TECNIACUSTICA León · 2010

41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA
6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

MÁS ALLÁ DEL FOCO GEOMÉTRICO EN HACES FOCALIZADOS DE ULTRASONIDOS

REFERENCIA PACS: 43.10.-a; 43.35.-c; 43.25-.x; 43.38.-p

Camarena Femenía, Francisco[1]; Makov, Yuri[2]; Sánchez-Morcillo, Victor[1]; Adrián Martínez, Silvia[1]; Jiménez González, Noé[1].

(1) Instituto de Investigación para la Gestión Integrada se Zonas Costeras (IGIC).
Universidad Politécnica de Valencia.
C/Paraninf, 1 46730, Grao de Gandía, Valencia. España.
Telf: 96 387 70 00 - Ext. 43681.
Fax: 96 284 93 37
E-mail: fcamarena@fis.upv.es

(2) Department of Acoustics, Faculty of Physics.
Moscow State University
119899 Moscow, Russia

ABSTRACT

The study of the acoustic field characteristics generated by focusing sources, both in linear and nonlinear regime, is an active field of research as they are relevant in most of the ultrasonic applications in medicine and industry. In this work we evaluate, experimentally and numerically the *linear shift* phenomenon (the distance between the geometrical focus of the focused source and the on-axis maximum pressure position in linear regime, real focus) and the *nonlinear shift* phenomenon (the movement of the pressure maximum position along the axis of focused acoustic beams under increasing driving voltages) of an ultrasonic beam with medium Fresnel number (N_F = 6), it is important to cover this region of focusing as some of the medical devices are there, as well as we demonstrate that the *nonlinear shift* is able to move the on axis maximum pressure location beyond the geometrical focus.

RESUMEN

El estudio de las características del campo acústico generado por fuentes ultrasónicas focalizadas es un activo campo de investigación dada la relevancia que éstas poseen tanto en aplicaciones médicas como industriales. En este trabajo se evalúa, experimental y numéricamente, el desplazamiento de foco lineal (distancia entre el foco geométrico de la fuente y la posición del máximo de presión en el eje: foco real) y el desplazamiento de foco no lineal (desplazamiento del máximo de presión en el eje al aumentar la tensión aplicada al transductor) en un haz ultrasónico generado por un transductor de focalización media (N_F=6). Se comprueba que los máximos de presión y rarefacción se desplazan en sentido opuesto al aumentar la potencia suministrada al transductor, y que el máximo de presión en el eje llega a superar la posición del foco geométrico del transductor.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del campo acústico generado por fuentes focalizadas, tanto en régimen lineal [1]- [3] como en régimen no lineal [4]-[8], es un campo de investigación muy activo debido a las numerosas aplicaciones de este tipo de fuentes en el campo de la medicina y la industria.

En transductores focalizados, la posición del máximo de presión axial difiere de la posición del foco geométrico. Existen dos explicaciones a este fenómeno. En primer lugar, en régimen lineal, la acción combinada de los efectos de difracción y focalización provoca un desplazamiento (hacia el transductor) de la posición del foco real respecto al foco geométrico. Éste fenómeno se conoce como *shift lineal* [3],[9].Los trabajos previos [12] publicados al respecto recogen que el *shift lineal* decrece conforme aumenta el grado de focalización, siendo de unos 2.5 cm en transductores de *Número de Fresnel* 1.28 y de pocos milímetros cuando el grado de focalización alcanza $N_F \approx 6$, lejos de los valores asociados a los dispositivos High Intensity Focused Ultrasound "HIFU" ($N_F \approx 15$). Por otro lado, bajo condiciones de propagación no lineal, la aparición de armónicos superiores de la señal provoca el movimiento del máximo de presión axial [9] (alejándolo del transductor). Este fenómeno es conocido como *shift no lineal* y ha sido observado tanto en haces generados por fuentes planas [10] como en haces focalizados [11]. En previos estudios se ha demostrado que el *shift no lineal* decrece conforme aumenta el grado de focalización. Para transductores con *Número de Fresnel* 1.28 se cuantificó un desplazamiento de 2.4 cm [12].

El *shift no lineal* ha sido explicado y observado [4][8] en trabajos previos pero, hasta el momento, no ha sido publicado un experimento específico con el objetivo de estudiar, tanto experimental como numéricamente, la región focal de un transductor de focalización media y evaluar la magnitud de este *shift*.

El objetivo de este trabajo es evaluar el *shift no lineal* de un haz ultrasónico generado con un transductor de focalización media ($N_F=6$) así como poder cuantificar si, debido al *shift no lineal*, el máximo de presión axial se puede localizar más allá del foco geométrico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental utilizado consiste en el clásico esquema de transductor emisor enfrentado al transductor receptor inmersos en un tanque (60x40x38) de agua destilada (ver Figura 1). El transductor emisor está formado por un único elemento piezoeléctrico (PZ 26, Ferroperm Piezoceramics, Denmark) plano de 50 mm de diámetro ensamblado en una carcasa metálica. Para la focalización del haz se adhiere a la cerámica una lente de metacrilato de 50 mm de diámetro y 70 m de radio de curvatura (R). La frecuencia de resonancia del sistema es 2.227 MHz, la apertura 50 mm ($2r_0$) y la distancia focal geométrica 157.0 ± 1.5 mm (F), avaluada a partir de la Ecuación 1.

$$F = \frac{R}{1-{c_m}/{c_l}} \tag{1}$$

dónde c_m y c_l son la velocidad del sonido en el agua y en el metacrilato respectivamente.

El emisor es excitado con ráfagas de pulsos (30 ciclos, tipo senoidal) mediante un generador de funciones (14 bits, 100 MS/s, modelo PXI5412, National Instruments). La señal se amplifica previamente mediante un Amplificador RF lineal (ENI 1040L, 400W, +55dB, ENI, Rochester, NY). Para medir las formas de onda se utiliza como receptor un hidrófono de membrana (0.229 V/MPa de sensibilidad, modelo MH2000B, 200 μm de diámetro activo,

NTR/Onda Corp.) y un digitalizador (64 MS/s, model PXI5620, National Instruments). El receptor está fijado a un sistema de microposicionamiento que permite desplazarlo en las tres direcciones ortogonales del campo acústico con una precisión de 10 µm (OWIS GmbH). Tanto la generación de la señal como el proceso de adquisición se llevan a cabo desde un controlador PXI (NI 8176, National Instruments) a su vez controla el sistema de microposicionamietno.

2.2. Modelo Numérico

La ecuación de onda parabólica *KZK* (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) es conocida por describir con exactitud la propagación de haces de sonido teniendo en cuenta la combinación de los tres efectos clave en la propagación, la difracción, la absorción y la no linealidad. Puede escribirse en términos de la presión acústica *p*, considerando la propagación en la dirección *z* positiva como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t'} = \frac{c_0}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right) + \frac{D}{2c_0^3}\frac{\partial^3 p}{\partial t'^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3}\frac{\partial^2 p^2}{\partial t'^2} \qquad (2)$$

donde $t'=t-z/c_0$ es un tiempo de retardo, c_0 la velocidad del sonido, *r* de distancia radial desde el eje z, ρ_0 la densidad del fluido y *D* es la difusividad del sonido en un medio termoviscoso. El coeficiente de no linealidad se define por $\beta=1+B/2A$, donde *B/A* es el parámetro de no linealidad del medio. La Ecuación 2 es válida en aproximación paraxial (Ka>>1) y tiene en cuenta la no linealidad, la difracción y la absorción termoviscosa. El efecto de focalización se considera en las condiciones iniciales.

Hasta la fecha, no hay soluciones analíticas a la ecuación *KZK*. Solo se han dado soluciones en régimen quasilineal, desarrolladas para casos en que la no linealidad es débil. Para entender los efectos de la no linealidad en los haces acústicos se debe obtener completamente las soluciones no lineales de la ecuación *KZK* y, ya que, por el momento, no existen estas soluciones, se debe recurrir al modelado numérico.

Para el análisis numérico se ha utilizado el algoritmo *KZKTexas* [14][15] *,* es un código informático que trabaja con diferencias finitas en el dominio del tiempo para modelar haces acústicos con simetría axial en fluidos. El algoritmo es capaz de resolver la ecuación parabólica no lineal *KZK* para haces acústicos pulsados, axisimétricos y de amplitud finita. Para llevar a cabo todos los cálculos en el dominio del tiempo, evita los problemas asociados usando series de *Fourier* truncadas en cálculos en el dominio de la frecuencia. La ecuación diferencial resultante se resuelve para cada punto en el espacio (paso espacial) considerando los efectos de difracción, absorción y no linealidad por separado. Se asume que cada efecto actúa independiente del resto si el paso es lo suficientemente pequeño.

3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Para medir las características del haz generado por la fuente se registran formas de onda en veinticinco planos a lo largo del eje z del sistema de microposicionamiento, estos planos son transversales al eje z del transductor de tamaño 6x6 mm (planos *x,y*) y las formas de onda se registran con una resolución espacial en el plano de 0.25 mm. Para evaluar la distribución de presión en el eje, de cada plano *x-y* (144 puntos medidos), se debe extraer el valor máximo y sus coordenadas (x_{max},y_{max}). Como el eje *z* mecánico no coincide con el eje de simetría del transductor, normalmente, el máximo de presión no estará situado en el origen del plano *x-y*, es decir, tiene coordenadas distintas de cero, esto obliga a localizar el eje del transductor y los valores de presión en el mismo de forma alternativa como la usada en [13].

La mayoría de los planos medidos se localizan cerca de la posición del máximo de presión axial (Figura 2) con una separación mínima de 1mm entre ellos. Esta resolución espacial en *z* es crítica en el experimento ya que se necesita evaluar la posición del máximo de presión axial con una precisión mayor de 3 mm con el objetivo de poder detectar el fenómeno del *shift no lineal* (estimado en menos de 1 cm en simulaciones numéricas [12]).

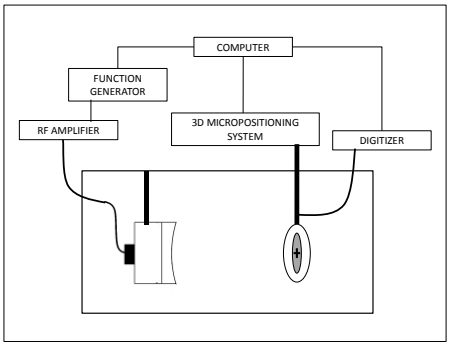


Figura 1. Dispositivo experimental para medir presión acústica en agua.

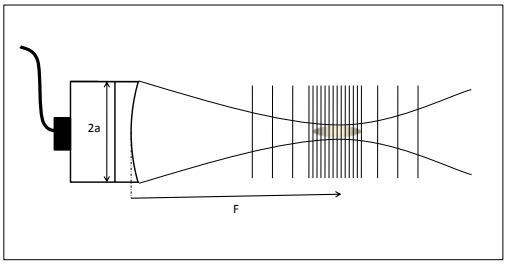


Figura 2. Estrategia de medida. Formas de onda evaluadas en veinticinco planos a lo largo del eje z del sistema de microposicionamiento.

Asimismo, como el experimento presenta un error aleatorio estimado en un 2%, la determinación de la posición del máximo de presión tiene asociada una incertidumbre ligeramente superior a 1 mm.

Este procedimiento de medida se repitió hasta en ocho ocasiones incrementando la tensión de entrada al emisor en el rango comprendido entre 2.5 V_{pp} (régimen lineal, p_0=2kPa) y 125 V_{pp} para poder estudiar la evolución de las características del campo acústico al pasar de régimen lineal a régimen no lineal.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización Lineal del Haz

La caracterización del haz en régimen lineal permite conocer las características físicas de la fuente acústica (apertura y foco geométrico) y la posición del máximo de presión axial, es decir, el *shift lineal*.

La caracterización lineal se llevó a cabo en tres pasos: primero, los valores nominales proporcionados por el fabricante de la lente se utilizaron para evaluar la distancia focal geométrica nominal (Ec.1). Segundo, los datos experimentales fueron ajustados a la solución analítica de la ecuación de *O'Neil* [1] para el campo acústico focalizado en régimen lineal. Este ajuste proporciona un nuevo valor para la distancia focal geométrica y la apertura. Y tercero, se definen los parámetros de la simulación numérica del haz, basada en la ecuación *KZK*, que consiguen el mejor ajuste con los datos experimentales en régimen lineal, la apertura y distancia focal resultantes serán utilizadas para simular el haz en régimen no lineal.

La distancia focal geométrica y la apertura del transductor fueron definidas nominalmente por el fabricante como 157 mm y 50 mm respectivamente. Estas implican un *Número de Fresnel* de 5.9 y una ganancia *G*=19. El ajuste de la solución analítica de O'Neil a los datos experimentales (ver Figura 3 y Figura 4) proporciona una apertura efectiva del transductor $2r_0$=51.6 mm y una distancia focal geométrica efectiva *F*=158.2 mm. El máximo de presión axial

obtenido a partir de la expresión analítica se sitúa a 153 mm del transductor, es decir, al 96.7% de la distancia focal geométrica, lo cual está de acuerdo por lo predicho por *Makov et. al* [12].

Se llevaron a cabo simulaciones para distintos valores de apertura y distancia focal geométrica con el objetivo de obtener el mejor ajuste con los datos experimentales (ver Figura 3 y Figura 4). Se determinó una apertura efectiva el transductor de 50.2 mm y una distancia focal geométrica de 157 mm.

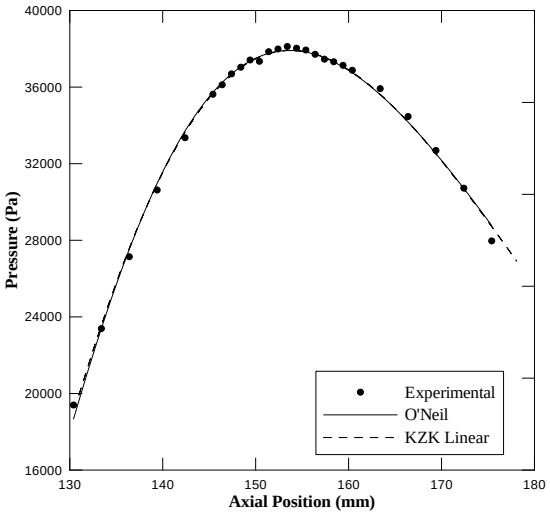


Figura 3. Distribución axial de presión en régimen lineal. Valores experimentales, expresión analítica de O'Neil y simulación *KZK*.

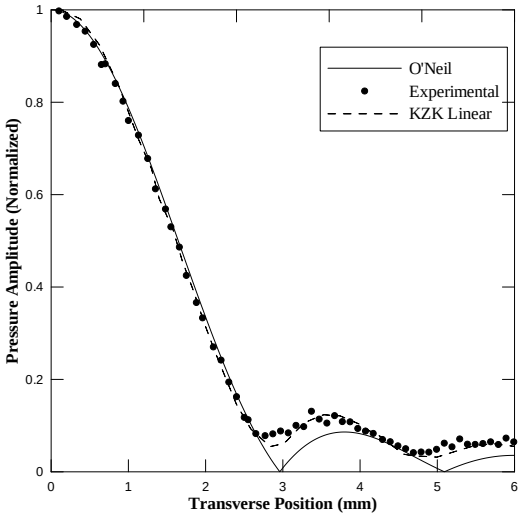


Figura 4. Distribución transversal de presión normalizada. Valores experimentales, expresión analítica de O'Neil y simulación *KZK*.

4.2. Comportamiento No Lineal

La Figura 5 muestra la variación de la posición del máximo de presión con la tensión de entrada medida experimentalmente (puntos). Además, partiendo de los valores de apertura y distancia focal geométrica obtenidos a partir del ajuste de la simulación *KZK* y los datos experimentales en régimen lineal, se ha estudiado mediante simulación el comportamiento del campo acústico en régimen no lineal (línea). Ambos resultados, experimentales y simulados, muestran dos conclusiones relevantes: a) la posición del máximo de presión axial se aleja del transductor cuando aumenta la potencia de excitación, y b) esta posición puede superar la posición del foco geométrico.

El comportamiento de la posición del máximo de presión que se observa en la Figura 5 puede justificarse considerando la aparición de armónicos superiores durante la propagación no lineal. A altas frecuencias el efecto de la difracción decrece y el foco real tiende a aproximarse al foco geométrico. Los valores experimentales y simulados encajan perfectamente en la zona cercana al régimen lineal (bajas tensiones de entrada) pero difieren ligeramente a medida que aumenta la potencia y la propagación se aleja del régimen lineal, el *shift no lineal* es mayor en los resultados de simulación. Existen varias razones posibles que explicarían estas pequeñas diferencias: en primer lugar, la respuesta en frecuencia del hidrófono impone un límite superior de 20 MHz el cual afecta al registro de armónicos superiores a esa frecuencia que contenga la señal. En segundo lugar, el campo acústico no presenta una distribución plana y uniforme bajo el área activa del receptor (200 µm de diámetro activo), por ello la medida del máximo de presión estará subestimada ya que el registro es el promedio espacial de la zona de medida, por el contrario, el máximo en simulación es la solución de la ecuación *KZK* en un punto infinitesimal. Otra posible fuente de error se asociaría

a la vibración no uniforme de la fuente. El modelo numérico asume que la superficie del transductor vibra uniformemente, sin embargo, el transductor real no actúa como un pistón con vibración perfectamente uniforme. Además, la simulación presenta errores numéricos, sobretodo cuando aparecen ondas de choque, porque los picos máximos son muy difíciles de resolver numéricamente.

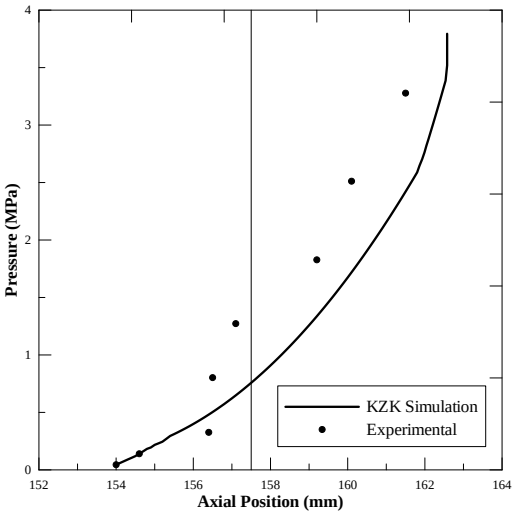


Figura 5. Maximo de presión positiva en el eje. Valores experimentales (puntos) y simulación *KZK* (línea). La línea vertical denota la posición del foco geométrico situado en 157.5 mm. Las tensiones de entrada son 2, 9, 21, 45, 65, 85, 100 y 125 Vpp de abajo hacia arriba.

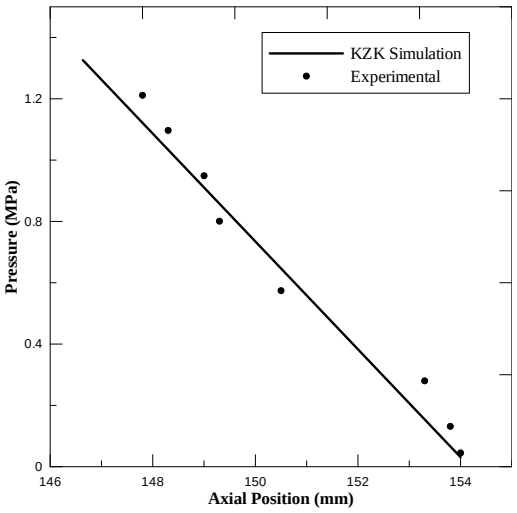


Figura 6. Mínimo de presión negativa en el eje. Valores experimentales (puntos) y simulación *KZK* (línea). La línea vertical denota la posición del foco geométrico situado en 157.5 mm. Las tensiones de entrada son 2, 9, 21, 45, 65, 85, 100 y 125 Vpp de abajo hacia arriba

La Figura 6 muestra la variación de la posición del mínimo de presión axial con la tensión de entrada. Los valores experimentales han sido representados por puntos y la línea contínua denota el desplazamiento del mínimo de presión obtenido con la simulación *KZK*. El desplazamiento en rarefracción es aproximadamente 6.2 mm mientras que en compresión se obtuvo un shift de 7.5 mm.

La Figura 5 muestra una especie de saturación en el *shift no lineal*, esto es debido a la aparición de ondas de choque. Por el contrario, el comportamiento de los mínimos es casi lineal, ya que en la rarefacción las ondas no saturan ni cuando aparece la onda de choque.

4.3. Ancho del Haz

La Figura 7 muestra el perfil de presión de los haces (experimentales) de compresión y rarefacción. Se consideró definir e ancho del haz a -6 dB del máximo de presión en el plano. R^+ y R^- denotan el rango de movimiento que sufren el máximo y mínimo de presión respectivamente al incrementar la tensión de entrada.

En el caso más extremo (con la mayor potencia de excitación) la posición del máximo de presión está 4 mm por encima del foco geométrico, en este caso la distancia entre la posición del máximo de compresión y el de rarefacción es de 13.7 mm.

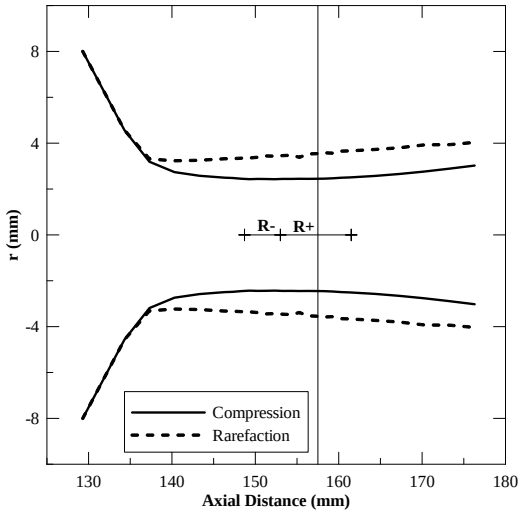


Figura 7. Ancho del haz a la mitad de amplitud, para presiones positivas (línea continua) y negativas (línea discontinua). Valores experimentales, p0=67 kPa.

5. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un estudio del campo acústico de un transductor de focalización media (N_F=6) con el objetivo de establecer las características del *shift lineal* y no lineal. En régimen lineal se ha observado que el máximo de presión se sitúa a 153 mm del transductor, lo cual indica un *shift lineal* de 4.5 mm. Este resultado es coherente con los resultados de *Makov et al*. [12] en su estudio sobre la dependencia del *shift lineal* con el *Número de Fresnel*.

En condiciones de no linealidad se ha observado un desplazamiento de la posición del máximo de presión (tanto en experimento como en simulación) debido al aumento de la tensión de entrada, incluso llegando a exceder la posición del foco geométrico.

Para la mayor potencia aplicada al transductor la posición del máximo de presión excede el foco geométrico en 4 mm, y la separación entre la posición del máximo y mínimo axiales de 13.7 mm.

Siguiendo el trabajo en esta línea se prevé incluir próximamente el estudio del comportamiento de la intensidad axial, la fuerza de radiación y la fase del haz.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia dentro del proyecto FIS2008-06024-C03-03 y por el Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID-05-09)(002-618).

REFERENCIAS

[1] H.T. O'Neil, *"Theory of focusing radiators",* J. Acoust. Soc. Am. **21**, 516-526 (1949).
[2] Kossoff G. *"Analisys of focusing action of spherically curved transducers*". Ultrasound in Medicine and Biology. 5, 359-365 (1979).
[3] B.G. Lucas and T.G. Muir, *"The field of a focusing source"*, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1289-1296 (1982).

[4] Zabolotskaya E. A. and Khokhlov R. V. *"Quasi-Plane waves in the Nonlinear Acoustics of Confined Beams"*. *Sov. Phys. Acoustics*, 1969, V.15, N 1, 35–40.

[5] N. G. Kuznetsov, *"Hypoelliptic convolution equations and Gevrey classes"*, *Funkts. Anal. Prilozh.*, **5**:3 (1971),98–99 .

[6] N.S. Bakhvalov, Ya.M. Zhileikin, and E.A. Zabolotskaya, *"Nonlinear Theory of Sound Beams"*. *American Institute of Physics*, New York, 1987

[7] M. F. Hamilton, V.A. Khokhlova, O. V. Rudenko. *"Analitical method for describing the paraxial region of finite amplitude sound beams"*. *J. Acoust. Soc. Am*. **101**, 1298 – 1308 (1997).

[8] Michael S. Canney, Michael R. Bailey, and Lawrence A. Crum, Vera A. Khokhlova and Oleg A. Sapozhnikov. *"Acoustic characterization of high intensity focused ultrasound fields: A combined measurement and modeling approach"*. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2406- 2420 (2008).

[9] Yu. Makov, V. Espinosa, V.J. Sánchez-Morcillo, J. Cruañes, J. Ramis and F. Camarena, *"Strong on-axis focal shift and its nonlinear variation in low-Fresnel-number ultrasound beams"*, *J. Acoust. Soc. Am*. **119,** 3618-3624 (2006).

[10] Bakhvalov N. S., Zhileikin Y. M. and Zabolotskaya E. A. *"Nonlinear propagation of sound beams with a uniform amplitude distribution"*. *Sov. Phys. Acoust.* **26**, 95-100 (1980).

[11] Francis A. Duck and Hazel C. Starrit. *"The locations of peak pressures and peak intensities in finite amplitude beams from a pulsed focused transducer"*, Ultrasound in Medicine and Biology, Volume 12, Number 5 (1986).

[12] Yu. Makov, V.J. Sánchez-Morcillo, F. Camarena, V. Espinosa.*"Nonlinear change of on-axis pressure and intensity maxima positions and its relation with the linear focal shit effect"*, *Ultrasonics Elsevier* 48, 678-686 (2008).

[13] D. Cathignol, O. A. Sapozhnikov, J. Zhang. *"Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between 's formula and experiment"*. *J. Acoust. Soc. Am*. **101,** No. 3 (1997).

[14] Yang-Sub Lee, B.S, M.S. *"Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids"*. *The University of Texas at Austin*. (1993).

[15] Yang-Sub Lee, M. Hamilton. *"Time-domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams"*. *J. Acoust. Soc. Am*. **97**, 906-917 (1995).