



Власов Константин Владимирович родился в 1972 г. Окончил Новосибирскую государственную академию водного транспорта в 1995 г. по специальности «Электрооборудование и автоматика судов». С 1998 г. работает в СГУПСе старшим преподавателем кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация». В 2004 г. закончил очную аспирантуру СГУПСа по специальности «Методы контроля и диагностика в машиностроении». В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка методики акустико-эмиссионного контроля несущих элементов пролетных строений железнодорожных мостов».

УДК 620.179.17

К.В. ВЛАСОВ, С.А. БЕХЕР

ПОГРЕШНОСТЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Предложен и экспериментально опробован алгоритм вычисления погрешностей координат источников акустической эмиссии в зависимости от места расположения внутри акустической антенны при выполнении АЭ контроля крупногабаритных протяженных объектов. Определена степень влияния основных факторов на точность вычисления координат источников акустической эмиссии.

При контроле крупногабаритных протяженных объектов размеры зон контроля могут достигать сотен метров. Повышение производительности, уменьшение времени на проведение сканирования поверхности являются особенно важными при неразрушающем контроле конструкций, находящихся под слоем защитного покрытия, слоем термоизоляции или гидроизоляции. Осмотр и использование средств дефектоскопии — сложная технологическая операция, а в отдельных случаях даже невозможная (при проведении контроля внутренней поверхности котлов цистерн, хранилищ технических жидкостей, резервуаров, сосудов давления).

Применение метода акустической эмиссии (АЭ) позволяет контролировать элементы конструкций неподвижно установленными на поверхности конструкции преобразователями без сканирования. В соответствии с действующими руководящими документами [1] неразрушающий контроль методом АЭ рекомендуется проводить в комплексе с традиционными активными методами: ультразвуковым, магнитным, радиационным, проникающими веществами. Достоинством такой системы контроля является существенное сокращение объемов работ, связанных со сканированием.

Координаты источников АЭ вычисляют в рамках теоретической модели объекта контроля по измеренным значениям информативных параметров сигналов. При регистрации дискретной АЭ для локализации используют разности времен прихода акустических импульсов, зарегистрированных преобразователями, образующими акустическую антенну. Точность определения координат является комплексной характеристикой, зависящей от параметров аппаратуры и акустических свойств объекта контроля.

Необходимой составляющей разработки методики контроля является обоснованный выбор размеров акустической антенны и чувствительностей каналов АЭ с позиции предельной максимально допустимой погрешности координат обнаруживаемых источников. Представление результатов локализации в виде области объекта контроля позволяет увеличить достоверность и производительность контроля активными методами дефектоскопии.

Основной целью исследования является определение закономерностей изменения точности локализации при варьировании основных параметров аппаратуры и метода, оценка пространственного распределения абсолютного значения погрешности внутри акустической антенны (рис. 1).

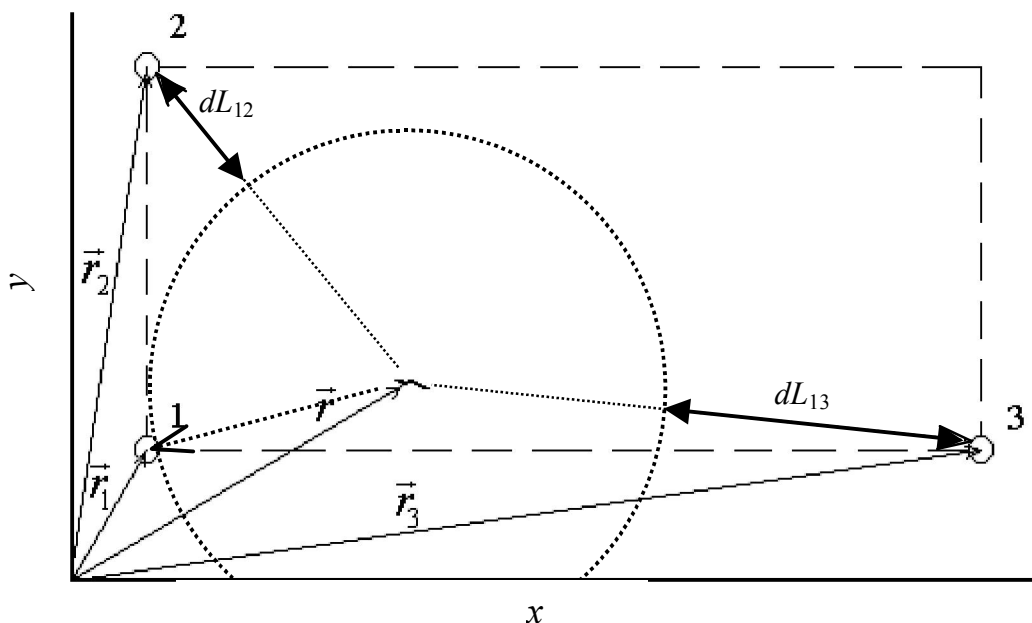


Рис. 1. Модель акустической антенны в декартовых координатах xy :

1, 2, 3 — преобразователи АЭ, $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3$ — координатные векторы преобразователей, $\vec{r}$ — координатный вектор источника АЭ, dL_{12}, dL_{13} — разность расстояния от источника до 1-го и 2-го ПАЭ, 1-го и 3-го ПАЭ, мм

Координаты источника измеряются косвенным способом по зависимостям координат от параметров импульса. Вектор источника акустической эмиссии связан только с месторасположением ПАЭ и разностями путей распространения импульса до двух преобразователей [2]:

$$\vec{r}(dL_{12}, dL_{13}, \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3). \quad (1)$$

Пренебрегая погрешностью измерения месторасположения преобразователей, оценим погрешность косвенного измерения координат источника по компонентам вектора:

$$\Delta r_i = \sqrt{\left(\frac{\partial r_i(dL_{12}, dL_{13}, \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3)}{\partial L_{12}} \right)^2 (\Delta L_{12})^2 + \left(\frac{\partial r_i(dL_{12}, dL_{13}, \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3)}{\partial L_{13}} \right)^2 (\Delta L_{13})^2}, \quad (2)$$

где ΔL_{12} — погрешность вычисления разности пути волны от источника до 1-го и 2-го ПАЭ, мм; ΔL_{13} — погрешность вычисления разности пути волны от источника до 1-го и 3-го ПАЭ, мм; $i = 1...2$ — номер компоненты вектора.

Расстояния вычисляются по измеренным временам прихода импульсов на разнесенные по поверхности изделия преобразователи:

$$L_{12} = C_s(t_2 - t_1), \quad (3)$$

где C_s — скорость механического импульса акустической эмиссии, мм/мкс; t_1 , t_2 , t_3 — времена прихода импульсов на 1, 2 и 3-й преобразователи, мкс.

Определение погрешности величины (3) заключается в оценках ошибок скорости распространения и разности времен начала импульсов на преобразователях. При контроле листовых изделий (толщина меньше длины волны) акустико-эмиссионный импульс представляет собой волновой пакет, состоящий из акустических волн с различными скоростями. Зависимость скорости распространения от частоты колебаний определяется дисперсионными кривыми (рис. 2, а). Спектральный состав регистрируемого акустико-эмиссионного импульса связан с амплитудно-частотными характеристиками источника и преобразователя, линейными размерами ПАЭ и толщиной изделия. В акустико-эмиссионной системе СЦАД с использованием полосовых приемников излучения максимальная спектральная плотность наблюдается в полосе частот от 60 до 140 кГц (рис. 2, б).

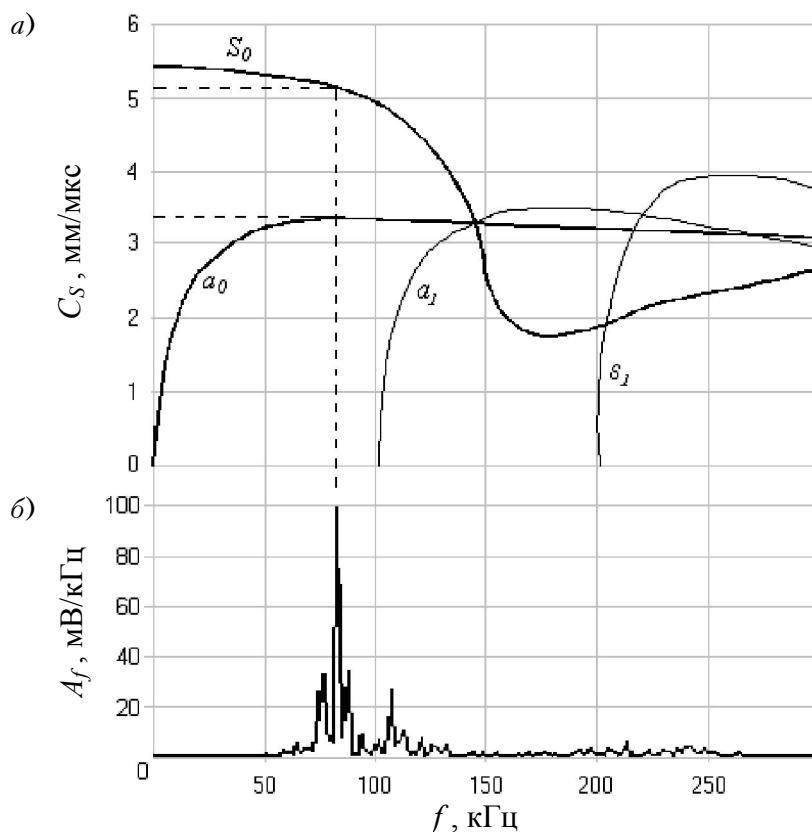


Рис. 2. Зависимость скоростей распространения волн в пластине толщиной 15 мм от частоты — а и спектральная плотность АЭ импульса A_f — б:

a_0 , a_1 — нулевая и первая антисимметричные моды волны; S_0 , S_1 — нулевая и первая антисимметричные моды волны

Механический сигнал АЭ представлен двумя модами волны Лэмба: быстрой (5,1 мм/мкс) симметричной и медленной (3,4 мм/мкс) антисимметричной волнами нулевого порядка с дисперсией скорости в рабочем диапазоне частот порядка 20 % и 5 % соответственно.

Ошибка в определении разности путей распространения L_{12} связана с неправильным измерением времен начала импульсов. Их погрешности являются положительными величинами (задержка), поэтому полная погрешность расстояния принимает следующий вид:

$$\Delta L_{12} = C_s(\Delta t_2 - \Delta t_1), \quad (4)$$

где $\Delta t_1, \Delta t_2$ — погрешность определения времен начала сигналов АЭ, мкс.

Измерение времени прихода сигнала АЭ на ПАЭ сводится к задаче выделения начала импульса на фоне непрерывных шумов. Пороговый способ определения времени начала импульса основан на пересечении электрическим сигналом АЭ некоторого критического значения (уровня порога). Погрешность определения времени начала импульса в этом случае обратно пропорциональна отношению сигнал — шум и прямо пропорциональна длительности нарастания переднего фронта [3]:

$$\Delta t = kt_{\phi} \frac{U_{\text{шум}}}{U_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где t_{ϕ} — длительность переднего фронта импульса, мкс; $U_{\text{шум}}$ — среднеквадратичное отклонение шума, мВ; U_{max} — амплитуда импульса, мВ; k — безразмерный коэффициент, зависящий от алгоритма определения начала импульса.

В отсутствии существенных внешних источников уровень шума определяется электрическими шумами аппаратуры. Значительное влияние на погрешность определения времени прихода оказывает время нарастания переднего фронта моды S_0 . Сильно затянутый передний фронт сигнала АЭ вызывает значительную ошибку времени начала импульса. Из зависимости (5) следует, что источники сигналов с низкой амплитудой и затянутым передним фронтом локализуются со значительной погрешностью.

Длительность нарастания переднего фронта, в свою очередь, — величина неслучайная, связанная с явлением дисперсии скорости акустических волн. Время нарастания увеличивается по мере распространения волны, а значит и с увеличением времени прихода сигнала АЭ на принимающий ПАЭ. Экспериментальные измерения зависимости длительности переднего фронта от времени распространения импульса в продольной балке моста (толщиной 15 мм), позволил установить коэффициент линейной зависимости:

$$\frac{t_{\phi}}{t} = \frac{\Delta C_s}{C_s} = 0,36, \quad (6)$$

где t — время распространения импульса от источника до приемника, мкс; ΔC_s — дисперсия скорости акустических волн, мм/мкс.

Подставив (6) в (5), получим положительно определенную погрешность определения времени прихода сигнала АЭ с учетом всех влияющих факторов:

$$\Delta t = kt_i \frac{\Delta C_s}{C_s} \frac{U_{\text{шум}}}{U_{\text{max}}}. \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (4) запишем в виде:

$$\Delta_{12} = C_s \left(kt_2 \frac{\Delta C_s}{C_s} \frac{U_{2\text{шум}}}{U_{2\text{max}}} - kt_1 \frac{\Delta C_s}{C_s} \frac{U_{1\text{шум}}}{U_{1\text{max}}} \right). \quad (8)$$

Выполнив необходимые преобразования и введя новые обозначения, получим

$$\Delta_{12} = \Delta C_s k \left(t_2 \frac{U_{2\text{шум}}}{U_{2\text{max}}} - t_1 \frac{U_{1\text{шум}}}{U_{1\text{max}}} \right), \quad (9)$$

$$\Delta_{12} = \Delta C_s \frac{k}{K_{\text{сш}}} \left(t_2 \frac{U_{1\text{max}}}{U_{2\text{max}}} - t_1 \right), \quad (10)$$

$$\frac{U_{1\text{max}}}{U_{2\text{max}}} = K_q K_3, \quad (11)$$

$$\Delta L_{12} = \Delta C_s \frac{k}{K_{\text{сш}}} (t_2 K_q K_3 - t_1), \quad (12)$$

где K_q — отношение чувствительностей каналов 1-го и 2-го; K_3 — отношение амплитуд принимаемых импульсов 1-м и 2-м каналами, связано с затуханием, расхождением волны; $K_{\text{сш}}$ — отношение сигнал — шум.

Анализ зависимости (12) показывает, что погрешность разностей путей распространения акустической волны определяется отношением сигнал — шум на первом принимающем преобразователе, отношениями чувствительностей акустико-эмиссионных каналов, затуханием и расхождением ультразвукового пучка, временем распространения.

Увеличение отношения сигнал — шум приводит к уменьшению погрешности, поэтому для оценки сверху примем отношение порога дискриминации акустико-эмиссионной системы к уровню собственных шумов аппаратуры:

$$K_{\text{сш}} = \frac{U_{\text{пор}}}{U_{\text{ш}}}. \quad (13)$$

Коэффициент отношения амплитуд импульсов на 1-м и 2-м каналах определяется известной зависимостью от расстояния между излучателем и приемниками в плоском объекте [4]:

$$K_3 = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{2\text{max}}} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} \frac{l_1}{l_2} e^{-\delta_3(l_1-l_2)}, \quad (14)$$

где l_1, l_2 — пути распространения от источника до приемников 1-го и 2-го, м; δ_3 — коэффициент затухания симметричной волны Лэмба нулевого порядка, $0,009 \frac{1}{i}$ (для частоты 100 кГц).

Для акустических антенн, линейные размеры которых не превышают 5 м, затуханием допустимо пренебречь, так как:

$$e^{-\delta_3(l_1-l_2)} - 1 = 0,05 \ll 1, \quad (15)$$

$$K_3 = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{2\text{max}}} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}. \quad (16)$$

Окончательный вид косвенной погрешности разности путей распространения акустической волны от источника до 1-го и 2-го ПАЭ. Эта погрешность зависит от дисперсии скорости моды $S_0(\Delta C_{S_0})$, а также конкретного алгоритма определения времени начала сигнала АЭ (k_i), применяемого в акустико-эмиссионной системе.

$$\Delta L_{12} = \frac{\Delta C_s}{C_s} l_1 \frac{k}{K_{\text{сш}}} \left(\sqrt{\frac{l_1}{l_2}} K_q - 1 \right). \quad (17)$$

Суммарная погрешность определения координат источников АЭ, связанная с погрешностью определения времени начала импульсов и геометрическими параметрами акустической антенны, получается подстановкой выражения (17) в зависимость (2).

Расчет погрешности осуществлялся для акустической антенны, применяемой для контроля несущей балки пролетного строения железнодорожного моста (рис. 3). Локализация выполнялась с использованием трех преобразователей, расположенных в углах прямоугольника с размерами: горизонтальный — 2,3 м и вертикальный — 1,6 м. Преобразователь с координатами на плоскости (0 м; 0 м) расположен в вершине левого нижнего угла антенны, имеет номер один и является первым принимающим преобразователем.

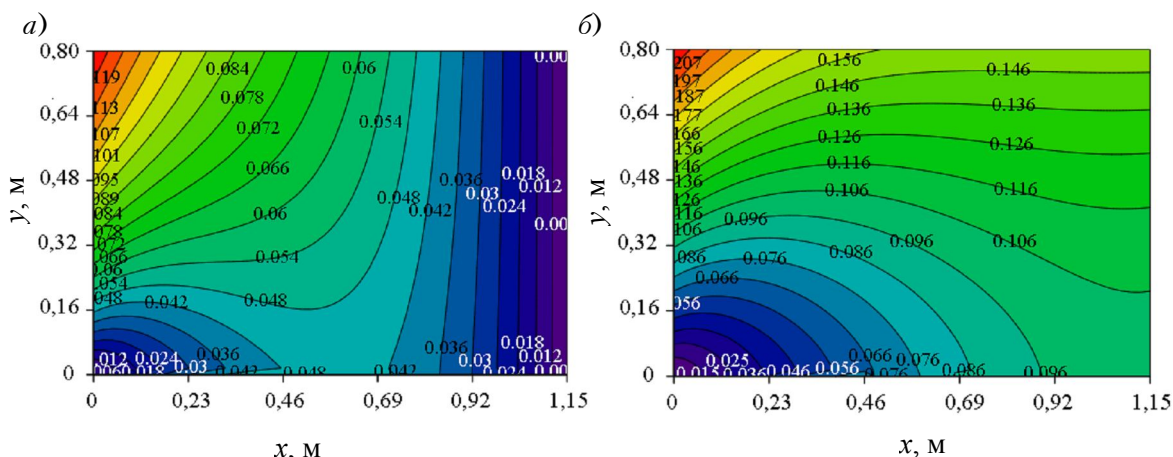


Рис. 3. Пространственное распределение погрешностей координат источников в одной четвертой части прямоугольной акустической антенны:

a — равная чувствительность на всех каналах; *б* — чувствительность первого канала в 2 раза меньше остальных каналов

При одинаковой чувствительности акустико-эмиссионных каналов погрешность определения координат источника АЭ принимает наименьшие значения в центре акустической антенны от 12 до 18 мм (см. рис. 3, *a*). В этой области объекта контроля погрешности времен прихода импульсов на двух нижних преобразователях (с номерами 1 и 3 на рис. 1) скомпенсированы. При смещениях источника влево или вправо к границе антенны погрешность определения координаты x существенно увеличивается и достигает максимального значения 120 мм в точке с координатами (0 м; 0,8 м).

Разница чувствительности акустико-эмиссионных каналов изменяет величину погрешности и ее пространственное распределение (см. рис. 3, *б*). Минимальная погрешность в этом случае реализуется в относительно небольшой области диагностируемой детали вблизи первого преобразователя. В основной части контролируемой детали погрешность принимает значения от 80 до 200 мм.

Исследование зависимости абсолютной погрешности от величины относительной чувствительности преобразователей акустической антенны показало наличие степенного роста максимальной и средней по объекту погрешности (рис. 4). Методом наименьших квадратов были получены коэффициенты аппроксимации:

$$\log_{10} \Delta_x = 0,074N - 0,952, \quad (18)$$

где Δ_x — абсолютная погрешность локализации, м; N — отношение чувствительностей, дБ.

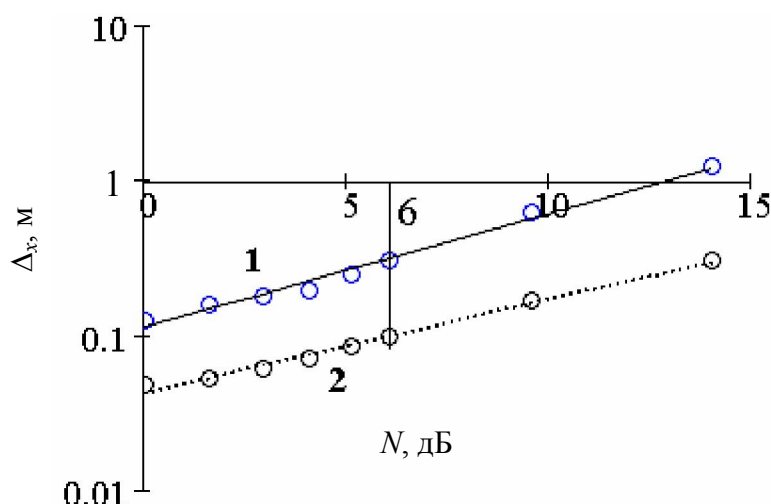


Рис. 4. Зависимость погрешности локализации Δ_x от относительной чувствительности преобразователей N : 1 — максимальная погрешность, 2 — средняя на размере акустической антенны

Рекомендуемая руководящими документами [1] максимально (2 раза) допустимая относительная чувствительность акустических каналов составляет 6 дБ. При этом максимальная погрешность достигает 300 мм, а средняя по объекту — 160 мм. Значительный разброс чувствительностей (более 10 дБ) приводит к недопустимо большой неопределенности области локализации дефекта, сравнимой с протяженностью контролируемой зоны объекта.

При изменении размеров акустической антенны с сохранением масштаба пропорционально увеличивается абсолютная погрешность. Для характеристики точности измерений допустимо использовать приведенную погрешность координаты источника АЭ с нормирующим значением, равным соответствующему размеру акустической антенны. В рассмотренном случае контроля продольной балки моста максимальная приведенная погрешность составляет $\gamma_{пр} = 13\%$ (средняя 7 %).

Для акустико-эмиссионного контроля протяженных в одном направлении объектов, таких как несущие элементы мостовых конструкций, трубопроводы, применяют прямоугольную акустическую антенну. Один размер антенны обычно связан с шириной или высотой конструкции. Второй размер задается на основании оценки погрешности координат источников.

Приведенная погрешность координаты x уменьшается при увеличении размера акустической антенны в направлении оси x . Когда отношение сторон акустической антенны превышает единицу, зависимость погрешности от длины стороны составляет от 5 до 7 % (рис. 5).

Анализ основных влияющих факторов позволил разработать математическую модель и предложить способ определения пространственного распределения погрешности координат источников АЭ. Установлены зависимости погрешности от основных влияющих факторов: относительной чувствительности акустико-эмиссионных каналов, размеров акустической антенны, дисперсии и амплитуды импульсов АЭ.

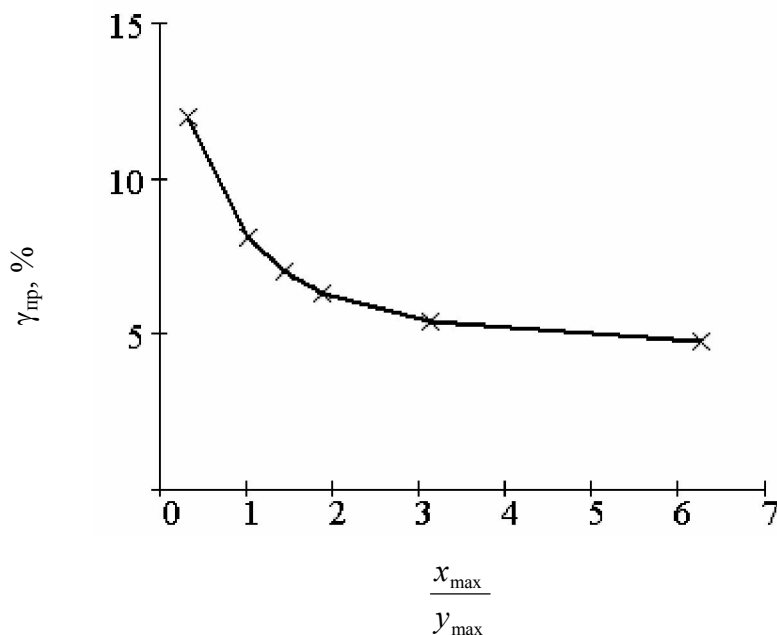


Рис. 5. Зависимость приведенной погрешности координаты источника — x от отношения высоты $y_{\max}$ на длину $x_{\max}$ акустической антенны

Моделирование акустической антенны (2,3×1,6 м) для продольной балки железнодорожного моста дало возможность определить величину средней приведенной погрешности 7 % (13 %). Полученные результаты исследования использованы для разработки инструкции контроля продольных несущих балок пролетных строений железнодорожного моста.

Литература

1. Система неразрушающего контроля. Метод акустической эмиссии. Сб. документов. Сер. 28. Вып. 2 / Кол. авт. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности и промышленности Госгортехнадзора России», 2001. 220 с.
2. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др.; Под ред. Л.Н. Степановой, В.В. Муравьева. М., 2004. 368 с.
3. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Применение новой методики обработки сигналов для повышения точности локализации источников АЭ // Дефектоскопия. 2002. № 8. С. 15–28.
4. Крауткремер И., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1991. 752 с.