

Разработка физических основ емкостного акустического метода дефектоскопии металлов

Б.М. Горкунов¹, И.В. Тюпа¹, Л.В. Зайцева^{1,2}, Г.С. Хрипунов¹, Р.В. Зайцев¹, А.Л. Хрипунова¹

¹ *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина*

² *ОАО «Турбоатом», просп. Московский, 199, 61037 Харьков, Украина*

(Получено 16.07.2014; опубликовано online 25.03.2015)

Разработана физическая модель процесса возбуждения с помощью конденсатора длинноволновых продольных и поверхностных акустических волн в металлах. Показано, что модель позволяет проводить расчет выходного сигнала и осуществлять выбор методов и средств для приема данных акустических колебаний при проведении дефектоскопии металлов. Установлена возможность возбуждения и приема длинноволновых акустических колебаний емкостными преобразователями. Разработана схемотехническое решение электронного устройства для реализации оригинального емкостного акустического метода дефектоскопии металлов.

Ключевые слова: Акустический метод, Дефектоскопия металлов, Емкостной преобразователь, Длинноволновое излучение.

PACS numbers: 06.20. – f, 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 (требует контактной жидкости, например). Заполнить эту нишу возможно с помощью методов не требующих ее использования: лазерные методы, электромагнитно акустические и, в частности, емкостной метод, использующий емкостные преобразователи (ЕП) для своей работы, которые имеют ряд преимуществ (бесконтактность, широкий частотный диапазон, простота изготовления). Ранее упоминалось [1], что данный преобразователь обладает низкой чувствительностью 100 В/мкм. Однако в работах [2-3] 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.

ДМ использует кГц частоты и волны, которые проникают сквозь всю толщину объекта (будь то труба или пластина). Более подробно процесс распространения

волн рассмотрен в [4]. В случае трубы направление распространения волны известно. Она работает как волновод, импульсы распространяются на очень длинные расстояния (до 100 м). 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 [5]. 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 электрической емкости, а также исследование возможности использования ЕП для длинноволнового излучения направленными волнами.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ

2.1 Распределение продольной волны

ЕП с диэлектрической прослойкой (ДП) возбуждает продольную волну в объекте контроля (ОК), создаваемую генераторами поляризующих (ГПИ) и возбуждающих импульсов (ГВИ) (рис. 1). Рассмотрим сдвиг материальных точек ОК вдоль оси z , вызванный переменным давлением P_0 . Расположим точку контроля с координатами $M_1(0, 0, z_0)$ на обратной поверхности ОК (рис. 1).

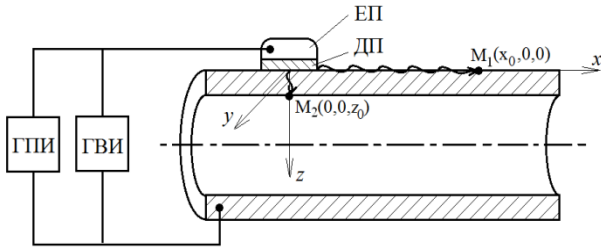


Рис. 1 – Распространение продольной волны вдоль оси z и поверхностной волны вдоль оси x

Используем базовую формулу [6], которая позволяет рассчитать величину смещения акустической волны для произвольной точки контроля, которая принадлежит ОК:

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

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:

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

G – модуль сдвига;
 μ – коэффициент Пуассона.

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

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

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

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

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

2.2 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:

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

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

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

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.

3. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОРИГИНАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ

При реализации возбуждения и приема акустических колебаний емкостным преобразователем, к возбуждающей и приемной аппаратуре необходимо предъявлять достаточно жесткие и одновременно противоречивые требования [7, 8]. Для обеспечения возбуждения акустической волны в объекте контроля с помощью емкостного преобразователя необходимо использовать высокочастотный генератор возбуждающих синусоидальных импульсов (ГВИ) с амплитудой выходного сигнала более 500 В. Приемный емкостной преобразователь (ПЕП) и предварительный усилитель, обеспечивающий процесс преобразования акустического сигнала в электрические импульсы, необходимо синхронизировать устройством синхронизации (УС) с возбуждающим генератором в широком диапазоне периода следования электрических импульсов генератора. При приеме на ЭП необходимо подавать постоянное напряжение не менее 100 В.

Данное условие требует создания специального высокостабильного по амплитуде генератора разнополярных поляризующих импульсов (ГПИ) с варьируемой скважностью. В работе разработан макет, который позволяет реализовать предложенный способ неразрушающего контроля (рис. 2).

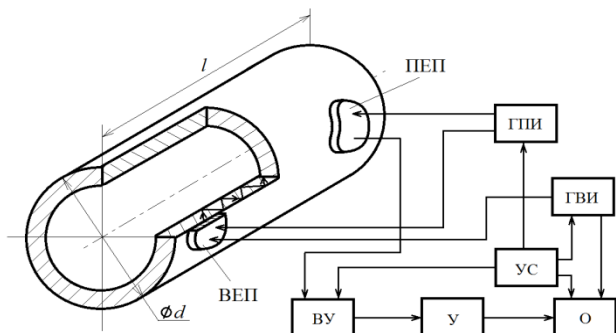


Рис. 2 – Макет прибора для акустического контроля емкостным способом

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

Работой ГВИ и ГПИ управляет устройство синхронизации УС. При подаче зондирующего импульса на пластине ПЭП за счет прямой передачи электрического сигнала наводится сигнал, который может привести к повреждению приемного канала установки. Для исключения этого во входном устройстве (ВУ) происходит запираение входной цепи на время прохождения зондирующего импульса под влиянием управления УС. Выходной сигнал с ВУ поступает на усилитель (У) и далее на осциллограф (О).

Для более четкого представления поведения упругих колебаний в качестве электрода была рассмотрена прямоугольная пластина, интегрирование и численные расчеты проводились численно с помощью соответствующих программ комплекса MathCAD, при условии расчета акустического смещения поверхности ОК (стальной образец) при фиксированном возбуждающем давлении $P_0 = 10^4$ Па. Значения частот возбуждающего давления находились в диапазоне 0,1-10 МГц, размеры электрода 15×15 мм. На рис. 3 приведен пример полученной зависимости акустического смещения от расстояния по поверхности ОК на частоте 2 МГц.

В случае моделирования аналогичных зависимостей для электродов круглой формы существенного отличия в их характере не замечено.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментальной апробации разработанного метода реализован опытный образец прибора для проведения акустического контроля с использованием емкостных преобразователей. Апробация проводилась при исследовании участка трубы.

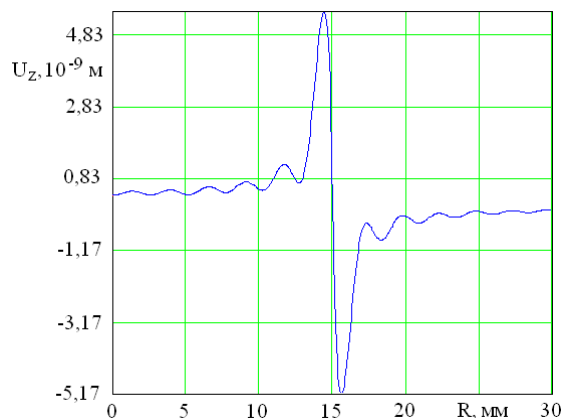


Рис. 3 – Зависимость акустического смещения от расстояния по поверхности ОК на частоте 2 МГц

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 $d_1 = d_2 = 0.1$ 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 ПЭП, 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:

$$\Delta C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_2 \pm \Delta d},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; d_2 – начальное расстояние между обкладками конденсатора;

Δd – прирост расстояния между обкладками конденсатора в результате поверхностных колебаний ОК и колебаний электрода.

При этом амплитуда выходного сигнала ПЭП определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_z \cdot U_{\infty}}{d_2},$$

где U_z – амплитуда смещения материальных точек поверхности.

Величина d_2 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. 4 приведены временные диаграммы работы устройства акустического контроля с ЕП.

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.

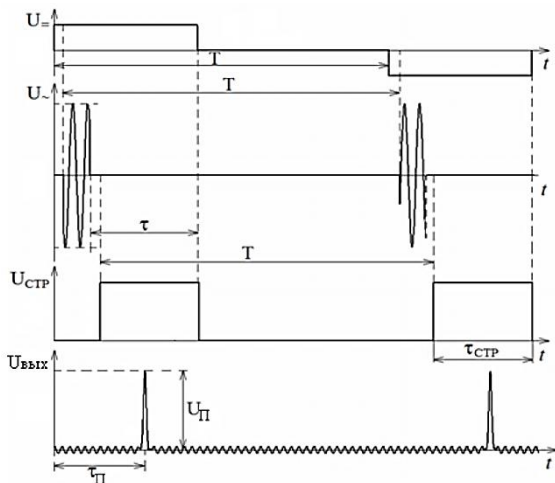


Рис. 4 – Временные диаграммы работы устройства для акустического контроля емкостным способом

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 $\tau_{СТР}$ (рис. 4), который отпирает во входном устройстве приемный канал. Сигнал с ОП 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. 4 изображен принятый сигнал ($U_{вых}$), прошедший через ОК, где $\tau_{П}$ – время прохождения акустической волны через ОК, $U_{П}$ – амплитуда принятого сигнала.

В случае возбуждения и приема акустических волн целесообразно использовать низкочастотный диапазон. На рис. 5 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.

Таблица 1 – Расчетные U_p и полученные экспериментальным путем U_s данные уровня выходного сигнала в зависимости от расстояния между ПЕП и ВЕП

l , мм	U_p , В	U_s , 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

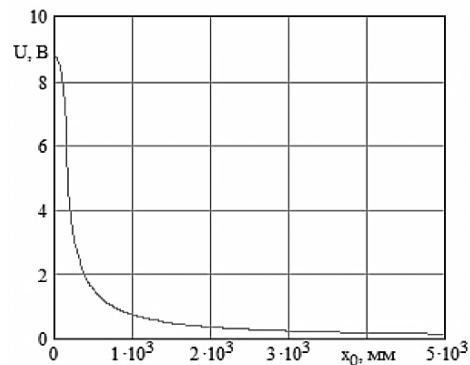


Рис. 5 – График зависимости выходного сигнала от расстояния между преобразователями для частоты 100 кГц

В таблице приведены расчетные U_p и полученные экспериментальным путем U_s данные уровня выходного сигнала в зависимости от расстояния между ПЕП и ВЕП. Расхождение в данных составляет порядка 20 %, что свидетельствует о правильности выбора методики расчета и аппаратуры для проведения электрического метода НК.

5. 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.

Розробка фізичних основ емнісного акустичного методу дефектоскопії металів

Б.М. Горкунов¹, І.В. Тюпа¹, Л.В. Зайцева^{1,2}, Г.С. Хрипунов¹, Р.В. Зайцев¹, А.Л. Хрипунова¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

² ВАТ «Турбоатом», просп. Московський, 199, 61037 Харків, Україна

Розроблено фізичну модель процесу збудження за допомогою конденсатора довгохвильових поздовжніх і поверхневих акустичних хвиль у металах. Показано, що модель дозволяє проводити розрахунок вихідного сигналу і здійснювати вибір методів і засобів для прийому даних акустичних коливань при проведенні дефектоскопії металів. Встановлено можливість збудження і прийому довгохвильових акустичних коливань емнісними перетворювачами. Розроблено схематехнічне рішення електронного пристрою для реалізації оригінального емнісного акустичного методу дефектоскопії металів.

Ключові слова: Перетворювач, акустичний контроль, довгохвильове випромінювання, хвиля.

Metal Defectoscopy by the Capacitive Acoustic Method: The Physical Base Development

B.M. Gorkunov¹, I.V. Tupa¹, L.V. Zaitseva^{1,2}, G.S. Khrypunov¹, R.V. Zaitsev¹, A.L. Khrypunova¹

¹ National technical University «Kharkov Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., 61002 Kharkiv, Ukraine

² OJSC «Turboatom», 199, Moskovsky Ave., 61037 Kharkiv, Ukraine

A physical model with a capacitor for excitation of long-wave longitudinal and surface acoustic waves in metals has been developed. It is shown that the model allows the calculation of the output signal and choice of methods and means for receiving data from acoustic oscillations during the defectoscopy of metals. The possibility of long-wave excitation and reception of acoustic oscillations of capacitive transducers are defined. Solution of the electronic device for implementing the original capacitive acoustic defectoscopy methods is designed.

Keywords: Transformer, Acoustic control, Long-wave radiation, Wave.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге, *Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль* (Москва: Машиностроение: 2004) (I.N. Yermolov, Yu.V. Lange, *Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyueva. T.3: Ul'trazvukovoy kontrol'* (Moskva: Mashinostroyeniye: 2004)).
2. Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой, *Дефектоскопия* **3**, 35 (1983) (Yu.B. Drobot, A.I. Kondrat'yev, V.A. Lugovoy, *Defektoskopiya* **3**, 35 (1983)).
3. Г.М. Сучков, Л.В. Глебова, *Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск «Приборы и методы контроля и определения состава вещества»* **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)).
4. С.В. Кузнецов, *Акустический журнал* **60** № 1, 90 (2014) (S.V. Kuznetsov, *Akusticheskiy zhurnal* **60** No 1, 90 (2014)).
5. А.-С. Бонне-Бен Диа, С.А. Назаров, *Акустический журнал* **59** № 6, 685 (2013) (A.-S. Bonne-Ben Dia, S.A. Nazarov, *Akusticheskiy zhurnal* **59** No 6, 685 (2013)).
6. Б.М. Горкунов, Л.В. Глебова, И.В. Тюпа, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль* **3**, 35 (2011) (B.M. Gorkunov, L.V. Glebova, I.V. Tupa, *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'* **3**, 35 (2011)).
7. С.Г. Львов, Л.В. Глебова, *Вісник НТУ «ХПІ»: Збірник наукових праць. «Електроенергетика та перетворювальна техніка»* **41**, 128 (2012) (S.G. L'vov, L.V. Glebova, *Vіsник NTU «KhPI»: Zbirnik naukovikh prats'. «Yeletroyenergetika ta peretvoryual'na tekhnika»* **41**, 128 (2012)).
8. А.И. Скряпник, А.А. Зажарченко, М.А. Хазьмуратов, Е.М. Прокхоренко, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвыненко, *Problems of atomic science and technology.-Series: Nuclear Physics Investigation* No 3(85), 231 (2013).