

Виллов Сергей Андреевич – ННГУ им. Н.И. Лобачевского; e-mail: vilovskimail@gmail.com; 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23; тел.: +78314623261; кафедра акустики радиофизического факультета; магистрант.

Диденкулов Игорь Николаевич – e-mail: diniar@mail.ru; тел.: +78314164782; старший научный сотрудник.

Мартьянов Александр Иванович – e-mail: martyanov@rf.unn.ru; тел.: +78314623261; кафедра акустики радиофизического факультета; к.ф.-м.н.; доцент.

Прончатов-Рубцов Николай Васильевич – e-mail: nikvas@rf.unn.ru; тел.: +78314656305; кафедра акустики радиофизического факультета; к.ф.-м.н.; доцент.

Vilov Sergey Andreevich – Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod; e-mail: vilovskimail@gmail.com; 23, Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; phone: +78314623261; the department of acoustics (radiophysics faculty); magistr.

Didenkulov Igor Nikolaevich – e-mail: diniar@mail.ru; phone: +78314164782; senior researcher.

Mart'yanov Alexander Ivanovich – e-mail: martyanov@rf.unn.ru; phone: +78314623261; the department of acoustics (radiophysics faculty); cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Pronchatov-Rubtsov Nikolay Vasil'evich – e-mail: nikvas@rf.unn.ru; phone: +78314656305; the department of acoustics (radiophysics faculty); cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

УДК 620.179.16

М.И. Сластен, В.И. Тимошенко

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
ИМПУЛЬСОВ В СЖАТОМ ПО ДИАМЕТРУ
ПЛОСКОЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

При диагностике остаточных механических напряжений в монокристаллических слитках, в частности галлий-гадолиниевого граната, используется акустический эхо-метод. Особое значение имеют идентификация напряженного состояния и его реализация для экспериментальных исследований. Идентификация и диагностика напряженных состояний осуществляются по сериям многократно отраженных ультразвуковых импульсов с учетом особенностей их распространения. При наличии остаточных механических напряжений траектория распространения ультразвукового пучка не является прямолинейной и форма огибающей серии многократных отражений отличается от формы убывающей экспоненты. Рассмотрено радиальное распределение напряжений в диаметральном сечении, перпендикулярном сжимающим силам. Представлены траектории распространения ультразвуковых импульсов для различных координат точки ввода.

Акустическая диагностика; остаточные механические напряжения; напряженное состояние; идентификация напряженного состояния; монокристаллические слитки; траектория распространения ультразвукового пучка; серия многократных отражений.

M.I. Slasten, V.I. Timoshenko

**PECULIARITIES OF ULTRASONIC PULSES PROPAGATION IN STRESSED
ALONG ITS DIAMETER PLANE-CYLINDER SAMPLE DURING
DIAGNOSTIC TESTS OF MECHANICAL STRESSES**

The acoustic echo-method is used for diagnostic of residual inner mechanical stresses in monocrystalline ingots, especially in gallium gadolinium garnets. The particular significance for experimental research has the identification of stressed states and their realization. The identification of stressed states and their diagnostic are carried out by using strings of multiple reverberations of ultra-

sonic pulses taking into account the peculiarities of their propagation. With residual mechanical stresses the path of ultrasonic beam propagation is not a straight-line, and form of the envelope of the set of multiple reverberations differs from damped exponential curve. The radial distribution of stressed states in diametric section perpendicular to compression forces is considered. The paths of ultrasonic pulses distribution for various coordinates of the beams entry into the sample are presented.

Acoustic diagnosis; residual mechanical stresses; stressed condition; identification of stressed condition; monocrySTALLINE ingot; path of ultrasonic beam propagation; set of multiple reverberations.

В устройствах памяти информационных систем в качестве подложки используются монокристаллы, в частности, галлий-гадолиниевый гранат. В процессе выращивания в монокристаллах могут возникать остаточные механические напряжения, отрицательно влияющие на работу запоминающих устройств. В некоторых случаях наиболее перспективным методом контроля и диагностики остаточных механических напряжений в монокристаллах является акустический эхо-метод. При разработке акустического эхо-метода особо актуальным является наличие эталонного образца с необходимым напряженным состоянием.

При диагностике остаточных механических напряжений в монокристаллических слитках акустическим эхо-методом используется идентификация напряженного состояния – определение характера или типа напряженного состояния [1, 2]. Идентификация напряженного состояния необходима для выбора соответствующих методик измерений и обработки получаемых результатов [3–7]. Распределение остаточных механических напряжений по сечению слитка обычно является достаточно сложным.

При нагружении плоскоцилиндрического образца 1 силами P вдоль диаметрального направления, перпендикулярного направлению действия сжимающих сил P , создается напряженное состояние с так называемым простым радиальным распределением напряжений [8]. Распределение нагрузки по толщине образца является однородным. Сжимающие напряжения σ_x направлены противоположно оси Ox и в зависимости от расстояния от центра образца y определяются по формуле [1]

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi DL} \cdot \left[1 - \frac{4D^4}{(D^2 + 4y^2)^2} \right], \quad (1)$$

где P – силы, которые можно установить, используя манометр гидравлического пресса и зная площадь его поршня; D – диаметр плоскоцилиндрического образца; L – толщина плоскоцилиндрического образца; y – текущая координата; $2a$ и $2b$ – длина и ширина ультразвукового преобразователя поперечных волн соответственно (рис. 1).

При $y = 0$ $\sigma_x = \sigma_{x0} = -\frac{6P}{\pi DL}$; при $y = \pm \frac{D}{2}$ $\sigma_x = 0$; при $-\frac{D}{2} < y < \frac{D}{2}$ $\sigma_x < 0$,

отрицательные значения σ_x обозначают, что σ_x являются сжимающими (рис. 2).

В центре образца 1 создается плоское однородное двухосное разноименное напряженное состояние с сжимающими напряжениями σ_{x0} , направленными противоположно оси Ox . Напряжения σ_{y0} направлены вдоль оси Oy , являются растягивающими и определяются по формуле $\sigma_{y0} = \frac{2P}{\pi DL}$.

Градиент изменения механических напряжений в плоскоцилиндрическом образце определяется соотношением

$$\text{grad } \sigma_x = \frac{128PD^3y}{\pi L(D^2 + 4y^2)^3}. \quad (2)$$

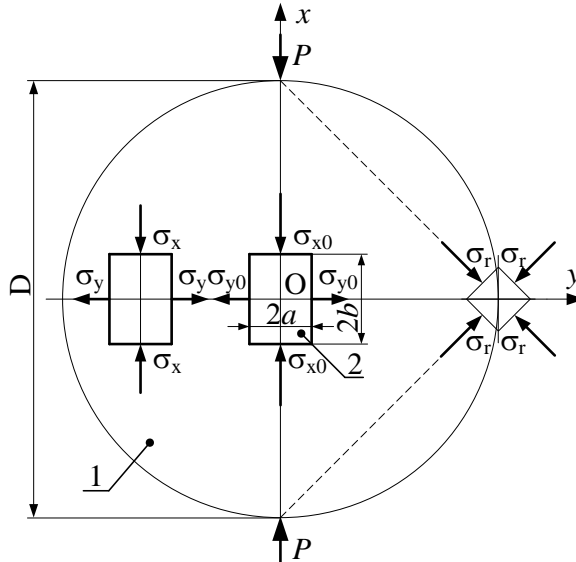


Рис. 1. Плоскопараллельный горизонтальный образец 1, сжатый вертикальными силами P , и УЗ-преобразователь 2 поперечных волн

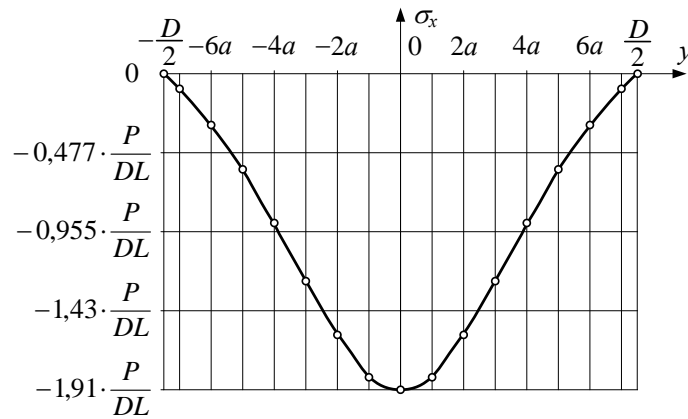


Рис. 2. Распределение механических напряжений σ_x вдоль радиального направления y в диаметральном сечении образца, перпендикулярном силам P

При $y = 0$ $\text{grad } \sigma_x = 0$; при $y = -\frac{D}{2}$ $\text{grad } \sigma_x = -2,55 \frac{P}{D^2L}$; при $y = \frac{D}{2}$ $\text{grad } \sigma_x = 2,55 \frac{P}{D^2L}$; при $-\frac{D}{2} < y < 0$ $\text{grad } \sigma_x < 0$ и при $0 < y < \frac{D}{2}$ $\text{grad } \sigma_x > 0$ (рис. 3).

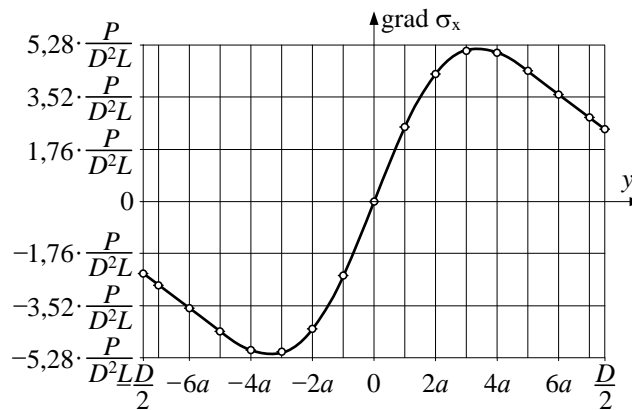


Рис. 3. Распределение градиента изменения механических напряжений $\text{grad}\sigma_x$ вдоль радиального направления y в диаметральной сечении образца, перпендикулярном силам P

Получим выражение для максимального значения градиента изменения механических напряжений $(\text{grad}\sigma_x)_{\max}$. Для этого вычислим

$$\frac{d(\text{grad}\sigma_x)}{dy} = \frac{128PD^3(D^2 - 20y^2)}{\pi L(D^2 + 4y^2)^4}. \quad (3)$$

Для определения расстояний $\pm y_{\max}$ от центра плоскоцилиндрического образца до $(\text{grad}\sigma_x)_{\max}$ приравняем числитель выражения (3) к нулю и, решая его относительно $y = y_{\max}$, получим

$$y_{\max} = \frac{D}{2\sqrt{5}} = 0,224D. \quad (4)$$

Подставляя y_{\max} из (4) в соотношение (2), получим выражение для $(\text{grad}\sigma_x)_{\max}$

$$(\text{grad}\sigma_x)_{\max} = 5,28 \frac{P}{D^2L}.$$

Механические напряжения в плоскоцилиндрическом образце приводят к непрямолинейному распространению ультразвукового импульса. Траекторией его распространения в этом случае является дуга окружности радиусом R (рис. 4).

Выразим зависимость радиуса R от величины механических напряжений σ_x и градиента изменения механических напряжений $\text{grad}\sigma_x$ в плоскоцилиндрическом образце. Для этого воспользуемся соотношением [9, 10]

$$R = \frac{v_s(y_2 - y_1)}{v_{s1} - v_{s2}}. \quad (5)$$

Учитывая, что $v_{s1} = c\sigma_{x1} + v_{s0}$, $v_{s2} = c\sigma_{x2} + v_{s0}$, $\Delta v_s = v_s - v_{s0}$ и $c = \frac{v_s - v_{s0}}{\sigma_x} = \frac{\Delta v_s}{\sigma_x}$ (рис. 5), подставим их в (5) и после преобразований получим

$$R = \frac{v_s}{\Delta v_s} \cdot \frac{(D-2y)(D+2y)(D^2+4y^2)(3D^2+4y^2)}{64D^4y}. \quad (6)$$

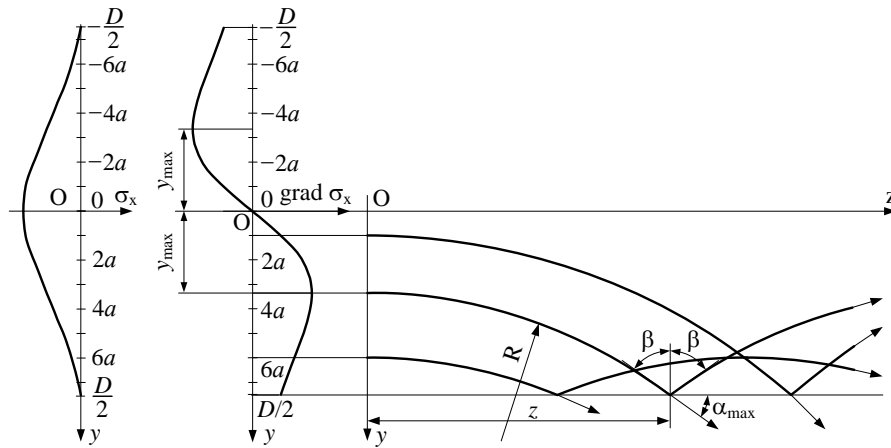


Рис. 4. Траектории распространения ультразвуковых импульсов в сжатом по диаметру плоскоцилиндрическом образце с механическими напряжениями σ_x в зависимости от координаты входа импульса y

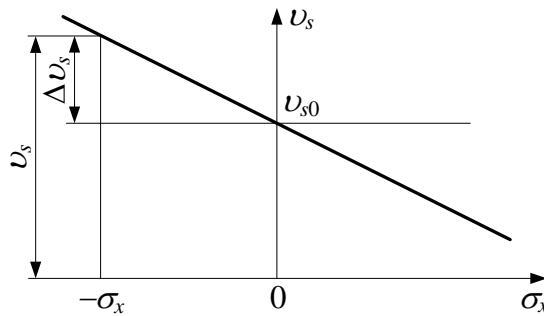


Рис. 5. Зависимость скорости распространения поперечной ультразвуковой волны v_s , поляризованной вдоль механических напряжений σ_x , от величины σ_x

Угол отклонения α ультразвукового импульса от его направления при излучении равен

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{D-2y}{2R}\right), \quad (7)$$

где z – расстояние, пройденное ультразвуковым импульсом в плоскоцилиндрическом образце до отражения от боковой поверхности; R – радиус кривизны траектории ультразвукового импульса.

Зависимость радиуса R кривизны траектории распространения ультразвукового импульса от координаты y входа в образец представлена на рис. 6.

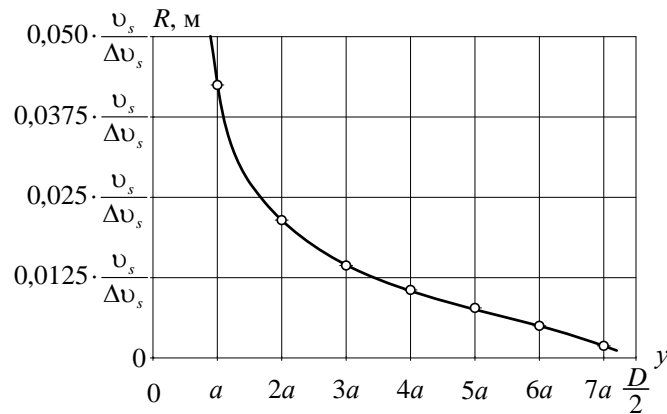


Рис. 6. Зависимость радиуса R кривизны траектории распространения ультразвукового импульса от координаты y входа в образец

Из рис. 4 видно, что ультразвуковые импульсы, входящие в область положительного градиента изменения механических напряжений $0 < y < \frac{D}{2}$, отклоняются в сторону положительного направления оси y . Угол отклонения α траектории движения этих ультразвуковых импульсов становится максимальным при падении ультразвукового импульса на боковую поверхность плоскоцилиндрического образца при $y = \frac{D}{2}$. При падении на боковую поверхность плоскоцилиндрического образца ультразвуковой импульс отражается от нее под углом β .

Подставляя в соотношение (7) выражение (6) с учетом (2) и (1), после преобразований получим выражение для максимального угла отклонения α_{\max} импульса в образце с механическими напряжениями σ_x на боковой поверхности плоскоцилиндрического образца

$$\alpha_{\max} = \arccos \left(1 - \frac{\Delta v_s}{v_s} \cdot \frac{32D^4 y}{(D+2y)(D^2+4y^2)(3D^2+4y^2)} \right).$$

Углы падения акустического импульса на боковую поверхность плоскоцилиндрического образца и отражения от нее β равны

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{\max} = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(1 - \frac{\Delta v_s}{v_s} \cdot \frac{32D^4 y}{(D+2y)(D^2+4y^2)(3D^2+4y^2)} \right).$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сластен М.И. Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 127 с.
2. Сластен М.И. Акустическая диагностика напряженного состояния монокристаллических слитков галлий-гадолиниевого граната ультразвуковым эхо-импульсным методом // Известия ТРТУ. – 2006. – № 9-2 (64). – С. 65-66.

3. *Сластен М.И.* Идентификация одноосных гармонически изменяющихся остаточных механических напряжений при диагностике напряженного состояния монокристаллов ультразвуковым эхо-импульсным методом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 197-204.
4. *Сластен М.И.* Об идентификации неоднородных плоских остаточных механических напряжений в монокристаллах ультразвуковым эхо-импульсным методом // Известия ТРТУ. – 2005. – № 9 (53). – С. 223-224.
5. *Сластен М.И.* Распространение ультразвуковой волны в плоскопараллельном образце с линейно изменяющимися остаточными механическими напряжениями // Известия ТРТУ. – 2002. – № 6 (29). – С. 170-175.
6. *Сластен М.И.* Распространение ультразвуковых волн в плоскопараллельных монокристаллических образцах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 219-224.
7. *Сластен М.И.* Измерение градиента скорости ультразвука в монокристаллах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 36-43.
8. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости: Пер. с англ. М.И. Рейтмана / Под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
9. *Сластен М.И., Тимошенко В.И.* О серии многократных отражений ультразвукового импульса в плоскопараллельных образцах с гармонически изменяющимися механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 225-230.
10. *Сластен М.И.* О сериях многократных отражений ультразвуковых импульсов в плоскоцилиндрических образцах с механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 9 (134). – С. 223-228.

REFERENCES

1. *Slasten M.I.* Ul'trazvukovoy kontrol' ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy v monokristallakh gallyi-gadolinievogo granata [Ultrasonic inspection of residual stress in single crystals of gallium-gadolinium garnet]. Taganrog: TRTU, 2004, 127 p.
2. *Slasten M.I.* Akusticheskaya diagnostika napryazhennogo sostoyaniya monokristallicheskikh slitkov gallyi-gadolinievogo granata ul'trazvukovym ekho-impul'snym metodom [Acoustic diagnostics of the stress state of monocrystalline ingots gallium-gadolinium garnet ultrasonic pulse-echo method], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 9-2 (64), pp. 65-66.
3. *Slasten M.I.* Identifikatsiya odnoosnykh garmonicheskii izmenyayushchikhsya ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy pri diagnostike napryazhennogo sostoyaniya monokristallov ul'trazvukovym ekho-impul'snym metodom [Identification uniaxial harmonically varying residual stress in the diagnosis of stress state of a single crystal ultrasonic pulse-echo method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 197-204.
4. *Slasten M.I.* Ob identifikatsii neodnorodnykh ploskikh ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy v monokristallakh ul'trazvukovym ekho-impul'snym metodom [About the identification of inhomogeneous planar residual stress in single crystals of ultrasonic pulse-echo method], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 9 (53), pp. 223-224.
5. *Slasten M.I.* Rasprostranenie ul'trazvukovoy volny v ploskoparallelnom obrabtse s lineyno izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [The propagation of ultrasonic waves in a plane-parallel sample with linearly varying residual mechanical stresses], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2002, No. 6 (29), pp. 170-175.
6. *Slasten M.I.* Rasprostranenie ul'trazvukovykh voln v ploskoparallelnykh monokristallicheskikh obraztsakh s garmonicheskii izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [The propagation of ultrasonic waves in a plane-parallel single-crystal samples with harmonically varying residual mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 219-224.

7. *Slasten M.I.* Izmerenie gradienta skorosti ul'trazvuka v monokristallakh s garmoni-cheski izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [Measurement of the gradient of the speed of ultrasound in single crystals with harmonically varying residual mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 36-43.
8. *Timoshenko S.P., Gud'er Dzh.* Teoriya uprugosti [Elasticity Theory]: Per. s angl. M.I. Reytmana, Pod red. G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979, 560 p.
9. *Slasten M.I., Timoshenko V.I.* O serii mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovogo impul'sa v ploskoparallel'nykh obraztsakh s garmonicheski izmenyayushchimisya mekhanicheskimi napryazheniyami [About a series of multiple reflections of the ultrasonic pulse in the plane-parallel samples with harmonically varying mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 225-230.
10. *Slasten M.I.* O seriyakh mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovykh impul'sov v plosko-tsilindricheskikh obraztsakh s mekhanicheskimi napryazheniyami [About the series of multiple reflections of the ultrasonic pulses in the face samples with mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 223-228.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Воронин.

Сластен Михаил Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП-17а, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Тимошенко Владимир Иванович – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Slasten Michail Ivanovitch – Southern Federal University; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Timoshenko Vladimir Ivanovitch – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroacoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 612.16+534.87

С.В. Горовой

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСОВЫХ ВОЛН ТЕЛОМ ЧЕЛОВЕКА

Работа посвящена исследованию возможности дистанционного определения частоты сердечных сокращений с целью обнаружения присутствия человека в воде вблизи места установки звукоприемной аппаратуры и оценки его состояния по результатам анализа variability сердечного ритма. Приведены результаты экспериментального исследования излучения телом находящегося в воде человека акустических волн, вызванных пульсовыми волнами, т.е. распространяющимися по аорте и артериям волнами повышенного давления, вызванными выбросом крови из левого желудочка в период систолы. Описаны результаты лабораторного эксперимента, в ходе которого в емкости с водой были зарегистрированы акустические сигналы, вызванные пульсовыми волнами в конечностях человека на расстоянии 0,5 м. С помощью ненаправленного низкочастотного гидрофона, предусилителя заряда с полосой пропускания 0,2–100 Гц и программно реализованного энергетиче-