

Моделирование физических процессов взаимодействия ультразвуковой волны с металлическими конструкциями для выявления дефектов

А.А. Можайко^{1,2}, С.А. Маннинен¹, В.В. Давыдов^{2,3}, В.Ю. Рудь³

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», ул. Шпалерная 49, Санкт-Петербург, Россия, 191015

²Высшая школа прикладной физики и космических технологий, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, ул. Институт 5а, Московская область, Большие Вязёмы, Россия, 143050

Аннотация. В статье рассмотрены особенности моделирования физических процессов взаимодействия ультразвуковой волны с металлическими конструкциями. Разработана математическая модель для расчёта акустического поля единичного элемента 32-х элементной электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки поперечных волн с вертикальной поляризацией. Проведено компьютерное моделирование процесса отражения ультразвукового пучка от дефекта. Разработана модель, позволяющая исследовать влияние формы, размера, местоположения дефектов в пластине, а также геометрических параметров пластины, на формирование отраженного сигнала.

1. Введение

В настоящее время важной актуальной задачей является своевременная диагностика повреждений в труднодоступных сварных соединениях различных металлических конструкциях (например, трубопроводы, балки и т.д.). Наибольшая сложность возникает с обнаружением внутренних дефектов, по причине того, что они находятся внутри металлических конструкций, и не доступны для визуального контроля. Для выявления данных дефектов применяются различные методы [1, 2]. Наибольшее предпочтение отдается методам неразрушающего контроля, которые также используются в различных областях [1-6] для диагностики состояния различных материалов. К таким методам относят: ультразвуковой (УЗ), радиоволновый, магнитный, тепловой, вихревых токов, электрический, радиационный и капиллярный.

Не все из этих методов позволяют проводить дефектоскопию на больших высотах и в труднодоступных местах. Один из методов, который позволяет это делать – это ЭМА-метод с использованием электромагнитно-акустических фазированных антенных решеток (ФАР). В настоящее время ФАР активно применяются в различных областях науки и техники [7-10], где доказали свою необходимость.

Суть данного метода заключается в появлении силы Лоренца при взаимодействии постоянного магнитного поля с вихревыми токами, которые индуцируются в металле

контролируемого объекта при прохождении через катушку индуктивности переменного тока. Сила Лоренца генерирует ультразвуковые колебания в объекте [11, 12].

Наиболее целесообразным решением при проведении диагностики сварных соединений и металлических конструкций будет использование 32-х элементной электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки. В качестве элементов решетки будут использованы катушки с током. В настоящей работе исследуются SV-волны, так как они не требуют создания сложных многополюсных магнитных систем и катушек со сложной топологией и им присущи все достоинства SH-волн [13].

Компьютерное моделирование играет важную роль при разработке фазированных антенных решеток. На этапе проектирования можно выявить недостатки конструкции преобразователей и определить закономерности взаимодействия ультразвуковых волн с дефектами различного типа [14]. Это значительно экономит временные ресурсы и уменьшает затраты на конструирование.

Эффективным способом расчета акустических полей ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток является моделирование методом конечных элементов. Одной из наиболее функциональных и перспективных программных сред для моделирования физических процессов является среда COMSOL Multiphysics. Данная программная среда позволяет рассчитывать электрические, магнитные, электромагнитные и акустические поля, что в целом дает возможность комплексного моделирования ЭМА преобразователя [15-17].

2. Конструкция фазированной антенной решетки

Основными достоинствами многоэлементных преобразователей на ФАР являются возможность контроля различных деталей в труднодоступных местах и возможность электронного управления углом ввода и фокусировкой УЗ в выбранную зону, за счет чего происходит облучение и прием эхосигналов под разными ракурсами к несплошности, что позволяет узнать точную информацию о форме и размерах дефекта.

Однако УЗ контроль с использованием ФАР преобразователей довольно медленно внедряется в современные технологии из-за сложной конструкции преобразователя, высокой стоимости и более низкой (по сравнению с одноэлементными преобразователями) надежности [18].

ФАР представляет собой набор точечных источников, которые возбуждают сигналы с определенным запаздыванием относительно соседнего источника. В зависимости от величины запаздывания изменяется угол фокусировки УЗ-пучка (от всех источников) [19, 20].

Временные задержки dt_i при фокусировке луча на угол α вычисляются следующим образом:

$$dt_i = \frac{10^3 dr_i}{c_t}, \quad (1)$$

$$dr_i = \sqrt{(x + (n - 1)d)^2 + h^2} - \sqrt{(x + (i - 1)d)^2 + h^2}, \quad (2)$$

$$x = htg(\alpha) - \left(\frac{n}{2} - 0,5\right) d, \quad (3)$$

где n – число элементов ФАР; d – расстояние между элементами; h – глубина фокусировки; α – угол фокусировки; dr_i – расстояние от i -го элемента до окружности радиуса $\sqrt{(x + nd)^2 + h^2}$ с центром в точке фокусировки; c_t – скорость распространения поперечной волны.

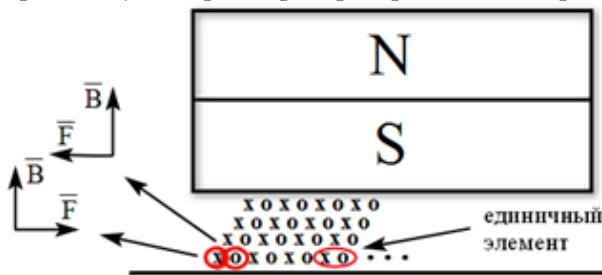


Рисунок 1. Конструкция 32-х элементной электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки SV-волн.

Для расчета акустического поля 32-х элементной электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки SV-волн используется четырехслойная катушка, состоящая из 32 петлевых элементов (по 8 элементов в каждом слое), смещенных друг относительно друга на ширину излучающего элемента в направлении по двум осям плоскости (в направлении ширины катушки смещение обнуляется каждые 4 элемента) (рисунок 1).

3. Разработка модели единичного элемента фазированной антенной решетки

Модель единичного элемента ЭМА ФАР была спроектирована в программном пакете Comsol Multiphysics 5.2 (COMSOL Inc., Massachusetts, USA), используя такие модули как: магнитные поля (Magnetic field) и механика твердого тела (Solid mechanics). Трехмерная модель состоит из постоянного магнита, витка с током и образца (рисунок 2). Модель заключена в полусферическую область диаметром 120 мм, смоделированную как воздух и окруженную границами магнитной изоляции.

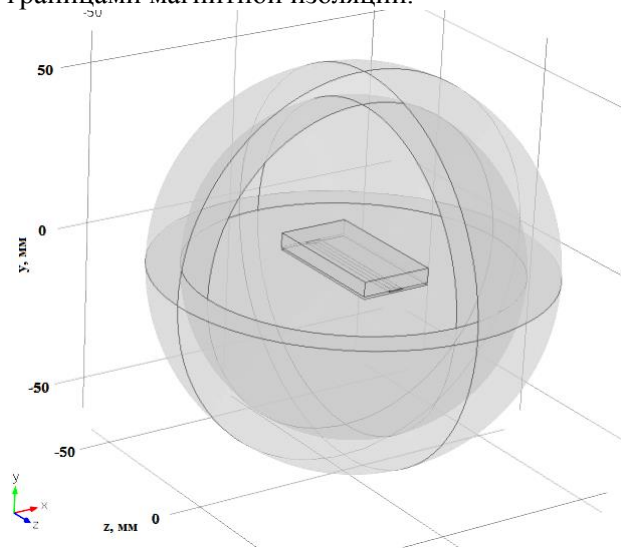


Рисунок 2. Модель для расчета акустического поля единичного элемента электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки SV-волн.

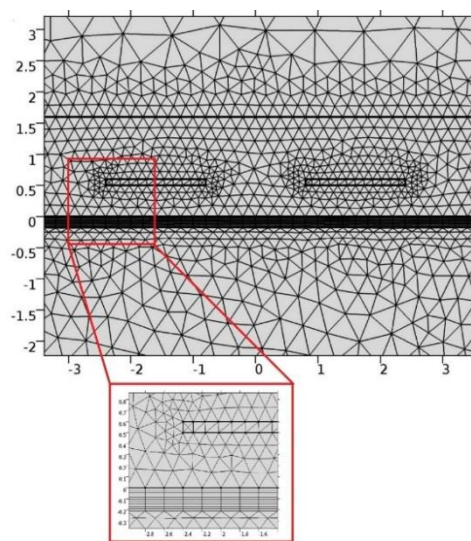


Рисунок 3. Граничный слой на границе воздух-металл.

Размеры магнита в поперечном сечении составляют $22 \times 4,5$ мм. Остаточная магнитная индукция $B_r = 1$ Тл и направлена вдоль оси y .

Ток в катушке задается по формуле

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{S} e_{coil}, \quad (4)$$

где I_{coil} – ток, протекающий в одном витке; N – число витков; S – площадь катушки; e_{coil} – единичный вектор вдоль оси катушки [21].

Для описания упругих свойств материала используются такие параметры как: плотность образца ρ , скорость поперечной волны в материале образца C_s , скорость продольной волны C_l . Основные параметры разработанной модели представлены в таблице 1.

Элементы сетки имеют треугольную форму. Переход от высокой дискретизации сетки (в центре модели) к низкой осуществляется плавно, чтобы улучшить сходимость решения. В образце максимальная длина элемента (расстояние между самыми дальними узлами) 0,5 мм. При использовании более мелкой сетки результаты изменились менее, чем на 1%. Этот размер элементов сетки был выбран как оптимальный, он обеспечивает при наименьшей скорости расчета максимальную точность. В образце на границе с воздухом построен граничный слой высотой 2,1 мм, равной толщине скин-слоя (рисунок 3). Так как в этом слое возбуждаются

вихревые токи, то для точного результата, данная область требует высокой степени дискретизации сетки.

Таблица 1. Основные параметры разработанной модели.

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Частота	f_0	1	МГц
Скорость продольной волны	C_l	5905	м/с
Скорость поперечной волны	C_s	3200	м/с
Плотность	ρ	7810	кг/м ³
Длина волны	λ	3,2	мм
Шаг катушки	d	1,6	мм
Ширина излучающего элемента	e	0,8	мм
Диаметр провода	dr	0,1	мм
Зазор между катушкой и образцом	gap	0,5	мм
Сила тока в одном витке	I	1000	А
Количество витков	N	5	
Радиус образца	R	60	мм
Остаточная намагниченность	B_r	1	Т
Электропроводность	σ	4,032	МСм/м

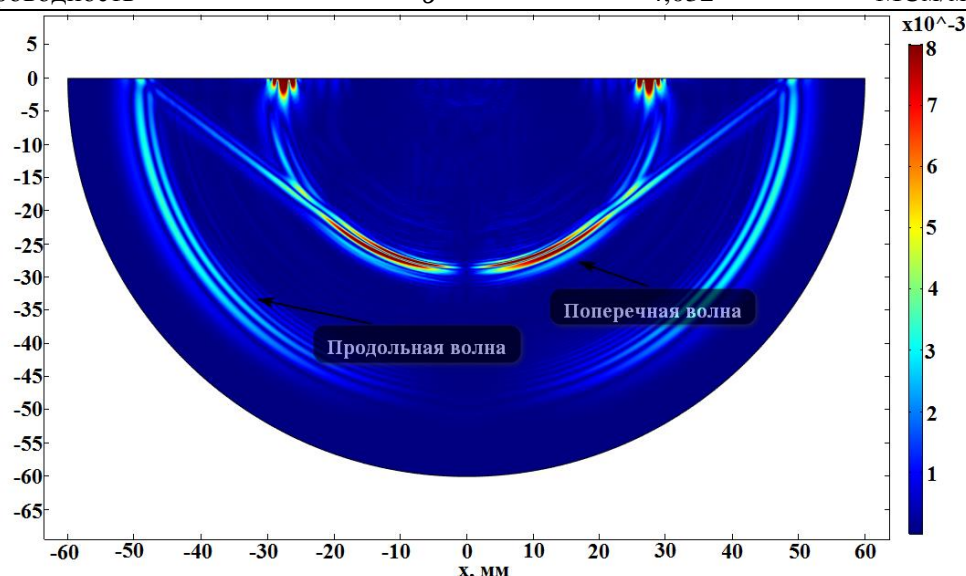


Рисунок 4. Распространение ультразвуковой волны в полусферическом образце.

На рисунке 4 представлено распространение акустической волны в стальном полусферическом образце. Здесь мы наблюдаем распространение волн трех типов: продольная волна, поперечная волна и поверхностные волны Рэлея. Поверхностные волны Рэлея распространяются только вдоль поверхности и не дают возможность исследовать дефекты внутри образца [22, 23]. Из рисунка видно, что продольные и поперечные волны имеют разную скорость и распространяются под разными углами.

4. Разработка модели взаимодействия ультразвуковой волны с дефектами

Для расчета акустического поля, отраженного от различных видов дефектов, используется модель 32-х элементной электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки SV-волн. Все модели (для различных дефектов) параметризованы, поэтому возможен расчет пластин другой толщины, в частности от 6 мм до 32 мм, и дефектов различных размеров.

При моделировании возбуждения акустической волны в качестве зондирующего импульса используется форма импульса в виде окна Хэннинга с одним периодом в импульсе (рис. 5).

Для создания касательных или нормальных смещений при возбуждении продольной и поперечной волны используется условие «заданное смещение» (Prescribed displacement). Смещения задаются формулой:

$$U = \frac{1}{2} U_0 \sin(\omega t) \left(1 - \cos\left(\frac{\omega t}{n}\right)\right) \text{rect}(f_0 t) \quad (5)$$

где U_0 – амплитуда смещений, рассчитанная при моделировании единичного элемента; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; n – количество периодов; $\text{rect}(x)$ – прямоугольная оконная функция.

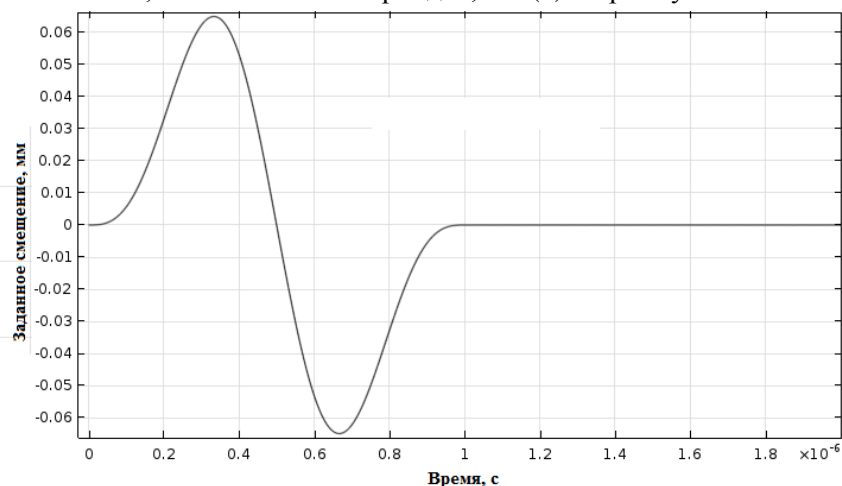


Рисунок 5. Зондирующий импульс.

При моделировании акустических полей методом конечных элементов необходимо соблюдать условия по критерию Куранта–Фридрихса–Леви, а также учитывать условие соотношения размера конечных элементов к длине волны, которое должно составлять не менее одной пятой. В любой модели, содержащей распространение акустических волн, должно выполняться следующее неравенство [15, 24]:

$$C \Delta t < \Delta x < \frac{c}{5f} \quad (6)$$

где C – скорость распространения волны; Δt – шаг дискретизации по времени; Δx – шаг дискретизации по расстоянию (максимальный размер конечных элементов).

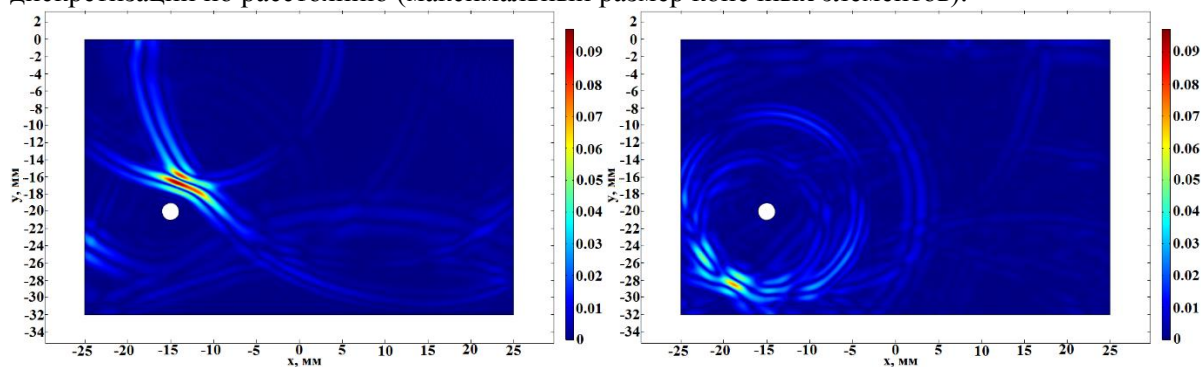


Рисунок 6. Картина распределения смещений в момент фокусировки волны (а) и в момент отражения от дефекта (б).

Элементы сетки имеют треугольную форму. В образце максимальная длина элемента (расстояние между самыми дальними узлами) 0,5 мм.

Для боковых границ пластины использовалось условие поглощения (Low-Reflecting Boundary), т.к. предполагается, что размеры пластины в двух направлениях много больше толщины. Для расчета акустического поля в пластине с дефектами, протяженными в том же направлении, что и единичные элементы ФАР (например, боковое сквозное цилиндрическое сверление) возможно использование двумерной модели. При этом акустическая волна

считается в приближении плоской деформации [12]. Данное приближение даёт возможность расчета акустической волны, отраженной от дефекта, с меньшими временными затратами.

Результаты моделирования представлены на рисунке 6. На рисунке 6 (а) представлено распространение акустической волны в пластине до отражения от дефекта, на рисунке 6 (б) соответственно после отражения от дефекта.

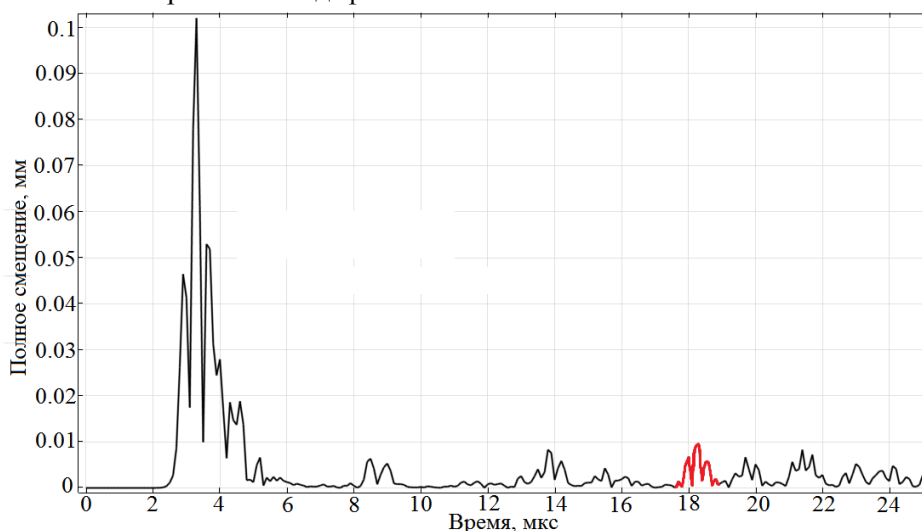


Рисунок 7. Зависимость полного смещения от времени в центре ФАР.

Построена зависимость полного смещения от времени. Из рисунков 6 и 7 видно, что сигнал, отраженный от дефекта приходит в центр ФАР через 17,5 мкс после начала излучения.

Так как скорость продольной волны больше, то она первой достигает нижней границы пластины и отражается от нее. Отраженные от дна пластины продольные волны приходят в центр решетки вместе с отраженной от дефекта волной. В тонких пластинах это в большей степени влияет на результат, чем в толстых, поскольку отраженная волна будет больше по амплитуде. Также продольные волны будут в значительной степени влиять на результат, в случае, когда дефект находится близко к границе образца. Поскольку временные задержки настроены на фокусировку поперечных волн, то возбуждаемая продольная волна будет значительно меньше по амплитуде и не будет оказывать существенного влияния на результаты.

5. Заключение

Полученные результаты моделирования физических процессов взаимодействия ультразвуковой волны с металлическими конструкциями показали, что разработанная модель, позволяет исследовать влияние формы, размеров, местоположения дефектов в пластине, а также геометрических параметров пластины, на формирование отраженного сигнала.

6. Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-29-06036).

7. Литература

- [1] Сясько, В.А. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий / В.А. Сясько, С.С. Голубев, Я.Г. Смородинский, А.И. Потапов, Н.И. Смирнова // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 25-36.
- [2] Потапов, Ф.И. Низкочастотные ультразвуковые широкополосные преобразователи для контроля изделий из крупноконструктурных и композиционных материалов / А.И. Потапов, В.Е. Поляков, В.А. Сясько, А.А. Попов, П.В. Курьянова // Дефектоскопия. – 2015. – № 6. – С. 15-31.

- [3] Давыдов, В.В. Бесконтактный метод дефектоскопии внутренних стенок трубопровода / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин, С.Е. Логунов, В.Б. Фадеенко // Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 70-76.
- [4] Давыдов, В.В. Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости / В.В. Давыдов, С.В. Кружалов, Н.М. Гребеникова, К.Я. Смирнов // Измерительная техника. – 2018. – № 4. – С. 33-39.
- [5] Baranov, M.A. Methods of non-destructive testing in studies of self-organization processes in protein films / M.A. Baranov, E.N. Velichko, E.T. Aksenov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917(6). – P. 062059.
- [6] Savchenko, E.A. Registration of fluorescence in biomolecular solutions using dynamic pin photodiode / E.A. Savchenko, E.K. Nepomnyashchaya, D.B. Dyubo, E.N. Velichko, O.Y. Tsybin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917(4). – P. 042010.
- [7] Smirnov, A. Polarization Direction Finding Method of Interfering Radio Emission Sources / A. Simonov, G. Fokin, V. Sevidov, M. Sivers, S. Dvornikov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11660. – P. 208-219.
- [8] Fokin, G. Algorithm for Positioning in Non-line-of-Sight Conditions Using Unmanned Aerial Vehicles Unmanned Aerial Vehicles / G. Fokin, A.-O.A.H. Ali // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 11118. – P. 496-508.
- [9] Davydov, R.V. Fiber-optic transmission system for the testing of active phased antenna arrays in anechoic chamber / R.V. Davydov, I.V. Saveliev, V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, T.R. Yalunina, V.V. Davydov, V.Yu. Rud' // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – Vol. 10531. – P. 177-183.
- [10] Podstrigaev, A.S. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the Frequency Range / A.S. Podstrigaev, A.V. Smolyakov, V.V. Davydov, N.S. Myazin, M.G. Slobodyan // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 11118. – P. 509-515.
- [11] Isla, J. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection / J. Isla, F. Cegla // Ultrasonics. – 2017. – Vol. 78. – P. 1-9.
- [12] Drinkwater, B.W. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review / B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox // Ndt & E Int. – 2006. – Vol. 39(7). – P. 525-541.
- [13] Базылев, Д.Н. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки / Д.Н. Базылев, В.А. Романович, С.Н. Сомов, А.А. Пыркин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 12. – С. 1060-1066.
- [14] Yu, X. Shear horizontal feature guided ultrasonic waves in plate structures with 90 transverse bends // Ultrasonics. – 2016. – Vol. 65. – P. 370-379.
- [15] Мышкин, Ю.В. Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю.В. Мышкин, К.В. Петров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции, Могилев, 19-20 сентября 2017 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 519-529.
- [16] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [17] Маннинен, С.А. Создание трехмерной модели намагниченного участка трубопровода для внутритрубной магнитной дефектоскопии / С.А. Маннинен, П.А. Кузнецов // Измерительная техника. – 2016. – № 8. – С. 52-54.

- [18] Кузнецов, П.А. Экспериментальная проверка расчетной модели намагниченного участка трубопровода с искусственными дефектами / П.А. Кузнецов, С.А. Маннинен, А.А. Жумагалиева // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 52-54.
- [19] Васильев, А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А.Н. Васильев, Ю.П. Гайдуков – М.: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.
- [20] Валеско, Д. Как автоматизировать проектирование обмоток в электрических машинах с использованием приложения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/how-to-automate-winding-design-in-electrical-machines-with-an-app/> (11.09.2019).
- [21] Ушаков, В.М. Неразрушающий контроль и диагностика горно-шахтного и нефтегазового оборудования – М.: Горная книга, 2014. – 318 с.
- [22] Фрей, В. Как моделировать проводники в переменных магнитных полях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/how-to-model-conductors-in-time-varying-magnetic-fields/> (21.10.2019).
- [23] Wang, S. Numerical and experimental analysis of unidirectional meander-line coil electromagnetic acoustic transducers / S. Wang, R. Su, X. Chen, L. Kang, G. Zhai // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2013. – Vol. 60(12). – P. 2657-2664.
- [24] Jian, X. A model for pulsed Rayleigh wave and optimal EMAT design / X. Jian, S. Dixon, K.T. V. Grattan, R.S. Edwards // Sens. Actuators A. – 2006. – Vol. 128(2). – P. 296-304.
- [25] Курант, Р. О разностных уравнениях математической физики / Р. Курант, К.О. Фридрихс, Г. Леви // Успехи математических наук. – 1941. – № 8. – С. 125-160.

Modeling of physical processes of interaction of ultrasonic wave with metal structures for detection of defects

A.A. Mozhayko^{1,2}, S.A. Manninen¹, V.V. Davydov^{2,3}, V.Yu. Rud³

¹NRC "Kurchatov institute" – CRISM "Prometey", st. Shpalernay 49, St. Petersburg, Russia, 191015

²Higher School of applied physics and space technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

³Russian Research Institute for Phytopathology, Institut str. 5, Moscow Region, B. Vyazyomy, Russia, 143050

Abstract. In the article the features of modeling the physical processes of the interaction of an ultrasonic wave with metal structures are considered. A mathematical model for calculating the acoustic field of a single element of a 32-element electromagnetic-acoustic phased array of SV-waves is developed. A computer simulation of the process of reflection of the ultrasonic beam from a defect is carried out. The developed model allows to study the influence of the shape, size, location of defects in the plate, as well as the geometric parameters of the plate, on the formation of the reflected signal.