

and I.V. Tyupa. "Vihretokovyyiy dvuhparametrovyyiy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskikh izdeliy". *Vestnik NTU "KhPI"*. No. 5. 2004. 93-99. Print. 4. Moskalenko I. I., V. P. Sebko and B. M. Gorkunov. "Transformatornyiy elektromagnitnyiy preobrazovatel fiziko-mehaniicheskikh velichin". *Netraditsionnyie elektromehaniicheskie i elektricheskie sistemy: konf.* Alushta. 1997. 1173-1176. Print. 5. Gorkunov B. M. "Vyibor ratsionalnogo metoda vihretokovogo kontrolya nemagnitnyih metalliicheskikh izdeliy". *TehnIchna elektrodinamika, tematiichnyy vipusk "Silova elektronika ta energoefektivnIst.* Vol. 4. 2006. 57-60. Print.

Поступила (received) 27.04.2015

УДК 620.179.16

Е. Л. НОЗДРАЧЕВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ СОЗДАНИЯ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ (ОБЗОР)

В работе проанализированы способы и средства ультразвукового неразрушающего контроля емкостным бесконтактным методом. Описаны преимущества, недостатки, возможности и условия применения емкостного метода ультразвукового контроля. Установлена перспективность применения емкостного метода, описан принцип работы. Рассмотрены емкостные преобразователи и направления их применения, исследования их возможностей по сравнению с другими.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, емкостной преобразователь, электрод, электрическое поле, объект контроля, бесконтактный.

Введение. При производстве металлоизделий на предприятиях различных отраслей промышленности, и изделий, находящихся в эксплуатации широко применяют различные методы и средства неразрушающего контроля, позволяющие проверять качество продукции без дальнейшего нарушения ее пригодности к использованию по назначению [1].

Наиболее распространенным методом неразрушающего контроля является акустический, который позволяет обнаруживать не только макроскопические дефекты в металлах, но и определять их структуру. Автоматизация процессов акустического контроля повысила его производительность и качество технологии производства.

Актуальность темы. Повышение требований к качеству промышленной продукции обусловило интенсивное развитие средств ультразвукового контроля материалов и изделий, основу которых составляют приборы, которые реализуют контактный метод ультразвукового контроля (то есть с использованием контактной жидкости). При-

© Е. Л. Ноздрачева, 2015

менение данного метода не достаточно эффективно при некоторых условиях производства и эксплуатации продукции. Например, при контроле изделий с загрязненной, корродированной поверхностью или с покрытиями (краска, полимерные пленки и другие изоляционные покрытия), дефектоскопия горячих и холодных изделий, высокоскоростной контроль, дефектоскопия с низкими эксплуатационными затратами и др. Заполнить нишу возможно за счет применения приборов, не предусматривают применения контактной жидкости [2–4]. То есть приборов, которые могут эффективно контролировать качество изделий с загрязненной, корродированной поверхностью или с изоляционными покрытиями. Применение таких средств повышает производительность контроля, снижает затраты на зачистку поверхности изделий и постоянно расходуемую контактную жидкость. За счет исключения из процесса контроля контактной жидкости улучшаются экологические условия.

В настоящее время наиболее эффективно среди бесконтактных методов неразрушающего контроля реализованы средства, которые используют электромагнитно - акустический (ЭМА) способ возбуждения и приема ультразвуковых колебаний [3]. Однако, они имеют ряд ограничений в некоторых областях применения. В частности при контроле ферромагнитных материалов, из-за сильного взаимного притяжения преобразователя и изделия, налипания окалина. Низкая эффективность ЭМА преобразования для сплавов на основе меди, титана и других. Существенно влияет на результаты контроля возникновения помех в полезном сигнале от пластинок Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . При реализации данного метода применяются достаточно мощные кратковременные, которые могут приводить к быстрому выходу из строя элементов ЭМА дефектоскопа импульсы тока [2–4].

Таким образом, значительные потенциальные преимущества, с одной стороны, недостатки и сложность реализации, с другой стороны, привели к появлению важной для промышленности научной проблемы. Ее суть заключается в развитии теории и практики создания новых приборов для бесконтактного контроля, обеспечивающие обнаружение дефектов, измерения толщины и определения структурных параметров электропроводящих изделий широкого сортамента. Решение поставленной проблемы требуют: железнодорожный транспорт, объекты нефтегазовой промышленности, металлургическая промышленность, химическая промышленность – при контроле изделий пораженных коррозией, авиа и судостроения и др.

Следовательно, создание новой разновидности приборов и способов для эффективного бесконтактного ультразвукового контроля явля-

ется социально значимым, актуальным и своевременным.

Известны и другие методы возбуждения и приема ультразвуковых колебаний (УЗК) бесконтактно. Это – метод лазерного возбуждения и детектирования УЗК; метод электромагнитно-акустического контроля; пьезоэлектрические преобразователи с воздушно-акустической связью.

Среди таких методов контроля можно выделить емкостной способ ультразвукового контроля, который потенциально обладает следующими преимуществами: прежде всего бесконтактность реализации метода; высокие технические характеристики, простота изготовления и удобство в эксплуатации, а следовательно, высокая воспроизводимость технических характеристик. В известной литературе также отмечается [5–9], что этот способ имеет низкую чувствительность, и существенную сложность аппаратурной реализации, но достаточно эффективные разработки, учитывающие особенности применения емкостного способа по настоящее время – отсутствуют. Недостаточно рассмотрены теоретические вопросы метода, в результате не созданы эффективные приборы для дефектоскопии, не разработаны высокочувствительные преобразователи. Не учтены особенности метрологического обеспечения емкостных приборов ультразвукового контроля.

О возможности использования механических сил, действующих на обкладки конденсатора, подключенного одновременно к источникам постоянного и переменного электрического напряжения известно уже давно [5, 6]. Но, несмотря на широкополосность, присущую ультразвуковым (УЗ) преобразователям, основанным на этом эффекте, большого распространения они не получили. В последние годы интерес к таким преобразователям вновь возрос в связи с возможностью их применения для бесконтактного возбуждения ультразвуковых волн в твердых телах на высоких и сверхвысоких частотах.

Последние исследования, которые были направлены на определение влияния основных технических и технологических факторов, определяющих результаты контроля [10–14] показали, что данный метод потенциально может иметь достаточную чувствительность. Он реализуется в широком частотном диапазоне при возбуждении и приеме ультразвуковых колебаний. Поэтому дальнейшая разработка преобразователей данного типа является перспективной.

Емкостные приемники акустических сигналов широко известны еще с 60-х годов прошлого столетия [15–19], которые могут измерять два параметра в акустической волне : смещение и колебательную скорость. Конструктивно, они представляют собой два электрода, между которыми находится либо воздушный промежуток, либо диэлектрическая пленка.

Емкостный способ возбуждения акустических колебаний в упругой среде использует эффект воздействия на объект контроля электрическим полем [12-14]. В качестве источника поля выступает емкостный преобразователь (ЕП). Реализовать данный метод возможно в случае, если электропроводящую поверхность изделия сделать одной из обкладок конденсатора, при этом происходит притяжения пластины конденсатора 1 ЕП с изделием 3 (рис. 1), где в последнем возникают упругие колебания. Регистрацию акустических колебаний производят за счет обратного эффекта - появлении переменного электрического напряжения на обкладках ЕП при изменении расстояния h между обкладками (одна из которых - объект контроля), а следовательно и емкости конденсаторного преобразователя при обязательном наличии поляризующего напряжения.

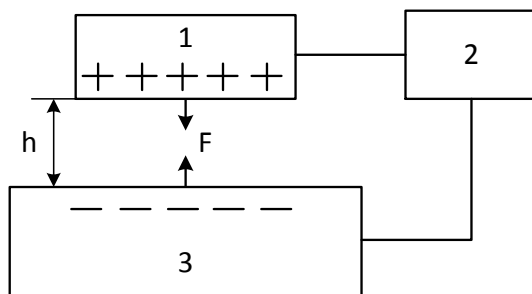


Рис. 1 – Упрощенная схема емкостного преобразователя:
 1 – электрод конденсаторного преобразователя; 2 – генератор переменного напряжения; h – толщина слоя; F – сила, действующая между обкладками ЕП 1 и электропроводящим изделием 3

При разноименных зарядах на обкладках конденсатора пластина 1 и изделие 3 притягиваются. Максимум сила притяжения достигается дважды за один период колебаний переменного напряжения высокой частоты. Следовательно, возникает эффект удвоения частоты акустических колебаний. Для исключения эффекта удвоения и повышение коэффициента преобразования электрической энергии в акустическую одновременно на электрод 1 подают постоянное поляризующее напряжение [12].

На основе емкостного метода в известной литературе было разработано много вариаций бесконтактных широкополосных датчиков и макетов лабораторных установок на основе емкостного способа, поз-

воляющих проводить исследования в таком направлении ультразвукового неразрушающего контроля как структуроскопия. Работы [12-14] были направлены на совершенствования реализации метода, но разработок в области дефектоскопии и толщинометрии не было.

Например, в работе [15] описан метод емкостного датчика, предназначенного для непрерывной регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности, который позволяет исследовать параметры упругих волн в металлах. При этом, точность, которую можно получить при записи скорости оценивают в 3-5 %, что связано с низким уровнем принимаемого сигнала, а, следовательно, с недостаточно высокой помехоустойчивостью метода.

На основе емкостного способа была разработана методика [20] для проведения измерений на большом гравитационном детекторе. Установка реализована на основе емкостного датчика, позволяющего регистрировать акустические колебания твердого тела с амплитудой $5 \cdot 10^{-14}$ см в диапазоне частот около 4 кГц. Конструкция датчика и объекта исследования достаточно сложная, так как рабочие поверхности должны быть отполированы до $\pm 0,5$ мк и зазор рабочей емкости не должен превышать 1 мк, для чего на внутреннем конце одного из стержней емкостного датчика укреплялась обмотка электрического нагревателя, увеличение температуры стержня приводило к уменьшению зазора. Подстройка такого плана достаточно трудоемкая в реализации.

В более ранних экспериментальных исследованиях емкостных преобразователей использовались кварцевые пластинки или пластинки из пьезокерамики, обладающие резонансными свойствами и требующие акустического контакта [21, 22].

С целью более полного определения параметров пьезопреобразователей авторами [22] были разработаны установки, в которых в качестве приемников и излучателей использовались электродинамический и емкостной преобразователи. Методика реализации электродинамического приемника ультразвуковых колебаний (УЗК) заключается в следующем – на грань образца, выполненного из материала с малым затуханием УЗК, наносится тонкая металлическая пленка. При вводе УЗК с противоположной грани на концах проводника, находящимся в магнитном поле, развивается ЭДС. Данные установки позволяли определить чувствительность датчиков ультразвуковой дефектоскопической аппаратуры, как в режиме передачи, так и в режиме приема, причем в последнем случае в качестве приемного элемента использовался исследуемый датчик, а излучателем служил электродинамический либо емкостной преобразователь. Но так как электродинамический метод и

установка, его реализующая, имеет недостаточную чувствительность, что требует применения дополнительных усилительных устройств. Кроме того громоздкость магнитной установки с достаточно сильным магнитным полем, что ограничивало и затрудняло подбор широкополосного усилителя из-за низкочастотных электрических наводок на приемных от схемы питания магнита, то применение емкостного преобразователя (рис. 2 а, б) оказалось более целесообразно и удобно, который применялся для абсолютных измерений интенсивности ультразвуковых сигналов.

На рис. 2 а приведена конструкция емкостного приемника. Электрод 1 вместе с металлизированной поверхностью образца 2 создает конденсатор, который принимает УЗК. Для обеспечения необходимого зазора (10—20 мк) электрод 1, выполненный в виде шлифованного (с последующей полировкой) диска, прижимался к металлизированной поверхности через бумажную или полимерную пленку определенной толщины. Образец 2 представлял собой тарированный стеклянный стержень, соответствующий ГОСТ 1151–54. Одна из тарированных плоскостей была покрыта тонким слоем серебра (сначала химически, а затем гальванически). Для стабилизации акустического контакта исследуемой пьезопластины 3 со стеклянным стержнем 2 используется пружина 4. Однако влияние слоя смазки может оказаться существенным, особенно, если поверхность исследуемой пьезопластины недостаточно хорошо обработана.

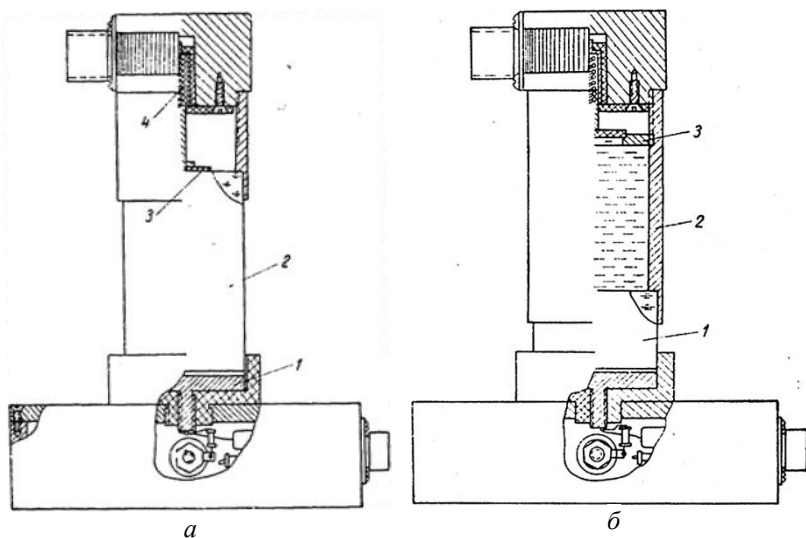


Рис 2. – Емкостной приемник [22]:
а, б – контактный и емкостной варианты соответственно

Для этих случаев использовалась конструкция емкостного приемника, показанная на рис. 2 б. Здесь исследование пьезопластины производится в иммерсионном варианте. Конструктивные особенности емкостного датчика в иммерсионном варианте незначительны. Стекланный образец 1 помещается в металлическую трубу 2, в которой находится дистиллированная вода. Пьезопластина устанавливается в оправке 3 и излучает УЗК в жидкость. Использование дополнительной переходной среды не приводит к существенным изменениям формы излученного сигнала. Ввиду достаточно большого столба жидкости и длины стержня, последние можно рассматривать как безграничные среды, что позволяет ввести не зависящую от частоты поправку, учитывающую акустические сопротивления воды и стекла.

Использование предлагаемых установок позволило калибровать преобразователи как в режиме излучения, так и приема. Недостатком схемы на основе емкостного преобразователя является подбор зазора между обкладками преобразователя и поляризующего напряжения для достижения максимального коэффициента передачи.

Так же, емкостной метод широко использовался для регистрации сигналов акустической эмиссии, длительность которых составляла 10^{-7} с [23].

Как частный случай исследования бесконтактных методов возбуждения акустических импульсов с радиочастотным заполнением в твердых телах авторами [24, 25] разработан диэлектрический преобразователь, представляющий собой диэлектрик, помещенный между плоскопараллельными проводящими электродами, одним из которых служит торец звукопровода. Причиной возникновения механических сил, действующих на звукопровод, является электростатическое притяжение обкладок под действием переменного электрического поля в диапазоне частот 30 – 1000 МГц, а при наличии акустического контакта между диэлектриком и звукопроводом также и стрикции диэлектрика, помещенного в электрическое поле. Авторами [26] разработана установка для измерения затухания ультразвуковых колебаний в твердых телах в диапазоне частот 0,16–30 МГц с широкополосными диэлектрическими преобразователями.

Отличие данного метода от емкостного заключается в том, что принимают во внимание механические напряжения, возникающие в диэлектрике за счет силы электростатического притяжения обкладок конденсатора при подаче на него одновременно высокочастотного и импульсного напряжения.

Лишь в 80-х гг. прошлого столетия А.И. Кондратьеву, А.Н. Бондаренку, В.А. Луговому и др. [27, 28] в своих исследованиях удалось в какой-то мере усовершенствовать схему емкостного преобразователя и повысить чувствительность метода. Исследования авторов были направлены на совершенствование бесконтактных методов возбуждения ультразвуковых колебаний.

В частности, в работах [29, 30] теоретически и экспериментально исследованы амплитудно-временные характеристики сигнала, излученного емкостным преобразователем с заполнением [29] и без [30]. На рис. 3 приведена блок-схема экспериментальной установки. Генератор 1 возбуждает электрические импульсы (ЭИ) прямоугольной или треугольной формы длительностью 0,04–2,0 мкс, амплитудой до 2000 В, которые посредством ЕП 2–4 преобразуются в упругие. Возбуждающий электрод 2 диаметром 10 мм через слюдяную прокладку 3 толщиной 20 мкм прижат силой ~10 Н к образцу 4 – стальной плите диаметром 60 мм и толщиной 10 мм. Упругие импульсы регистрировались лазерным интерферометром 5 и осциллографом 6. Порог чувствительности регистрирующей аппаратуры составлял $0,5 \cdot 10^{-10}$ м в полосе частот 0,05–100 МГц.

В результате экспериментов было установлено, что амплитуда УИ растет пропорционально квадрату амплитуды возбуждающего ЭИ. При длительности последнего более 0,15 мкс форма упругого импульса

подобна форме электрического (под формой УИ подразумевается зависимость смещений в упругом импульсе от времени), а длительности упругого $\tau_{у,и}$ и электрического импульсов $\tau_{э,и}$ совпадают. Амплитуда УИ от $\tau_{э,и}$ не зависит. На рис. 4 показаны типичные формы электрических и соответствующих им упругих импульсов (T_3 — время задержки упругого импульса относительно электрического, равное времени распространения УИ в образце). При $\tau_{э,и} < 0,15$ мкс выполняются следующие соотношения: 1) длительность переднего фронта УИ совпадает с $\tau_{э,и}$; 2) длительность УИ (по полувысоте) не зависит от $\tau_{э,и}$ ($\tau_{э,и} < 0,1$ мкс); 3) характер изменения амплитуды УИ с уменьшением $\tau_{э,и}$ близок к линейному ($\tau_{э,и} < 0,1$ мкс).

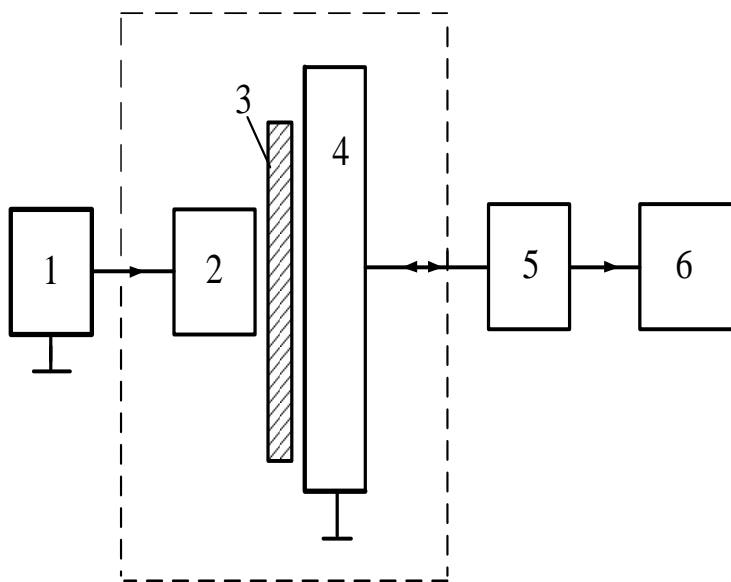


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

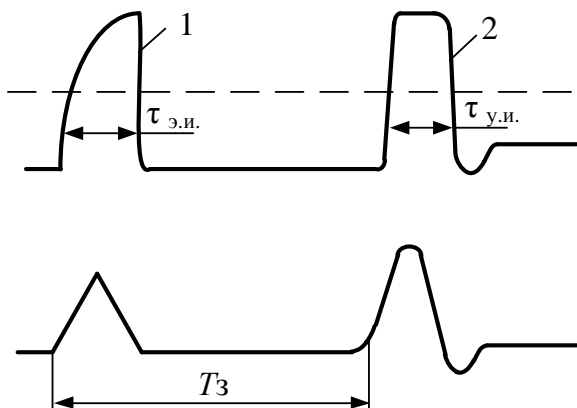


Рис. 4 – Форма электрического (1) и упругого (2) импульсов

При этом производился тщательный подбор параметров датчика и амплитуды излучаемого сигнала. Показано, что имеет место совпадение теоретических и экспериментальных результатов при и в отсутствии контакта между электродами преобразователя. Результаты проведенных исследований показали, что емкостные преобразователи могут быть использованы в качестве источника коротких упругих импульсов, причем их форму можно рассчитать, если известна форма возбуждающего электрического импульса. Результаты данных исследований могут быть весьма полезны и учтены при разработке и исследованиях емкостных преобразователей.

По результатам дальнейших исследований чувствительности емкостного преобразователя в режиме приема упругих импульсов в работе [31] приведены данные измерений акустических импульсов, возбуждаемых лазерными импульсами длительностью $3 \cdot 10^{-8}$ с в стальной пластине толщиной 1,5 см, диаметром 4 см. Измерение упругих импульсов производилось либо лазерным интерферометром, либо емкостным приемником. В данном эксперименте, из сравнения форм сигналов на выходе обоих устройств, следовало, что емкостной метод позволяет измерять короткие акустические импульсы с достаточно высокой чувствительностью, но не приведены значения амплитуд принятых импульсов.

В работе [32] описан приближенный метод расчета формы принимаемых ультразвуковых импульсов при конечных размерах зоны возбуждения. Даны результаты экспериментальных исследований,

подтверждающие теоретические. Ультразвуковой импульс возбуждался в изделии с помощью емкостного и пьезоэлектрического преобразователей. Прием осуществлялся лазерным интерферометром с достаточно высокой точностью. При этом наблюдалось хорошее качественное совпадение теории с экспериментом. При теоретических расчетах использовался метод приближения осесимметричной динамической задачи Лемба для упругого полупространства. Учитывалась длительность и действия давления пластины преобразователя на поверхность объекта контроля, что применительно к пьезоэлектрическим преобразователям, но не учитывалась влияние электрических сил для емкостного преобразователя.

При дальнейших разработках авторами был усовершенствован емкостной преобразователь и схема его реализации [33–47]. В [33] используется емкостной приемный преобразователь, в котором один из электродов изготовлен из алюминия или его сплава, а диэлектрический слой получается анодированием этого электрода, благодаря чему значительно уменьшаются такие недостатки преобразователя как накопление объемного заряда, создающего обратное поле в диэлектрике, что уменьшает чувствительность датчика во времени и не позволяет проводить долговременные эксперименты. Коэффициент преобразования $2 \cdot 10^8$ В/м; полоса воспроизводимых частот $25 - 5 \cdot 10^5$ кГц. Чтобы в полной мере реализовать возможности разработанного емкостного датчика, была разработана конструкция с самоустанавливающимся электродом, в которой устранен перекоп между образцом и электродом с диэлектрическим слоем. Экспериментальные исследования датчика на установке, приведенной в [34] показали, что его чувствительность выше на 2 порядка, чем у акустического интерферомента, и составляет $\sim 10^8$ В/м. Кроме того, доказано, что уменьшение диаметра электрода с диэлектрическим покрытием от 20 до 5 мм практически не приводит к уменьшению чувствительности. Это позволило с хорошим приближением использовать емкостной датчик как точечный приемник.

Схематический чертеж датчика представлен на рис. 5. Образец 8 из исследуемого материала устанавливается в корпус 9 и прижимается сверху накидной гайкой 10. Электрод 1 с диэлектрическим покрытием вместе с эбонитовым стаканом 2 плотно закреплен в шарнирном подшипнике 3, который впрессован в латунную втулку 4. В нижний конец втулки вворачивается латунная трубка 5, которая оканчивается разъемом 6 (СР-50-27 ОС). Электрод 1 тонким проводом соединен с разъемом 6. Винтом 7 перемещается втулка 4, а вместе с ней и электрод 1 до соприкосновения с образцом 8. При этом электрод 1, имея возможность углового перемещения $\sim 7^\circ$, устанавливается на образец без пере-

коса.

Было проведено детальное экспериментальное исследование опытного образца емкостного датчика по определению его чувствительности и полосы воспроизведения частот на установке, схематично представленной на рис. 6.

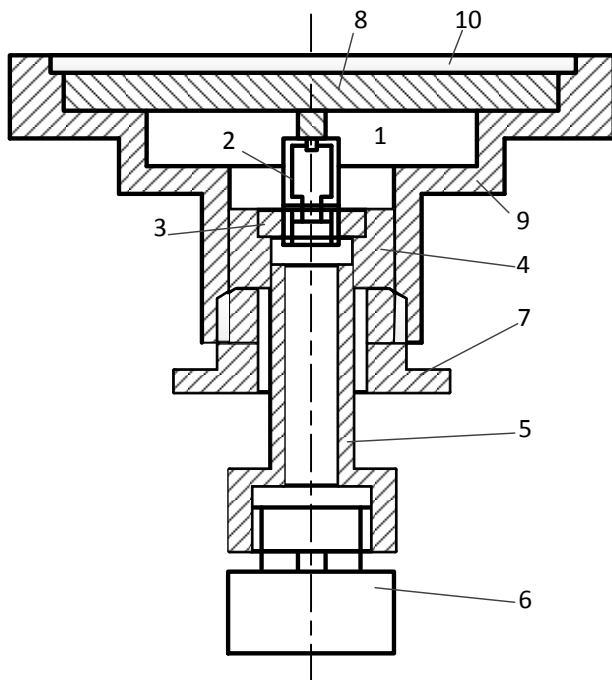


Рис. 5 – Схематический чертеж датчика [37]

Акустические импульсы в образце 3 из алюминиевого сплава Д16 толщиной 10 мм возбуждались емкостным преобразователем. Преобразователь состоит из алюминиевого электрода 1 диаметром 20 мм с диэлектрическим покрытием 2 и образца 3, являющегося вторым электродом. Источником электрического сигнала служил генератор высоковольтных импульсов, содержащий длинную линию с волновым сопротивлением r , искровой разрядник P , нагрузочное сопротивление R_n , источник постоянного тока E_0 . Зарядное сопротивление R_3 составляло 1 МОм. Амплитуда акустического сигнала на свободной поверхности

образца достигала $2 \cdot 10^{-9}$ м и контролировались оптическим интерферометром И. Исследования проводились в диапазоне частот 0,1 – 20 МГц.

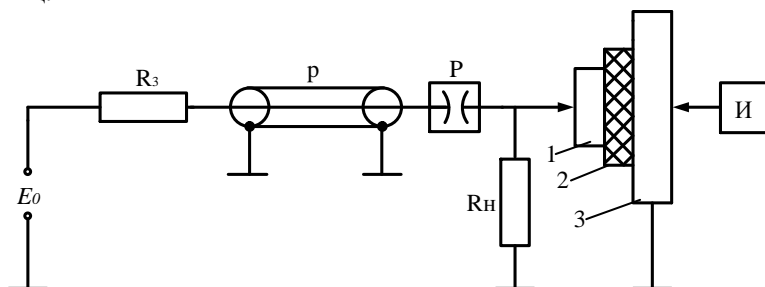


Рис. 6 – Блок-схема измерительной установки [37]

Также датчик обладал высокими эксплуатационными характеристиками, так, при нагревании электрода с диэлектрическим слоем до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ чувствительность не менялась. Датчик применялся в установке по измерению затухания в твердых телах. Но, не смотря на преимущества разработанного датчика, его конструкция довольно сложна и трудна в выполнении и настройке и не применима для ультразвукового неразрушающего контроля, так как используется в качестве точечного приемника.

В работе [35] были произведены лабораторные исследования по определению скорости продольных ультразвуковых волн в различных металлоизделиях с помощью емкостных преобразователей, применение которых позволило исключить фазовые искажения сигналов в переходных слоях между преобразователями и образцом. Отличительной особенностью данной установки являлась возможность проводить измерения скорости УЗ волн в широком диапазоне частот 1–15 МГц, а не на фиксированных, как предполагалось в то время, с относительной погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-3}$, что является хорошим показателем.

Из выбранного материала Д16Т были изготовлены образцы диаметром 100 мм, толщиной $h=10; 15; 20; 25; 30$ мм с непараллельностью и несоосностью торцов не хуже $1 \cdot 10^{-4}$ рад и $5 \cdot 10^{-7}$ м (на базе 40 мм) соответственно. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

Емкостные преобразователи 1, 9 устанавливались соосно (несоосность не более 0,1 мм) на противоположных торцах образца 2. Радиоимпульс амплитудой до 100 В генератора 3 через разделительную

емкость $C1(4,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф})$ подавался на преобразователь 1. Ультразвуковой импульс распространялся в образце 2 и трансформировался преобразователем 9 в электрический сигнал. Полученный сигнал через емкость $C2(4,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф})$ и усилитель подавался на вход 1 осциллографа 7, запуск которого производится синхрипульсом генератора 4. На вход 2 осциллографа подавалась пара импульсов генератора 5. Временной интервал между импульсами измерялся частотомером 6. Для поляризации преобразователей использовались источники постоянного напряжения 10, 11 ($R_1 = R_2 = 1 \text{ МОм}$). Емкостными преобразователями служили электроды из алюминиевого сплава АМГ-2 диаметром 10; 15 и 20 мм с диэлектрическим слоем в виде анодно-окисной пленки [33].

Методика измерений заключалась в следующем [35]. Развертка осциллографа 7 выбиралась таким образом, чтобы на экране наблюдалась серия импульсов, соответствующих многократным отражением УЗ волны. Затем, регулируя задержку генератора 4 (рис. 7) и временной сдвиг генератора 5, добиваются приближенного временного совпадения импульсов генератора 5 с выбранной полуволевой импульса регистрируемого сигнала. После этого осциллограф 7 переводят в режим работы *В зад*, добиваются точного их совпадения и по частотомеру 6 определяют временной интервал t_u . Выбранное число измерений обеспечивало погрешность измерения t_n менее $3 \cdot 10^{-9}$ с во всем исследуемом диапазоне частот для различных пар УЗ импульсов и образцов.

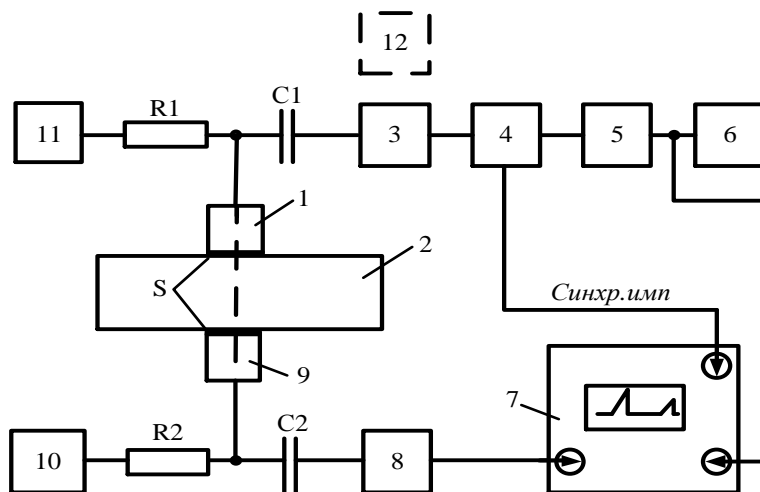


Рис. 7 – Блок-схема экспериментальной установки [35]

Реализация работы данной установки в лабораторных условиях достаточно сложная, так как преобразователи для возбуждения и приема УЗ колебаний, находящиеся на противоположных торцах преобразователя должны располагаться соосно (несоосность не более 0,1 мм).

Для контроля крупногабаритных изделий из неметаллических материалов, которые используются на предприятиях различных отраслей хозяйства, где применение традиционных пьезоэлектрических преобразователей для УЗ контроля не всегда применимо, ввиду ярко выраженной неравномерности частотной характеристики, авторами [36] был разработан емкостной датчик, работающий в низкочастотном диапазоне 0,1–20 кГц. Исследования показали, что на частотах до 2 кГц чувствительность емкостных преобразователей на 10–20 дБ выше чувствительности пьезоэлектрических, что дает возможность принимать сигнал акустической эмиссии от крупномасштабных разрушений. По данным исследований, на частотах выше 2 кГц амплитудно-частотные характеристики данного датчика и пьезопреобразователя совпадали. Отсутствие у ЕП собственных резонансов позволило использовать его для исследования модуля спектральной плотности и амплитудно-временных параметров сейсмоакустических сигналов.

Но для улучшения частотной характеристики ЕП на частотах ниже 2 кГц для снижения влияния паразитной емкости необходимо подбирать предварительный усилитель с как можно меньшей входной емкостью и размещением его непосредственно в корпусе преобразователя, а также уменьшать механическую связь между электродами путем выбора размеров электродов и их взаимной фиксации, что затрудняет реализацию датчика.

Коэффициент затухания, скорость распространения продольных и сдвиговых УЗ волн – важные информативные параметры при УЗ неразрушающем контроле материалов и изделий. Вопрос о точности и достоверности измерений этих физических величин, метрологическом обеспечении акустических измерений в твердых средах весьма актуален.

В настоящее время в качестве эталонных установок измерения скоростей распространения и коэффициентов затухания УЗ волн в металлах используются иммерсионные установки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования иммерсионных вариантов измерения скорости и затухания УЗ колебаний в твердых средах со всей очевидностью доказали факт искажения амплитудно-фазовых характеристик УЗ волн на границе жидкость – твердая среда. Такое влияние границы существенно снижает точность

измерений и должно либо учитываться при оценке систематической составляющей погрешности измерений, либо исключаться из процедуры измерений применением бесконтактных методов измерений.

Примером служит разработанная установка описанная в [37-43] для измерения коэффициента затухания и скорости распространения продольных УЗ волн в твердых средах и передачи средствам измерений низшего разряда размера единицы этих физических величин. Она позволяет также измерять групповую скорость распространения сдвиговых волн. В установке ИЗУ-1 реализован емкостный метод генерации и приема УЗ колебаний, основанные на применении емкостных преобразователей (ЕП) с тонкопленочным оксидным диэлектриком.

Структурная схема установки приведена на рис.8, где 1 – генератор радиоимпульсов амплитудой 0-200 В, частотным диапазоном 1-25 МГц, длительностью 2-200 мкс; 2 – излучающий ЕП; 3 – образец толщиной 1-100 мм, диаметром 20-150 мм; 4 – приемный ЕП; 5 – регистрирующая аппаратура, включающая полосовой усилитель, осциллограф, блок измерения ослабления, состоящий из аттенуатора АД-30 и измерителя затуханий; 6 – спектроанализатор СК4-59. Ключ в положении *a* (на рис. 8) соответствует резонансному режиму работы.

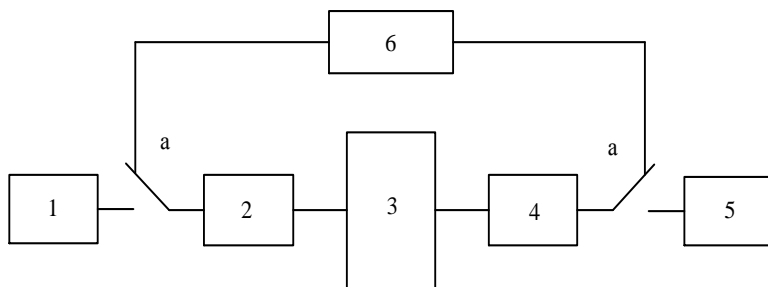


Рис. 8 – Структурная схема установки ИЗУ-1

Внешний вид установки (без приборной стойки) представлен на рис. 9. Масса оригинальной части не превышает 10 кг, а ее размеры составляют $(50 \times 30 \times 20)$ см³. Стрелкой на рисунке 9 указан исследуемый образец.

Разработанную установку ИЗУ-1 использовали для исследований образцов из различных материалов, подвергшихся термомеханической обработке или без нее и изготовленных из проката различных видов [41]. Эксперименты проводили в резонансном и эхо-режимах. Для воз-

буждения и приема ультразвуковых колебаний использовали ЕП с диаметром рабочих поверхностей 10 и 20 мм. Установка позволяла измерять скорость продольных волн с погрешностью менее 0,1% (чувствительность $\sim 0,01\%$) и коэффициент затухания продольных волн в диапазоне 5-900 дБ/м, с погрешностью менее 5% (чувствительность $\sim 0,05$ дБ/м). В качестве образцов использовали плиты с плоскопараллельными рабочими поверхностями из стали, меди, латуни и т.д., шероховатость которых не превышала 0,05 мкм и непараллельность не более 10^{-5} рад, также была необходима точная подстройка частоты под определенный образец, чтобы дифракционные эффекты проявлялись незначительно. Все вышесказанное свидетельствует о громоздкости и точности настройки установки для каждого типа образца, а также большие требования к вспомогательной аппаратуре.



Рис. 9 – Внешний вид установки ИЗУ-1

При решении ряда прикладных задач возникает необходимость определения акустических параметров в объектах, имеющих малую толщину [5, 42]. В этом случае применение традиционных эхоимпульсных методов нецелесообразно, так как для тонких образцов

ISSN 2079-4525. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. № 19 (1128) 45

они не обеспечивают требуемую точность измерения, а иногда их просто невозможно реализовать. Поэтому, для проведения измерений данной сложности разрабатываются новые методы и средства, где в качестве излучателя и приемника ультразвуковых колебаний все чаще применяют емкостные преобразователи [39–47], имеющие широкую полосу излучения и приема ультразвуковых импульсов, а так же главным преимуществом которых является бесконтактность проведения контроля. При этом, полученные результаты показывают [43], что емкостной метод позволяет определить качество тонкостенных изделий, в случае, когда применение оптических или радиационных методов – традиционных для подобных объектов, невозможно. Так же в [39, 42, 43] описывается возможность использования емкостных преобразователей для приема релеевских волн и волн Лемба, возбуждаемых любыми методами.

Подведя итоги работ [27–47] в данном направлении высокая сложность методик и необходимость учета множества различных факторов в процессе проведения измерений, что в свою очередь влечет за собой необходимость предъявления очень высоких требований к операторам эталонных установок. В работе [48] было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее использовать существующие и разрабатываемые эталонные установки в совокупности с современными цифровыми приборами с целью образования информационно-измерительного комплекса по определению параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах. Автором предложен ряд методик измерений. Для импульсного режима предложены методики нахождения скорости сдвиговой составляющей импульса при наличии помехи, методика определения частотной зависимости скорости распространения и коэффициента затухания УЗ колебаний. Для резонансного режима предложена методика определения дополнительной дифракционной поправки при нахождении коэффициента затухания, а также методика определения коэффициента затухания и скорости ультразвуковых колебаний при наличии помехи, зависящей от частоты (при значениях коэффициента затухания до 2000 дБ/м). Предложенные методики позволяют повысить точность, а также расширить диапазон измерений соответствующих физических величин.

Последние исследования [49–55] были направлены на создание математической модели емкостного преобразователя в режиме возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. Авторы утверждают, что такой способ возбуждения упругих импульсов высокой частоты позволяет оценить качество обработки поверхности объекта контроля, что

экспериментально не подтверждено.

Так же в [50–55] было указано, что акустические колебания в изделии возбуждаются силами взаимодействия электрических зарядов, приходящих на электропроводную поверхность после подачи поляризирующего напряжения. Возникающий при этом избыточный заряд в объекте контроля, взаимодействуя с кристаллами решетки, создает упругие колебания в поверхностном слое изделия. Авторами проведен только расчет акустического смещения контролируемой поверхности, в зависимости от создаваемого давления, но не учтено распределение зарядов в поверхностном слое изделия. В [52, 53] приводятся ряд теоретических исследований, заключающихся в том, что частота возбуждающего поля практически не влияет на процесс затухания акустической волны в объекте контроля, что противоречит экспериментальным данным.

В работах [51, 56, 57] авторами разработан емкостной преобразователь излучения и приема акустических колебаний, который представляет собой две круглые пластины, находящиеся коаксиально друг относительно друга. При этом внутренний электрод служит излучателем, внешний, соответственно, приемником. Реализация такого преобразователя достаточно сложная конструктивно. Авторы утверждают, что при таком расположении электродов преобразователя повышается чувствительность контроля, но экспериментального подтверждения результатов исследований не приведено.

Выводы.

1. В настоящее время ультразвуковой контроль изделий и материалов является наиболее распространенным средством для оценки качества материалов и изделий. Наиболее применяемыми при УЗ контроле являются контактные пьезоэлектрические датчики, которые считаются высокочувствительными. Которые обладают очевидными преимуществами, но имеют и существенный недостаток, заключающийся в необходимости применения контактной жидкости.

2. В связи с повышением требований к качеству выпускаемой и эксплуатируемой продукции, возникла острая необходимость в эффективном применении средств бесконтактного емкостного способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов. Емкостные датчики, по сравнению с традиционными методами УЗ контроля, имеют низкую чувствительность. В то же время, новый класс приборов, использующий емкостной способ, может дополнить традиционный метод при неразрушающем контроле металлоизделий: с высокой производительностью, с загрязненной поверхностью или с неэлектропроводными покрытиями и т.п.

3. Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, посвященных созданию емкостных датчиков, недостаточно развита теория построения преобразователей такого типа. Не в достаточной степени исследованы и оптимизированы параметры и технологии применения емкостного способа. Не используются современные возможности борьбы с шумами и помехами. На низком уровне остается чувствительность емкостных датчиков. Недостаточно используются возможности математических методов и средств стремительно развивающейся вычислительной техники. Общность характера нерешенных вопросов позволяет ставить проблему по разработке комплекса научно-технических мероприятий по созданию нового дополнительного класса приборов, предназначенных для осуществления емкостного способа ультразвукового контроля.

4. В известной литературе [27–47] установки с использованием емкостных преобразователей нашли узкую область применения в виде эталонных лабораторных установок для прецизионных акустических измерений в твердых средах, определение упругой неоднородности материала образца, аттестация стандартных образцов по коэффициенту затухания продольных УЗ колебаний и по скоростям распространения продольных и сдвиговых акустических волн. Но свидетельств широкого их применения в области неразрушающего контроля так и не найдено. Следовательно, не разработаны емкостные преобразователи различного назначения с высокими эксплуатационными характеристиками. Их разработка сдерживается недостаточностью применения современной элементной базы, новых материалов и конструкций.

За счет применения новых принципов создания приборов, адаптации современных методов выделения полезных импульсов из шумов и помех, нетрадиционных схемно-технических решений возможно увеличение чувствительности и повышение эффективности работы и области применения емкостных преобразователей и приборов на их основе.

Список литературы: 1. Патон Б. Е. Неруйнівний контроль в Україні / Б. Е. Патон, В. О. Тройцький, Ю. М. Поспайко // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. – 2003. – № 2(18). – С. 5–9. 2. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г. М. Сучков // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 67–70. 3. Сучков Г. М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий: дис. ... д-ра. техн. наук – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005 – 521 с. 4. Palmer S. B. Industrially viable non-contact ultrasound / S. B. Palmer, S. Dixon. // Insight. – 2003. – V. 45. – No. 3. – P. 211–217. 5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3 : Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 6. Буденков Г. А. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля. Обзор / Г. А. Буденков ,

С.Ю. Гурвич // Дефектоскопия. – 1983. – №5. – С. 5–33 **7.Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. Изд.2. – Москва : Издательство иностранной литературы. – 1957. – 728 с. **8.Ермолов И.Н.** Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн. кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потанов ; под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высшая школа, 1991. – 283 с. **9.** Крауткреммер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справ. изд. / Й. Крауткреммер, Г. Крауткреммер: пер. с нем. – М. : Металлургия, 1991. – 752 с. **10.** Глебова Л.В. Емкостные методы неразрушающего контроля / Л.В. Глебова, Г.М. Сучков // III Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 14-16 квітня 2009 р. : тези доп. частина 2 – Харків Ж НТУ «ХПІ», 2009. – С. 170-172. **11.**Сучков Г.М. Возможность приема ультразвуковых импульсов преобразователями емкостного типа. / Г.М. Сучков, С.Н. Глоба, Л.В. Глебова // Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск "Приборы и методы неразрушающего контроля – НТУ «ХПИ». : Харків, 2007. – №35. – С. 29-32. **12.**Сучков Г.М. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним способом. / Г.М. Сучков, Л.В. Глебова // Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск "Приборы и методы контроля и определения состава вещества" – НТУ «ХПИ». : Харків, 2008. – №48. – С. 116-123. **13.**Львов С.Г. Макет прибора для ультразвукового контроля емкостным способом / С.Г. Львов, Л.В. Глебова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 41 – С. 128 – 131. **14.**Пат. 72010 (Україна), МПК G 01 N 29/34 (2006.01). Конденсаторний спосіб прийому акустичних сигналів при неруйнівному контролі / Глебова Л.В., Петрищев О.Н., Глоба С.М.; заявник і власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – № у 2011 12741; заяв. 31.10.2011; надрук. 10.08.2012, Бюл. №15. **15.** Иванов А.Г. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности / А.Г. Иванов , С.А. Новиков // Приборы и техника эксперимента. – 1963. – №1. – С. 135–139. **16.** Микс. Емкостные микрофоны для ультразвуковых измерений в твердых телах / Микс, Петере, Арнольд // Приборы для научных исследований. – 1971. – 40. – С. 57-60. **17.** Ким. Самоустанавливающийся емкостный датчик для регистрации широкополосных ультразвуковых сигналов смещения / Ким, Саке // Приборы для научных исследований. – 1986. – №2. – С. 133–136. **18.** Bruneau A.H. Amplitude and phase measurement of vibration of radiation surfaces in order to determine the emitted sound field / A.H. Bruneau // Audio Engineering Society. –1983. –31, №12. – P. 907–913. **19.** Bindal V.N. A Broodhand Capacitive Transducer for Characterizing Pulsed Ultrasonic System / V.N. Bindal, T. K.Saksena, S.K.Yanis // Indian Journal of Technology. – 1984. – 22. – P. 397–400. **20.** Измерение слабых акустических волн при помощи емкостного датчика / В.Б. Брагинский, В.П. Митрофанов, Руденко В.Н., Хорев А.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1971. – № 4. – С. 241–244. **21.** Legros D. Generation of Ultrasound By a Dielectric Transduced. / D.Legros, I.Lewiner, P.Biguard // J. Acoust. Soc. Amer. –1979. – 52, №1. – P. 196–198. **22.** Гитис М.Б. Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых дефектоскопов / М.Б. Гитис, В.М., Добромислов, В.В. Сажин // Дефектоскопия. – 1971. – №1. – С. 51–57. **23.** Wadley H. N. G. A study of deformation and fracture processes in a low-alloy steel by acoustic emission transient analysis. / H. N. G.Wadley, C.B.Scruby // Acta Met. – 1979. – 27, №4. – P. 613–626. **24.** Болтарь К.О. Возбуждение ультразвуковых импульсов в твердых телах / К.О. Болтарь, Г.Д. Мансфельд // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – №1. – С. 128–131. **25.** Болтарь К.О. Исследование диэлектрического электроакустического преобразователя. / К.О. Болтарь, И.М. Котеланский, Г.Д. Мансфельд // Акустический журнал. – 1977. – т. 23. – №4. – С. 544–549. **26.** Пябус Г.В. Установка для измерения коэффициента затухания ультразвука в твердых телах / Пябус Г.В., Мельканович А.Ф., Кушуклей Л.М. // Дефектоскопия. – 1987. – №2. – С. 57–63. **27.** Луговой Владимир Александрович. Оптические методы для метрологического обеспечения акустических измерений в конденсированных средах : диссертация ... д-ра физико-математических наук : 01.04.05, 01.04.06. – Хабаровск, 2004. – 337 с.: ил. РГБ ОД, 71 05-1/345. **28.** Кон-

дрыхтев, Александр Иванович. Исследование бесконтактных методов возбуждения ультразвуковых колебаний : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.06. – Хабаровск, 1983 173 с. : ил. РГБ ОД 61:85-1/353. **29.** Бондаренко А.Н. Возбуждение упругих колебаний емкостным методом / А.Н. Бондаренко, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. 1979. № 6. С. 99–100.**30.** Дробот Ю.Б. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом/ Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1983. – № 3. – С. 36–41. **31.** Бондаренко А.Н. Применение емкостного метода для регистрации коротких акустических импульсов/ А.Н. Бондаренко, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1981. – №5. – С. 109–111. **32.** Кондратьев А.И. Метод приближенного расчета формы ультразвуковых импульсов/ А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1985. – № 1. – С. 53–59. **33.** Луговой В.А. Высокостабильный емкостный преобразователь ультразвуковых сигналов / В.А. Луговой, В.П. Троценко // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – №3. – С. 194–195. **34.** Тонкопленочный самоустанавливающийся емкостный преобразователь ультразвуковых сигналов / А.Н. Бондаренко, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 197–199. **35.** Измерение скорости продольных у.з. волн емкостными преобразователями / В.И. Архипов, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1988. – № 2. – С. 90–94. **36.** Кондратьев А.И. Исследование работы емкостного преобразователя в низкочастотном диапазоне / А.И. Кондратьев, И.А. Кривошеев // Дефектоскопия. – 1989. – № 7. – С.13–17. **37.** Кондратьев А.И. Прецизионные измерения скорости и затухания ультразвука в твердых телах / А.И. Кондратьев // Акустический журнал. – 1990. – Т. 36. – №3. – С. 470–476. **38.** Кондратьев А.И. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений/ А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38. **39.** Кондратьев А.И., Измерение скорости и затухания Рэлеевских волн емкостным преобразователем / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Измерительная техника. – 1991. – №5. – С. 43–44. **40.** Гусаков С.А. Образцовая установка для измерения акустических параметров материалов/ С.А. Гусаков, А.И. Кондратьев // Измерительная техника. – 1989. – №7. – С.50–52. **41.** Архипов В.И. О качестве образцов для ультразвуковых измерений / В.И. Архипов, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1991. – № 10. – С. 41–48. **42.** Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. В двух частях. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2006. – 152 с. **43.** Кондратьев А. И. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах /А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчѳев // Вестник ТОГУ. – 2013. № 4(31). – С. 17-24. **44.** Кондратьев А.И. Емкостный широкополосный датчик сигналов акустической эмиссии / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Акустическая эмиссия. Неразрушающий контроль :IV междунар. конф. : тезисы докл. – Москва, 1998 – С. 47. **45.** Луговой В.А. Широкополосный емкостный приемник акустических сигналов / В.А. Луговой // Сейсмоакустика переходных зон : материалы 3-го Всероссийского симпозиума. - Владивосток, 2003. – С.56–58. **46.** Пат. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Самокалибрующийся емкостной преобразователь / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120210/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 10.09.1999. **47.** Пат. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Способ контроля и стабилизации чувствительности емкостного преобразователя / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120202/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 20.10.1999. **48.** Король, Андрей Александрович. Алгоритмическое и программное обеспечение измерительного комплекса для определения параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.16 / Король Андрей Александрович; [Место защиты: Тихоокеан. гос. ун-т].- Хабаровск, 2011.- 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2448. **49.** Глебова Л.В. Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преобразо-

зователем. / Л.В. Глебова, И.В. Тюпа, А.Л. Григорьев, С.Н. Глоба // – Вестник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ «ХПИ», 2010. – Вип. 12. – С. 192–195. **50.** Григорьев А.Л. Математическая модель емкостного метода возбуждения колебаний в упругих средах. / А.Л. Григорьев, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // Вісник НТУ"ХПИ": Тематичний випуск "Математичне моделювання в техніці та технологіях" – 2010. – №68. – С.38–51. **51.** Горкунов Б.М. Емкостной преобразователь в режиме возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // – Методы та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, – 2010. – №. 25. – С. 10–16. **52.** Горкунов Б.М. Теория возбуждения и приема акустических волн емкостным преобразователем / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // ТД и НК. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2011. – №3. – с. 35-39. **53.** Глебова Л.В. Выбор режимов работы емкостного преобразователя акустических колебаний/ Л.В. Глебова // Вісник НТУ «ХПИ» . – Харків : НТУ «ХПИ», 2011. – Вип. 19. – с. 98-101. **54.** Глебова Л.В. Исследования емкостного преобразователя возбуждения ультразвуковых колебаний / Л.В. Глебова, И.В. Тюпа // Радиоэлектроника та молодь в ХХІ віці : 15-й ювілейний міжнародний молодіжний фору., 18 – 20 квітня 2011 р. : тези доп. – Харків, 2011. – С. 203-204. **55.** Львов С.Г. Требования к аппаратуре для неразрушающего контроля с использованием емкостного способа / С.Г. Львов, Л.В. Глебова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я: Анотації доповідей ХХ міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 травня 2012р. – Харків: НТУ "ХПИ" – Ч. II – С. 151. **56.** Capacitance method excitation and reception acoustic waves / Gorkunov B.M., Tiupa I.V., Zaitzeva L.V., Mitko Mihovski // Defectoscopy'13. Conference proceedings "NTD days 2013" : XXVIII International Conference: June 17-21, 2013. – Sozopol. Bulgaria, 2013.– P. 411–413. **57.** Пат. 60639 (Україна), МПК G01N 29/34 (2006.01). Перетворювач збудження прийому ультразвукових акустичних хвиль лавторів / Горкунов Б.М., Тюпа І.В., Глебова Л.В. Заявник і власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – № у 201112741 ; заяв. 31.10.2011 ; надрук. 25.06.2011, Бюл. № 12.

Bibliography (transliterated): 1. Paton, B. Ye., Troitskiy, V. A., Posypayko, YU.M. "Nerazrushayushchiy kontrol' v Ukraine. " *Inform. byul. Ukrainского obshchestva nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki* 2 (18) (2003): 5-9. Print. **2.** Suchkov, G. M. "O glavnom preimushchestve EMA sposoba. " *Defektoskopii* 10 (2000): 67-70. Print. **3.** Suchkov, G.M. *Razvitiye teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitnogo -akusticheskogo kontrolya metalloizdeliy. Dis. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkov, 2005. Print. **4.** Palmer, S.B. and Dixon S. "Industrially viable non-contact ultrasound. " *Insight*. Vol. 45. No. 3 P.211–217. **5.** *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: v 8 t.* Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 3. *Ul'trazvukovoj kontrol'.* Moscow: Mashinostroenie, 2004. Print. **6.** Budenkov, G.A. and Gurvich, S.YU. "Sovremennoye sostoyaniye beskontaknykh metodov i sredstv ul'trazvukovogo kontrolya. Obzor. " *Defektoskopii* No. 5 (1983): 5-33. Print. **7.** Bergman, L. *Ul'trazvuk i yego primeneniye v nauke i tekhnike.* Per. S nem. Izd.2 Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1957. Print. **8.** *Nerazrushayushchiy kontrol' : prakticheskoy. posobiye* : v 5 kn. kn. 2. Yermolov, I.N., Aleshin, N.P., Potapov, A.I.; pod red. V.V. Sukhorukova. Akusticheskiye metody kontrolya. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. Print. **9.** Krautkremmer, I., Krautkremmer, G. *Ul'trazvukovoy kontrol' materialov:* Moscow: Metallurgiya, 1991. Print. **10.** Glebova, L.V., Suchkov, G. M. "Yemkostnyye metody nerazrushayushchego kontrolya. " III Universitetskaya nauchno-prakticheskaya studencheskaya konferentsiya magistrrov Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta « Khar'kovskiy politekhnicheskiy institut», tezisy dop. chast' 2 NTU «KhPI» : Kharkov, 2009. 170-172. Print. **11.** Suchkov, G.M., Globa, S. N., Glebova, L.V. "Vozmozhnost' priyema ul'trazvukovykh impul'sov preobrazovatelyami yemkostnogo tipa. " *Vestnik NTU « KhPI ».* *Tematich. vypusk Pribory i metody nerazrushayushchego kontrolya.* No 35. Kharkov : NTU « KhPI », 2007. 29–32. Print. **12.** Suchkov, G.M., Glebova, L.V. "Issledovaniye faktorov, vliyayushchikh na vobuzhdeniye akusticheskikh impul'sov yemkostnym

sposobom. " *Vestnik NTU «KhPI» Tematich. vypusk Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veshchestva*. No 48. Kharkov : NTU «KhPI», 2008. 116-123. Print. **13**. L'vov, S. G., Glebova, L.V. " Maket pribora dlya ul'trazvukovogo kontrolya yemkostnym sposobom. " *Vestnik NTU «KhPI»*. No 41. Kharkov : NTU «KhPI», 2012. 128–131. Print. **14**. Pat. 72010 (Ukraina), MPK G 01 N 29/34 (2006.01) . " Kondensatornyy sposob priyema akusticheskikh signalov pri nerazrushayushchemu kontrolyu. " Glebova, L.V., Petrishchev, A.N. , Globa, S.M. *Zajavnik ta patentovlasnik*Natsional'nyy tekhnicheskyy universitet « Khar'kovskiy politekhnicheskyy institut» No. u 2011 12741 ; zayavleniy. 31.10.2011 ; na pechat' . 10.08.2012 , Byul. №15. Print. **15**. Ivanov, A.G., Novikov, S.A. " Metod yemkostnogo datchika dlya registratsii mgnovnoy skorosti dvizhushcheyesa poverkhnosti. " *Pribory i tekhnika eksperimenta* No. 1 (1963): 135–139. Print. **16**. Miks , Petere , Arnol'd " Yemkostnyye mikrofony dlya ul'trazvukovykh izmereniy v tverdykh telakh. " *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* No. 40 (1971): 57–60. Print. **17**. Kim, Sake. " Samoustanavlivayushchiysya yemkostnyy datchik dlya registratsii shirokopolosnykh ul'trazvukovykh signalov smeshcheniya. " *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy*. No. 2 (1986): 133–136. Print. **18**. Bruneau A.H. " Amplitude and phase measurement of vibration of radiation surfaces in order to determine the emitted sound field. " *Audio Engineering Society*. No. 12 (1983): 907–913. Print. **19**. Bindal, V.N., Saksena, T. K., Yanis, S.K. " A Broadband Capacitive Transducer for Characterizing Pulsed Ultrasonic System. " *Indian Journal of Technology*. No. 12 (1984): 397–400. Print. **20**. Braginsky, V.B. et al. " Izmereniye slabykh akusticheskikh voln pri pomoshchi yemkostnogo datchika. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 4 (1971): 241–244. Print. **21**. Legros, D., Lewiner, I., Biguard, P. " Generation of Ultrasound By a Dielectric Transduced. " *J. Acoust. Soc. Amer.* Vol. 52, No. 1 (1979): 196–198. Print. **22**. Gitis, M.B., Dobromyslov V.M., Sazhin ,V.V. " Opredeleniye Nekotorykh parametrov datchikov ul'trazvukovykh defektoskopov. " *Defektoskopii* No. 1 (1971): 51–57. Print. **23**. Wadley, H. N. G., Scruby, C.B. " A study of deformation and fracture processes in a low-alloy steel by acoustic emission transient analysis. " *Acta Met.* Vol. 27, No. 4 (1979): 613–626. Print. **24**. Boltar', K.A., Mansfel'd, G.D. " Vozbuzhdeniye ul'trazvukovykh impul'sov v tverdykh telakh. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 1 (1977): 128–131. Print. **25**. Boltar', K.A. Kotelanskiy, I.M. and Mansfel'd G.D. " Issledovaniye dielektricheskogo elektroakusticheskogo preobrazovatelya. " *Akusticheskyy zhurnal* .Vol. 23. No. 4 (1977): 544–549. Print. **26**. Pyabus G.V., Mel'kanovich A.F. and Kushkuley L.M. " Ustanovka dlya izmereniya koeffitsiyenta zatukhaniya ul'trazvuka v tverdykh telakh. " *Defektoskopii*. No. 2 (1987): 57–63. Print. **27**. Lugovoy Vladimir Aleksandrovich. *Opticheskiye metody dlya metrologicheskoy obespecheniya akusticheskikh izmereniy v kondensirovaniykh sredakh*. Dis. ... d-r fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 2004. Print. **28**. Kondrat'yev, Aleksandr Ivanovich . *Issledovaniye beskontaktnykh metodov vozbuzhdeniya ul'trazvukovykh kolebaniy* : Dis. ... kandidata fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 1983. Print. **29**. Bondarenko A.N., Drobot YU.B. and Kondrat'yev A.I. " Vozbuzhdeniye uprugikh kolebaniy yemkostnym metodom. " *Defektoskopii*. No. 6 (1979): 99–100. Print. **30**. Drobot YU.B., Kondrat'yev A.I. and Lugovoy V.A. " Vozbuzhdeniye korotkikh uprugikh impul'sov yemkostnym metodom. " *Defektoskopii*. No. 3 (1983): 36–141. Print. **31**. Bondarenko A.N., Drobot YU.B. and A.I. Kondrat'yev. " Primeneniye yemkostnogo metoda dlya registratsii korotkikh akusticheskikh impul'sov. " *Defektoskopii* . No. 5 (1981): 109–111. Print. **32**. Kondrat'yev A.I. "Metod priblizheniya rascheta formy ul'trazvukovykh impul'sov defektoskopii. " *Defektoskopii*. No.1 (1985): 53–59. Print. **33**. Lugovoy V.A., Trotsenko V.P. " Vysokostabil'nyy yemkostnyy preobrazovatel' ul'trazvukovykh signalov. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 3 (1986): 194–195. Print. **34**. Bondarenko A.N., Kondrat'yev A.I. and Lugovoy V.A. " Tonkoplenochnyye samoustanavlivayushchiysya yemkostnyy preobrazovatel' ul'trazvukovykh signalov. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 2 (1988): 197–199. Print. **35**. Arkhipov V.I. et al. " Izmereniye skorostiprodol'nykh U.Z. volnyemkostnym preobrazovatelyami. " *Defektoskopii* . No. 2 (1988): 90–94. Print. **36**. Kondrat'yev A.I., Krivosheyl.A. " Issledovaniyerabotyemyemkostnogopreobra-

zovatelyavnizkochastotnogodiapazone. " *Defektoskopii* . No. 7 (1989): 13–17. Print. **37.**Kondrat'yev A.I. " Pretsizionnyye izmereniya skorosti zatukhaniyaul'trazvukovykh tverdykh telakh. " *Akusticheskii zhurnal* . Vol. 36. No. 3 (1990): 470–476. Print. **38.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " Datchik akusticheskikh signalov dlya vysokotochnykh izmereniy. " *Defektoskopii* . No. 3 (1990): 30–38. Print. **39.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " Izmereniya skorosti zatukhaniyarelyevskim volnym yemkostnym preobrazovatelem. " *Izmeritel'nayatekhnika*. No. 5 (1991): 43–33. Print. **40.**Gusakov S.A., Kondrat'yev A.I. " Obraztsovaya ustanovkadiya izmereniya akusticheskikh parametrov materialov. " *Izmeritel'nayatekhnika*. No. 7 (1989): 50–52. Print. **41.**Arkhipov V.I., Kondrat'yev A.I. " Okachestve obratzov dlya ul'trazvukovykh izmereniy. " *Defektoskopii*. No. 10 (1991): 41–48. Print. **42.** Kondrat'yev A.I. " *Pretsizionnyye metody i sredstva izmereniya akusticheskikh velichin tverdykh sred.* " V dvukh chastyakh. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2006. Print. **43.** Kondrat'yev A. I. et al. " Izmereniya skorosti rasprostraneniya i koefitsiyent zatukhaniya prodol'nykh voln v tonkikh obratzakh. " *Vestnik TOGU* . No. 4 (31) (2013): 17–24. Print. 2013. **44.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " *Yemkostnyy širokopolosnyy datchik signalov akusticheskoy emissii.* " Akusticheskaya emissiya. Nerazrushayushchiy kontrol' : IV mezhdunar. konf. : Tezisy dokl. **Moscow**, 1998. 47. Print. **45.** Lugovoy V.A. " Shirokopolosnyy yemkostnyy priyemnik akusticheskikh signalov. " Seysmoakustika perekhodnykh zon : materialy 3-go Vserossiyskogo simpoziuma : Vladivostok , 2003. 56–58. Print. **46.** Pat. RU 2137118 , MPK G 01 N 27/22 . " Samokalibrnyushchiyya yemkostnoy preobrazovatel' . " Kondrat'yev A.I. , Rimlyand V.I. , Kazarbin A.V. ; *zayavitel' i patentoobladatel'* : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet No 97120210/28 ; *zayavleniy.* 04.12.1997 ; opubl. 10.09.1999/ Print. **47.** Pat. RU 2140072 , MPK G 01 N 27/22 . " Sposob kontrolya i stabilizatsii chuvstvitel'nosti yemkostnogo preobrazovatelya " Kondrat'yev A.I. , Rimlyand V.I. , Kazarbin A.V. ; *zayavitel' i patentoobladatel'* : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet. No 97120202/28 ; *zayavleniy.* 04.12.1997 ; opubl. 20.10.1999. Print. **48.** Korol' , Andrey Aleksandrovich . *Algoritmicheskoye i programmnoye obespecheniye izmeritel'nogo kompleksa dlya opredeleniya parametrov rasprostraneniya razlichnykh tipov akusticheskikh voln v tverdykh sredakh.* Dis. ... kandidata fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 2011. Print. **49.** Glebova L.V. et al. " Vozbuzhdeniye ul'trazvukovykh kolebaniyemkostnym preobrazovatelem. " - *Vestnik NTU "KHPI"*. No. 12. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2010. 192–195. Print. **50.** Grigor'yev A.L., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Matematicheskaya model' yemkostnogo metoda vozbuзhdeniya kolebaniy v uprugikh sredakh. " *Vestnik NTU "KHPI" : Tematicheskyy vypusk : Matematicheskoye modelirovaniye v tekhnike i tekhnologiyakh.* No. 68. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2010. - 2010. 38–51. Print. **51.**Gorkunov B.M., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Yemkostnoy preobrazovatel' vrezhimevozbuзhdeniya priyemaul'trazvukovykh kolebaniy. " *Metody i pribory kontrolya kachestva.* No. 25. Ivano- Frankivsk : IFNTUNG , 2010. 10–16. Print. **52.** Gorkunov B.M., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Teoriya vozbuзhdeniya i priyema akusticheskikh voln yemkostnym preobrazovatelem. " *TD i NK.* No. 3. Kiyv : IES im. Ye.O. Patona NAN Ukrainy , MA «Ssora» , 2011. 35-39. Print. **53.** Glebova L.V. " Vybor rezhimov raboty yemkostnogo preobrazovatelya akusticheskikh. " *Vestnik NTU "KhPI"*. No. 19. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2011. 98–101. Print. **54.** Glebova L.V., Tyupa I.V. " Issledovaniya yemkostnogo preobrazovatelya vozbuзhdeniya ul'trazvukovykh kolebaniy. " Radioelektronika i molodezh' v XXI vozraste: 15-y yubileynyi mezhdunarodnyy molodezhnyy foru. , 18 - 20 aprelya 2011 : tezisy dop : Kharkiv , 2011. 203–204. Print. **55.** L'vov S. G., Glebova L.V. " Trebovaniya k apparature dlya nerazrushayushchego kontrolya s ispol'zovaniyem yemkostnogo sposoba. " Informatsionnyye tekhnologii: nauka , tekhnika , tekhnologiya obrazovaniye , zdorov'ye : annotatsii dokladov XX mezhdunar. nauchno-prakticheskoy. konf., 15-17 maya 2012. Vol. 2. Kharkiv : NTU " KhPI" , 2012. 151. Print. **56.** Gorkunov B.M. et al. " Capacitance method excitation and reception acoustic waves. " Defectosopia'13. Conference proceedings "NTD days 2013" : XXVIII International Conference: June 17-21, 2013. Sopol. Belgapia , 2013. 411–413. Print. **57.** Pat. 60639 (Ukraina), MPK G01N 29/34 (2006.01) . " Preobrazovatel' vozbuзhdeniya i priyema ul'trazvukovykh akusticheskikh voln avtorov " Gorkunov B.M.,

УДК 371.134

А. Г. ПРОТАСОВ, д-р пед. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ТЕПЛОМ МЕТОДОМ

В работе предлагается использовать метод компьютерного моделирования для исследования возможностей теплового неразрушающего контроля для диагностики состояния сотовых панелей, применяемых в конструкциях летательных аппаратов. Для моделирования был использован пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать технические задачи, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве модели для исследования была использована трехмерная модель сотовой панели. В результате проведенных исследований были определены оптимальные параметры контроля для обнаружения дефектов типа отслоение обшивки и наличие воды в заполнителе. Л.: 5. Бібліогр.: 6 наз.

Ключевые слова: сотовая панель, компьютерное моделирование, трехмерная модель.

Введение. В современном авиастроении широко используются сотовые конструкции, которые отличаются высокой прочностью при малом удельном весе. В самолетах последнего поколения более 30% площади фюзеляжа, крыла, киля и других частей самолета изготавливаются из таких материалов. Сотовая панель состоит из двух листов обшивки, между которыми находится сотовая структура. Несущие конструкции самолета выполняются, как правило, из сплавов алюминия, а в качестве заполнителя используют алюминиевую фольгу. Основными дефектами сотовых конструкций являются отслоение обшивки от заполнителя, вследствие непрочности или смятия сот. Эти дефекты могут возникать как при эксплуатации летательного аппарата, так и вовремя изготовления сотовой панели в результате нарушения технологического процесса. Наиболее опасным дефектом считается попадание воды в сотовые структуры элементов самолета. При низких температурах вода замерзает и увеличивает свой объем, что приводит к разрушению ячеек сот и существенно снижает прочность всей конструкции панели. Проблемой является своевременное выявление этих дефектов.

© А. Г. Протасов, 2015