

Карлов С.А.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из самых эффективных способов диагностики предопасного состояния конструкций. Для его успешного применения в заводских условиях требуется постоянное развитие и совершенствование методологии. Одним из основных методологических аспектов является решение задачи локации источников АЭ, что необходимо для обеспечения достоверности результатов АЭ-контроля.

При определении координат источников АЭ наибольшее распространение получил разностно-временной способ, в соответствии с которым координаты вычисляются по известным уравнениям локации. Основным недостатком данной концепции является сложность получения уравнений локации для объектов контроля сложной геометрической формы, а также для изделий, в материале которых присутствует сильная анизотропия в скорости распространения акустических колебаний. Автором разработан локационный алгоритм, в котором координаты источника АЭ извлекаются из массива данных по адресу, который определяется комбинацией номеров приемных каналов аппаратуры и соответствующих им задержек во времени регистрации акта излучения. Основное отличие данного алгоритма заключается в том, что для локации источников АЭ на отдельных участках одного и того же объекта контроля может использоваться различное количество каналов, которое определяется сложностью конкретного участка объекта контроля.

Разработанный локационный алгоритм был апробирован специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при проведении АЭ-контроля по оценке качества сварных швов вварки изделий 24 в основной корпус заказов, строящихся на АО «ПО «Севмаш». В результате выполненных работ была показана эффективность данного алгоритма при выявлении недопустимых сварочных дефектов.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, метод акустической эмиссии, акустико-эмиссионный контроль, преобразователь акустической эмиссии, алгоритм локации, локационная антенна, локационный алгоритм, разность времени прихода.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Карлов С.А. Универсальный алгоритм локации источников акустической эмиссии. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 121–129.

УДК 620.179.18:534

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-121-129

Karlov S.

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## A UNIVERSAL ALGORITHM FOR LOCATING ACOUSTIC EMISSION SOURCES

The acoustic emission (AE) method is one of the most efficient tools for early diagnostics of structural hazards. For successful application of this method at manufacturer's sites it is required to continuously develop and improve the methodology.

One of the core methodological issues here is locating of AE sources as necessary to ensure reliable AE-monitoring results.

The most common method to locate the coordinate of AE sources is a so-called time difference technique when the coordinates are calculated using the known equations. One of the drawbacks of this concept is that the such equations are quite difficult to derive for objects of sophisticated geometry as well as for products whose materials feature strong anisotropy in terms of acoustic vibration velocity. The author suggests a locating algorithm where the AE source coordinates are extracted from a set of data based on the address defined by a combination of receiving channel numbers and their corresponding time delays in recording the emission event. The main distinctive feature of this algorithm is that AE sources can be located in different places on the same test object using different number of channels, and this number is chosen depending on the complexity of specific sections subjected to monitoring. The developed locating algorithm has been proven by KSRC experts during AE examination of set-in welded joints on the hulls under construction at Sevmas. It has been confirmed that this algorithm enables efficient detection of unacceptable defects in welded joints.

**Key words:** acoustic emission, acoustic emission method, acoustic emission monitoring, acoustic emission transducer, locating algorithm, locating antenna, arrival time difference.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Karlov S. A universal algorithm for locating acoustic emission sources. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; special issue 1: 121–129 (in Russian).

UDC 620.179.18:534

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-121-129



## Введение

### Introduction

В связи с необходимостью сокращения сроков строительства атомных подводных лодок на АО «ПО «Севмаш» и повышения надежности диагностики качества сварных швов вварки ответственных элементов конструкций было принято решение в дополнение к ультразвуковому (УЗК) и радиографическому (РГК) методам неразрушающего контроля (НК), которые являются штатными в судостроении, использовать метод АЭ.

Сварные швы судокорпусных конструкций зачастую имеют сложную геометрическую форму, а ввариваемые элементы при этом могут иметь полости большого диаметра, через которые прохождение акустических колебаний невозможно. Кроме того, в районе контролируемого сварного шва, как правило, находятся элементы насыщения, также препятствующие распространению сигналов АЭ. В результате применение традиционных методов локации для контроля подобных объектов встречает большие трудности.

Для решения задачи определения местоположения источника АЭ в сварных швах сложной формы автором разработан локационный алгоритм, в котором координаты источника АЭ извлекаются из массива данных по адресу, который определяется комбинацией номеров приемных каналов аппаратуры и соответствующих им задержек во времени регистрации акта излучения. Основное отличие данного алгоритма заключается в том, что для локации источников АЭ на отдельных участках одного и того же объекта контроля может использоваться различное количество преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), которое определяется сложностью конкретного участка объекта контроля.

Предлагаемый локационный алгоритм позволяет:

- для участков контроля, в которых присутствует избыток локационной информации, дополнительно учитывать влияние различных факторов на точность локации;
- на участках контроля, где стабильная регистрация локационных серий возможна лишь минимальным числом ПАЭ, определять координаты источников излучения с достаточной степенью достоверности.

## Обоснование актуальности применения метода акустической эмиссии

### Benefits of AE method application

Наличие в элементе конструкции опасного концентратора напряжений приводит к значительному

увеличению действующих напряжений в локальной области, величина которых может превышать предел прочности материала. В результате этого в объеме повышенной концентрации напряжений происходит проскок трещины. Данный процесс на участке продвижения трещины сопровождается высвобождением части запасенной упругой энергии в виде сигнала АЭ. Это позволяет методу АЭ оценивать дефект по динамике его развития.

Таким образом, метод АЭ выявляет только развивающиеся (наиболее опасные) дефекты. Подобный подход к оценке опасности дефекта является более объективным по сравнению с классификацией дефектов по их условным размерам, что принято при использовании таких традиционных методов НК, как УЗК и РГК.

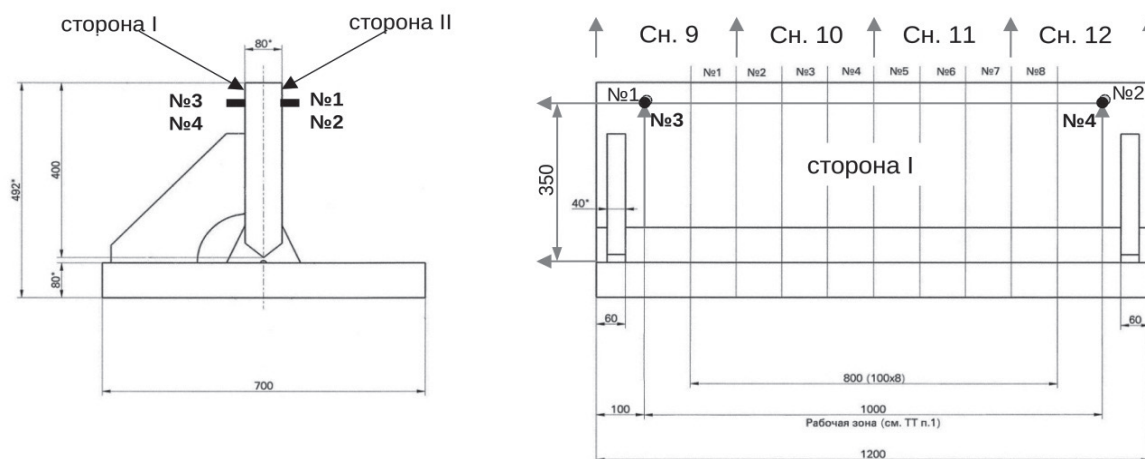
Бесспорным преимуществом метода АЭ является возможность оценки качества выполнения сварных швов в процессе их изготовления. Это позволяет оперативно исправлять сварочные дефекты, тем самым существенно уменьшая трудоемкость этой операции, и, что более важно, снижая негативное влияние на прочность сварного шва внесения избыточной термической энергии в процессе выборки и повторной заварки дефектного участка сварного шва.

В обеспечение применения АЭ-диагностики для оценки качества сварных швов на территории АО «ПО «Севмаш» была проведена экспериментальная работа по АЭ-контролю сварных соединений опытных образцов в процессе их выполнения [1]. При этом решались следующие задачи:

- оценка принципиальной возможности выявления методом АЭ сварочных дефектов, которые моделировались в процессе выполнения сварных соединений;
- отработка технологии АЭ-контроля качества аустенитных сварных швов, имитирующих шов вварки изделий 24 в основной корпус подводной лодки (ПЛ).

Общий вид опытного образца № 3 и его основные конструктивные размеры приведены на рис. 1. Схема расстановки ПАЭ для АЭК качества изготовления сварного соединения предусматривала расположение 4-х преобразователей № 1 ÷ № 4 (по два ПАЭ с каждой стороны стенки образца) вдоль линии сварного шва на расстоянии 350 мм от нижней кромки разделки. Величина базы линейной антенны (расстояние между ПАЭ № 1 и № 2, № 3 и № 4) составляла 1000 мм.

В сварном шве опытного образца в процессе его изготовления «естественным» образом, путем нарушения технологии сварки, моделировались различные виды сварочных дефектов (непровары,



**Рис. 1.** Общий вид испытательного образца № 3 и схема расположения преобразователей акустической эмиссии  
**Fig. 1.** General view of test sample No. 3 and layout of AE transducers

несплавления, трещины). Дефекты закладывались на различных стадиях формирования сварного шва: в корне, по линии сплавления и в усилении сварного шва. Для моделирования сварочных дефектов рабочая зона сварного шва была разделена на 8 равных участков по 100 мм каждый (обозначены как «№ 1 ÷ № 8» на рис. 1).

Результаты контроля качества сварного шва на испытательном образце № 3 представлены в таблице. Здесь для каждого участка, на котором был внесен дефект, указан его номер, тип вносимого дефекта и результаты контроля используемых в данной работе методов НК, а также результаты исследования макрошлифов.

Из таблицы следует, что ни один из методов контроля не классифицировал все дефекты как недопустимые. Стоит также обратить внимание, что, несмотря на общие для РГК и УЗК критерии оценки

опасности дефектов по условным размерам, их результаты о недопустимости дефекта совпали только для несплавления на участке №6.

Тем не менее, комплексная оценка качества сварного соединения на образце №3 штатными методами НК (РГК и УЗК) позволила выявить недопустимые дефекты на пяти участках контроля из шести.

Особого внимания заслуживает участок № 4, где дефекты не моделировались. Однако на этом участке методом АЭ в процессе сварки был выявлен источник АЭ, свидетельствующий о наличии в этом месте сварного шва недопустимого развивающегося дефекта. Впоследствии дефект на участке № 4 был подтвержден результатами исследований макрошлифов. Таким образом, методом АЭ был зафиксирован реальный сварочный дефект, появившийся в процессе сварки вследствие нарушения технологии.

**Таблица.** Результаты контроля качества сварного шва на испытательном образце № 3

**Table.** Welded joint quality control on test sample No.3

Метод НК	Номер участка испытательного образца № 3					
	Тип моделируемого дефекта					
	№ 1 непровар	№ 3 трещина	№ 4 сварочный дефект	№ 5 непровар	№ 6 несплавление	№ 8 непровар
РГК	не годен	не годен	нет	нет	не годен	допустим
УЗК	допустим	допустим	допустим	не годен	не годен	не годен
АЭК	допустим	не годен	не годен	допустим	не годен	допустим
Наличие дефекта на макрошлифе	есть	есть	есть	есть	есть	есть

Результаты проведенной работы показали, что метод АЭК следует, наряду со штатными методами РГК и УЗК, рассматривать как равноправный метод НК для оценки качества выполнения сварных соединений. При этом метод АЭК расширяет возможности контроля качества сварных швов и обеспечивает выявление небольших по размерам, но опасных развизующихся дефектов.

## Актуальность предлагаемой концепции алгоритма локации

### Advantages of the suggested locating algorithm concept

Решение задачи локации источников АЭ является основным методологическим аспектом, предусмотренным в большинстве нормативных документов по выполнению АЭК.

При выборе алгоритма локации для конкретного объекта контроля необходимо иметь четкое представление об особенностях конструкции. В частности, при выполнении работ по АЭ-диагностике качества сварных швов варки ответственных изделий на АО «ПО «Севмаш» имелись факторы, которые способствовали упрощению задачи определения координат источников АЭ:

- сферическая и цилиндрическая часть основного корпуса ПЛ имеет радиус кривизны, который намного превышает расстояние между группой ПАЭ, образующих общую локационную антенну, а при таких условиях вполне допустимо представлять объект контроля в виде листа;
- ПАЭ находятся на таком расстоянии от контролируемого сварного шва, которое в несколько раз превышает толщину объекта контроля, и для объемных волн вполне допустимо пренебрегать толщиной объекта контроля;
- скорость распространения упругих колебаний в материале основного корпуса можно принять постоянной;
- в сварном шве гранецентрированные кристаллы аустенита начинают расти перпендикулярно кромке сварного шва, и по мере заполнения шва растут вдоль направления теплоотвода, то есть перпендикулярно границе расплавленного металла [2]. Таким образом, кристаллиты в основном формируются в направлении, перпендикулярном поверхности объекта контроля, и потому перпендикулярно распространению волнового пакета. В этом случае анизотропия скорости распространения практически не наблюдается;

- основной путь волнового пакета проходит в материале основного корпуса, поэтому незначительными отличиями в скорости распространения волнового пакета в основном корпусе и сварном шве можно пренебречь.

С другой стороны, для данных объектов контроля имеются сложности, возникающие при решении задачи локации. В частности, из рис. 2, на котором представлена схема расстановки ПАЭ при варке одного из изделий, очевидно, что сварной шов имеет сложную геометрию. Кроме того, здесь показана проекция сварного шва, а реальная его форма получается при пересечении со сферической частью корпуса. Поэтому получить точное уравнение, описывающее геометрию сварного шва, практически невозможно.

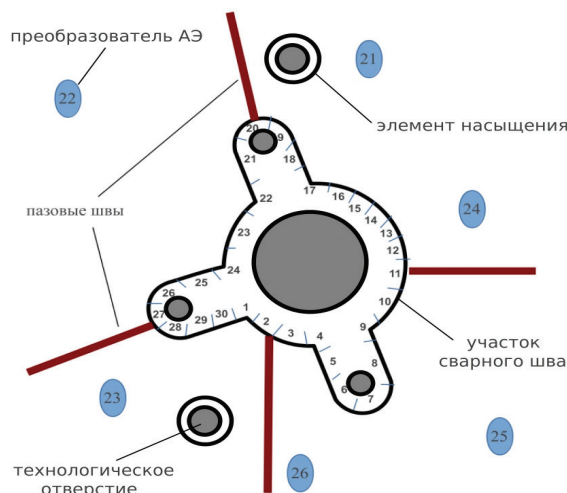
Кроме того, сварные швы выполняются из аустенитных сталей, имеющих высокую степень затухания сигналов АЭ, а свариваемые элементы конструкции имеют внутренние полости, через которые прохождение акустических колебаний невозможно.

Дополнительные сложности при определении координат источников АЭ создают элементы насыщения, находящиеся в районе контролируемого сварного шва, также изготовленные из аустенитных сталей и имеющие внутренние полости.

Таким образом, на некоторых участках сварного шва устойчивая регистрация событий АЭ возможна только двумя ПАЭ.

Учитывая нелинейность геометрии сварного шва, вывод уравнения локации для двух ПАЭ невозможен. Одним из решений данной проблемы могло бы быть увеличение числа ПАЭ, чтобы обеспечить уверенный прием сигналов со всех участков сварного шва тремя ПАЭ, что необходимо для использования плоскостной локации. Но из-за наличия элементов насыщения это не всегда возможно, а во многих случаях и не целесообразно, т.к. при уменьшении базы расстановки между ПАЭ, образующими приемную антенну, возрастает погрешность математической модели, используемой для решения задачи локации.

Еще одним требованием, предъявляемым к алгоритму локации, является тот факт, что для интерпретации результатов АЭК процесса сварки используется координатно-временное представление, где в качестве координаты целесообразно использовать протяженность по сварному шву. Однако применительно к сварному шву, показанному на рис. 2, обеспечить равномерность протяженности шва в зависимости от угловой координаты в случае использования планарной локации не представляется возможным.



**Рис. 2.** Схема расстановки преобразователей акустической эмиссии для контроля сварного шва варки ответственного изделия на АО «ПО «Севмаш»

**Fig. 2.** Layout of AE transducers to examine a set-in welded joint at a critical product of Sevماش

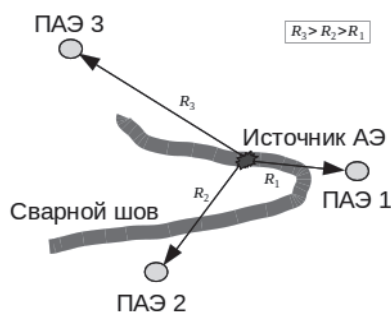
## Реализация алгоритма локации для контроля сварных швов

Implementation of the locating algorithm for examination of welded joints

Для успешного выполнения АЭ-диагностики на АО «ПО «Севмаш» необходимо было разработать локационный алгоритм, позволяющий эффективно решать задачу определения местоположения источника АЭ в сварных швах сложной формы. При этом для решения задачи определения координат должно было быть достаточно регистрации события АЭ двумя ПАЭ.

Автором была разработана концепция, при которой координаты источника определяются из хранилища акустической информации. Бесспорным преимуществом такого подхода является возможность привязки к реперным точкам, например, к границам разметки участков РГК. Для этого на этапе подготовки к АЭ-контролю в этих точках производится имитация сигналов источником Су – Нильсена [3]. Полученная акустическая информация обрабатывается в специализированной программе, которая преобразует исходные данные в конфигурационный файл настройки.

В результате координата реального источника АЭ непосредственно в процессе выполнения АЭ-контроля определяется из локационной матрицы по адресу, включающему номер зоны, соответствующей паре сработавших ПАЭ, и разность времени прихода (РВП) сигнала на эти ПАЭ:



**Рис. 3.** Условная схема распространения сигнала от источника акустической эмиссии на участке сварного шва сложной формы

**Fig. 3.** Schematic diagram of AE signal propagation from the AE source on a welded joint of complicated geometry

Координата=Матрица [ Зона(Канал1,Канал2),Р-ВП(Канал1,Канал2) ], (1)

где «Канал1» и «Канал2» – приемные каналы аппаратуры, которые должны первыми зарегистрировать сигнал от источника АЭ для конкретной зоны.

При нелинейной конфигурации контролируемого сварного шва для некоторых участков шва номер зоны может определяться некорректно. В частности, истинная координата источника АЭ, показанного на рис. 3, определяется РВП сигнала на ПАЭ 1 и ПАЭ 3. Однако для схемы расстановки ПАЭ в рассматриваемом районе сварного шва из-за возможности прохождения сигнала через объект контроля  $R_3 > R_2$ , поэтому координата источника определится РВП сигнала на ПАЭ 1 и ПАЭ 2, что приведет к ошибке.

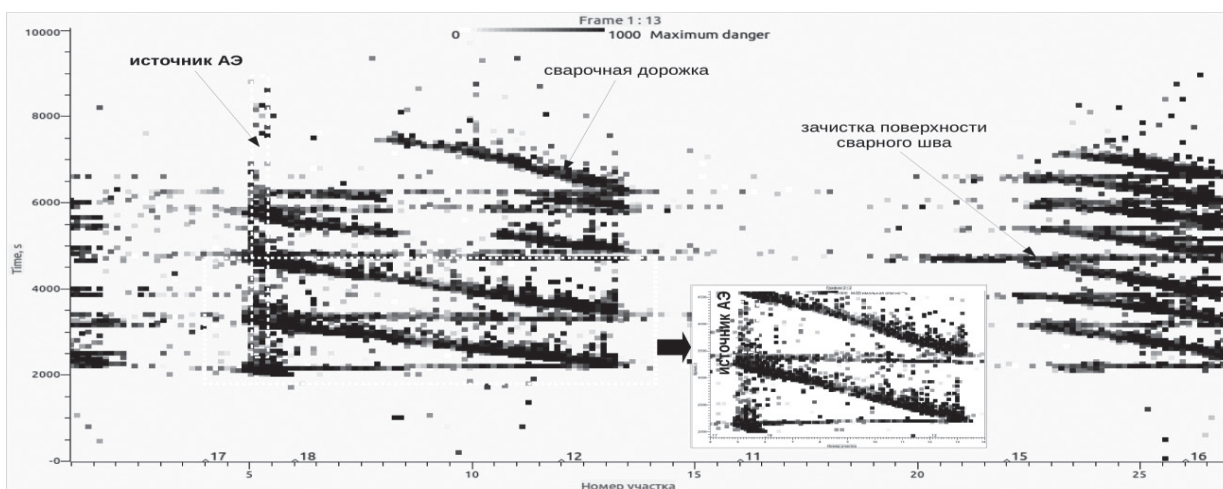
Для выделения «некорректной антенны» предлагается проводить амплитудную проверку по следующей логике:

$$\text{если } A_3 + \Delta_A > A_2 ,$$

то Координата=Матрица [Зона (Канал1,Канал3), РВП (Канал1,Канал3)], (2)

где  $A_2$  и  $A_3$  – амплитуды импульсов в каналах, зарегистрировавших сигнал от источника АЭ вторым и третьим по времени прихода;  $\Delta_A$  – добавка к амплитуде в «Канале3».

Применение данного алгоритма основывается на том, что сигнал АЭ при прохождении через сварной шов (особенно из аустенитных марок сталей) в общем случае затухает существенно, чем при распространении по материалу объекта контроля. Величина добавки  $\Delta_A$  определяется эксперимен-



**Рис. 4.** Координатно-временное распределение событий АЭ, зарегистрированных аппаратурой КАЭМС при выполнении сварочных работ на заказе зав. № 162

**Fig. 4.** Coordinate/temporal distribution of AE events recorded with the Acoustic Emission System during welding jobs on vessel of Project No. 162

тально для конкретного объекта контроля, в зависимости от интенсивности затухания сигнала АЭ при его прохождении через область сварного шва.

Разработанный локационный алгоритм был интегрирован в программу анализа АЭ-информации аппаратуры КАЭМС и апробирован на АО «ПО «Севмаш» при выполнении работ по АЭ-диагностике качества сварных швов в процессе сварки ответственных узлов в корпус заказов. Результаты проведенных работ показали, что применение этого алгоритма локации позволяет оперативно, в процессе выполнения сварочных проходов, выявлять опасные источники, свидетельствующие о наличии в данных районах сварного шва недопустимых дефектов.

В частности, на рис. 4 показано координатно-временное распределение событий АЭ, зарегистрированных аппаратурой КАЭМС при выполнении фрагмента сварочных работ на заказе зав. № 162. Здесь по оси X показаны участки РГК (№ 1–№ 26) и относительное расположение ПАЭ (№ 11, № 12, № 15–№ 18), а по оси Y – время выполнения сварочных работ.

Из представленного рисунка следует, что на участке № 5 сварного шва зарегистрирован источник АЭ, обладающий совокупностью следующих признаков:

- активное излучение сигналов АЭ с высокой степенью опасности по параметру Danger в локальном месте сварного шва после прохождения сварочной дугой данного участка шва, т.е. на начальной стадии его остывания;

- повторная регистрация активного источника АЭ-сигналов в данном месте сварного шва на последующих проходах.

По методологии АЭ-контроля перечисленные критерии являются необходимыми признаками наличия в сварном шве недопустимых развивающихся дефектов, выявление которых является основной задачей метода АЭ.

К недостаткам данного алгоритма локации стоит отнести следующие:

- в реальности сварной шов имеет ширину, поэтому его представление как линейного объекта вносит дополнительную погрешность;
- разномодовость волнового пакета и зависимость эффективности амплитуды возбуждения отдельных составляющих от положения источника относительно поверхности установки ПАЭ, а также связь пути прохождения волнового пакета по объему сварного шва в зависимости от положения источника по его ширине при некоторых условиях могут сделать амплитудную проверку уязвимой;
- некорректная схема расстановки ПАЭ может привести к невозможности однозначной интерпретации координаты источника на нелинейном участке сварного шва.

Для того, чтобы нивелировать все эти недостатки, а также повысить точность локации источников АЭ за счет использования параметра достоверности локационных антенн, была разработана концепция универсального алгоритма локации.

## Концепция универсального алгоритма локации

### Concept of universal locating algorithm

Концепция, при которой данные об акустической информации извлекаются из конфигурационного файла настройки в оперативную память, позволяет реализовать алгоритм локации, максимально адаптированный к конкретному объекту контроля.

В этой концепции координаты источника АЭ будут извлекаться из хранилища локационной информации по адресу, определяемому массивом каналов и РВП в зарегистрированной локационной серии:

Координата=Хранилище[Лок антенна(Массив каналов), Массив РВП], (3)

где «Массив каналов» – массив номеров каналов в зарегистрированной локационной серии;

«Массив РВП» – массив РВП в зарегистрированной локационной серии;

«Хранилище» – хранилище данных локационной информации об объекте контроля, загружаемое в оперативную память из конфигурационного файла настройки.

Генерация файла конфигурации может быть выполнена по результатам процедуры имитации по границам зон (участкам РГК), отмеченным на объекте контроля. Такой подход имеет ряд достоинств:

- траектория распространения от источника до ПАЭ соответствует реальной геометрии объекта контроля;
- возможность привязки к реперным точкам на объекте контроля позволяет оперативно представлять результаты АЭК.

Файл конфигурации локационной информации может также быть сформирован по результатам математического моделирования. Такой подход стоит использовать только при большой области контроля с нелинейной геометрией и там, где нет возможности произвести имитацию по всей области контроля.

При любой реализации объект контроля разбивается на элементарные зоны, размер которых определяется необходимой точностью локации для конкретной конструкции. Размер элементарных областей не может быть меньше максимальной разрешающей способности в точности определения координат. На рис. 5 представлена условная схема представления локационной информации об объекте контроля.

Здесь для каждой элементарной области содержится весь набор необходимой информации. Во-первых, это координаты участка в N-мерном пространстве объекта контроля. Также здесь может храниться

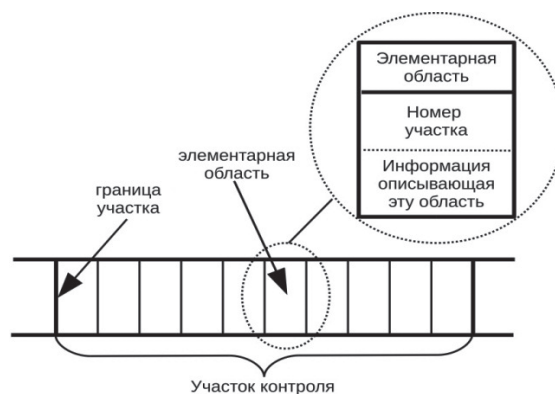


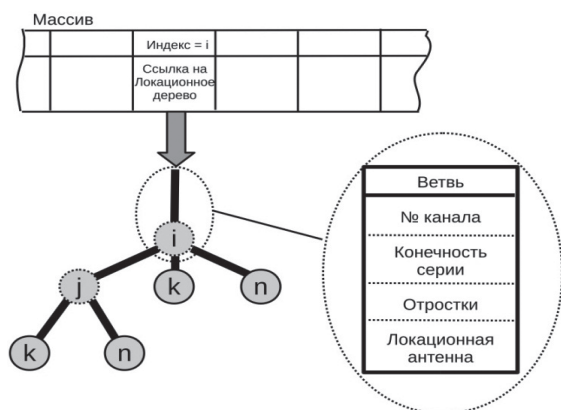
Рис. 5. Условная схема представления локационной информации об объекте контроля

Fig. 5. Schematic representation of location data for the object under monitoring

любая информация, индивидуальная для данной области и полезная для целей АЭК. Например, методология АЭ-диагностики процесса сварки подразумевает анализ графической информации. При этом координаты каждого источника АЭ должны быть пересчитаны в координаты пикселя на диаграмме. Этой процедуры можно избежать, если на этапе генерации локационной схемы в каждую элементарную область произвести запись индексов пикселя. Также для каждой элементарной области можно было бы хранить свои критериальные признаки. Это особенно актуально для конструкций, где имеет место сильное затухание амплитуды волнового пакета и искажение его формы.

Возможность использования разного числа ПАЭ для решения задачи локации позволяет на участках контроля, где присутствует избыточность локационной информации, использовать веса локационных достоверностей для каждой из задержек. А в случае, когда регистрация возможна только минимально допустимым числом ПАЭ, такой подход позволяет с максимальной возможной в таких условиях достоверностью определять координаты источника АЭ. Для того, чтобы обеспечить гибкость локационной системы, было реализовано локационное дерево, представленное на рис. 6.

При регистрации события АЭ по номеру первого принявшего сигнал канала производится обращение в массив, где для каждого ПАЭ, участвующего в решении локационной задачи, хранится ссылка на локационное дерево. Локационное дерево представляет собой группу последовательно соединенных ветвей. Каждая ветвь хранит в себе информацию



**Рис. 6.** Схематичное представление локационного дерева

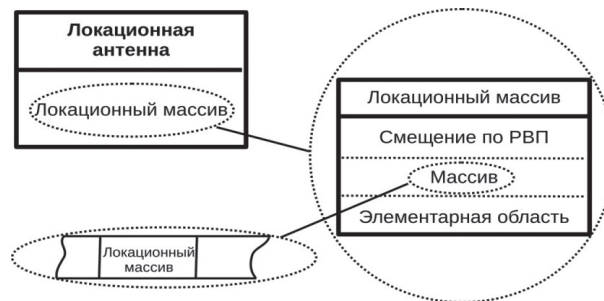
**Fig. 6.** Schematic locating tree

о номере канала, соответствующего ей, конечности локационной серии, всех отростков, представляющих собой ссылки на дочерние ветви. Здесь также хранится ссылка на локационную антенну.

Обработка события в локационном дереве включает в себя следующие этапы:

- для текущей ветви по логическому указателю о конечности серии определяется необходимость продолжения формирования локационной серии;
- в случае целесообразности продолжения формирования серии на вход этой ветви из массива каналов серии подается значение номера канала на текущей итерации;
- номер этого канала сопоставляется со значениями ключей в отростках и, в случае успешного поиска, обнаруженная ветвь передается на следующий шаг формирования серии. В противном случае формирование серии продолжается с использованием текущей ветви;
- по окончании формирования локационной серии происходит проверка на существование ссылки на локационную антенну для последней обнаруженной ветви. При непустой ссылке сформированный массив РВП серии подается на вход локационной антенны.

Задачей локационной антенны является хранение ссылок на элементарные области контроля и обеспечение доступа к ним по ключу, представляющему собой массив РВП для каналов, образующих локационную серию. Учитывая тот факт, что для локационной антенны у каждого ПАЭ в серии свой диапазон изменения РВП, а начиная с третьего канала в серии РВП может начинаться не с нуля, то использование здесь



**Рис. 7.** Схема представления хранилища данных

**Fig. 7.** Schematic representation of data storage

массива или массива массивов приведет к крайне нерациональному использованию оперативной памяти.

В этом случае одним из самых эффективных способов хранения информации является хэш-таблица. В ней доступ к элементу осуществляется через его хэш-функцию. Для этого необходимо реализовать алгоритм определения хэш-кода. При этом очевидно, что эта процедура требует дополнительных временных затрат. Кроме того, реализация хэш-функции, которая для всего множества статических значений ключей определяет свой уникальный индекс (без коллизий) приводит к большому перерасходу оперативной памяти. Для того, чтобы реализовать «идеальное» (обеспечивающее поиск элемента за одно обращение к памяти) хэширование при эффективном расходе памяти в книге [4] предлагается использовать двухуровневую схему хэширования. Из-за трудоемкости определения ключа для локационной серии, с точки зрения скорости поиска в этом сценарии более рационально было бы использовать «не идеальную» хэш-таблицу, где коллизии разрешаются методом цепочек или методом открытой адресации. В методе цепочек необходимо использовать дополнительную память для организации связанного списка. Для «не идеальной» хэш-таблицы в ячейках массива также необходимо хранить значение ключа. А степень приближения к поиску нужного значения за один шаг определяется коэффициентом заполнения хэш-таблицы. Таким образом, для быстрого поиска по ключу в «не идеальной» хэш-таблице необходимо избыточное использование оперативной памяти.

С целью обеспечения более быстрого доступа к значению и при этом эффективному использованию оперативной памяти автором была реализована своя специальная коллекция. Эффективность в использовании оперативной памяти этим хранилищем данных



обусловлена тем, что подавляющее большинство объектов контроля представлены в пространстве РВП, как непрерывные множества, смещенные от нулевого значения на некоторую величину. На рис. 7, показано схематичное представление этой коллекции.

Доступ к хранилищу элементарных областей, представленному на рис. 7, включает в себя следующие этапы:

- на вход локационной антенны подается массив РВП из сформированной серии;
- для каждой РВП в массиве последовательно происходит поиск в текущем локационном массиве по индексу, определяемому как разница между адресуемой РВП и смещением по РВП, заданным в локационном массиве, к которому происходит обращение;
- в случае успешного поиска доступ по следующей РВП уже происходит к найденному локационному массиву, в противном случае поиск преждевременно заканчивается;
- после того, как обход всех РВП в серии успешно завершен, происходит извлечение ссылки на элементарную область.

В разработанном хранилище данных доступ к элементарной области происходит за  $N-1$  шагов, где  $N$  – длина локационной серии. На каждом шаге происходит проверка на попадание текущей РВП в допустимый диапазон значений. Данная проверка была бы обязательна при любой реализации коллекции. А к дополнительной операции при поиске на каждом шаге стоит отнести только вычисление значения индекса. Но эта процедура достаточно проста, поэтому выполняется за короткий интервал времени.

Концепция универсального локационного алгоритма реализована на современном языке программирования C#. Для ее внедрения в АЭ-диагностику сейчас ведется разработка генератора локационной настройки, способного максимально эффективно учитывать все особенности объекта контроля.

## Выводы

### Conclusion

Разработанный алгоритм локации для АЭ-контроля сварных швов сложной формы продемонстрировал

свою высокую эффективность на практике, позволив выявить ряд дефектов, которые были бы пропущены традиционным алгоритмом плоскостной локации.

Автором разработан локационный алгоритм, способный эффективно решать любые задачи АЭ-диагностики, где применим разностно-временной подход к определению координат источника АЭ. Для его окончательного внедрения в настоящее время выполняется разработка генератора локационной настройки.

## Библиографический список

### References

1. Результаты АЭ контроля качества сварных швов при изготовлении опытных образцов на ОАО «ПО «Севмаш». Научно-технический отчет. Вып. №47413. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр». [Results of AE quality control on welded joints during fabrication of test samples at JSCo PO Sevmas. Technical Report. Issue No.47413. SPb.: Krylov State Research Centre. (In Russian)].
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. Неразрушающий контроль. Т. 3. М.: Машиностроение, 2006. [Ermolov I.N., Lange Yu.V. Ultrasonic Testing. Non-destructive tests. V.3. M.: Mashinostroenie, 2006. (In Russian)].
3. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2005. [Ivanov V.I., Vlasov I.E. Acoustic Emission Method. Non-destructive testing. 2005. (In Russian)].
4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. [Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest Introduction to Algorithms, M. ООО I.D. Viliams, 2013. (Russian translation)].

### Сведения об авторе

Карлов Сергей Анатольевич, инженер I категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: Санкт-Петербург, 196158, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-33-23; E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

### About the author

Karlov S., Engineer 1st category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-33-23; E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 12.03.18  
Принята в печать / Accepted: 18.04.18  
© Карлов С.А., 2018

