

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРУГЛЫХ ПЬЕЗОПЛАСТИН

UDC 534.86

V. I. Borisov, S. S. Sergeev, A. S. Nikitin

FINE STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD OF RADIATION OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS ON THE BASIS OF CIRCULAR PIEZOELECTRIC CRYSTAL PLATES

Аннотация

Теоретически и экспериментально исследовано акустическое поле излучения круглых пьезопластин. Показано, что в ближней зоне оно носит неоднородный характер с наличием большого количества минимумов и максимумов. Наблюдается качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, акустическое поле, пьезопреобразователь, пьезопластина, излучатель, дальняя зона, ближняя зона.

Abstract

An acoustic field of the radiation of circular piezoelectric crystal plates has been investigated both theoretically and experimentally. It is shown that in near-field zone the acoustic field has a nonuniform nature with a large number of minimums and maximums. A qualitative correspondence between theoretical and experimental results is observed.

Key words:

nondestructive testing, acoustic field, piezoelectric transducer, piezoelectric crystal plate, radiation source, far-field zone, near-field zone.

Методы акустического неразрушающего контроля на сегодняшний день самые распространенные при дефектоскопии технических изделий и материалов как в процессе производства, так и при эксплуатации. При этом одной из важнейших характеристик, влияющих на информационные возможности и достоверность контроля, является акустическое поле используемых пьезо-

преобразователей. При расчете акустического поля пьезопреобразователей аналитическое решение удается получить лишь для точек, расположенных на акустической оси круглой пьезопластины [1]. Для пьезопластин другой формы также получены удовлетворительные аналитические выражения, описывающие акустическое поле в дальней зоне [1–3].

Приведены результаты численного анализа акустического поля излучения круглых пьезопластин в режиме непрерывного возбуждения волн. Расчет акустического поля проводился способом,

изложенным в [4].

Расчетная схема пьезопреобразователя в виде круглой пластинки радиусом R_0 и площадью S представлена на рис. 1.

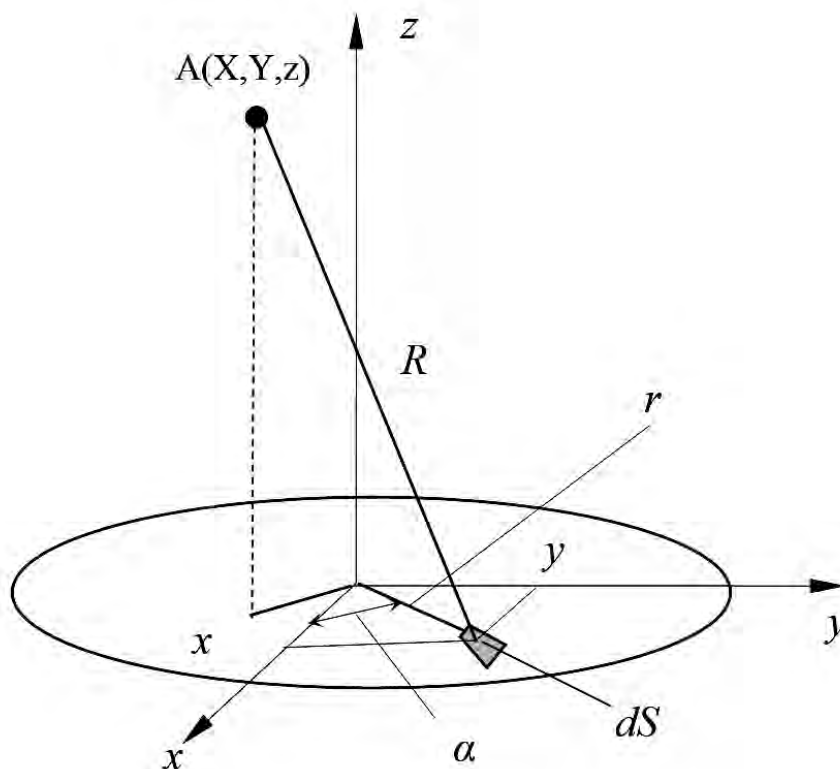


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля круглого пьезопреобразователя

Результирующая сила давления в точке A с координатами X, Y, z будет определяться следующей суммой:

$$F(X, Y, z) = P_0 \Delta r \Delta \alpha \times \sqrt{\left(\sum_0^N \frac{r z}{R^2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2 + \left(\sum_0^N \frac{r z}{R^2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2}, \quad (1)$$

где $\frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль волнового вектора (волновое число), $\frac{2\pi}{\lambda} = k$; λ – длина волны в материале среды, где распро-

страняется акустическая волна; P_0 – амплитуда давления, создаваемого элементарным излучателем на единичном расстоянии от элементарной площадки dS .

В этом выражении расстояние R от элементарного излучателя площадью $dS = r \Delta r \Delta \alpha$, расположенного в точке с координатами x, y , до точки A определяется следующим выражением:

$$R = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + z^2}. \quad (2)$$

Для вычисления суммы (1) удобно применять цилиндрическую систему координат. Вычисление этой суммы проводится следующим образом. Вся поверхность пьезопластинки разбивается на N элементарных площадок площа-

дью $dS = r\Delta r\Delta\alpha$, где r – расстояние от начала координат до элементарной площадки, а Δr и $\Delta\alpha$ – ее линейный и угловой размеры соответственно.

Число элементарных площадок выбирается таким образом, чтобы расстояние от соседних площадок до рассматриваемой точки A было значительно меньше длины акустической волны в

материале среды, в которой она распространяется.

Расчеты проводились для непрерывного режима работы круглой пьезопластины диаметром 10 мм, нагруженной на воду и работающей на резонансной частоте 5 МГц.

К примеру, на рис. 2 приведено распределение давления P на оси пьезопластины.

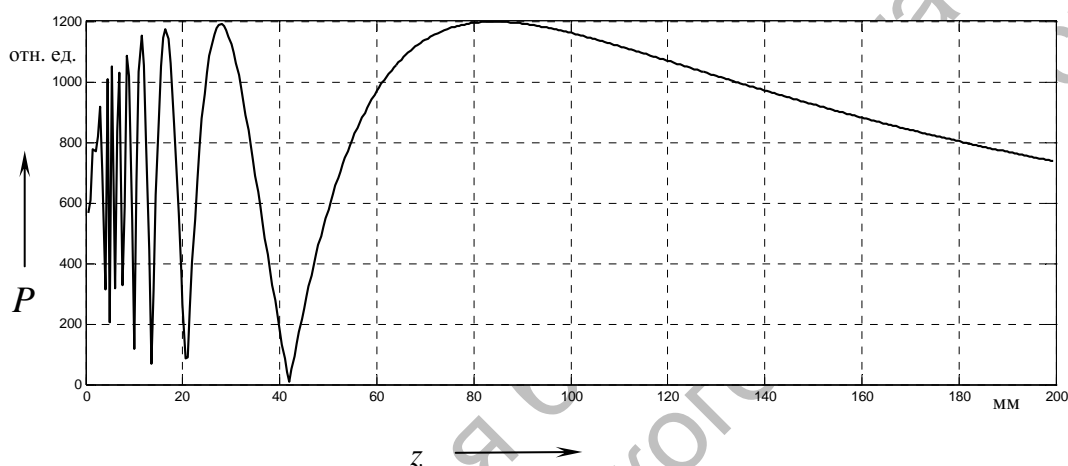


Рис. 2. Распределение давления акустической волны вдоль оси пьезопластины

Из рисунка видно, что для ближней зоны характерна осцилляция давления, а последний максимум наблюдается на расстоянии 83 мм от пьезопластины, что согласуется с литературными данными о размерах ближней зоны круглой пьезопластины [2].

Как в ближней, так и в дальней зонах акустическое поле носит круглосимметричный характер с осью симметрии, совпадающей с осью пьезопластины.

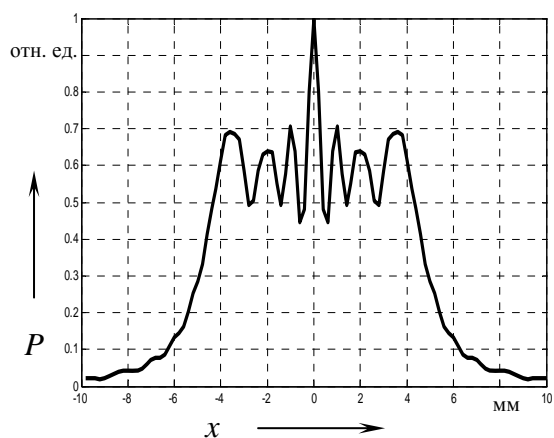
В ближней зоне наблюдается неоднородный характер распределения давления акустических волн в каждой плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины. К примеру, на рис. 3, а приведено распределение акустического давления P в плоскости XOZ на рас-

стоянии 5 мм от пьезопластины, а на рис. 3, б – трехмерный вид акустического поля на этом же расстоянии.

Анализ акустического поля в ближней зоне на разных расстояниях показал, что вдоль оси пьезопластины не везде наблюдается максимум акустического давления и, как правило, прослеживается ряд максимумов, сравнимых по амплитуде, как это видно на рис. 3, а.

В дальней же зоне энергия акустической волны сосредоточена, в основном, в центральном максимуме, распределенном вокруг оси пьезопластины. На рис. 4 приведено распределение акустического поля в осевой плоскости пьезопластины в дальней зоне на расстояниях 100, 200 и 300 мм от пьезопластины.

а)



б)

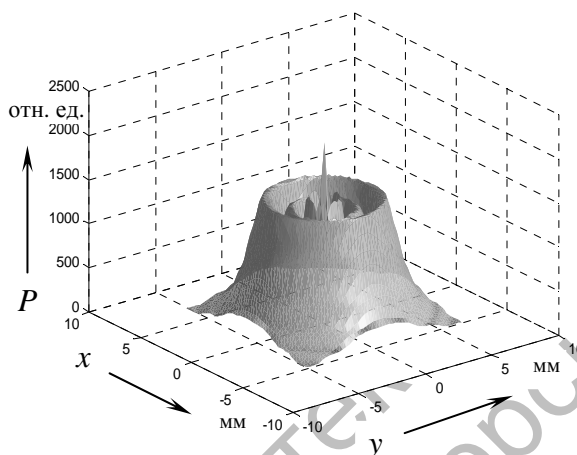


Рис. 3. Распределение давления акустических волн в ближней зоне в осевой плоскости пьезопластины (а) и трехмерное изображение акустического поля (б) на расстоянии 5 мм от пьезопластины

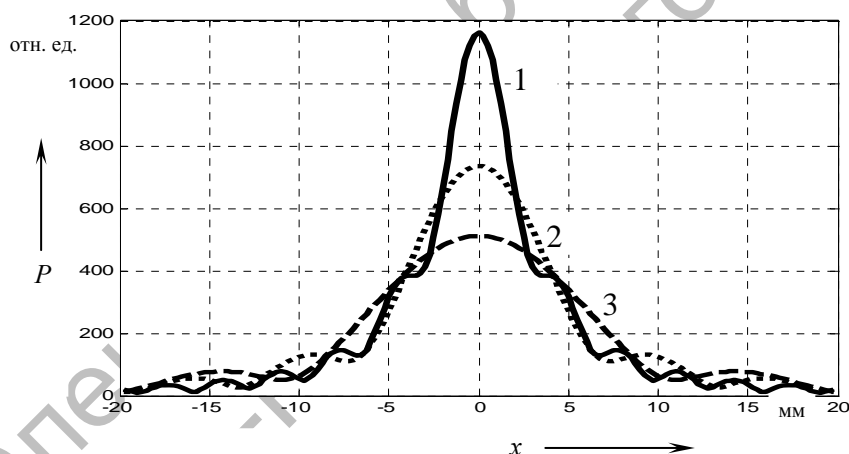


Рис. 4. Распределение акустического давления в дальней зоне на расстояниях 100 мм (1), 200 мм (2) и 300 мм (3) от оси пьезопластины

Из рисунка видно, что в дальней зоне при удалении от оси пьезопластины также наблюдаются дополнительные максимумы давления (боковые лепестки диаграммы направленности) акустических волн, но эти максимумы более чем в 5 раз меньше центрального. Анализ рассчитанного акустического поля в дальней зоне показал, что угловое раскрытие основного лепестка диаграммы

направленности по уровню 0,5 составляет $7,3^\circ$, что в 1,7 раза превышает дифракционную расходимость акустического излучения по нулевому уровню.

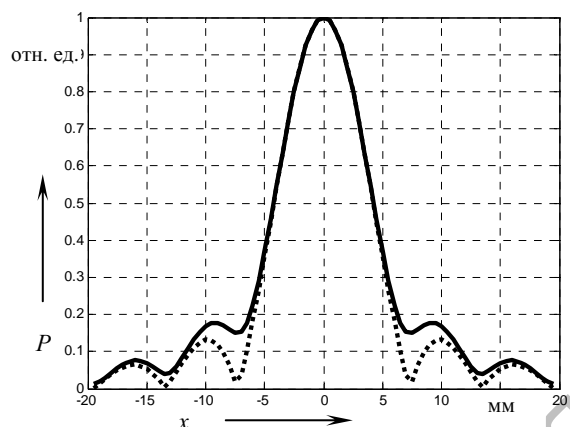
Из литературы известно, что акустическое поле круглых пьезопреобразователей в дальней зоне удовлетворительно описывается аналитической зависимостью [2]

$$|2J_1(X)/X|, \quad (3)$$

где $J_1(X)$ – функция Бесселя 1-го рода первого порядка; $X = ak \sin\theta$; a – радиус пьезопластины; k – волновое число в материале среды, в которой распространяется акустическая волна; θ – угол между акустической осью и направлением на точку, в которой рассматривается акустическое поле.

Было проведено сравнение акустического поля, рассчитанного по формулам (1) и (3). К примеру, на рис. 5, а сплошной линией приведено распределение акустического давления P в осевой плоскости XOZ на расстоянии 200 мм от пьезопластины, рассчитанное предлагаемым способом, а штриховой – вычисленное по аналитической зависимости (3).

а)



б)

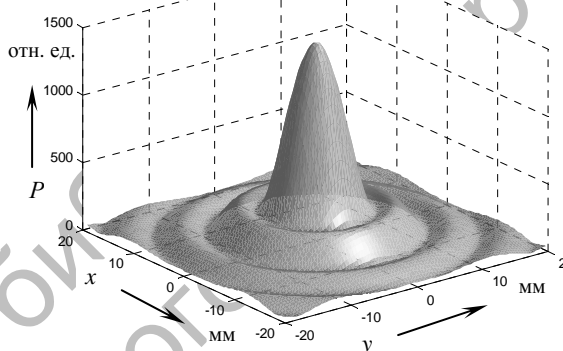


Рис. 5. Распределение давления акустических волн в дальней зоне в осевой плоскости пьезопластины (а) и трехмерное изображение акустического поля (б) на расстоянии 200 мм от пьезопластины

Из графиков видно, что в области центрального максимума, расположенного на акустической оси пьезопластины, рассчитанная зависимость практически совпадает с аналитической. Различие же заключается в том, что давление акустических волн, описываемое аналитической зависимостью, имеет более глубокие минимумы. Это различие наблюдается тем меньше, чем дальше происходит удаление от пьезопластины. Трехмерная картина акустического поля, приведенная на рис. 5, б, показывает, что поле носит симметричный характер относительно оси пьезопластины.

Кроме того, было осуществлено сравнение рассчитанного акустического поля с экспериментально измеренным. Экспериментальное измерение акусти-

ческого поля круглых пьезопреобразователей проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 6.

Установка работает следующим образом. Акустическое поле изучается при распространении ультразвуковой волны в цилиндрической кювете 1, заполненной водой 2. Кювета устанавливается на подставку 3 для того, чтобы ввести ультразвуковую волну в воду через дно кюветы через слой контактной жидкости от прямого пьезопреобразователя 4 на основе круглой пьезопластины диаметром 10 мм, который работает в импульсном режиме на резонансной частоте 5 МГц. Амплитуда импульса, излучаемого пьезопреобразователем, измеряется с помощью цифрового ультразвукового дефектоскопа УД4-76.

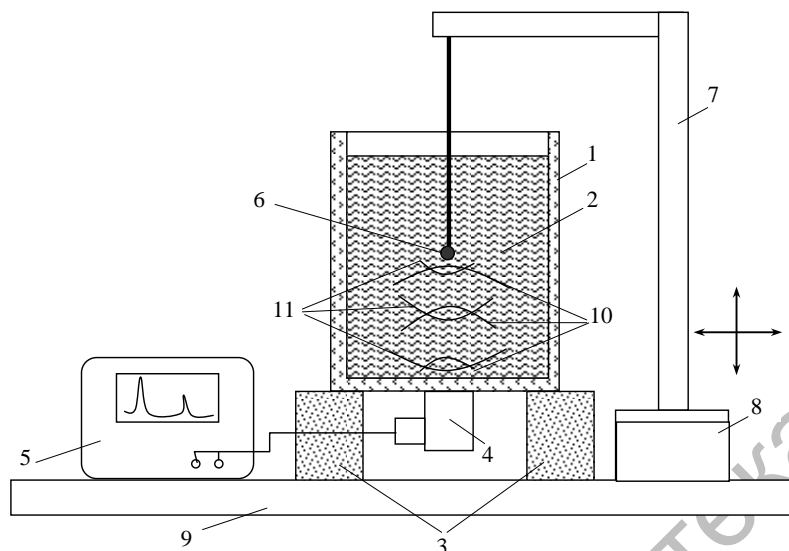


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрическая кювета; 2 – вода; 3 – подставки под кювету; 4 – пьезопреобразователь с круглой пьезопластиной; 5 – ультразвуковой дефектоскоп УД4-76; 6 – шаровый зонд; 7 – стойка для крепления зонда; 8 – двухкоординатный столик; 9 – стол; 10 – прямая акустическая волна; 11 – акустическая волна, отраженная от зонда

Акустическая волна 10, генерируемая пьезопреобразователем, распространяется от дна кюветы вверх по направлению к зонду 6, представляющему собой стальной шарик диаметром 1 мм, припаянный к отрезку медной проволоки диаметром 0,2 мм. Шаровый зонд 6 частично отражает акустическую волну в направлении пьезопреобразователя 4. Так как зонд представляет собой точечный отражатель, то отраженная от него волна 11 является сферической. Зонд закрепляется на стойке 7, которая фиксируется на двухкоординатном столике, позволяющем определять передвижение зонда в горизонтальном и вертикальном направлениях. В экспериментах снималась зависимость амплитуды акустической волны только в ближней зоне пьезопреобразователя, т. к. именно в ней наблюдается неоднородность акустического поля и характерные различия акустического поля на разных расстояниях от пьезопластины.

К примеру, на рис. 7 приведены рассчитанные и измеренные зависимости давления акустической волны P в осевой плоскости XOZ пьезопластины

на расстояниях 28, 48 и 68 мм от пьезопластины.

Из рис. 7 видно, что основные закономерности качественно повторяются как для теоретических расчетов, так и для экспериментальных данных. Так, на расстоянии 28 мм от пьезопластины в центре наблюдаются наибольший максимум, по обе стороны которого прослеживаются меньшие максимумы. На расстоянии 48 мм на оси пьезопластины наблюдается провал, а на расстоянии 68 мм, которое близко к последнему максимуму акустического поля, – один максимум. Различия в деталях объясняется тем, что в экспериментах использовался импульсный режим работы пьезопреобразователя, при котором не проявляются многие детали интерференционной картины акустического поля, а также размеры применяемой кюветы не удовлетворяют условию полубесконечности пространства, что приводит к влиянию на определяемое акустическое поле паразитных отражений от стенок кюветы и поверхности воды. Кроме этого, размеры шарового зонда больше длины волны.

Таким образом, проведенные исследования акустического поля круглых пьезопластин показали основные зако-

номерности этого поля на различных расстояниях от пьезопластины.

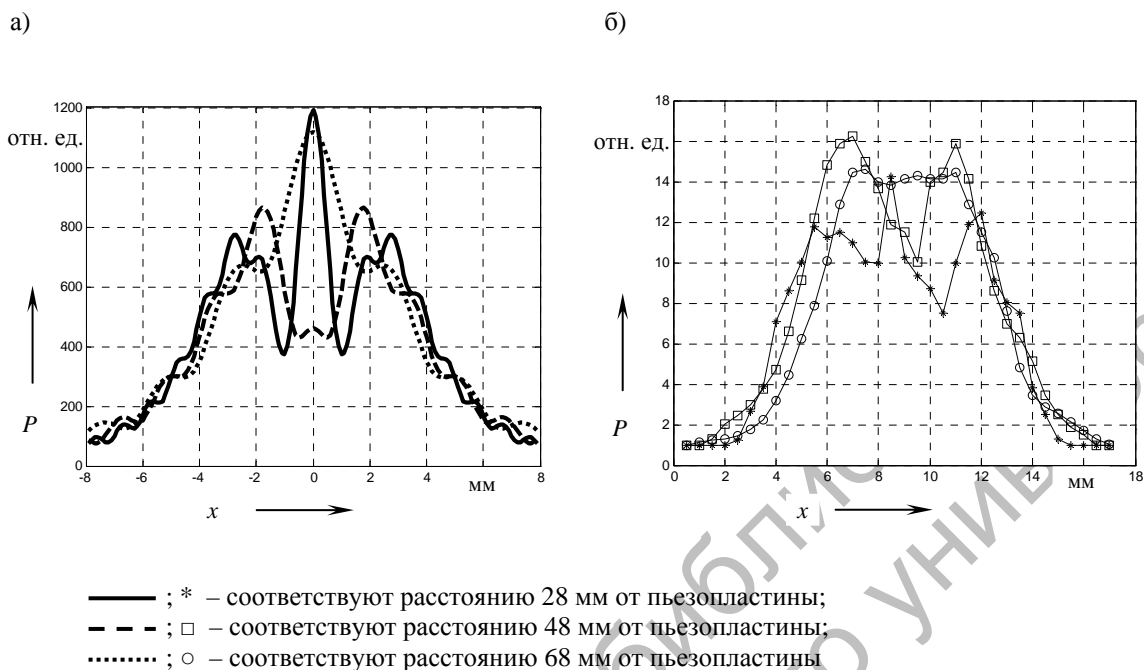


Рис. 7. Теоретические (а) и экспериментальные (б) зависимости давления акустической волны в осевой плоскости пьезопластины в ближней зоне на разных расстояниях от пьезопластины

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич, А. К. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. – Киев : Техніка, 1980. – 101 с.
2. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля : практ. пособие в 5 кн. / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов ; под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – М. : Машиностроение, 1986. – 280 с.
4. Борисов, В. И. Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 105–113.

Статья сдана в редакцию 31 марта 2015 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-52-12.

Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-52-12.

Александр Сергеевич Никитин, студент, Белорусско-Российский университет.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics & Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-52-12.

Sergey Sergeevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-52-12.

Aleksandr Sergeevich Nikitin, student, Belarusian-Russian University.