

Емкостные датчики для длинноволнового акустического излучения направленными волнами

Л.В. Зайцева

Национальный аэрокосмический университет им. М.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»,
ул. Чкалова, 17, 61000 Харьков, Украина

(Получено 15.03.2016; в отредактированной форме – 09.06.2016; опубликовано online 21.06.2016)

Рассматриваются с общих позиций состояние, перспективы и возможности применения емкостного метода неразрушающего контроля. Разработана математическая модель процесса возбуждения акустических волн (продольной и поверхностной) с помощью конденсатора, позволяющая проводить расчет выходного сигнала, для последующего выбора методов и средств приема данных акустических колебаний. Разработан макет устройства для реализации емкостного метода. Установлена возможность возбуждения и приема акустических колебаний емкостными преобразователями.

Ключевые слова: Преобразователь, Акустический контроль, Длинноволновое излучение, Волна.

DOI: 10.21272/jnep.8(2).02048

PACS numbers: 43.35.Zc, 43.35.Yb

1. ВВЕДЕНИЕ

Одно из доминирующих положений в неразрушающем контроле (НК) занимает акустический метод, поскольку он имеет хорошо развитую теоретическую и экспериментальную базу. Классический метод возбуждения и приема акустических волн с помощью пьезоэлектрического преобразователя имеет ряд недостатков. Заполнить эту нишу возможно с помощью бесконтактных методов контроля с использованием электромагнитно-акустических [1-3] и емкостных преобразователей (ЕП). ЕП имеют ряд преимуществ (бесконтактность, широкий частотный диапазон, простота изготовления). Ранее упоминалось [4], что данный преобразователь обладает низкой чувствительностью 100 В/мкм. Однако в работах [5, 6] было экспериментально доказано, что он имеет достаточную чувствительность для практического использования в НК. Благодаря широкому рабочему частотному диапазону, одной из областей, где можно применить ЕП, является исследование протяженных участков трубопроводов с использованием длинноволнового низкочастотного излучения направленными волнами. Данная область является новой и малоизученной, о чем говорят первые стандарты по длинноволновому излучению (Италия – UNI/TS 11317 – 2009 г., Япония – JIS – NDIS 2427 – 2010 г., США – ASTM E2775 – 2011 г.). Сейчас это один из наиболее быстро развивающихся методов по исследованию качества трубопроводов. Длинноволновой метод (ДМ) позволяет проводить сплошной контроль труб на большие расстояния, без снятия изоляции. ДМ значительно ускоряет проведение контроля, поскольку нет необходимости сканировать весь трубопровод, достаточно иметь доступ к небольшому участку трубы.

Метод длинноволнового излучения использует частоты и волны порядка 100 кГц, известные как нормальные или волны Лэмба. Нормальные волны распространяются только в объектах с толщиной, которую можно сравнить с длиной волны. Более подробно процесс распространения волн рассмотрен в [7]. В данной статье рассматриваются лишь про-

дольные нормальные волны. В случае трубы направление распространения волны известно. Она работает как волновод, импульсы распространяются на очень длинные расстояния (до 100 м). Коэффициент затухания, его частотная зависимость и коэффициент отражения от поверхности рассмотрены в [8]. Для труб существует дополнительное осложнение: режим распространения волны зависит от диаметра трубы и толщины стенки. На практике используют приборы, которые используют программное обеспечение для расчёта скорости в зависимости от частоты колебаний, диаметра трубы и толщины стенки. Поскольку скорость распространения волн изменяется в зависимости от толщины стенки, то соответственно волны чувствительны к коррозии, где бы она не находилась снаружи или внутри, к трещинам, при условии, что они составляют значительную область перпендикулярную оси трубы [9]. Разными исследовательскими группами проводится систематическая работа по улучшению методик и программ по оценке размеров дефектов. Несмотря на это, технология направленных волн все еще далека от точных оценок толщины стенки трубы и в основном используется для точного определения дефектных участков трубы.

Целью данной работы является разработка модели и решение задачи возбуждения акустических волн в упругой среде с помощью емкостного преобразователя, а также исследование возможности использования ЕП для длинноволнового излучения направленными волнами.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ

Сила между обкладками конденсатора создается путем подачи на него поляризующего напряжения и определяется соотношением:

$$F = \frac{dW_c}{dz} \quad (1)$$

где W_c – энергия конденсатора,
 z – переменная интегрирования, характеризующая расстояние между обкладками.

Выражение для энергии плоского конденсатора имеет простой вид[10]:

$$W_c = \frac{cU_{\approx}^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U_{\approx}^2}{2d} \quad (2)$$

где U_{\approx} – переменное напряжение, подаваемое на обкладки конденсатора,

- ε – диэлектрическая проницаемость среды,
- ε_0 – диэлектрическая постоянная,
- S – площадь обкладки,
- d – расстояние между обкладками.

Приняв во внимание, что напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону $U_{\approx} = U_0 \sin \omega t$, где U_0 – максимальное значение переменного напряжения, и сила F действует строго перпендикулярно к площади электрода, запишем выражение для зондирующего давления P_0 на поверхность объекта контроля (ОК), которое создается электростатической силой F . Продифференцировав выражение (1) с учетом формулы (2), получим:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_0^2 \sin^2 \omega t}{2d^2} \quad (3)$$

Поскольку $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$, то выражение (3) примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 - U_0^2 \cos 2\omega t) \quad (4)$$

Как видно из выражения (4) при подаче на конденсатор переменного напряжения с частотой ω амплитуда давления P_0 изменяется во времени с удвоенной частотой 2ω . Для устранения данной особенности применяется поляризация конденсатора путем подачи на его обкладки постоянного напряжения U .

В таком случае, выражение для давления P_0 примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0 \sin \omega t + U_{\approx})^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (2U_0 U_{\approx} \sin \omega t - U_0^2 \sin 2\omega t) + \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 + U_{\approx}^2) \quad (5)$$

Характерной особенностью полученных выражений является то, что амплитуда возбуждающего давления P_0 по сути не зависит ни от формы, ни от площади электрода. Увеличение амплитуды давления, а, следовательно, и амплитуды акустических колебаний, можно осуществить путем увеличения амплитуды переменного и поляризирующего напряжений, подбора соответствующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве прослойки между электродом и поверхностью ОК, или уменьшения расстояния h между обкладками конденсатора.

Емкостные преобразователи с диэлектрической прослойкой (ДП) возбуждает продольную волну в ОК, создаваемую генераторами поляризующих (ГПИ) и возбуждающих импульсов (ГВИ) (рис. 1).

Рассмотрим сдвиг материальных точек ОК вдоль оси z , вызванный переменным давлением P_0 . Распо-

ложим точку контроля с координатами $M_I(0, 0, z_0)$ на обратной поверхности ОК (рис. 1).

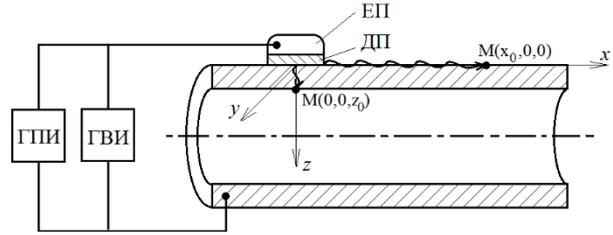


Рис. 1 – Распространение продольной волны вдоль оси z и поверхностной волны вдоль оси x : $M(x_0, 0, 0)$ – точка наблюдения с координатами $(x_0, 0, 0)$; $M(0, 0, z_0)$ – точка наблюдения с координатами $(0, 0, z_0)$

Используем базовую формулу, которая позволяет рассчитать величину смещения акустической волны для произвольной точки контроля, которая принадлежит ОК:

$$U_z(M_1) = -\frac{1}{4\pi K_0} \times \int_{z \geq 0} \frac{P(x, y, z, t)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}\right)^3} dx dy dz, \quad (6)$$

где $P(x, y, z, t)$ – пространственно-временное распределение давления на поверхности образца;

- x, y, z – текущие координаты выбранной точки;
- x_0, y_0, z_0 – координаты точки M_1 ;

K_0 – коэффициент, который характеризует материал образца и выражается через известные параметры, которые определяют свойства материала:

$$K_0 = \left(2 + \frac{2\mu}{1-2\mu}\right) G; \quad (7)$$

- G – модуль сдвига;
- μ – коэффициент Пуассона.

Для точки наблюдения с координатами $M_1(0, 0, z_0)$, выражение для смещения примет вид:

$$U_z(0, 0, z_0, t) = -\frac{1}{4\pi K_0} \times \int_{z \geq 0} \frac{(z-z_0) \cdot P(x, y, z, t)}{\left(\sqrt{x^2 + y^2 + (z-z_0)^2}\right)^{3/2}} dx dy dz. \quad (8)$$

Решением этого уравнения для точки $M_1(0, 0, z_0)$ является функция:

$$U_z(0, 0, z_0, t) = -\frac{P_0}{8\pi K_0 z_0} \left[\frac{7}{3} \cos(k \cdot z_0) - \frac{13 \sin(k \cdot z_0)}{3(k \cdot z_0)} + 2 \cdot \frac{1 - \cos(k \cdot z_0)}{(k \cdot z_0)} - \frac{8}{3} \frac{1}{(k \cdot z_0)^2} \left(\cos(k \cdot z_0) - \frac{\sin(k \cdot z_0)}{(k \cdot z_0)} \right) \right] \cdot S, \quad (9)$$

- где P_0 – давление на поверхность ОК;
- z_0 – координата точки по оси z ;
- S – площадь преобразователя;
- k – волновое число $k = \omega/a$;

a – фазовая скорость волны;
 ω – круговая частота $\omega = 2\pi f$;
 f – частота.

Как видно из этого соотношения, амплитуда смещения не зависит от формы возбуждающего электрода.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

При исследовании поверхностных колебаний нас интересует точка M_2 с координатой $z_0 = 0$ (рис. 1). Более того, мы предполагаем, что координата $y_0 = 0$, то есть, мы считаем, что акустическая волна распространяется от края электрода вдоль координаты x .

Тогда выражение для смещения точек поверхности вдоль оси z примет вид:

$$U_z(x_0, 0, 0, t) = \frac{1}{4\pi K_0} \iiint_{\mathbb{R}^3} \frac{z \cdot P(x, y, z, t)}{(\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + z^2})^3} dx dy dz. \quad (10)$$

Для точки наблюдения с координатами $M_2(x_0, 0, 0)$, выражение для смещения в цилиндрической системе координат приобретает вид:

$$U_z(M_2) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega}{c} R \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}\right)}{\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}} - \frac{1 - \cos\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}\right)}{\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}} \right] d\phi dr \quad (11)$$

где R – радиус датчика;
 c – скорость распространения звука в ОК;
 r – радиус емкостного преобразователя;
 ϕ – сферическая координата.

Как видно из этого соотношения, подынтегральная функция зависит от формы и размера электрода.

4. МАКЕТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

При реализации возбуждения и приема акустических колебаний емкостным преобразователем, к возбуждающей и приемной аппаратуре необходимо предъявлять достаточно жесткие и одновременно противоречивые требования [12]. Для обеспечения возбуждения акустической волны в объекте контроля с помощью возбуждающего емкостного преобразователя (ВЕП) необходимо использовать высокочастотный генератор синусоидальных колебаний с амплитудой выходного сигнала более 500 В. Приемный емкостной преобразователь (ПЕП) и предварительный усилитель (У), обеспечивающий процесс преобразования акустического сигнала в электрические импульсы, необходимо синхронизировать (устройство синхронизации УС) с возбуждающим генератором в ши-

роком диапазоне периода следования электрических импульсов генератора. При приеме на ЕП необходимо подавать постоянное напряжение не менее 100 В. Данное условие требует создания специального высокостабильного по амплитуде генератора разнополярных поляризующих импульсов с варьируемой скважностью [13]. В работе разработан макет, который позволяет реализовать предложенный способ неразрушающего контроля (рис. 2).

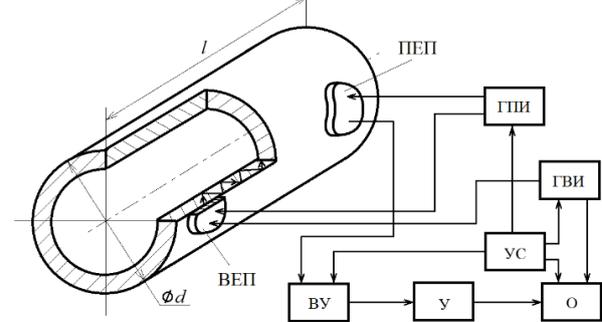


Рис. 2 – Макет прибора для акустического контроля емкостным способом: ВУ – входное устройство; О – осциллограф; d – диаметр трубы; l – длина трубы

На возбуждающий емкостной преобразователь, состоящий из обкладки конденсатора и объекта контроля, который представляет собой вторую обкладку конденсатора, подается поляризующее напряжение порядка 500 В с генератора поляризующих импульсов. Также на пластину конденсатора с генератора возбуждающих импульсов дается пакет синусоидальных импульсов с амплитудой около 500 В.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Емкостной преобразователь создает сплошной фронт волны, который обеспечивает возможность проведения контроля трубы по всему объему. Для проведения контроля необходим доступ к небольшому участку трубы, на который устанавливаются ЕП (рис. 2). В эксперименте использовалась труба $d = 50$ мм, $l = 500$ мм, датчик в виде пластины радиуса $r = R = 75$ мм. Параметры датчика и среды: толщина диэлектрической прослойки $h = 0.1$ мм, ее диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 40$ (промасленная бумага), ОК – сталь, $\rho = 7.8$ кг/м³, $c = 5 \cdot 10^3$ м/с, напряжения подаваемые на обкладки конденсатора $U_+ = 500$ В, $U_- = 500$ В.

При приеме акустических сигналов с помощью ПЕП, его емкость C_0 будет изменяться из-за модуляции воздушного зазора между обкладками конденсатора под действием акустической волны. Таким образом, в режиме приема акустических колебаний получим:

$$\Delta C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h \pm \Delta h}, \quad (12)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды;
 ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;
 h – начальное расстояние между обкладками конденсатора;
 Δh – прирост расстояния между обкладками конденсатора в результате поверхностных колебаний ОК

и колебаний электрода.

При этом амплитуда выходного сигнала ПЕП определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_z \cdot U_{\infty}}{h}, \quad (13)$$

где U_z – амплитуда смещения материальных точек поверхности.

Как видно из формулы, выходное напряжение не зависит от площади электрода и диэлектрических свойств изолирующего слоя. При этом, величина h может быть значительно уменьшена за счет выбора диэлектрического слоя с высокой диэлектрической проницаемостью. Например, в качестве электрода может быть использована алюминиевая пластина, покрытая пленкой оксида Al_2O_3 , которая имеет хорошие диэлектрические свойства и высокую механическую прочность.

На рис. 3 приведены временные диаграммы работы устройства акустического контроля с ЕП.

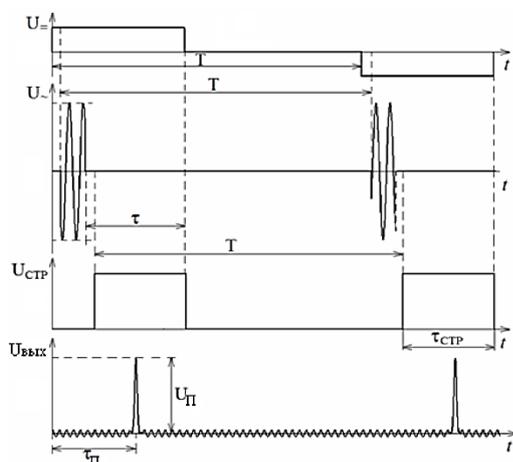


Рис. 3 – Временные диаграммы работы устройства для акустического контроля емкостным способом

На диаграмме изображены поляризующие импульсы (U_+) и пакетные импульсы (U_-). Здесь T – период зондирования ОК, τ – время, на протяжении которого принимаются акустические импульсы из ОК. Работой ГВИ и ГПИ управляет устройство синхронизации. При подаче зондирующего импульса на пластине приемного емкостного преобразователя за счет прямой передачи электрического сигнала наводится сигнал, который может привести к повреждению приемного канала установки.

Для исключения этого во входном устройстве ВУ происходит запираание входной цепи на время прохождения зондирующего импульса под влиянием управления УС. В системе ВЕП – ОК – ПЕП происходит преобразование электрического сигнала в акустическую волну, прохождение ее по ОК и вторичное преобразование акустической волны в электрический сигнал. Сигнал после такого преобразования приходит позже сигнала наведенного зондирующими импульсами, что позволяет разделить их по времени. Для этого УС формирует стробирующий импульс с длительностью $\tau_{\text{стр}}$ (рис. 3), который отпирает во входном устройстве приемный канал. Сигнал с ЕП

поступает на предварительный усилитель У. Выходной сигнал после предварительного усиления поступает на осциллограф О. При использовании двухканального осциллографа на второй канал можно подавать сигнал с генератора возбуждающих импульсов. На рис. 3 изображен принятый сигнал ($U_{\text{вых}}$), прошедший через ОК, где $\tau_{\text{п}}$ – время прохождения акустической волны через ОК, $U_{\text{п}}$ – амплитуда принятого сигнала.

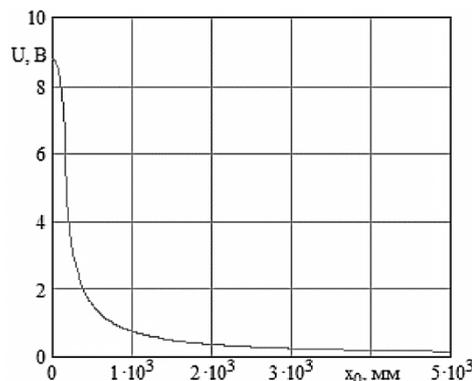


Рис. 4 – График зависимости выходного сигнала от расстояния между преобразователями для частоты 100 кГц

В случае возбуждения и приема акустических волн целесообразно использовать низкочастотный диапазон. На рис. 4 представлен график зависимости выходного сигнала от расстояния между ПЕП и ВЕП для частоты 100 кГц и $d_1 = 75 \cdot 10^{-3}$ м.

На расстоянии 5 м уровень акустического сигнала на уровне 100 мВ, что позволяет использовать этот тип преобразователя для неразрушающего контроля объектов с использованием длинноволнового излучения направленными волнами.

В таблице приведены расчетные U_p и полученные экспериментальным путем U_z данные уровня выходного сигнала в зависимости от расстояния между ПЕП и ВЕП.

Таблица 1 – Назначение специальных стилей абзаца

| H , мм | U_p , В | U_z , В |
|----------------|-----------|-----------|
| $1 \cdot 10^3$ | 0,70 | 0,80 |
| $2 \cdot 10^3$ | 0,35 | 0,40 |
| $3 \cdot 10^3$ | 0,20 | 0,23 |
| $4 \cdot 10^3$ | 0,17 | 0,20 |
| $5 \cdot 10^3$ | 0,10 | 0,12 |

Расхождение в данных составляет порядка 20 %, что свидетельствует о правильности выбора методики расчета и аппаратуры для проведения электрического метода неразрушающего контроля.

6. ВЫВОДЫ

В результате теоретического расчета распространения акустических волн установлено, что имеется возможность приема таких волн с достаточно высоким уровнем электрического сигнала в низкочастотном диапазоне частот. В целях повышения уровня выходного сигнала емкостного преобразователя исследованы геометрические параметры приемного и возбуждающего емкостного преобразователя.

Capacitive Sensors for the Long-wave Acoustic Radiation by Directed Waves

L.V. Zaitseva

*Zhukovsky National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" (NAU "KhAI"),
17, Chkalova St., 61000 Kharkiv, Ukraine*

Consider from the common position present-day state, prospects and the possibility of non-destructive testing capacitive method using. Developed mathematical model of the process of acoustic wave's excitation (longitudinal and surface) with a capacitor allow carrying out the output signal calculation for the subsequent choice of methods and devices for receiving the acoustic oscillations data. A device layout has been developed for realization of capacitive method. The possibility of excitation and reception of acoustic vibrations by capacitive transducers it has been established.

Keywords: Transducer, Acoustic control, The long-wave radiation wave.

Ємнісні датчики для довгохвильового акустичного випромінювання направленими хвилями

Л.В. Зайцева

*Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
вул. Чкалова, 17, 61000 Харків, Україна*

Розглядаються з загальних позицій стан, перспективи і можливості застосування ємнісного методу неруйнівного контролю. Розроблено математичну модель процесу збудження акустичних хвиль (повдовжньої і поверхневої) за допомогою конденсатора, що дозволяє проводити розрахунок вихідного сигналу, для подальшого вибору методів і засобів прийому даних акустичних коливань. Розроблено макет пристрою для реалізації ємнісного методу. Встановлено можливість порушення і прийому акустичних коливань ємнісними перетворювачами.

Ключові слова: Перетворювач, Акустичний контроль, Довгохвильове випромінювання, Хвиля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Г.М. Сучков, *Дефектоскопия* **10**, 67 (2000) (G.M. Suchkov, *Defektoskopiya* **10**, 67 (2000)).
2. В.П. Себко, Г.М. Сучков, Б.М. Горкунов, *Электроэнергетика и преобразовательная техника* **1**, 54 (Харьков: НТУ «ХПИ»: 2003) (V.P. Sebko, G.M. Suchkov, B.M. Gorkunov, *Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika* **1**, 54 (Kharkov: NTU «KhPI»: 2003)).
3. Г.М. Сучков, *Контроль. Диагностика* **12**, 36 (2003) (G.M. Suchkov, *Kontrol'. Diagnostika* **12**, 36 (2003)).
4. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге, *Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль*, 863 (М.: Машиностроение: 2004) (I.N. Yermolov, Yu.V. Lange, *Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T.3: Ul'trazvukovoy kontrol'*, 863 (M.: Mashinostroyeniye: 2004)).
5. Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой, *Дефектоскопия* **3**, 35 (1983) (Yu.B. Drobot, A.I. Kondratyev, V.A. Lugovoy, *Defektoskopiya* **3**, 35 (1983)).
6. Г.М. Сучков, Л.В. Глебова, *Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск "Приборы и методы контроля и определения состава веществ"* **48**, 116 (2008) (G.M. Suchkov, L.V. Glebova, *Vestnik NTU "KhPI": Tematicheskiiy vypusk "Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veshchestva"* **48**, 116 (2008)).
7. С.В. Кузнецов, *Акустический журнал* **60** No 1, 90 (2014).
8. А.Д. Мансфельд, А.М. Рейман, *Акустический журнал* **57** No 2, 211 (2011) (A.D. Mansfeld, A.M. Reyman, *Akusticheskiiy Zhurnal* **57** No 2, 211 (2011)).
9. А.-С. Бонна-Бен Диа, С.А. Назаров, *Акустический журнал* **59** No 6, 685 (2013) (A.-S. Bonne-Ben Dia, S.A. Nazarov, *Akusticheskiiy Zhurnal* **59** No 6, 685 (2013)).
10. И.Е. Тамм, *Основы теории электричества. Издание третье*, 660 (М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы: 1946) (I.Ye. Tamm, *Osnovy teorii elektrichestva. Izdaniye tret'ye*, 660 (M.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury: 1946)).
11. Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль* **3**, 35 (2011) (B.M. Gorkunov, I.V. Popova, L.V. Golubeva, *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'* **3**, 35 (2011)).
12. С.Г. Львов, Л.В. Глебова, *Вісник НТУ "ХПИ": Збірник наукових праць. "Електроенергетика та перетворювальна техніка"* **41**, 128 (2012) (S.H. L'vov, L.V. Hlebova, *Visnyk NTU "KhPI": Zbirnyk naukovykh prats'. "Elektroenerhetyka ta peretvoryval'na tekhnika"* **41**, 128 (2012)).
13. А.И. Скряпник, А.А. Зажарченко, М.А. Хазхмуратов, Е.М. Прокхоренко, В.Ф. Клепиков, В.В. Лытвыненко, *Probl. Atomic Sci. Technol. Series: Nuclear Phys. Investigation* No 3(85), 231 (2013).