

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ УДАРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ ПРЕДМЕТОВ В КОНТУРЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ВВЭР

И.В. Максимов, В.В. Перевезенцев*

ООО «КВАНТ ПРОГРАММ»

111558, г. Москва, Зеленый проспект, д. 5/12, строение 3, помещение Б1

** МГТУ им. Баумана*

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1



В реакторных установках с ВВЭР не исключено появление в главном циркуляционном контуре свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов. Опыт эксплуатации показывает, что раннее обнаружение и оценка параметров подобных инцидентов могут предоставить время, требуемое на устранение или минимизацию повреждений основного оборудования реакторной установки. Описывается метод локализации удара свободного, слабозакрепленного или постороннего металлического предмета, находящегося в контуре циркуляции теплоносителя реакторной установки с ВВЭР. Точное определение места возникновения акустической аномалии необходимо для диагностирования неисправностей основного оборудования реакторной установки. В случае появления свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов важно отслеживать пути их передвижения по главному циркуляционному контуру, а также места их локализации физическими барьерами.

В основе метода лежит представление поверхности, по которой распространяется акустическая волна, в виде 3D-модели главного циркуляционного контура РУ. Модель представляется в виде графа, в котором вершины характеризуют контрольные точки на поверхности РУ, а ребра – расстояния между ними. Метод основан на использовании информации о скорости распространения акустической волны и разнице времен прихода переднего фронта на различные датчики. Показано, что при регистрации эффекта более чем тремя датчиками, наряду с оценкой координаты удара, возможно оценить среднюю скорость распространения акустической волны. Для определения времени прихода переднего фронта используется метод обнаружения изменения дисперсии сигнала. Средняя ошибка локализации при условии среднего размера между контрольными точками на поверхности РУ 300 мм составила ~ 600 мм. Разработанный алгоритм легко адаптируется под любую реакторную установку с ВВЭР. Полученные значения отклонений приемлемы для практического использования.

Ключевые слова: система обнаружения свободных предметов, мониторинг, диагностика АЭС, локализация.

© *И.В. Максимов, В.В. Перевезенцев, 2019*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных систем мониторинга состояния реакторных установок (РУ) с ВВЭР является система обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов (СОСП), функция которой заключается в обнаружении и оценке параметров свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов (ССП) в контуре циркуляции теплоносителя. Свободные и посторонние предметы могут перемещаться с потоком теплоносителя в контуре циркуляции и вызывать повреждения оборудования первого контура РУ. Наличие ССП может привести к частичной блокировке потока теплоносителя, что приведет к ухудшению теплообмена и возможному перегреву оболочек твэлов, изменению температуры топлива и росту интенсивности распухания топлива. Еще одним негативным последствием может быть риск попадания ССП в подвижные механизмы рабочих органов системы управления и защиты. При несвоевременном обнаружении ССП в контуре циркуляции теплоносителя значительно возрастают затраты на меры, принимаемые для устранения повреждений, нанесенных ССП.

В настоящее время большинство РУ с реакторами с водой под давлением (PWR, ВВЭР) оснащены СОСП. Существует несколько международных стандартов, определяющих требования, которым должна удовлетворять СОСП:

- U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) Regulatory Guide 1.133 (1981) [1];
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) Standard OM-2017 [2];
- International Electrotechnical Commission (IEC) Standard IEC-609887 [3].

Локализация источника удара является одной из важнейших функций СОСП при диагностировании оборудования РУ [4]. Точное определение места возникновения акустической аномалии необходимо для диагностирования оборудования РУ. В случае появления свободных и посторонних предметов важно отслеживать пути их перемещения по главному циркуляционному контуру, а также места их локализации.

К настоящему времени выполнено большое количество исследований по способам локализации источника удара [5 – 14]. Традиционный и самый тривиальный метод локализует источник акустической аномалии до оборудования, контролируемого датчиком, который первым зарегистрировал удар. При наличии в более чем одном канале зарегистрированного эффекта источник локализуется с использованием разностей времен прихода (РВП) переднего фронта волны в двух или более измерительных каналах.

К одному из наиболее известных методов с использованием РВП можно отнести метод пересечения гипербол [5, 9], который осуществляется в ручном режиме и требует от оператора системы дополнительных экспертных знаний. Алгоритм имеет простое аналитическое решение для плоскости, однако для сложной поверхности первого контура РУ он не адаптирован.

Еще один метод [6, 12, 13] основан на поиске ближайшего соответствия зарегистрированным РВП, рассчитанным ранее. Для этого первый контур разбивается на сегменты небольшой площади или контрольные точки. Учитывая, что скорость акустических волн в металле известна, может быть предварительно рассчитано время прохождения волны от отдельных сегментов к датчикам. Полученные значения РВП сохраняются в базе данных. При регистрации акустической аномалии ее местоположение выбирается из базы данных в качестве ближайшего сохраненного вектора к измеренному в соответствии с евклидовым расстоянием. В работе [13] анализируются ошибки метода локализации и его структурные ограничения. Для определения времени прихода необходимо знать скорость распространения акустической волны. Поскольку она зависит от материала, кинетической энергии взаимодействия, массы, формы ССП и других параметров, то данный метод вносит большую неопре-

деленность в оценке локализации источника акустической аномалии.

Предлагаемый алгоритм в автоматическом режиме производит локализацию до точки на поверхности первого контура РУ. Он основан на вычислении кратчайшего пути по 3D-модели поверхности первого контура РУ. Алгоритм является гибким и легко адаптируется под любую РУ с водой под давлением.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА ПЕРЕДНЕГО ФРОНТА ВОЛНЫ

Одним из ключевых факторов определения локализации источника акустической аномалии является определение времени прихода (ВП) переднего фронта ударной волны для каждого канала, который зарегистрировал эффект. Существует несколько подходов к определению ВП. Одним из методов является приближение кусочно-гладкой функцией среднеквадратичного значения (СКЗ) сигнала:

$$F(t) = \begin{cases} F_n(t) = a, & t < t_{TOA}, \\ F_S(t) = kt + b, & t_{TOA} < t < t_{max}, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_n(t)$ – постоянное значение, аппроксимирующее фоновый шум; $F_S(t)$ – линейная функция, аппроксимирующая передний фронт на интервале от ВП (t_{TOA}) до времени максимума СКЗ (t_{max}), причем $F_n(t_{TOA}) = F_S(t_{TOA}) = F(t_{TOA})$.

Другой широко распространенный подход основан на методах статистического последовательного анализа, которые используются при обнаружении акустического эффекта. К ним можно отнести последовательный критерий отношения вероятностей (критерий Вальда) и CUSUM-тест [15]. В работе [16] предлагается метод определения ВП ударного сигнала на основе преобразования Гильберта-Хуанга (ННТ) и информационного критерия Акаике.

В данной работе для определения ВП используется метод обнаружения разладки (изменения параметров случайного процесса). Предварительно исходный сигнал фильтруется [17]. Рассматривается нестационарный случайный процесс $y = \{y_{t1}, \dots, y_{tN}\}$. Предполагается, что сигнал y является кусочно-стационарным. В какой-то момент времени t_{TOA} дисперсия сигнала резко меняет свое значение. Этот момент времени называется точкой разладки. Оценка точки изменения t_{TOA} является задачей поиска минимума целевой функции [18, 19]. Поскольку требуется разбиение сигнала только на две части, то целевую функцию можно определить как

$$F(t_{TOA}) = c(y_{t_1 \dots t_{TOA}}) + c(y_{t_{TOA} \dots t_N}), \quad (2)$$

где $c(y_{t_i \dots t_j})$ – функция, которая измеряет однородность (неизменность параметров) части сигнала $y_{i \dots j}$.

Функцию $c(y_{t_i \dots t_j})$ для задачи разладки дисперсии сигнала можно определить как

$$c\sigma^2(y_{i \dots j}) = |y_{i \dots j}| \cdot \log \sigma^2_{i \dots j} \quad (3)$$

где $|y_{i \dots j}|$ – длина части сигнала; $\sigma^2_{i \dots j}$ – дисперсия части сигнала. Ожидается, что значения целевой функции будут низкими для однородных частей сигналов и большими при значительной разладке дисперсии. Поэтому ВП переднего фронта ударной волны определяется следующим образом:

$$t_{TOA} = \arg \min F(t_{TOA}). \quad (4)$$

Иллюстрация данного метода показана на рис. 1. При наличии акустического эффекта (рис. 1а) целевая функция имеет единственный ярко выраженный минимум, который соответствует ВП. В случае сигнала исключительно фонового шума (рис. 1б) значения целевой функции носят стационарный характер и глобальный минимум не наблюдается.

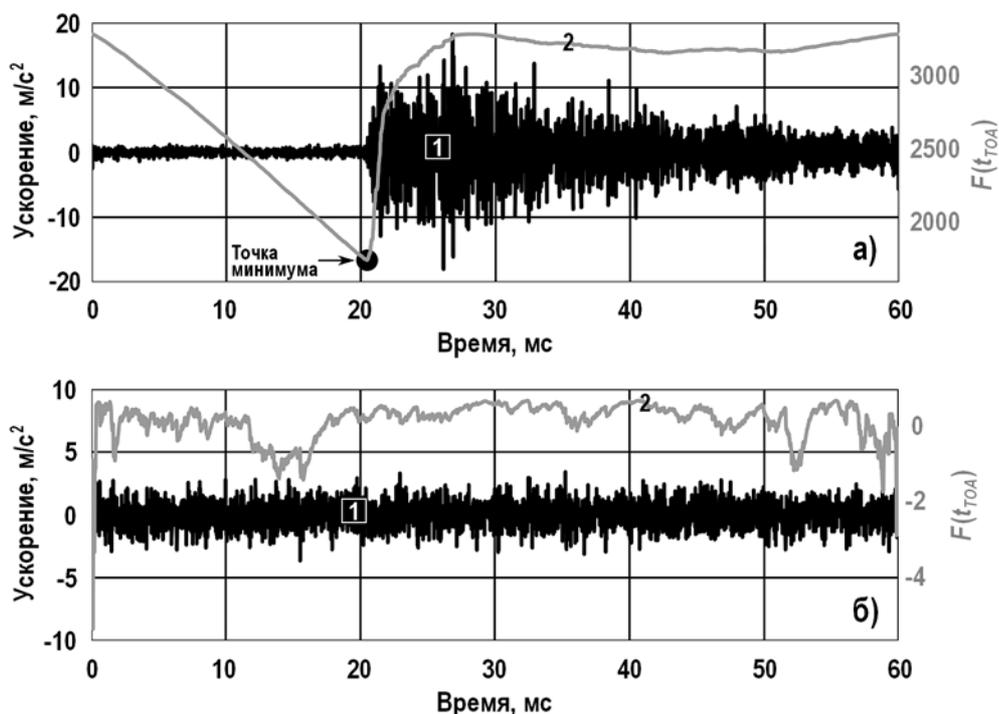


Рис. 1. Оценка времени прихода переднего фронта акустического сигнала: а) – с акустическим эффектом; б) – без акустического эффекта (1 – сигнал, 2 – целевая функция)

ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ

При соударении ССП с поверхностью оборудования РУ генерируется ударная акустическая волна. Предполагается, что она распространяется в материале оборудования РУ во все стороны с равной скоростью, которая не зависит от местоположения источника и направления. Как следствие, время распространения волны между двумя точками на поверхности однозначно определяется длиной кратчайшего пути вдоль поверхности между этими точками. Таким образом, время между моментом удара и обнаружением датчиком зависит от расстояния и скорости распространения волны.

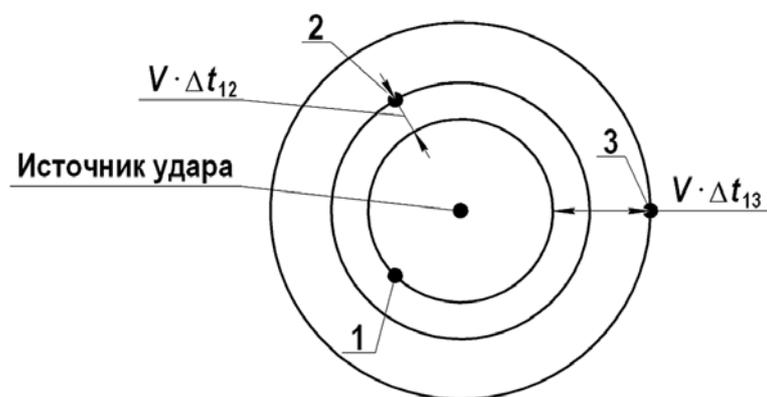


Рис. 2. Графическое представление метода локализации акустической аномалии, основанного на РВП: 1, 2, 3 – датчики каналов, пронумерованные по времени прихода

Для локализации аномалии на линейном участке достаточно иметь сигналы с двух датчиков, зарегистрировавших всплеск. Для плоскости или поверхности, которую

можно представить в виде плоскости, РВП-пары датчиков определяют геометрическое место точек возможного положения источника. Для точного определения места удара необходим сигнал третьего канала. Тогда положение источника ударной волны определяется как центр окружности, проходящей через координату установки датчика, соответствующего каналу, который первым зарегистрировал ударный всплеск, и касательной к двум другим, с радиусом $\Delta t_{1i} \cdot V$, где Δt_{1i} – РВП переднего фронта акустической волны между каналом, зарегистрировавшим удар первым, и i -м каналом по времени прихода; V – скорость звука в среде (рис. 2).

Средняя скорость распространения волны, рассматриваемая в целевом диапазоне частот, составляет примерно 2500 м/с [6]. Такая скорость используется для расчета координаты места удара при регистрации акустического эффекта не более чем тремя датчиками. При регистрации эффекта четырьмя и более датчиками скорость распространения волны рассчитывается наряду с координатой места удара.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Для вычисления координаты локализации источника акустической аномалии в реальном масштабе времени необходимо подготовить данные для расчета. Основные данные берутся из проектной документации на РУ и СОСП:

- геометрическая модель поверхности РУ;
- позиции расположения датчиков на оборудовании РУ.

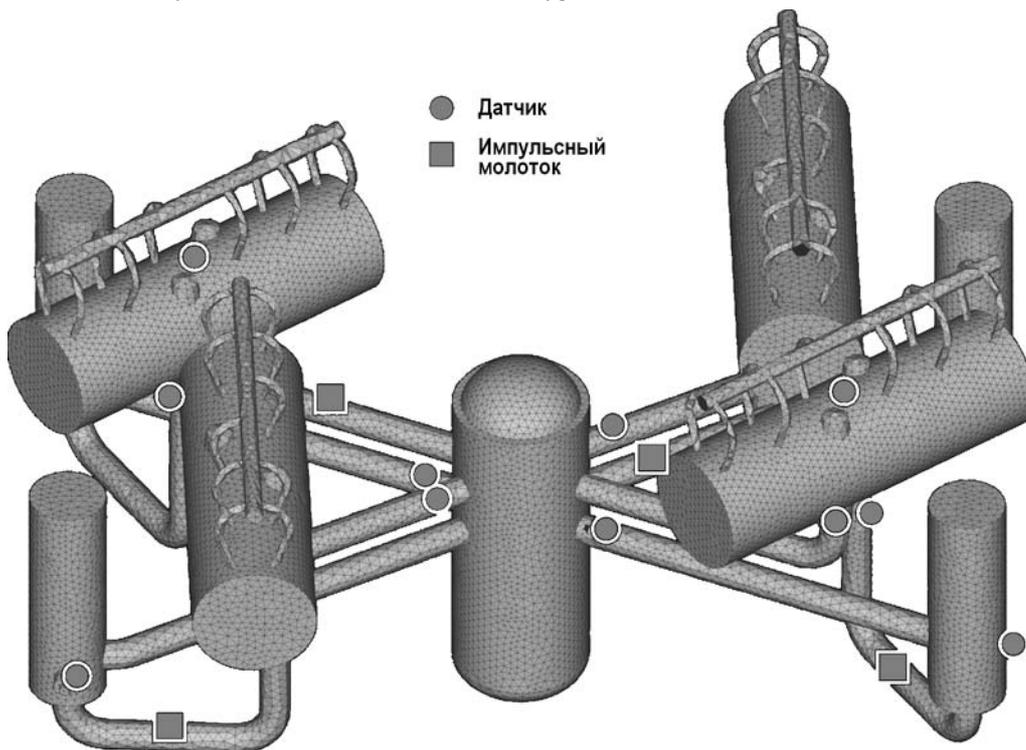


Рис. 3. Геометрическая модель поверхности РУ и места расположения датчиков и молотков

Геометрическая модель представляет собой форму границ трубопроводов и основного оборудования ГЦК, т.е. поверхность, вдоль которой распространяется акустическая волна. Позиции датчиков представляют собой фиксированные положения, в которых установлены датчики. Они описываются координатами на геометрической модели.

Этап подготовки данных включает в себя следующее.

1. Выбор контрольных точек на геометрической поверхности (рис. 3). Они характеризуют потенциальные места удара. Для облегчения дальнейших вычислений они выбираются как вершины равномерно триангулированной поверхности (сетки). Чем больше разрешение сетки (количество вершин), тем меньше погрешность определения места удара. С другой стороны, при достаточно мелком разбиении увеличиваются затрачиваемые ресурсы по памяти и процессорному времени при работе алгоритма. Результат – контрольные точки $C_i, i = 1, \dots, M$, где M – количество контрольных точек.

2. Привязка позиции датчиков к ближайшим контрольным точкам. Координаты расположения датчиков на оборудовании РУ сопоставляются с контрольными точками. Триангуляцию поверхности следует производить таким образом, чтобы координатам датчиков соответствовали контрольные точки сетки. Результат – позиции датчиков $S_j, j = 1, \dots, N$, где N – количество датчиков.

3. Расчет кратчайших расстояний между контрольными точками и датчиками с помощью дискретного алгоритма Дейкстры [20] для поиска минимального пути во взвешенном графе. Контрольные точки считаются узлами графа, а длины ребер сетки – весами графа. Алгоритм Дейкстры прост в реализации, однако результат чувствителен к качеству разбиения поверхности. Для улучшения результатов необходимо производить равномерную триангуляцию поверхности, где ребра сетки имеют примерно одинаковую длину.

В результате получается матрица \mathbf{D} размерностью $[M \times N]$ с элементами

$$D_{ij} = \text{dist}(C_i, S_j), \quad (5)$$

где C_i – i -я контрольная точка; S_j – j -й датчик; $\text{dist}(C_i, S_j)$ – функция вычисления кратчайшего расстояния по поверхности геометрической модели.

АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Алгоритм локализации выполняется каждый раз при регистрации события, связанного с неизвестной акустической аномалией и (потенциально) наличием ССП в первом контуре. На вход алгоритма подается

– вектор разностей времен прихода (РВП) переднего фронта акустической аномалии Δt на каждый датчик S_j

$$\Delta t_i = TOA_i - \min(TOA), \quad (6)$$

где TOA_i – время прихода переднего фронта акустической волны;

– матрица расстояний \mathbf{D} , рассчитанная по формуле (5);

– начальное значение скорости распространения акустической волны в материале оборудования РУ, которое принимается равным 2500 м/с.

Значения вектора РВП представляют собой вектор, размер которого соответствует количеству датчиков N . В тех случаях, когда на датчике не определилось время прихода, значение РВП остается неопределенным. Номера каналов, в которых определилось значение РВП, формируют множество K .

Алгоритм расчета координаты места возникновения акустической аномалии заключается в следующем.

1. Для каждой контрольной точки $C_i, i = 1, \dots, M$ рассчитывается вектор \mathbf{r}_i :

$$\mathbf{r}_{ij} = D_{ij} - \Delta t_j \cdot V, \quad (7)$$

где V – начальное приближение скорости распространения акустической волны; $j \in K$ – номера каналов, где определено РВП.

2. Для каждого вектора $\mathbf{r}_i, i = 1, \dots, M$ рассчитывается значение функционала за исключением пустых значений:

$$\sigma_i = \frac{1}{|K|} \sum_{j \in K} (r_{ij} - r_i^m)^2. \quad (8)$$

3. Находится контрольная точка C_i , в которой значение σ_i минимально:

$$i = \arg \min (\sigma). \quad (9)$$

4. Для найденной контрольной точки C_i пересчитывается значение скорости распространения акустической волны V_j до датчика S_j :

$$V_j = (D_{ij} - D_{ij0}) / \Delta t_{ij}, \quad (10)$$

где D_{ij0} – расстояние от C_i до датчика S_{j0} , первого зарегистрировавшего удар по времени прихода; $j \in K$ – номера каналов, где определено РВП.

5. Для рассчитанных скоростей V_j вычисляется средняя скорость распространения волны

$$V^m = \frac{1}{|K|} \sum_{j \in K} V_j. \quad (11)$$

6. Рассчитанное среднее значение скорости V^m сравнивается с инициализированным значением скорости V . Если значения скоростей совпадают, то алгоритм завершается. При различии значений скорость V принимается равной V^m , и алгоритм повторяется до тех пор, пока скорости V и V^m не совпадут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате реализации алгоритма определяются координата источника акустической аномалии C и средняя скорость распространения акустической волны V^m . Для оценки точности определения локализации источника были рассмотрены удары импульсных молотков (ИМ), расположенных на трубопроводах РУ (схема расположения датчиков и ИМ показана на рис. 3). Датчики располагаются на каждом ГЦНА, горячих и холодных коллекторах ПГ, корпусе ПГ, а также входных и выходных патрубках реактора. ИМ производит удар энергией ~1.8 Дж.

Геометрическая модель РУ в виде сетки содержала 30004 вершины (контрольные точки). Среднее расстояние между двумя контрольными точками составляло 30 см.

Всего было произведено 143 удара ИМ по разным петлям. Удары производились при разных режимах работы энергоблока, и, соответственно, различными были фоновые акустические шумы, что сказывалось на точности определения времени прихода переднего фронта. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Номер петли	Расположение ИМ	Количество ударов	Средняя ошибка локализации, мм	Средняя скорость распространения волны, м/с	Расстояние до ближайшего датчика, мм
1	U-образный гиб	29	624	2241	8803
2	Холодный участок трубопровода	38	708	2351	5998
3	Горячий участок трубопровода	38	473	2494	3769
4	U-образный гиб	38	768	2161	8654

Средняя ошибка локализации при условии среднего размера ячейки 300 мм составила 643 мм. При увеличении расстояния от места удара до ближайшего датчика погрешность увеличивается. Основная погрешность связана с определением разности времен прихода переднего фронта ударной волны. Размер ребра вносит постоянную погрешность, пропорциональную его длине. Тем не менее, значения отклонений полностью приемлемы для практического использования, а разработанный алгоритм можно использовать для оценки локализации источника акустической аномалии.

ВЫВОДЫ

В работе предложен алгоритм локализации источника акустической аномалии на поверхности оборудования РУ по триангулированной поверхности 3D-модели контура циркуляции теплоносителя.

Алгоритм состоит из двух частей. Подготовка данных выполняется один раз для каждого энергоблока. Затем в масштабе реального времени при регистрации события выполняется вторая часть, в которой определяются место удара и средняя скорость распространения акустической волны.

Анализ экспериментальных данных показал, что средняя погрешность локализации источника удара составляет ~600 мм, что делает возможным практическое применение разработанного метода.

Литература

1. Regulatory Guide 1.133. Loose Part Detection Program for the Primary System of Light-Water Cooled Reactors : tech. rep. – U.S. Nuclear Regulatory Commission. – 1981. – 6 p.
2. Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants. Part 12 Loose Part Monitoring. – American Society of Mechanical Engineers (ASME). – 2015. – 523 p.
3. IEC 60988. Nuclear power plants. Instrumentation important to safety. Acoustic monitoring systems for detection of loose parts: Characteristics, design criteria and operational procedures. – 2009. – 75 p.
4. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Общее руководство. Часть 1. – М.: Стандартинформ, 2015. – 33 с.
5. *Olma B.* Source location and mass estimation in loose parts monitoring of LWR. // Progress in Nuclear Energy. – 1985. – Vol. 15. – PP. 583-594.
6. *Szappanos G. et al.* Analysis of measurements made by HELPS loose part detection system during installation and operation periods. // Progress in Nuclear Energy. – 1999. – Vol. 34. – No. 3. – PP. 185-193.
7. *Kim J.S. et al.* Development of automatic algorithm for localizing loose parts with a steam generator. // Nuclear Engineering and Design. – 2003. – Vol. 219. – No. 3. – PP. 269-276.
8. *Choi Y.-C., Park J.-H., Choi K.-S.* An impact source localization technique for a nuclear power plant by using sensors of different types. // ISA Transactions. – 2011. – Vol. 50. – No. 1. – PP. 111-118.
9. *Park J.-H., Kim Y.-H.* Impact source localization on an elastic plate in a noisy environment. // Measurement Science and Technology. – 2006. – Vol. 17. – No. 10. – PP. 2757-2766.
10. *Park G.Y. et al.* An estimation method for impact location of loose parts. // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – No. 4. – PP. 360-370.
11. *Ki H.I., Seong-In M., Soon-Woo H.* ANN based localization of metal ball impacts on reactor pressure boundary structure. // Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 26-27. – 2017. – 3 p.
12. *Figedy S., Oksa G.* Modern methods of signal processing in the loose part monitoring system. // Progress in Nuclear Energy. – 2005. – Vol. 46 (3-4). – PP. 253-267.

13. *Liska J., Kunkel S.* Localization of loose part impacts on the general 3D surface of the nuclear power plant coolant circuit components. // *Progress in Nuclear Energy.* – 2017. – Vol. 99. – PP. 140-146.
14. *Zheng H., Cao Y., Yang J.* A method for estimating impact location of loose part using ННТ. / *Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements / Ed. by Y. Fei, K.-C. Fan, R. Lu.* – SPIE, 12.2008. – 6 p.
15. *Page E.S.* Cumulative Sum Charts. // *Technometrics.* – 1961. – Vol. 3. – No. 1. – PP. 1-9.
16. *Liu M. et al.* A new method for arrival time determination of impact signal based on ННТ and АІС. // *Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2017. – Vol. 86. – PP. 177-187.
17. *Максимов И.В., Павелко В.И., Перевезенцев В.В., Трыков Е.Л.* Метод выделения полезного сигнала для системы обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов в главном циркуляционном контуре реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* – 2018. – № 1. – С. 4-15.
18. *Truong C., Oudre L., Vayatis N.* A review of change point detection methods. – 2018. – 46 p. Электронный ресурс: <https://arxiv.org/abs/1801.00718> (дата доступа 19.02.2019).
19. *Lavielle M.* Using penalized contrasts for the change-point problem. // *Signal Processing.* – 2005. – Vol. 85. – No 8. – PP. 1501-1510.
20. *Dijkstra E.W.* A note on two problems in connexion with graphs. // *Numerische Mathematik.* – 1959. – Vol. 1. – No. 1. – PP. 269-271.

Поступила в редакцию 21.02.2019 г.

Авторы

Максимов Иван Владимирович, инженер
E-mail: iv_maksimov@mail.ru

Перевезенцев Владимир Васильевич, профессор, доктор технических наук
E-mail: pervezentsev@bmstu.ru

UDC 621.039.588:534.21

A LOCALIZATION METHOD OF LOOSE PART FOR VVER NPPs

Maksimov I.V., Perevezenцев V.V.*

«KVANT PROGRAMM» LTD

111558, Moscow, Zeleny prospect 5/12

* Bauman Moscow State Technical University

5/1 2-nd Baumanskaya str, Moscow, 105005 Russia

ABSTRACT

As operational experience shows, it can hardly be excluded that some detached or loosened parts and even foreign objects may appear in the main circulation loop of VVER reactor plants. Naturally, the sooner such incidents are detected and evaluated, the more time will be available to eliminate or at least minimize damage to the reactor plant main equipment. The paper describes a method for localizing the impact of a detached, loosened, or foreign metallic object located in the coolant circulation circuit of a VVER reactor plant. To diagnose malfunctions of the reactor plant main equipment, it is necessary to accurately determine the place where the acoustic anomaly occurred. Therefore, if some detached, loosened or foreign objects make themselves felt, it is important to track the path of their movement along the main

circulation circuit as well as their location using physical barriers.

The method is based on the representation of the surface, along which an acoustic wave propagates, as a 3D model of the RP main circulation circuit. The model has the form of a graph in which the vertices characterize the control points on the RP surface and the edges are the distances between them. The method uses information about the acoustic wave velocity and the difference in the arrival times of the leading edge at various sensors. It is shown that, when the effect is recorded by more than three sensors, along with an estimate of the impact coordinate, it becomes possible to estimate the average acoustic wave velocity. To determine the arrival time of the leading edge, the signal dispersion change detection method is used. Provided that the average size between the control points on the RP surface was 300 mm, the average localization error was about 600 mm.

The developed algorithm can be easily adapted to any VVER reactor plant. The obtained deviation values are acceptable for practical use.

Key words: Loose Part Monitoring System (LPMS), diagnostics of NPPs, impact localization, acoustic wave, main circulation circuit, VVER reactor plant.

REFERENCES

1. Regulatory Guide 1.133. *Loose Part Detection Program for the Primary System of Light-Water Cooled Reactors*: tech. rep. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981, 6 p.
2. Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants. Part 12. *Loose Part Monitoring*. – American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2015. 523 p.
3. IEC 60988 Nuclear power plants. Instrumentation important to safety. *Acoustic monitoring systems for detection of loose parts: Characteristics, design criteria and operational procedures*. International Electrotechnical Commission, 2009. 75 p.
4. ISO 13379-1-2015. Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques — Part 1: General guidelines. Moscow. Standartinform Publ., 2015, 33 p. (in Russian).
5. Olma B. Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWR. *Progress in Nuclear Energy*. 1985, v. 15, pp. 583-594.
6. Szappanos G., Kiss J.J., Por G., Kiss J.M. Analysis of Measurements made by HELPS Loose Part Detection System During Installation and operation Periods. *Progress in Nuclear Energy*. 1999, v. 34, no. 3, pp. 185-193.
7. Kim Jung Soo, Hwang In Koo, Kim Jung Tak, Lyoo Joon. Development of Automatic Algorithm for Localizing Loose Parts with a Steam Generator. *Nuclear Engineering and Design*. 2003, v. 219, no. 3, pp. 269-276.
8. Choi Y.-C., Park J.-H., Choi K.-S. An Impact Source Localization Technique for a Nuclear Power Plant by Using Sensors Of Different Types. *ISA Transactions*. 2011, v. 50, no. 1, pp. 111-118.
9. Park J.-H., Kim Y.-H. Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment. *Measurement Science and Technology*. 2006, v. 17, no. 10, pp. 2757-2766.
10. Park Gee Yong, Cheon Se Woo, Lee Cheol Kwon and Kwon Kee Choon. An Estimation Method for Impact Location of Loose Parts. *Progress in Nuclear Energy*. 2006, v. 48, no. 4, pp. 360-370.
11. Ki H.I., Seong-In M., Soon-Woo H. ANN Based Localization of Metal Ball Impacts on Reactor Pressure Boundary Structure. *Transactions of the Korean Nuclear Society. Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 26-27. 2017.* 3 p. Available at: https://www.kns.org/files/pre_paper/38/17A-554***.pdf (accessed 19.02.2019).
12. Fignedy S., Okxa G. Modern Methods of Signal Processing in the Loose Part Monitoring System. *Progress in Nuclear Energy*. 2005, v. 46(3-4), pp. 253-267.
13. Liska J., Kynkel S. Localization of Loose Part Impacts on the General 3D-surface of the Nuclear Power Plant Coolant Circuit Components. *Progress in Nuclear Energy*. 2017, v. 99, pp. 140-146.

14. Zheng H., Cao Y., Yang J. A Method for Estimating Impact Location of Loose Part Using HHT. *Proc. of the Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. Ed. by Y. Fei, K.-C. Fan, R. Lu. SPIE, 12.2008, 6 p.
15. Page E.S. Cumulative Sum Charts. *Technometrics*. 1961, v. 3, no. 1, pp. 1-9.
16. Liu Mingzhou, Yang Jiangxin, Cao Yanpeng, Fu Weinan and Cao Yanlong. A New Method for Arrival Time Determination of Impact Signal Based on HHT and AIC. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017, v. 86, pp. 177-187.
17. Maksimov I.V., Pavelko V.I., Perevezencev V.V., Trykov E.L. Valid Signal Isolation Method for Loose Parts Monitoring System in the Main Circulation Circuit of VVER Reactor. *Vestnik MGTU n.a. Bauman. Ser. Priborostroenie*. 2018, no. 118, pp. 4-15 (in Russian).
18. Truong C., Oudre L., Vayatis N. C. A Review of Change Point Detection Methods. 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.00718> (accessed Feb 19, 2019).
19. Lavielle M. Using Penalized Contrasts for the Change-Point Problem. *Signal Processing*. 2005, v. 85, no. 8, pp. 1501-1510.
20. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*. 1959, v. 1, no. 1, pp. 269-271.

Authors

Maksimov Ivan Vladimirovich, Engineer

E-mail: iv_maksimov@mail.ru

Perevezencev Vladimir Vasilievich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: perevezentsev@bmstu.ru