

8. Пат. 2550363 РФ. Способ измерения толщины льда и определения свойств подстилающей поверхности подо льдом и устройство для его осуществления (варианты) / Б. А. Атаянц, В. М. Давыдочкин, И. В. Баранов, В. А. Болонин, В. В. Езерский // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 13.

9. ПОТ РО-00030171—99. Правила по охране труда при выполнении перегрузочных работ в речных портах (утв. Минтранс России 30.12.1999). Приложение 6. Инструкция по обеспечению безопасного движения людей и транспорта по ледовой дороге.

Дата принятия: 27.07.2016.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

534.6.08:53.088

Измерения акустических параметров с использованием радиоимпульса

К. А. ДРАЧЁВ, В. И. РИМЛЯНД

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия,
e-mail: project1326@mail.ru

Рассмотрены погрешности измерений акустических параметров при ультразвуковом контроле металлических труб с использованием возбуждающего сигнала в виде радиоимпульса.

Ключевые слова: скорость звука, коэффициент затухания, радиоимпульс, одиночный импульс.

Measuring errors of acoustic parameters in metal pipes with the use of the actuating signal as a radio pulse are considered.

Key words: sound speed, attenuation coefficient, radio pulse, single pulse.

В последние годы получили развитие методы и средства ультразвукового контроля длинномерных объектов — стержней, труб, пластин, листов, рельсов и т. п. Основой данных методов является волноводный эффект распространения ультразвука на значительные расстояния. При этом используются различные типы и моды ультразвуковых колебаний в волноводе: продольные и поверхностные (Релея) волны, волны Лэмба [1—3]. Создание подобных ультразвуковых систем требует знания зависимостей скорости звука C и коэффициента затухания α от частоты f для волн различных типов.

Определения зависимостей $C(f)$, $\alpha(f)$ возможны на базе резонансных методов, однако для объектов большой длины, обладающих волноводными свойствами, возникают проблемы, связанные с особенностями распространения ультразвуковых волн: большое число резонансов, одновременное возбуждение волн нескольких типов и др. Цель данной работы — установление возможности измерения дисперсионных зависимостей $C(f)$, $\alpha(f)$ для металлических труб с использованием в качестве зондирующего ультразвукового импульса (УЗИ) амплитудно-модулированного сигнала в виде радиоимпульса (РИ). В экспериментах длительность и амплитуда РИ составляли 50 мкс и 9 В, несущая частота изменялась в диапазоне 30—600 кГц. Для возбуждения РИ применяли пьезопреобразователи (ПП), расположенные

на торце металлической части или на поверхности трубы (рис. 1, ПП1). При возбуждении одиночным импульсом его длительность, амплитуда и крутизна фронта составляли соответственно 0,5 мкс, 9 В и 0,03 В/нс. Для уменьшения уровня фона использовали усреднение по 100 цифровым реализациям ($N = 100$). Более подробно методика эксперимента приведена в [4].

На рис. 2 приведены усреднённые цифровые осциллограммы сигнала для стальной трубы диаметром 114 мм, длиной 2 м и толщиной стенки 4 мм. На рис. 2, а представлены осциллограммы сигналов для ПП, установленных на торцах трубы. Применение РИ позволяет идентифицировать волну как с продольной поляризацией (имеет наибольшую скорость), так и поперечной. На рис. 2, б показаны осциллограммы сигналов для ПП, расположенных на поверхности трубы с углом ввода 50° (см. рис. 1). Возбуждение РИ позволяет создавать и идентифицировать поверхностную волну Рэлея (кривая 7) и волну Лэмба (кривая 6). При использовании одиночного импульса наблюдается только волна Рэлея (кривая 5), волну Лэмба невозможно выделить из шумов ($N \geq 100$). При этом увеличение амплитуды импульса до 50 В фактически не даёт положительного эффекта при любых углах ввода.

По результатам измерений времени прохождения между ПП, излучающим и принимающим РИ с различной частотой

той заполнения, можно вычислить скорость звука по формуле

$$C = l_1 / (t - t_0),$$

где l_1 — расстояние между ПП; t — время прихода УЗИ, определяемое по превышению первой полуволны уровня фона на 10 %; t_0 — время задержки сигнала, равное сумме времён задержки сигнала в электронном тракте возбуждения УЗИ измерительной системы и распространения УЗ-волн в ПП и области контакта преобразователь—образец.

Коэффициент затухания рассчитываем как

$$\alpha = (20/l_2) \lg (U_2/U_3),$$

где U_2, U_3 — амплитуды напряжения соответствующих сигналов на пьезоприёмниках ПП2, ПП3 (см. рис. 1); l_2 — расстояние между ПП2 и ПП3.

Погрешность измерения акустических характеристик с помощью РИ. Как указано выше для определения скорости звука и коэффициента затухания ультразвуковых волн в трубах в качестве зондирующего был использован РИ с различной частотой заполнения. Основной вклад в погрешность измерения скорости вносят погрешности, связанные с определением длины образца и временем прохождения сигнала — $\Delta C_l, \Delta C_t$, соответственно.

Значение ΔC_l определяется погрешностью δl измерения линейного размера трубы или другого объекта измерений и составляет в данном случае менее 1 мм. При длине трубы $l = 1$ м вклад в относительную погрешность составляет не более 0,1 %, при $l = 2$ м — 0,05 %. Отсюда при $C = 6000$ м/с получим $\Delta C_l = \pm 6$ м/с.

Погрешность ΔC_t содержит несколько составляющих:

$$\Delta C_t = \Delta C_{t_0} + \Delta C_{t_{узи}} + \Delta C_{t_{ри}}.$$

Здесь погрешность ΔC_{t_0} связана с определением времени t_0 аппаратной задержки; $\Delta C_{t_{узи}}$ обусловлена неопределённостью и разбросом момента времени фиксации прихода УЗИ из-за шумов и крутизны фронта акустического импульса, имеет систематическую $\Delta C_{t_{узи}}^{\text{сист}}$ и

случайную $\Delta C_{t_{узи}}^{\text{сл}}$ составляющие; $\Delta C_{t_{ри}}$ — определяется дополнительной задержкой времени при фиксации времени прихода РИ по сравнению с временем поступления одиночного УЗИ.

Для определения времени t_0 была проведена дополнительная серия измерений. В качестве эталонного образца (аналога бесконечной среды) служила медная пластина толщиной 14,6 мм размером 52×52 мм. По полученным осциллограммам акустических сигналов был выполнен расчёт средней скорости распространения продольных волн в материале и её сравнение с теоретическим значением. Затем найдена экспериментальная временная задержка $t_0 = 2,28 \cdot 10^{-7}$ с. При работе с наклонными ПП также учитывалась временная задержка в материале призмы ПП. По результатам измерений уста-

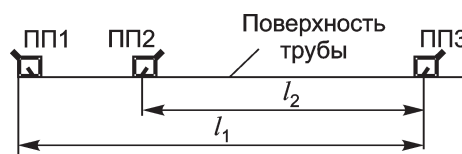


Рис. 1. Расположение пьезопреобразователей на поверхности трубы:

ПП1 — излучающий пьезопреобразователь; ПП2, ПП3 — принимающие пьезопреобразователи

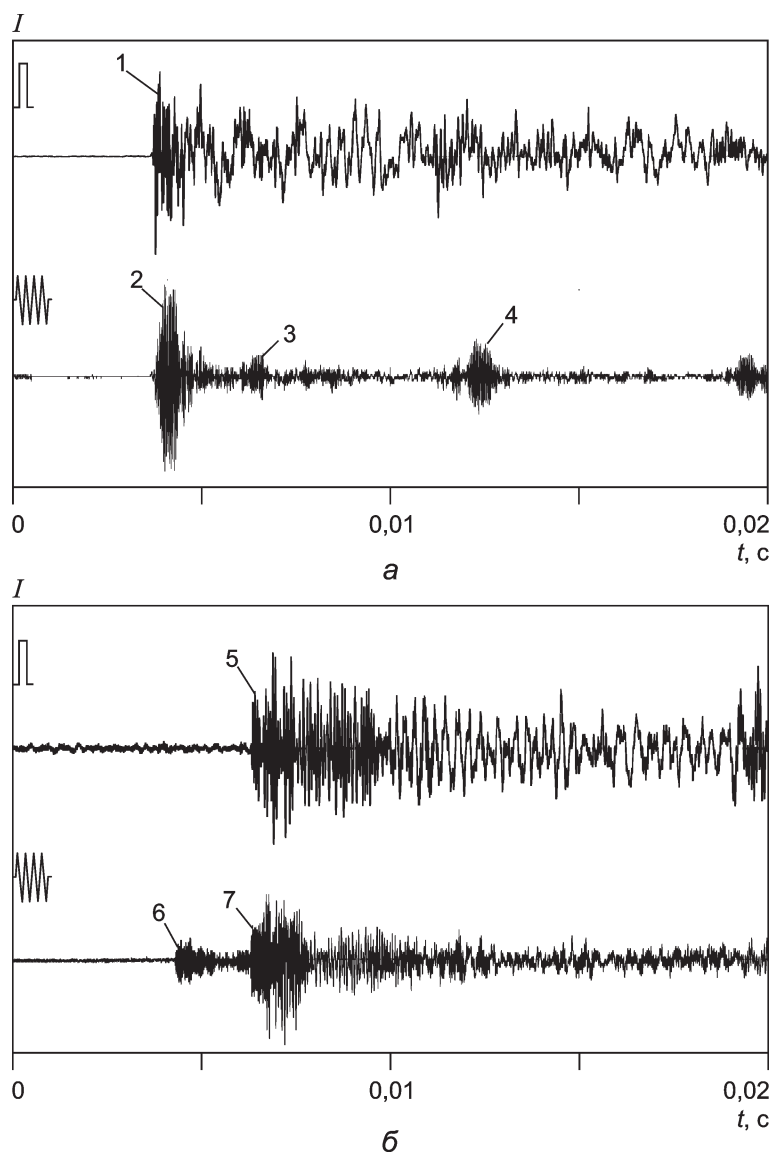


Рис. 2. Цифровые осциллограммы сигналов для пьезопреобразователей, установленных на торцах трубы (а) и её поверхности (б) при частоте заполнения $f = 300$ кГц:

1, 5 — возбуждение одиночным импульсом продольной и поверхностной (Рэлея) волн; 2, 3, 4, 6, 7 — возбуждение радиоимпульсом волн соответственно продольной, поперечной, отражённой продольной, Лэмба, Рэлея

новили, что погрешность $\delta_{t_0} < 4 \cdot 10^{-8}$ с. При длине стальной трубы 1 м и скорости звука 6000 м/с получили время $t = 167$ мкс, откуда $\delta_{t_0}/t = 0,017$ %, при длине трубы 2 м эта погрешность уменьшается примерно в два раза. Таким образом, погрешностью скорости ΔC_{t_0} можно пренебречь. Аналогичные значения t_0 , δ_{t_0} были получены при использовании в качестве эталона ультразвукового стандартного образца СО-2 (заводской номер № 1502/2015 [5]).

Систематическая составляющая $\Delta C_{t_{узи}}^{сист}$ определяется погрешностью $\delta_{t_{узи}}$ фиксации времени «начала» УЗИ и зависит от крутизны фронта этого импульса и конечного значения уровня напряжения срабатывания «компаратора», отвечающего за фиксацию электрического напряжения на выходе тракта усиления сигнала приёмника. Данная погрешность относится к систематическим, так как в основном обуславливает «запаздывание» обнаружения пришедшего сигнала. Влияние различных факторов на погрешность $\delta_{t_{узи}}$ достаточно подробно проанализировано в [6—8]. Для одиночного импульса получена $\delta_{t_{узи}} = 0,5$ мкс, при $t = 200$ мкс погрешность $\delta_{t_0}/t = 0,25 \cdot 10^{-2}$ с (0,25 %). Отсюда при $C = 6000$ м/с составляющая погрешности измерения скорости УЗИ будет $\Delta C_{t_{узи}}^{сист} = 15$ м/с.

Экспериментальная оценка составляющих погрешности. Для оценки влияния РИ на систематическую погрешность измерений скорости, а также для нахождения её случайной составляющей были проведены дополнительные измерения. В качестве эталонного образца использован стальной сплошной цилиндр диаметром 5 см и длиной $(2,508 \pm 0,0005)$ м, изготовленный из углеродистой инструментальной стали марки Ст У7 (98 % Fe; 0,66—0,73 % С; по 0,17—0,33 % Si, Mn; до 0,25 % Ni; до 0,028 % S; до 0,03 % P; до 0,2 % Cr; до 0,25 % Cu). Диаметра основания цилиндра достаточно, чтобы считать цилиндр близким по акустическим свойствам к сплошной среде. В соответствии с данными [9] скорость продольных волн в стали марки Ст У7 составляет 5900—5950 м/с. Использовали ПП диаметром 28 мм и максимумом амплитудно-частотной характеристики 1,25 МГц, расположенные на торцах цилиндра. Эти же ПП применяли для измерения скорости продольных волн, только устанавливали их на торцах трубы.

Первоначально возбуждение осуществлялось одиночным электрическим импульсом генератора Г5-54 длительностью 0,5 мкс и амплитудой 20 В. Выполнили несколько серий измерений по четыре измерения в каждой серии (при этом несколько раз переставили ПП). Для каждой серии методом Стюдента с надёжностью 0,95 рассчитали случайную погрешность. В табл. 1 приведены значения скорости звука, определённые по первому пришедшему импульсу, и случайной погрешности для серий измерений 1, 3.

Таблица 1
Экспериментальная оценка составляющих погрешности для одиночного импульса

Номер серии	t , с	C , м/с	$\Delta C_{t_{узи}}^{сл}$, м/с
1	0,0004232	5927,46	8,9
	0,0004241	5914,88	
	0,0004235	5923,26	
	0,0004229	5931,66	
3	0,0004229	5931,66	8,4
	0,0004237	5920,46	
	0,0004238	5919,07	
	0,0004240	5916,27	

Для всех серий измерений нашли среднее значение скорости $C_{ср} = 5924$ м/с, которое совпадает с данными для стали марки Ст У7. Затем рассчитали случайную погрешность при возбуждении одиночным импульсом $\Delta C_{t_{узи}}^{сл} = 8,9$ м/с ≈ 9 м/с.

Отсюда получили $C = (5924 \pm 9)$ м/с, при этом $\Delta C_{t_{узи}}^{сл}/C = 0,0015$ (0,15 %), что свидетельствует о достаточно высокой точности метода.

Для оценки погрешностей измерения скорости РИ провели измерения скорости продольных волн в описанном выше цилиндре. Длительность РИ составляла 50 мкс при различных частотах заполнения: $f = 100; 300; 500; 600$ кГц.

Таблица 2
Экспериментальная оценка составляющих погрешности измерения скорости РИ

f , кГц	t , с	C , м/с	$C_{ср}$, м/с	$\Delta C_{t_{РИ}}^{сл}$, м/с
100	0,0004270	5874,71	5868,5	14,42
	0,0004270	5874,71		
	0,0004274	5869,21		
	0,0004284	5855,51		
300	0,0004265	5881,59	5877,5	6,93
	0,0004272	5871,96		
	0,0004266	5880,22		
	0,0004269	5876,08		
500	0,0004270	5874,71	5879,2	9,70
	0,0004262	5885,73		
	0,0004271	5873,33		
	0,0004264	5882,97		
600	0,0004266	5880,22	5879,9	7,25
	0,0004267	5878,84		
	0,0004262	5885,73		
	0,0004270	5874,71		

В табл. 2 приведены средние значения скорости и случайной погрешности $\Delta C_{t_{РИ}}^{сл}$ для разных частот заполнения. Средняя скорость РИ для всех измерений равна 5876 м/с, что на 48 м/с меньше скорости одиночного УЗИ (5924 м/с).

Данная разница фактически не зависит от частоты, что, с одной стороны, является экспериментальным фактом, а с другой, объясняется тем, что скорость нарастания для первой полуволны генератора сигнала для одиночного импульса выше, чем для РИ, даже на частоте 500 кГц. Амплитуда одиночного импульса также выше, чем РИ. Указанную разницу можно принять за систематическую погрешность определения скорости с помощью РИ, т. е. $\Delta C_{\text{РИ}}^{\text{сист}} = 48$ м/с. С ростом частоты случайная погрешность уменьшается. Это связано со скоростью нарастания фронта первой полуволны пришедшего РИ. При низких частотах фронт нарастает медленнее, чем при высоких, и погрешность определения времени прихода импульса возрастает за счёт шумов — для первой полуволны даже при усреднении $N = 100$ шумы могут составлять 20—40 % амплитуды. Для дальнейших исследова-

ний приняли $\Delta C_{\text{РИ}}^{\text{сл}} = 15$ м/с в диапазоне частот 100—250 кГц

и $\Delta C_{\text{РИ}}^{\text{сл}} = 10$ м/с в диапазоне 300—600 кГц. Эти значения были подтверждены и при «основных» измерениях дисперсии скорости звука в трубах.

Таким образом, в качестве погрешности измерения скорости продольных волн (с учётом ΔC_l) приняли максимальные значения при возбуждении одиночным импульсом и РИ, соответственно:

$$\Delta C_{\text{УЗИ}} = \Delta C_{\text{УЗИ}}^{\text{сист}} \pm |\Delta C_{\text{УЗИ}}^{\text{сл}} + \Delta C_l| = 15 \pm |9 + 6| = 15 \pm 15 \text{ м/с};$$

$$\Delta C_{\text{РИ}} = \Delta C_{\text{УЗИ}}^{\text{сист}} + \Delta C_{\text{РИ}}^{\text{сист}} \pm |\Delta C_{\text{РИ}}^{\text{сл}} \pm \Delta C_l|;$$

$$\Delta C_{\text{РИ}} = 15 + 48 \pm |15 + 6| \text{ м/с} = 63 \pm 21 \text{ м/с для } f = 100 \dots 250 \text{ кГц};$$

$$\Delta C_{\text{РИ}} = 15 + 48 \pm |10 + 6| \text{ м/с} = 63 \pm 16 \text{ м/с для } f = 300 \dots 600 \text{ кГц}.$$

При измерении скорости звука поперечных волн в трубах возбуждение и регистрацию сигнала осуществляли тем же методом, что и для продольных волн. Идентификацию сигнала выполняли путём выделения «начала УЗИ», соответствующего поперечной волне из усреднённой последовательности сигнала (см. рис. 2, а). Поскольку скорость поперечных волн примерно в два раза меньше скорости продольных, относительные погрешности уменьшаются в два раза. Однако увеличиваются абсолютные погрешности за счёт возможных наложений волн различных типов и увеличения погрешности определения времени прихода соответствующего УЗИ. Проведённые исследования показали, что систематическая составляющая существенно не изменяется, а случайная увеличивается в 2 раза в зависимости от уровня сигнала. Суммарная максимальная погрешность измерений скорости звука поперечных волн может быть принята равной $\Delta C_{\text{РИ}} = (63 \pm 42)$ м/с.

Погрешности измерений скорости звука волн Лэмба и Рэлея в трубах. Измерения проводили с применением наклонных ПП. Сигнал, соответствующий волне, выделялся из усреднённой последовательности сигнала, содержащего и волны других типов. Применение РИ позволяло экспериментально подбирать углы ввода для ПП, чтобы добиться максимума амплитуды волн определенного типа. Основными задачами данных измерений были обнаружение волн данного типа при различных частотах заполнения РИ и измере-

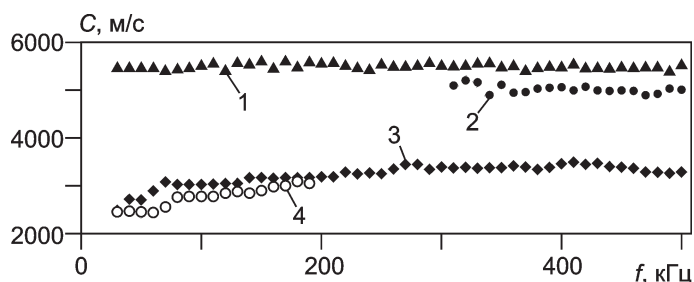


Рис. 3. Дисперсионные зависимости скорости волн разных типов в трубе длиной 2 м:

1 — продольная; 2 — Лэмба; 3 — поперечная; 4 — поверхностная (Рэлея)

ние относительного изменения скорости при заданной частоте. Абсолютная погрешность измерения скорости принципиального значения не имела. Установили, что систематическая погрешность измерения скорости волн Рэлея и Лэмба может быть принята такой же, как для поперечных волн: 63 м/с. Экспериментальное значение случайной погрешности, определённое в процессе «основных» измерений скорости волн Лэмба и Рэлея для трубы длиной 2 м, составляло ± 65 м/с. Таким образом, $\Delta C_{\text{РИ}} = (63 \pm 65)$ м/с. Суммарные погрешности для волн Лэмба и Рэлея составляют около 2,5 и 4,5 %, что достаточно много для акустических измерений. Однако измерить скорости волн данных типов для использованных в эксперименте труб другими методами не представлялось возможным. Это относится и к металлическим пластинам размерами близкими к размерам трубы: длиной, толщиной и шириной, соответствующей образующей трубы.

Погрешность измерения коэффициента затухания. Измерения коэффициента α затухания УЗИ для волн различных типов и его зависимости от частоты основаны на измерении амплитудных значений записанного усреднённого сигнала. Аналогичная методика была использована для измерения α в отверждающихся полимерных составах [10]. В [8, 10] погрешность измерения коэффициента затухания принималась равной $0,1\alpha$. После сопоставления результатов указанных работ с данными, полученными авторами настоящей статьи при измерениях α , $\Delta\alpha$ для труб, можно сделать следующие выводы: для продольных волн $\Delta\alpha/\alpha > 10$ % во всем диапазоне частот; для поперечных волн $\Delta\alpha/\alpha \leq 12$ %; для волн Рэлея и Лэмба $\Delta\alpha/\alpha \leq 15$ %.

Для иллюстрации применения методики измерений с помощью РИ на рис. 3 приведены полученные дисперсионные зависимости скорости звука для волн различных типов. Значения скорости приведены с учётом систематической погрешности. Скорость продольной волны фактически не изменялась во всем диапазоне частот ($C_{\text{пр}} = 5486$ м/с). Зависимость $C(f)$ для волны с поперечной поляризацией имела более сложную зависимость ($C = 2472 \dots 3291$ м/с). Поверхностная волна Рэлея фиксировалась в диапазоне частот 30—190 кГц, её скорость изменялась в интервале 2457—3059 м/с. Для волны Лэмба вариации скорости составляли 5012—5102 м/с в диапазоне частот 340—500 кГц. При этом использование одиночного импульса или резонансного метода не позволяло получить подобные зависимости. Более подробные результаты проведённых экспериментальных исследований дисперсионных зависимостей $C(f)$

и $\alpha(f)$ для металлических труб на основе рассмотренной методики приведены в [4].

Л и т е р а т у р а

1. Alleyne D. N., Cawley P. Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework // Mater. Evaluation. 1997. V. 55. P. 504—508.
2. Bingham J., Hinders M. Lamb Wave Detection of Delaminations in Large Diameter Pipe Coatings // The Open Acoustics J. 2009. No. 2. P. 75—86.
3. Demma A., Alleyne D. Inspection of pipes using Guided Waves: state of the art // Proc. 5th Pan American Conf. for NDT. 2011. P. 1—6.
4. Drachev K. A., Rimlyand V. I. Acoustic wave propagation in metal pipes // Proc. 22nd Intern. Congress on Sound and Vibration. 2015. P. 1—8.
5. ГОСТ Р 55724—2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
6. Калинов Г. А. Автоматизированные системы контроля параметров жидкости в наблюдательных скважинах и резервуарах: Автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. Хабаровск, Тихоокеанский государственный университет, 2010.
7. Калинов Г. А., Мигунов Д. С., Римлянд В. И. Оценка влияния шумов на фазовый способ определения момента прихода акустических импульсов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2009. № 1 (12). С. 275—282.
8. Серавин Г. Н., Микушин И. И., Лобанов В. Н. Прямые импульсные методы измерения скорости звука в жидкости // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. № 9 (122). С. 238—243.
9. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996.
10. Rimlyand V. I., Starikova V. N., Bakhantsov A. V. Dynamics of Mechanical, Acoustical and Electrical Properties of Epoxy-Amine Compositions During Cure // J. Appl. Polymer Sci. 2010. V. 117. P. 143—147.

Дата принятия: 04.04.2017.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

539.125.52:621.384.654

Исследование высокоинтенсивного поля промежуточных нейтронов реактора БР-К1

В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ¹, О. И. КОВАЛЕНКО¹, Р. М. ШИБАЕВ¹,
А. С. КОШЕЛЕВ², С. В. ВОРОНЦОВ², И. Ю. ДРОЗДОВ²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: sevast@vniiftri.ru

² Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Москва, Россия

Создан новый высокоинтенсивный источник промежуточных нейтронов в центре активной зоны мощного импульсного реактора БР-К1. Измерение дифференциального энергетического спектра нейтронов в источнике выполнено нейтронно-активационным методом с применением стандартизированной вычислительной программы КАСКАД. Проведено сравнение нейтронных характеристик созданного источника нейтронов и зарубежных аналогов.

Ключевые слова: источник промежуточных нейтронов, дифференциальный энергетический спектр, источник нейтронов реактора БР-К1.

A new high-intensity source of intermediate neutrons in the center of a powerful pulsed reactor BR-K1 core was developed. The differential energy spectrum of neutrons was measured by neutron activation method using standardized CASCADE program. Neutron characteristics of the new neutron source are compared with analogous foreign sources.

Key words: source of intermediate neutrons, differential energy spectrum, neutron source of a reactor BR-K1.

В атомной науке и технике принято называть нейтроны с энергией в диапазоне от нескольких килоэлектронвольт до 0,5 МэВ нейтронами промежуточных энергий [1]. Эталонные источники нейтронов промежуточных энергий широко используются для корректировки сечений дозиметрических

ядерных реакций, градуировки по чувствительности в диапазоне промежуточных нейтронов радиометрической и дозиметрической аппаратуры [2, 3].

Были выполнены исследования созданного высокоинтенсивного источника промежуточных нейтронов в центре