

УДК 004.93: 621.313

Болтенков В.А. к.т.н., Аль-Джасри Гамаль Халед Мохаммед,
Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕЧЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Болтенков В.О., Аль-Джасри Гамаль Халед Мохаммед. Дослідження акустичних систем моніторингу течій теплоносія. Показано переваги акустичних систем моніторингу течі водяного теплоносія в енергоустаткуванні. Дія систем заснована на реєстрації просторово рознесеною системою мікрофонів ширококутового звукового сигналу, що генерується перегрітим теплоносієм, який витікає через течію. Обробка вимірювальної інформації заснована на TDOA технології. Досліджено два алгоритми оцінювання координат течі рознесеною мікрофонною системою. Порівняння алгоритмів за критеріями точності оцінювання координат і швидкості обчислень проведено шляхом комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: моніторинг течій теплоносія, акустичні мікрофонні системи, TDOA технології, псевдообернення матриці.

Болтенков В.А., Аль-Джасри Гамаль Халед Мохаммед. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя. Показаны преимущества акустических систем мониторинга течей водяного теплоносителя в энергооборудовании. Действие систем основано на регистрации пространственно разнесенной системой микрофонов широкополосного звукового сигнала, генерируемого перегретым теплоносителем, истекающим через течь. Обработка измерительной информации основана на TDOA технологии. Исследованы два алгоритма оценивания координат течи разнесенной микрофонной системой. Сравнение алгоритмов по критериям точности оценивания координат и скорости вычислений проведено путем компьютерного моделирования.

Ключевые слова: мониторинг течей теплоносителя, акустические микрофонные системы, TDOA технологии, псевдообращение матрицы.

Boltenkov V.A., Al-Jasri Gamal Khaled Mohammed. The study of acoustic coolant leak monitoring systems. The advantages of the acoustic monitoring system leaks water coolant in power equipment has been shown. Their action is based on registration of broadband audio signal generated by superheated coolant flow with spatially separated system of microphones. The measuring information processing is based on TDOA technology. We studied Two algorithms for estimating the leak with microphone system has been studied. Comparison of algorithms for estimating the coordinates by criteria of accuracy and calculations speed has been performed with computer simulation.

Keywords: coolant leak monitoring, acoustic microphone system, TDOA technology, pseudoinverse matrix.

Постановка научной проблемы. В условиях мирового дефицита энергоносителей особое значение приобретают средства их строгой экономии. Одним из эффективных путей такой экономии является применение систем мониторинга и раннего обнаружения течей водяного теплоносителя в энергетических установках. Раннее обнаружение течи и ее локализация позволяют предотвратить дальнейшее развитие аварийной ситуации в теплотехническом агрегате и предотвратить потери теплоносителя, которыми сопровождается течь. Существует ряд методов мониторинга течей в теплоэнергетических установках [1, 2]. На рис. 1 приведена классификация этих методов.

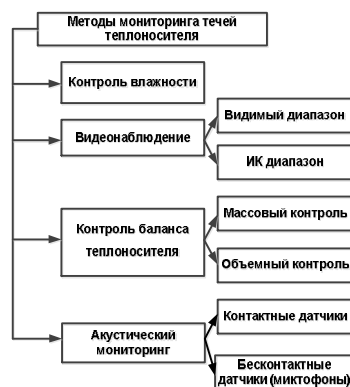


Рис. 1. Классификация методов мониторинга течей теплоносителя.

Методы контроля влажности основаны на регистрации локального возрастания влажности воздуха в районе течи. Такие методы достаточно чувствительны [3] (их чувствительность по

расходу теплоносителя составляет 5-15 кг/час), но их применение требует расстановки большого числа датчиков влажности в контролируемом помещении теплоэнергетического предприятия и большого числа каналов передачи измерительной информации. Методы видеонаблюдения в видимом или инфракрасном (ИК) диапазоне (тепловидение) наиболее чувствительны: в ИК диапазоне они могут зафиксировать течь с расходом до 1кг/час, однако их практическое применение связано с постоянным визуальным контролем оператора или применением сложных программных систем интеллектуального распознавания образов в регистрируемом видеопотоке. Методы контроля баланса теплоносителя – массовые или объемные – (сравнение массы или объема на входе и выходе агрегата) относительно легко реализуются, но их чувствительность крайне низка – 150-200 кг/час. От всех перечисленных недостатков свободны акустические системы мониторинга течей. Акустические системы основаны на регистрации широкополосного акустического сигнала, возникающего при истечении перегретого теплоносителя через дефект в металле. Акустические методы могут быть основаны на размещении на элементах конструкции контактных акустических датчиков, которые регистрируют акустическую волну от течи, распространяющуюся в металле [4]. Недостаток таких систем заключается в высокой стоимости контактных акустических датчиков. Наиболее приемлемым вариантом системы мониторинга течей является применение бесконтактных акустических систем, элементами которых являются пространственно разнесенные микрофоны – акустическая сенсорная сеть (АСС) – регистрирующие акустический сигнал от течи, распространяющийся в воздушной среде помещения. АСС достаточно эффективны для обнаружения течей теплоносителя в оборудовании атомных и тепловых электростанций, бойлерных системах и технической диагностики состояния других сосудов, работающих под давлением. Их чувствительность по расходу составляет 20-30 кг/час. Процесс мониторинга течей легко автоматизируется. Пространственное разнесение микрофонов позволяет не только обнаружить течь, но и оценить местоположение точки истечения теплоносителя, т.е. локализовать течь. Однако сложность обработки измерительной информации и характеристики точности локализации течи в акустических бесконтактных системах изучены недостаточно. Кроме того, важную роль в процессе мониторинга течей играет оперативность контроля, т.е. время, затрачиваемое на оценку координат течи – чем раньше течь будет локализована, тем менее тяжелыми будут ее последствия. Поэтому **целью исследования** является сравнительный анализ алгоритмов локализации течи теплоносителя с помощью акустической микрофонной системы, позволяющих оценить координаты течи с достаточной точностью и с минимальными затратами процессорного времени.

Изложение основного материала и обоснование полученных результатов исследования. Для оценки координат течи предлагается применить TDOA (time difference of arrival) технологии обработки измерительной акустической информации [5]. Они основаны на оценке разности времен прихода сигналов на каждую пару микрофонов. Пусть источник звука расположен в точке S . Тогда микрофона 1, расположенного на расстоянии d_1 , сферическая волна достигнет через время $t_1 = d_1/c$, где c - скорость распространения звука (при нормальных условиях в воздушной среде $c = 331$ м/с), микрофона 2 (d_2) через время $t_2 = d_2/c$, микрофона 3 (d_3) через время $t_3 = d_3/c$ (рис. 2).

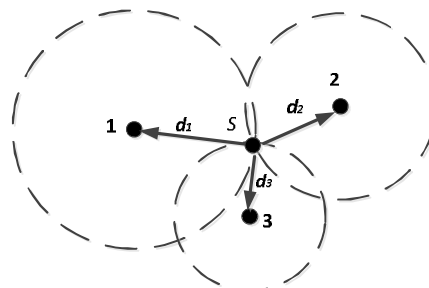


Рис.2. Принцип действия TDOA системы.

Поскольку время прихода непрерывного сигнала на микрофоны в пассивной системе измерить невозможно, перейдем к измерению разностей времен прихода. Пусть источник звука расположен в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) , а микрофоны 1,2,3 – в точках с координатами (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) соответственно. Тогда разности времен прихода волны от источника на микрофоны составят:

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= 1/c \left\{ \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \right\}, \\ \tau_{23} &= 1/c \left\{ \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} - \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2} \right\}, \\ \tau_{13} &= 1/c \left\{ \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2} \right\}. \end{aligned}$$

Получены три уравнения, описывающие двуполостные гиперболоиды вращения. Эти поверхности являются поверхностями положения (источник звука может находиться только на этих поверхностях). Их точка пересечения дает координаты течи. Для двумерного случая требуются три уравнения, для трехмерного - четыре уравнения, т.е. четыре микрофона. Для микрофонной системы, состоящей из N микрофонов можно построить систему уравнений для каждой четверки датчиков:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} &= c\tau_{ij}, \\ \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} &= c\tau_{ik}, \\ \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} &= c\tau_{jk}, \\ i &= 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N, i \neq j \neq k. \end{aligned}$$

Решение этой системы дает оценку координат источника звука (течи). В реальных условиях в технологических помещениях присутствуют акустические шумы работающего оборудования, поэтому в оценки разности времен прихода будут внесены случайные погрешности. Разности времен прихода τ_{ij} оцениваются путем определения максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сигналов $s_i(t)$ и $s_j(t)$, зарегистрированных парой микрофонов с номерами i, j на интервале наблюдения T :

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{0 < \tau < T} \frac{1}{T} \int_0^T s_i(t) s_j(t + \tau) dt$$

или в дискретном виде для скользящего окна длиной L

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{0 \leq n \leq (L-1)} \sum_{n=0}^{L-1} s_i[n] s_j[n - \Delta\tau].$$

Для получения усредненной статистической оценки координат течи необходимо провести пространственное усреднение по всем N микрофонам системы. Для решения такой задачи возможны две стратегии. Первая состоит в решении системы для каждой четверки микрофонов, не лежащих в одной плоскости, и последующем усреднении. Решение системы гиперболических уравнений, которая является существенно нелинейной, необходимо применение численных методов, например, метода Левенберга-Марквардта. Это достаточно ресурсоемкая вычислительная операция. Например, для системы из 24 микрофонов необходимо решить $C_{24}^4 = 10626$ систем уравнений. Такая стратегия очевидно неприемлема из-за большого времени счета. Вторая стратегия состоит в том, что разности времен прихода рассчитываются относительно одного опорного микрофона, т.е. решается система их $(N - 1)$ нелинейных уравнений. Эту стратегию и будем применять в дальнейшем.

Рассмотрим другой TDOA алгоритм оценки координат течи [6]. Пусть $\{(x_m, y_m, z_m)\}_{m=1}^M$ - координаты M микрофонов, а (x, y, z) - неизвестные координаты источника. Обозначим через t_m время распространения сигнала от источника до микрофона m , c - скорость распространения

звука, тогда расстояние от источника до микрофона m равно $R_m = ct_m$. Введем $\tau_m = t_m - t_1$ - разность времен прихода между микрофонами m и 1 ($\tau_1 = 0$). Тогда

$$c\tau_m = c(t_m - t_1) = R_m - R_1.$$

Отсюда

$$\frac{R_1^2 - R_m^2}{c\tau_m} + 2R_1 + c\tau_m = 0, \quad m = 2, 3, K, M.$$

Для второго микрофона:

$$\frac{R_1^2 - R_2^2}{c\tau_2} + 2R_1 + c\tau_2 = 0.$$

Вычитая это уравнением из аналогичных уравнений для $m = 3, 4, K, M$ получим систему уравнений:

$$\frac{R_1^2 - R_m^2}{c\tau_m} - \frac{R_2^2 - R_m^2}{c\tau_m} + c\tau_m - c\tau_2 = 0, \quad m = 3, 4, K, M. \quad (1)$$

Возведение в квадрат каждого из уравнений дает :

$$R_1^2 - R_m^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + 2xx_m + 2yy_m + 2zz_m, \quad m = 3, 4, K, M.$$

В результате подстановки этого результата в (1) имеем:

$$\frac{1}{c\tau_m}(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + 2x_mx + 2y_my + 2z_mz) -$$

$$- \frac{1}{c\tau_m}(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + 2x_2x + 2y_2y - 2z_2z) + c\tau_m - c\tau_2 = 0,$$

$m = 3, 4, K, M$.

Перепишем последнее уравнение более кратко

$$A_mx + B_my + C_mz + D_m = 0,$$

здесь введены следующие обозначения:

$$A_m = \frac{1}{c\tau_m}(-2x_1 + 2x_m) - \frac{1}{c\tau_2}(2x_2 - 2x_1),$$

$$B_m = \frac{1}{c\tau_m}(-2y_1 + 2y_m) - \frac{1}{c\tau_2}(2y_2 - 2y_1),$$

$$C_m = \frac{1}{c\tau_m}(-2z_1 + 2z_m) - \frac{1}{c\tau_2}(2z_2 - 2z_1),$$

$$D_m = c\tau_m - c\tau_2 + \frac{1}{c\tau_m}(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 + y_m^2 + z_m^2) - \frac{1}{c\tau_2}(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2).$$

Запишем полученную систему из $(M - 2)$ уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ A_M & B_M & C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3 \\ -D_4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -D_M \end{bmatrix}.$$

Для $M \geq 5$ система может быть решена относительно (x, y, z) методом псевдоинверсии матрицы Мура-Пенроуза. Таким образом, путем введения дополнительного опорного микрофона можно решить задачу определения координат источника без трудоемкой вычислительной процедуры

решения системы гиперболических уравнений. Ценой линеаризации задачи является добавление лишнего приемника в элементарную расчетную ячейку.

Для исследования обоих алгоритмов путем компьютерного моделирования разработана моделирующая программа в системе Matlab. Основными функциями программы являются:

- задание числа и координат микрофонов и скорости звука, которая в общем случае является функцией температуры воздуха,
- задание фрагмента записи звукового сигнала, излучаемого источником в виде файла в формате wav,
- формирование сигналов, принимаемых каждым приемником, из соображений геометрии задачи и значения скорости звука,
- наложение аддитивного широкополосного гауссова шума на сигнал на каждом приемнике в соответствии с заданным отношением сигнал/шум,
- оценка задержек τ_{ij} по максимуму взаимно-корреляционной функции сигналов $s_i(t)$ и $s_j(t)$, зарегистрированных парой сенсоров с номерами i, j для скользящего окна длиной L

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{0 \leq n \leq (L-1)} \sum_{n=0}^{L-1} s_i[n] s_j[n - \Delta\tau],$$

- формирование системы гиперболических уравнений и ее решение методом Левенберга-Марквардта,
- формирование матричного уравнения и его решение методом псевдоинверсии Мура-Пенроуза,
- расчет среднеквадратичной ошибки оценивания координат источника.

Для моделирования широкополосного акустического сигнала от течи в оборудовании высокого давления использовался розовый шум [7], т.е. сигнал со спектром вида $1/f^\alpha$ (f - частота), $\alpha \approx 1$ в диапазоне (0-20) кГц. Фрагмент сигнала и его спектр показаны на рис.3

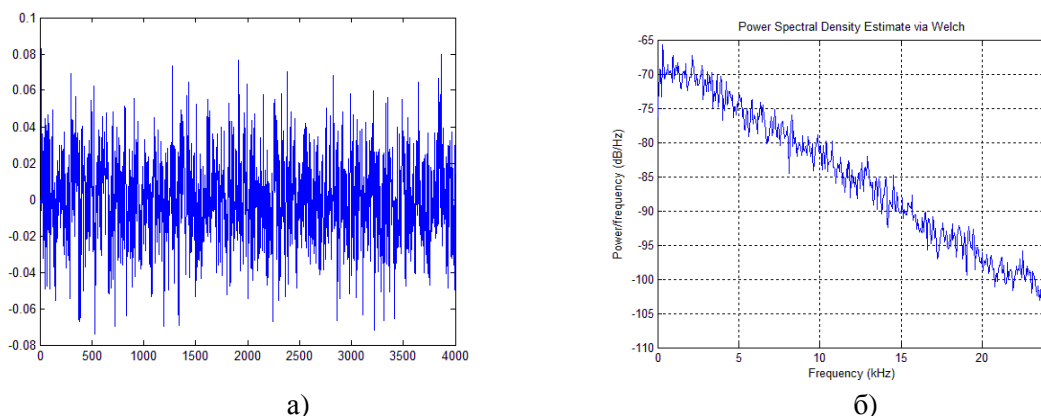


Рис.3. Временная картина (а) и спектр (б) акустического сигнала.

Моделирование проводилось для микрофонной системы, конфигурация которой показана на рис.4. Это АСС из 24-х микрофонов, расположенных 4-мя кольцами по 6 микрофонов, охватывающая зону расположения условного теплотехнического агрегата, в котором может возникнуть течь. Источник звука (течь) S расположен в геометрическом центре системы (координаты источника известны точно). Оценка местоположения течи рассчитывается двумя алгоритмами: путем численного решения системы гиперболических уравнений и путем псевдообращения матрицы с дальнейшим расчетом среднеквадратичной ошибки (СКО) оценивания координат источника. Микрофоны включались в систему уравнений последовательно с пяти (начиная с 1₁ до 1₅) и до 24-х. Оценивалась СКО оценивания координат и процессорное время счета (при помощи операторов *tic*, *toc*). Моделирование осуществлялось на программно-аппаратной платформе: CPU Intel Core i5 2450M 2.5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7, Matlab 7.1

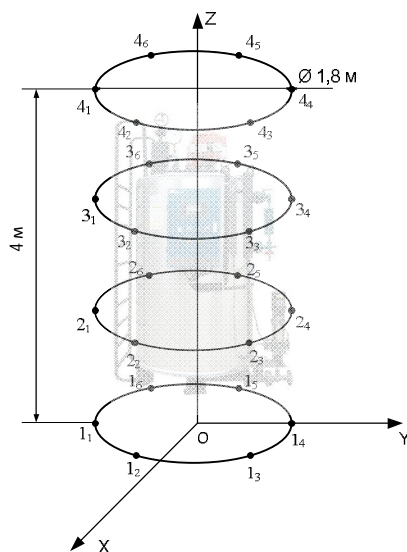


Рис.4. Конфигурация микрофонной системы.

Микрофоны вводились в систему уравнений последовательно, начиная с пяти (1₁ ... 1₅) и далее, до 24-х. Оценивалась СКО оценивания координат и процессорное время счета (при помощи операторов *tic*, *toc*). Моделирование осуществлялось на программно-аппаратной платформе: CPU Intel Core i5 2450M 2.5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7, Matlab 7.1

На рис.5 представлены типичные результаты показателей качества полученные при отношении сигнал/шум, равном 5 дБ (линии 1 относятся к прямому решению системы гиперболических уравнений, линии 2 – к решению путем псевдообращения матрицы).

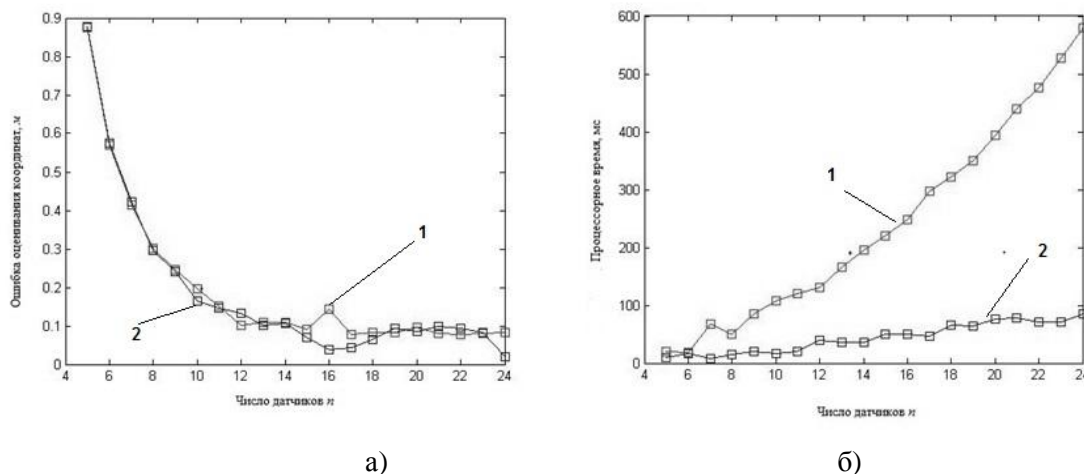


Рис.5. Показатели качества системы: а) СКО оценивания координат течи, б) процессорное время счета.

Анализ приведенных результатов моделирования позволяет установить следующее:

1. Точность оценивания координат течи при обоих методах расчета практически одинакова и при отношении сигнал/шум 5 дБ составляет ~ 10 см, что вполне достаточно для практических применений.
2. С ростом числа микрофонов в системе ошибка оценивания координат резко уменьшается при увеличении числа микрофонов примерно до 10, дальнейшее увеличение числа микрофонов в системе несущественно влияет на уменьшение ошибки.
3. Метод псевдоинверсии матрицы позволяет получить существенный выигрыш (почти на порядок) по времени счета по сравнению с решением системы гиперболических уравнений, причем экономия времени расчета растет с увеличением числа микрофонов в системе.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Изложенные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. Акустические микрофонные системы являются весьма перспективными для решения актуальной научной и практической задачи мониторинга течей теплоносителя. Исследованы два алгоритма оценивания координат течи системой разнесенных микрофонов с использованием TDOA-технологий: алгоритм, основанный на решении системы гиперболических уравнений, и алгоритм с псевдообращением матрицы. Алгоритмы исследованы с точки зрения точности и оперативности, определяемой временем расчета координат течи. На основе компьютерного моделирования установлено, что для системы из 24 микрофонов СКО оценивания координат течи при отношении сигнал/шум 5 дБ составляет примерно 10 см. При этом алгоритм псевдоинверсии матрицы является существенно более быстродействующим, чем метод, основанный на решении системы гиперболических уравнений.

В качестве направления дальнейших практических исследований следует указать поиск оптимальной конфигурации микрофонной системы и числа ее элементов, обеспечивающих требуемые характеристики качества мониторинга.

1. Geiger, G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization [Text] // Oil and Gas European Magazine. —2006. — No. 4. — P. 193-198.
2. Shahul S. H. Automatic Detection and Analysis of Boiler Tube Leakage System [Text] / S. Shahul Hamid, D. Najumnissa Jamal, Murshitha Shajahan // International Journal of Computer Applications – 2013. – Vol. 84. – No. 16. – P. 19-23.
3. Гетман А.Ф. Концепция безопасности (течь перед разрушением) для сосудов и трубопроводов давления АЭС – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 256 с.
4. Маркосян Г.Р. Совершенствование диагностической системы «Alus» для определения места течи теплоносителя из первого контура ВВЭР-440 [Текст] / Маркосян Г.Р. , Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асланян М.А. // Теплоэнергетика .– 2000. - №5. – С.15-20.
5. An L. Hyperbolic boiler tube leak location based on quaternary acoustic array [Text] /Liansuo An, Peng Wang, Augusto Sarti , Fabio Antonacci, Jie Shi// Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol.31 – P. 3428-3436.
6. Steven Li. TDOA Acoustic Localization (2011) [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.ocf.berkeley.edu/~stevenli/programming_files/TDOA_Acoustic_Localization.pdf.
7. Болтенков В.А. Алгоритмы обработки информации при акустическом бесконтактном поиске протечек на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000 [Текст] / В. А. Болтенков, А. В. Королев, М. В. Максимов, О. В. Маслов. // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ: Энергетика – 2009. – N 3. – С. 67-72.