

## **АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ БЕСКОНТАКТНОМ ПОИСКЕ ПРОТЕЧЕК НА ВЕРХНЕМ БЛОКЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

**Канд. техн. наук, доц. БОЛТЕНКОВ В. А.,  
доктора техн. наук, профессора КОРОЛЁВ А. В., МАКСИМОВ М. В.,  
канд. техн. наук, доц. МАСЛОВ О. В.**

*Одесский национальный политехнический университет*

В повышении безопасной и надежной эксплуатации АЭС важную роль играют системы диагностики течей теплоносителя. Особую опасность представляют малые течи, в частности во фланцевых соединениях, которые не фиксируются штатными средствами, но приводят к повреждению основного оборудования АЭС. В этом плане весьма актуально внедрение на АЭС Украины эффективных систем обнаружения и локализации течей на раннем этапе их развития, а именно акустических бесконтактных систем течеискания [1]. Принцип действия таких систем основан на регистрации звукового сигнала, возникающего при истечении теплоносителя через дефект, пространственно разнесенной системой акустических датчиков (микрофонов). Поскольку при истечении теплоносителя, находящегося на рабочем режиме энергоблока при температуре до 320 °С и давлении до 16 МПа, происходят достаточно сложные процессы звукообразования, акустический сигнал от течи является широкополосным и занимает частотную полосу 2–45 кГц при общем уровне звукового давления до 95 дБ. По сравнению с другими типами систем течеискания акустические бесконтактные системы имеют ряд преимуществ: дистанционность, долговечность, живучесть, возможность определения места течи с высокой точностью, хотя их существенный недостаток – невысокая чувствительность по расходу теплоносителя.

Основными функциями системы течеискания являются: обнаружение течи, ее локализация с максимально возможной точностью, оценка расхода течи, прогноз развития течи, классификация типа течи (щелевая/фланцевая). Акустические бесконтактные системы течеискания обеспечивают все перечисленные функции, главная из которых – локализация течи, т. е. оценивание ее координат.

Эксплуатация акустических бесконтактных систем течеискания осложняется рядом факторов. Это, в частности, низкие отношения сигнал/шум (ОСШ), связанные с интенсивными фоновыми акустическими шумами технологических агрегатов и узлов реакторной установки (РУ), наличие многократных переотражений звуковых волн, создаваемых течью в контролируемых помещениях АЭС, повышенная температура в локальных областях истечения теплоносителя, вызывающая особенности распространения звуковых волн. Все перечисленные сложности требуют разработки новых эффективных алгоритмов обработки сигналов от течей. Главные требования к алгоритмам вытекают из того, что течь должна быть зафиксирована в кратчайшие сроки и диагностическая информация должна быть

выдана с максимально возможной точностью, что позволяет принять правильное решение о действиях персонала АЭС при обнаружении течи. Поэтому разработанные алгоритмы исследованы с точки зрения их быстродействия и точности диагностической информации.

В статье приводятся результаты моделирования алгоритмов обработки реальных сигналов от течей, зарегистрированных на экспериментальном теплофизическом стенде НИЛ «Атомспецавтоматика» ОНПУ [2]. Специальный теплофизический стенд позволяет имитировать сигналы истечения теплоносителя от различных видов дефектов в элементах оборудования АЭС на рабочих давлениях и температурах, соответствующих работе энергоблока на мощности. Течи через дефекты в трубопроводах (щельные течи) моделировались на калиброванных щелях, а фланцевые течи – на полномасштабных макетах фланцев верхнего блока (ВБ) РУ ВВЭР-1000. Генерируемый при модельной течи акустический сигнал регистрировался в цифровом виде группой из восьми пространственно разнесенных измерительных конденсаторных микрофонов с улучшенными характеристиками (рабочая амплитудно-частотная характеристика – 20–40000 Гц при неравномерности не более 5 дБ).

Алгоритм локализации (оценивания координат течи) основывается на обработке сигналов, зарегистрированных каждой четверкой микрофонных датчиков. Составим систему гиперболических уравнений:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} &= c\hat{\tau}_{12}; \\ \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \\ - \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2} &= c\hat{\tau}_{13}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 + (z_0 - z_4)^2} = c\hat{\tau}_{14},$$

где  $(x_0, y_0, z_0)$  – координаты источника звука;  $(x_k, y_k, z_k), k = 1, \dots, 4$  – то же четырех микрофонов из всей сети акустических сенсоров;  $\hat{\tau}_{ij}, i = 1, j = 2, 3, 4$  – соответствующие оценки разности времен приходов (РВП) на микрофоны с номерами  $i, j$ ;  $c$  – скорость звука для условий измерения.

Уравнения (1) описывают гиперboloиды вращения. Решение системы уравнений дает оценку местоположения источника  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$ .

Техника оценивания РВП такова. Для каждой пары микрофонов в скользящем временном окне длительностью  $T$  оценивается обобщенная взаимно корреляционная функция (ВКФ)  $\hat{R}(\tau)$ . Положение максимума ВКФ позволяет оценить разность времен прихода (РВП)  $\hat{\tau}_{ij}$  на  $i$ -й и  $j$ -й микрофоны

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{\tau \in T} \hat{R}_{ij}(\tau), \quad (2)$$

после чего уравнение (1) решается численными методами.

Типичный вид ВКФ для шумового сигнала от фланцевой течи приведен на рис. 1.

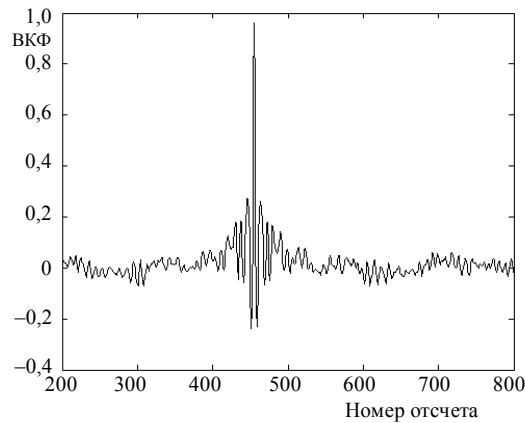


Рис. 1. Типичный вид ВКФ для сигнала фланцевой течи: частота дискретизации – 125 кГц

В условиях помещений АЭС наблюдается многократное переотражение звуковых сигналов от стен помещения и находящегося в нем оборудования (реверберация). Это вызывает искажение формы ВКФ и дает смешанную оценку ВКФ, что в свою очередь приводит к ошибке в оценке координат  $(x_0, y_0, z_0)$ .

Так, моделирование с конфигурацией микрофонной сети, приведенной на рис. 2 (система контроля течей для ВБ), показало, что при двукратном отражении точность определения координат течи определяется со средне-квадратичной погрешностью 0,7–1,0 м (по всем четверкам датчиков, зарегистрировавших сигналы от течи).

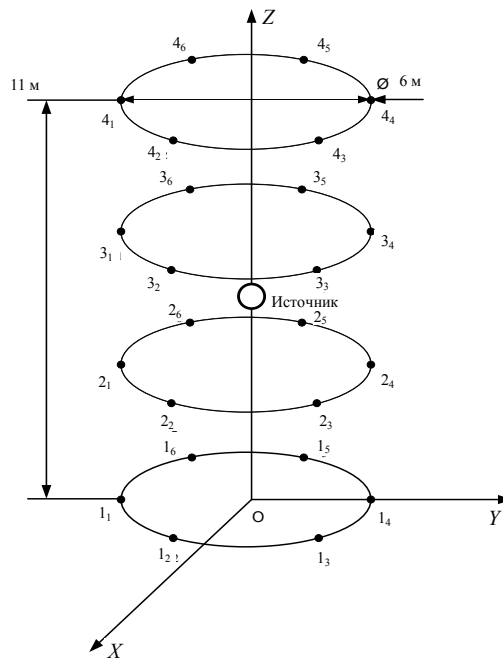


Рис. 2. Конфигурация микрофонной системы для течеискания на верхнем блоке РУ ВВЭР-1000

Для повышения точности был применен метод областей локальной когерентности [3]. Точностью оценивания значений РВП для каждой пары микрофонов  $\hat{\tau}_{ij}$ , которая в свою очередь определяется степенью когерентности сигналов, регистрируемых каждой парой микрофонов. Количественной мерой когерентности двух случайных сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$ , принимаемых парой микрофонов, является комплексная функция когерентности, равная взаимному спектру мощности  $C_{xy}(f)$ , деленному на корень квадратный из произведения собственных спектров мощности этих сигналов:

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{G_{xy}(f)}{\sqrt{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота.

Обычно используется квадрат модуля когерентности (КМК)  $\gamma_{xy}^2(f)$ . По физическому смыслу как функция когерентности, так и КМК – это коэффициент корреляции на каждой частоте  $f$  из анализируемого частотного диапазона. На практике удобнее использовать КМК как функцию, по определению нормированную к единице: в частности, если  $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ , то на всех частотах исследуемого диапазона сигналы считаются полностью когерентными, при  $\gamma_{xy}^2(f) = 0$  – сигналы некогерентны. На практике при обработке широкополосных сигналов  $0 < \gamma_{xy}^2(f) < 1$ , причем порогом когерентности, выше которого когерентность считается существенной для широкополосных сигналов, применяется величина 0,75–0,8 [3]. В каждом скользящем окне строится КМК, и для обработки по (2) используются только те частотные области, в которых КМК выше порогового значения. На рис. 3 показаны две зоны локальной когерентности для пары сигналов, зарегистрированных в условиях сильной реверберации. Применение метода областей локальной когерентности позволило уменьшить погрешность оценивания координат течи до 0,3–0,5 м.

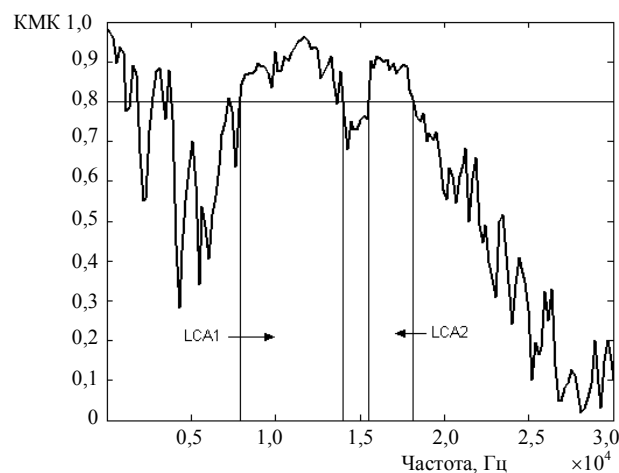


Рис. 3. Функция квадрата модуля когерентности с двумя выраженными областями локальной когерентности

Другой проблемой, снижающей точность оценки координат течи, с которой мы столкнулись, является смещение (систематическая ошибка), достигающее в отдельных случаях 15–18 %. Установлено, что смещение оценки координат источника вызвано тем, что в отдельных точках зоны контроля температура воздуха при истечении теплоносителя достигала 175 °С и более. Это вызывало ошибку в оценивании координат путем решения системы (1) из-за существенного изменения скорости звука  $c$  с ростом температуры. Температурная зависимость скорости звука описывается соотношением

$$c = 331,3 + 0,6t, \text{ м/с.} \quad (4)$$

После установки в зоне контроля термодатчиков и изменения реальной температуры воздуха при истечении перегретого теплоносителя рассчитывалось ее усредненное значение по зоне контроля  $\bar{t}^0$ . Уравнение (4) со значением  $t^0 = \bar{t}^0$  добавлялось четвертым в систему уравнений (1), которая решалась методом Ньютона – Рафсона с учетом скорости звука  $c$  для реальных условий. Результаты расчетов показали, что смещение оценки координат протечки  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$  уменьшилось до 1,5–3,0 %.

Разработаны алгоритмы классификации фланцевых и щелевых течей. Проблема такой классификации весьма актуальна в практическом плане, так как возникновение фланцевой и щелевой течей – события различной сложности, требующие разных оперативных действий. Классификация типов течей основана на оценке фрактальных показателей акустических сигналов от течей [4], в частности показателя Херста. Установлено, что показатель Херста для зарегистрированных сигналов от фланцевых течей лежит в пределах 0,62–0,64, а для сигналов от течи через микродефект – в пределах 0,69–0,71. Это позволяет достаточно простыми методами классификации распознавать тип течи. Так, вероятности правильного распознавания шума щелевой течи и шума фланцевой течи составляют соответственно 0,97 и 0,93 при ошибке распознавания второго рода (отнесение объекта к чужому классу) 0,03 и 0,04 соответственно [5]. Кроме того, установлено, что для щелевой течи степень фрактальной динамики процесса звукообразования заметно выше, чем для фланцевой течи. По временному поведению фрактальных показателей можно строить прогноз расхода течи, поскольку чем выше показатель Херста процесса, тем более процессу присуща нарастающая динамика истечения теплоносителя.

## ВЫВОД

Все представленные алгоритмы протестированы на реальных сигналах от щелевых и фланцевых течей, зарегистрированных экспериментально. Алгоритмы построены в расчете на минимальные вычислительные затраты, что позволяет повысить оперативность систем акустического бесконтактного течеискания, и как следствие – обнаруживать течи в оборудовании АЭС на ранней стадии их проявления. Повышение точности диагностической информации облегчает принятие правильного решения при обнаружении течи оператором энергоблока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Болтенков, В. А. Исследование принципов построения автоматизированной системы мониторинга протечек теплоносителя на верхнем блоке реакторной установки АЭС / В. А. Болтенков, В. И. Верпета, А. Н. Калашников // Вестник Харьковск. гос. политехн. ун-та, 1999. – Вып. 73. – С. 13–18.
2. Королёв, А. В. Экспериментальное исследование акустических сигналов при истечении теплоносителя через фланцевые соединения верхнего блока реактора ВВЭР-1000 / А. В. Королёв, А. Н. Литвин, М. В. Максимов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2001. – № 4. – С. 73–80.
3. Болтенков, В. А. Локально-когерентная обработка широкополосных сигналов в системах локализации источника звука / В. А. Болтенков // Збірник наукових праць Одеського ордена Леніна інституту сухопутних військ. – 2006. – № 12. – С. 21–26.
4. Болтенков, В. А. Системы мониторинга течей в оборудовании АЭС: технологии обработки диагностической информации / В. А. Болтенков // Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій: матеріали науково-практичної конференції. Херсон, 2006. – Т. 1. – С. 45–48.
5. Болтенков, В. А. Методика расчета критериев эффективности распознающих систем / В. А. Болтенков, О. Б. Максимова, В. О. Давыдов // Холодильна техніка і технологія. – 2003. – № 1 (81). – С. 83–86.

Представлена кафедрой АЭС

Поступила 03.03.2009

УДК 621.1.016: 536.242

### **О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ КОРИДОРНОГО ТРУБНОГО ПУЧКА НА ЕГО ТЕПЛОТДАЧУ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ\***

**Канд. техн. наук, доц. СМОЛЯК А. А.**

*Могилевский государственный университет продовольствия*

Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке к настоящему времени достаточно хорошо исследована многими авторами. По современным представлениям, при поперечном обтекании коридорного пучка трубки предыдущего ряда закрывают (затеняют) от потока трубки последующего ряда. За обтекаемой трубкой образуется застойная вихревая зона. Движение в этой зоне в значительной мере зависит от относительного продольного шага  $\sigma_2 = S_2/d$ . При уменьшении продольного шага вихревое движение тормозится. Это приводит к более слабому омыванию кормовой части трубки, более сильному затенению последующей трубки и, следовательно, к уменьшению средней теплоотдачи от поверхности трубки в пучке.

Основной поток жидкости в коридорном пучке течет между трубками рядов без изменения направления. Приблизительно этот поток можно рассматривать как движущийся в плоском канале. Ширина канала является определяющим размером для характеристики движения и теплообмена. Поэтому и величина поперечного шага также должна влиять на теплоотдачу коридорного пучка труб. Но такое влияние значительно слабее. По этой причине в уравнениях подобия для коридорных пучков чаще всего предлагается учитывать только влияние продольного относительного шага.

\* Публикуется в порядке обсуждения.