УДК 620.179.16

В. С. Егоров, магистрант *Р. Р. Хасанов*, аспирант E-mail: skillet2828@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Методика расчета коэффициента отражения с учетом физических свойств объекта контроля

Предложена методика расчета коэффициента отражения с учетом отличий физических свойств композитной арматуры и искусственного отражателя. Рассчитано максимальное значение коэффициента отражения в зависимости от геометрических размеров искусственного отражателя и объекта контроля. Рассмотрено отличие между подходами расчета коэффициента отражения в зависимости от свойств искусственного отражателя.

*Ключевые слова:* композитная арматура, волноводный метод, акустический контроль, коэффициент отражения, линейно-протяженный объект, искусственный отражатель.

### Введение

Развитие строительного рынка привело к активному внедрению новых материалов в процесс армирования бетонных сооружений. Одним из таких материалов стала композитная арматура, представленная неметаллическими стержнями из углеродных, базальтовых, стеклянных или армидных волокон, пропитанных полимерным связующим. Новизна материала является причиной недостаточного количества методик неразрушающего контроля. В связи с тем, что арматура является линейнопротяженным объектом, длина волны в котором многократно превышает его поперечные размеры, проведение неразрушающего контроля представляется возможным с помощью волноводного акустического метода [1-7]. Для повышения точности контроля производится настройка аппаратуры. Одним из способов калибровки акустического дефектоскопа является его настройка по стандартным образцам [8], и для реализации волноводного контроля композитной арматуры можно использовать тот же подход, настраивая аппаратуру по настроечному образцу с дефектом. Целью данной работы является разработка методики расчета одного из важнейших параметров волноводного акустического контроля – коэффициента отражения. Коэффициент отражения позволяет описать распространение стержневой волны в волноводе и оценить

<sup>©</sup> Егоров В. С., Хасанов Р. Р., 2020

уровень сигнала от искусственного отражателя. По его рассчитанным значениям можно найти такие значения геометрических и физикотехнических параметров, при которых амплитуда этого сигнала будет максимальной [9–12]. Настроечный образец представляет собой пруток композитной арматуры с нанесенным на поверхность искусственным отражателем. Его геометрические размеры, такие как высота и длина, будут непосредственным образом влиять на амплитуду акустического сигнала. Для удобства исполнения, искусственный отражатель в поперечном сечении имеет форму прямоугольника на круглом сечении. На рисунке представлен внешний вид нанесенного дефекта (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид искусственного отражателя: h – высота искусственного отражателя, D – диаметр объекта контроля, L – протяженность искусственного отражателя

## Коэффициент отражения

В ходе распространения акустического импульса по волноводу, наблюдается потеря энергии волны, обусловленная ее отражением от дефекта и неоднородностей непосредственно в объекте контроля [13]. Коэффициент отражения формируется из отношения интенсивности отраженного акустического импульса к интенсивности волны, падающей на границу раздела, между объектом контроля и дефектом. Он зависит от акустических волновых сопротивлений сред [14]. Расчет коэффициентов отражения и прохождения осложняется тем, что искусственный отражатель отличается по плотности и скорости стержневой волны от объекта контроля [15]. В связи с этим необходим вывод этих формул.

Объект контроля с нанесенным на поверхность искусственным отражателем можно рассматривать как систему, состоящую из 3 частей (рис. 2):



Рис. 2. Распределение зон изменения коэффициента отражения в объекте контроля: 1, 2, 3 – зоны изменения коэффициента отражения и прохождения, 4 – тело дефекта, 5 – тело объекта контроля, L – линейная протяженность искусственного отражателя

Так как объект контроля с искусственным отражателем является сложной системой, вывод формулы происходит для каждой зоны, в которой изменяются параметры, влияющие на коэффициент отражения.

Значения коэффициента отражения при переходе из зоны 2 в зону *3* рассчитываются по формуле [16]

$$R_{23} = \frac{Z_l - S_2 \rho_2 C_2}{Z_l + S_2 \rho_2 C_2},$$
(1)

где  $Z_l$  – входной импеданс в зоне 3;  $\rho_2$  – плотность в зоне 2;  $C_2$  – скорость распространения стержневой волны в зоне 2.

Входной импеданс в зоне 2 вычисляется по формуле [16]

$$Z_l = (S_2/S)^2 * (S\rho C + i\omega M), \tag{2}$$

где  $S_2$  – площадь поперечного сечения объекта контроля и искусственного отражателя; S – площадь поперечного сечения объекта контроля;  $\rho$  – плотность объекта контроля; C – скорость стержневой волны в объекте контроля; i – мнимая единица;  $\omega$  – циклическая частота; M – присоединенная масса.

Так как значения площади поперечного сечения зоны 2 и 3 не сильно различаются, присоединенной массой можно пренебречь. В связи с этим формула для входного импеданса в зону 2 принимает вид:

$$Z_l = \frac{S_2^2 * \rho * C}{S}.$$

(2)

Импеданс на входе в зону 2 рассчитывается по подобию с входным импедансом в плоский слой между двумя плоскостями [16]:

$$Z_{\text{BX2}} = \rho_2 C_2 S_2 * \frac{e^{-ikl} + R_{23} * e^{ikl}}{e^{-ikl} - R_{23} * e^{ikl'}}$$
(4)

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны; l – линейная протяженность дефекта.

Комплексная экспонента может быть расписана как

$$e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x). \tag{5}$$

Зная это, формула (4) принимает следующий вид:

$$Z_{\text{BX2}} = \rho_2 C_2 S_2 * \frac{\cos(kl) - i\sin(kl) + R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}{\cos(kl) - i\sin(kl) - R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}.$$
 (6)

Соответственно акустический импеданс рассчитывается как:

$$Z_{a BX2} = \frac{\rho_2 C_2}{S_2} * \frac{\cos(kl) - i\sin(kl) + R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}{\cos(kl) - i\sin(kl) - R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}.$$
 (7)

Произведение волнового числа может быть расписано как

$$kl = \frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{2\pi f l}{C} = \frac{\omega l}{C},\tag{8}$$

где  $\omega$  – круговая частота; *С* – скорость распространения стержневой волны в зонах 1 и 3.

Коэффициент отражения при прохождении волны из зоны 1 в зону 2 вычисляется по входному импедансу в эту зону 2 и механическому импедансу в зоне 1:

$$R = R_{12} = \frac{Z_{a BX2} - (\rho c/S)}{Z_{a BX2} + (\rho c/S)}.$$
(9)

При условии идентичности материалов объекта контроля и искусственного отражателя формула (9) принимает вид:

$$R = \frac{\cos(kl) (1 - S_{31}) + i\sin(kl)(S_{21} - S_{32})}{\cos(kl) (1 + S_{31}) - i\sin(kl)(S_{21} + S_{32})},$$
(10)

где  $S_{31} = S_3/S_1 = 1$  (площадь поперечного сечения зоны 1 и зоны 3 одинакова),  $S_{21} = S_2/S$ ,  $S_{32} = S/S_2$ .

Взяв модуль комплексного числа, формула для коэффициента отражения принимает вид:

$$R = \frac{\frac{S_2^2 - S^2}{S * S_2} * \sin(kl)}{\sqrt{4(\cos(kl))^2 + \sin(kl)^2 * \frac{(S_2^2 + S^2)^2}{S^2 S_2^2}}},$$
(11)

.....

$$R = \frac{(S_2^2 - S^2) * \sin\left(\frac{\omega l}{C}\right)}{\sqrt{4(\cos\left(\frac{\omega l}{C}\right))^2 * S^2 S_2^2 + \sin\left(\frac{\omega l}{C}\right)^2 * (S_2^2 + S^2)^2}}.$$
(12)

Далее с использованием выведенных формул произведен расчет коэффициентов отражения с учетом однородности и неоднородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля. Основные геометрические и физико-технические параметры, необходимые для выполнения расчетов, представлены в таблице.

Параметр	Значение
Диапазон высот искусственного отражателя, мм	02
Линейная протяженность искусственного отражателя, мм	0120
Плотность объекта контроля, кг/м <sup>3</sup>	2170
Плотность искусственного отражателя, кг/м <sup>3</sup>	1700
Скорость стержневой волны в объекте контроля. м/с	5034

#### Основные геометрические и физико-технические параметры

# Влияние параметров искусственного отражателя на коэффициент отражения

Используя полученные ранее формулы, построена частотная зависимость коэффициента отражения из учета физических свойств искусственного отражателя и объекта контроля. При этом диаметр прутка составлял 8 мм, высота дефекта 1 мм, длина дефекта 40 мм. Также получена зависимость коэффициента отражения от линейной протяженности дефекта при различных значениях высот (рис. 3).

Частотная характеристика коэффициента отражения является периодической функцией. Пиковые значения коэффициентов, заданных одинаковыми и разными материалами искусственного отражателя, по частотной оси совпадают и наблюдаются через каждые 487 кГц. При этом максимальное значение коэффициента отражения из учета неоднородности материала в 1,09 раза больше, нежели при условии идентичности физических свойств дефекта и объекта контроля.



Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения R(f) от частоты f: a – частотная зависимость коэффициента отражения при однородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля;  $\delta$  – зависимость коэффициента отражения R(L) от протяженности искусственного отражателя при разных высотах h

При увеличении протяженности искусственного отражателя увеличивается и максимальное значение коэффициента отражения. Заметное возрастание значений коэффициента отражения наблюдается при значениях длины дефекта от 0 до 13 мм. В дальнейшем максимум отражения меняется незначительно, что говорит о постоянстве функции. Так же при увеличении высоты искусственного отражателя заменто увеличиваются и значения коэффициента отражения.

В расчете коэффициента отражения учитываются геометрические размеры искусственного отражателя. На рис. 4 представлено соотношение максимальных значений коэффициента отражения R(h) (из учета однородности и неоднородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля) от перепада сечения при изменении высоты искусственного отражателя.



Рис. 4. Отношение максимумов коэффициентов отражения при условии однородности и неоднородности материала и прирост площади в зависимости от высоты искусственного отражателя: dS/S(h) – прирост площади, R<sub>1</sub>(h) – максимум коэффициента отражения с учетом неоднородности искусственного отражателя и объекта контроля, R<sub>2</sub>(h) – максимум коэффициента отражения с учетом однородности материалов

Максимальные значения коэффициента отражения  $R_1(h)$  в зоне малых высот искусственного отражателя h совпадают со значениями прироста площади ds/S(h), тогда как максимум коэффициента отражения идентичных материалов меньше на 1,17 %. С увеличением высоты искусственного отражателя растет расхождение максимальных значений коэффициента отражения  $R_1(h)$  и  $R_2(h)$  относительно прироста площади: 6,69 % и 9,58 % соответственно.

### Выводы

По результатам работы можно сделать вывод о поведении коэффициента отражения в зависимости от параметров объекта контроля. Так, подобрав значения геометрических и физико-технических параметров, можно добиться максимального значения отражения от искусственного отражателя, что позволит настроить дефектоскоп на отбраковку дефектных образцов по выбранному значению уровня дефекта относительно амплитуды донного импульса. Работа выполнена в рамках проекта №FZZN-2020-0011 (Исследование динамики и разработка алгоритмов управления мобильных роботов) по Государственному заданию Министерства образования и науки.

### Список литературы

1. Пат. 2688877 RU, МПК G01N 29/04(2006.01), С1. Способ определения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов : № 2018117638 : заявл. 1105. 2018 : опубл. 22.05.2019 / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов.

2. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88. – DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.

3. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры / А. В. Бучкин, В. Ф. Степанова, В. А. Стрижак, Е. Ю. Юрин, Е. И. Никишов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 1 (24). – С. 23–35.

4. Влияние водопоглощения на скорость распространения нормальных волн в композитной арматуре / О. В. Муравьева, Р. Р. Хасанов, В. А. Стрижак, С. С. Мкртчан, М. В. Сяктерев // SIBTEST – 2019 : сб. тез. докл. V Междунар. конф. по инновациям в неразрушающем контроле. – Томск, 2019. – С. 67–68.

5. Water absorption effect on the propagation velocity of normal waves in composite rebars / O. V. Muravieva, R. R. Khasanov, V. A. Strizhak, S. S. Mkrtchyan // Materials Science Forum. -2019. - T. 970. - Pp. 202-209.

6. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.

7. Импульсный метод измерения скорости ультразвука / Г. А. Буденков, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Г. А. Полянкин, Я. Ю. Коршунов, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 3–8.

8. *Клюев, В. В.* Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Т. 3 / В. В. Клюев, И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – Москва : Машинстроение, 2004. – 864 с.

9. Михайлов, С. Е. Особенности расчета информативных параметров для волноводного метода акустического контроля / С. Е. Михайлов, В. А. Стрижак, С. С. Мкртчян // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 259–265.

10. *Муравьева, О. В.* Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. С. 41–49. 11. Буденков, Г. А. Акустика затрубного пространства добывающих и нагнетательных скважин / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 3–10.

12. *Муравьева, О. В.* Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2017. – № 3. – С. 27–34.

13. Лебедева, Т. Н. Разработка методов акустического контроля прутков из инструментальной стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. – Ижевск : Изд-во СО РАН, 2004. – 20 с.

14. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

15. Стрижак, В. А. Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. С. 5–15.

16. Акустика в задачах : учеб. рук-во для вузов / под ред. С. Н. Гурбатова и О. В. Руденко. – Москва : Наука. Физматлит, 1996. – 336 с.

V. S. Egorov, magister student R. R. Khasanov, postgraduate student E-mail: skillet2828@mail.ru Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

# Method for Calculating the Reflection Coefficient Taking into Account the Physical Properties of the Test Object

A method for calculating the reflection coefficient is proposed, taking into account the differences in the physical properties of composite reinforcement and artificial reflectors. The maximum value of the reflection coefficient is calculated depending on the geometric dimensions of the artificial reflector and the object of testing. The difference between the approaches for calculating the reflection coefficient depending on the properties of an artificial reflector is considered.

*Keywords:* composite reinforcement, waveguide method, acoustic testing reflection coefficient, linear-extended objects, artificial reflector.