

Асташкин Ю.С.

Тверь

ИЗЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В РАСПЛАВЫ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Приведены результаты расчетов интенсивности и удельного импеданса ультразвуковых поршневых излучателей для легкоплавких металлов на низких ультразвуковых частотах

Ультразвук, излучение, интенсивность, легкоплавкие металлы

Astashkin U.S.

RADIATION OF ULTRASONIC IN MELTS OF THE LIGHT MELTING METALS

The calculation of intensity and specific impedance of the piston radiators are presented for ultrasonic radiation in melts of the light melting metals on low ultrasonic frequency

Ultrasonic, radiation, intensity, light melting metals

Величина удельного импеданса и типоразмера излучателя определяет мощность и интенсивность ультразвуковых колебаний, излучаемых в жидкости, в том числе и в легкоплавких металлах.

Как известно, в случае колебаний с равномерно распределенной на поверхности излучателя нормальной скоростью – v_n , механический импеданс излучения определяется выражением [1]:

$$Z = \frac{\int p_a ds}{v_n} \quad (1),$$

где p_a – давление, которое в силу реакции со стороны жидкости действует на площадку величиной – ds .

Средний удельный импеданс излучения, отнесенный к единице площади – S имеет вид [1]:

$$z_a = \frac{Z}{S} = r_a + jx_a, \quad (2)$$

где r_a и x_a активная и реактивная составляющие импеданса соответственно. Полная мощность ультразвука, излучаемого в жидкость при площади излучателя – S [1]:

$$N_a = \rho c^2 r_a S \quad (3)$$

при соотношении $d \gg \lambda$, где λ длина волны, активная составляющая импеданса принимается равной волновому сопротивлению жидкости.

Удельный импеданс для тонкого круглого диска диаметром – $d=2a$, колеблющегося в бесконечном экране, согласно определению Релея имеет вид [2]:

$$z_a = \rho c \left[\left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) + j \frac{K_1(2ka)}{2k^2 a^2} \right] \quad (4)$$

где ρ – плотность, c – скорость звука, ρc – волновое сопротивление среды, a – радиус диска, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, J_1 – функция Бесселя первого рода, первого порядка, K_1 – модифицированная функция Бесселя, определенная Релеем [3]:

$$K_1(x) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{x^3}{3} - \frac{x^5}{5} + \frac{x^7}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right)$$

Зависимости импеданса – z_a от величины – ka для дисков и пластин, колеблющихся, как поршень были получены в работах Л.Я Гутина. (например [3]) и Кикучи с сотрудниками [1,4]. Эти аналитические выражения имеют громоздкий вид и поэтому в рамках данной статьи они приведены из работы [4] в наглядном графическом виде [1]. При значениях $ka < 1$ реактивная составляющая больше активной $x_a \geq r_a$, как у диска с двухсторонним излучением, колеблющегося без экрана, так и диска, излучающего одной стороной в свободной пространство, с фиксированной противоположной стороной. Активная составляющая растет и становится преобладающей при $ka=2$, а при значении $ka=3$, реактивная составляющая падает до величины $x_a \approx 0,2r_a$. [1,4]. Важно, что для всех трех видов диафрагм при $ka=2$ и $ka=3$ значения r_a равны между собой с точностью графического изображения (рис. 1a,b). Кроме того эти значения близки для круглой и равновеликой прямоугольной пластины в бесконечном экране, а также для бесконечной пластины в бесконечном экране [4].

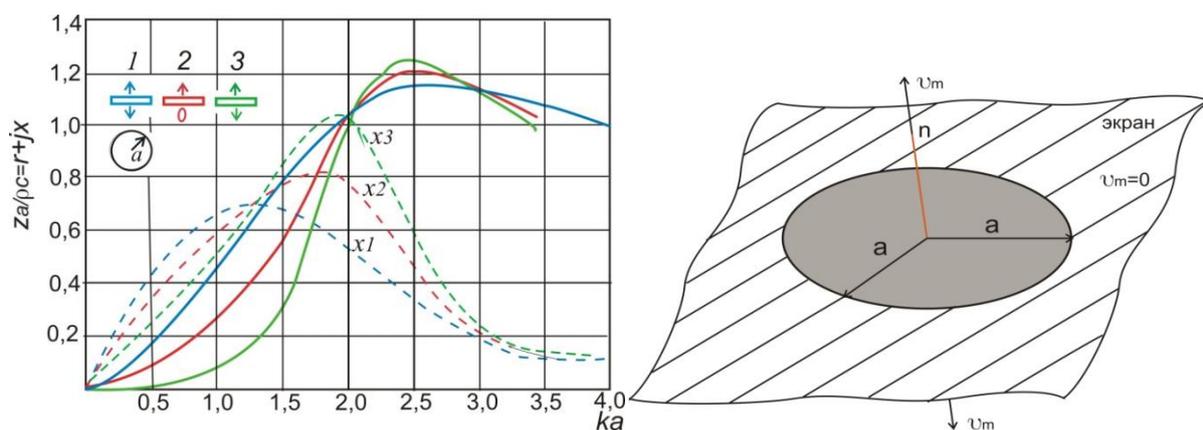


Рис. 1а,б Зависимости составляющих удельного импеданса z_a от ka [4]. Сплошные кривые – r_a , штриховые и штрихпунктирные кривые – x_a . а) 1 – диск в бесконечном экране с излучением двумя сторонами, 2 – с односторонним излучением и фиксированной другой стороной, 3 – диск, колеблющийся без экрана в свободном пространстве;

Принимая эти значения как критические, используем их для оценок мощности и интенсивности ультразвука (3), излучаемого в жидкие легкоплавкие металлы при значении $ka=2$.

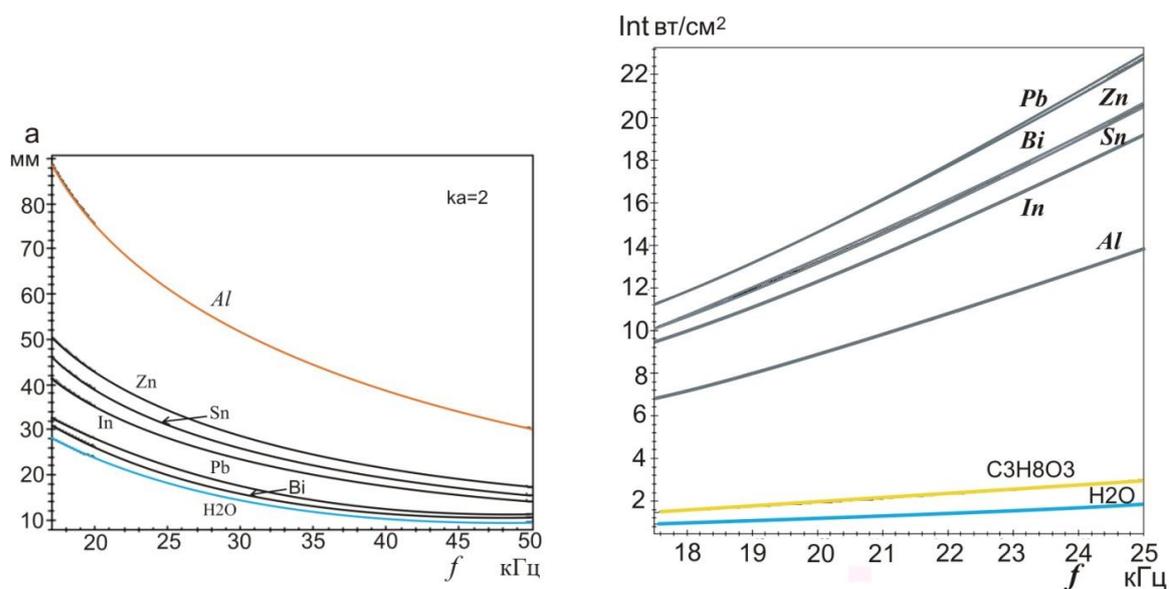


Рис. 2 а,б. а) Зависимости радиуса излучателя – a и интенсивности – Int от частоты – f в диапазоне низкочастотного ультразвука при значении $ka=2$.

На низких частотах ($ka \ll 1$) для диска в бесконечном экране с двухсторонним излучением, величина r_a определяется квадратом частоты – ω^2 , а для диска, колеблющегося в свободном пространстве с двухсторонним излучением – ω^4 [1,4].

Мощность излучаемого ультразвука в соответствии с выражением (3) в этих случаях незначительна, и для получения оптимального значения $ka = 2$, радиус излучателя должен увеличиваться с уменьшением частоты (рис.

2а). Величина $z_a=r_a+jx_a$ пропорциональна волновому сопротивлению – $\rho_l c_l$ (табл. 1), поэтому мощность и интенсивность (4) при равной величине $ka=2$ для случая расплавов металлов на порядок выше, чем в воде (рис 2b),.

Таблица 1

Свойства легкоплавких металлов и воды [6-11]

Me	Al	Ga	Zn	Sn	Cd	In	Pb	Bi	H ₂ O
c_l м/с	4750	2740	2700	2450	2215	2215	1760	1660	1483
$\rho_l c_l \cdot 10^{-7}$ кг/м ² сек	1,12	1,67	1,87	1,68	1,56	1,61	1,85	1,67	0,148
ρ_l кг/м ³ □	2369	6095	6920	6830	7790	7260	10510	10030	1000
σ_v 10 ⁻³ Н/м ²	520	720	785	526	564	340	442	376	73

Волновое сопротивление в таблице обозначено: $r_a \cong \rho_l c_l$, ρ_l – плотность, c_l – скорость звука в жидкости.

В данной работе были также произведены оценки величин ближней и дальней зоны излучения, а также толщины вязкого слоя для ряда расплавов металлов (рис.3а,b,c). Протяженность ближней зоны излучения – r_0 определяется выражением [5]:

$$r_0 = a^2/\lambda = d^2 f/(4c_l) ,$$

Протяженность дальней зоны – R_0 (зона Фраунгофера) определяется расстоянием от поверхности излучателя до первой фокальной точки, где интенсивность максимальная. Интенсивность в этой зоне изменяется в зависимости от квадрата расстояния [5].

Приведенные на рис.2а,b величины интенсивности, являются потенциально достижимыми для случая докавитационного режима. [5]. При развитии кавитации появление пульсирующих пузырьков приводит к изменению скорости звука и плотности возмущенной жидкости [10], а начальный этап развития кавитации в легкоплавких металлах зависит от смачивания и шероховатости поверхности излучателя [11-14].

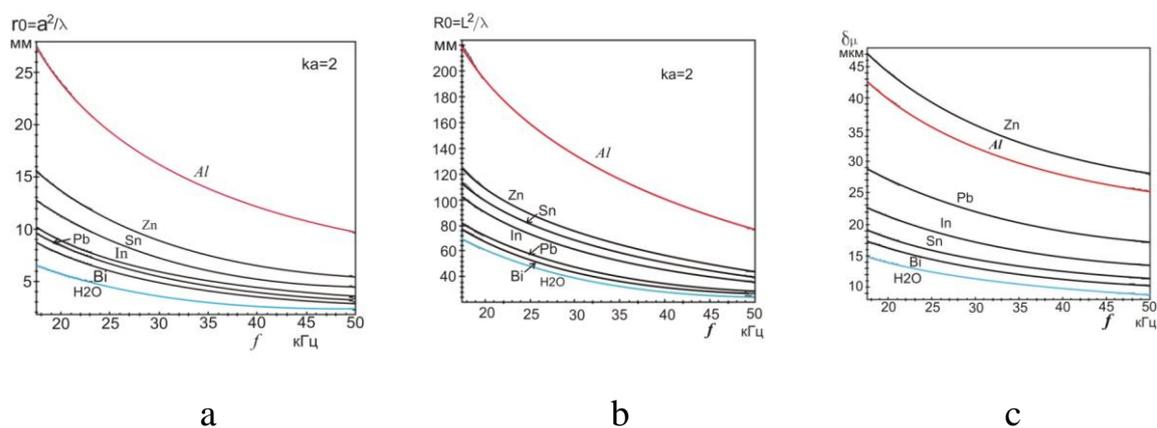


Рис. 3 а) Зависимость протяженности ближней зоны излучения – r_0 , б) дальней зоны излучения – R_0 от частоты для ряда легкоплавких металлов, в) толщина вязкого слоя – δ_μ для ряда расплавов металлов.

Кавитирующая жидкость является нелинейной средой, характеризуемой средним значением сопротивления излучения $\overline{\rho_l c_l}$, которое также как мощность ультразвука, передаваемая в жидкость нелинейно зависит от квадрата колебательной скорости $\square_m^2 = (\omega \xi_m)^2$, где ξ_m – амплитуда колебательного смещения:

$W_{ak} = I_k S = \frac{1}{2} \square_m^2 \overline{\rho_l c_l} S$ [15]. Рассмотрение этого явления произведено в работах [11-14] и выходит за рамки данной работы.

Но исходная величина $ka \cong 2$ при расчете излучателя для случая введения ультразвуковых колебаний в жидкий металл на практике остается оптимальной [16].

Литература.

1. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. Под ред. Е. Кикучи. М. Мир, 1972 –385–399 с.
2. Стретт Д.В. (лорд Рэлей). Теория звука. Т.2, –1955, –163с
3. Гутин Л.Я., Звуковое излучение бесконечной пластинки, возбуждаемой нормальной к ней сосредоточенной силой. //Акуст. журн., 10, 4, 1964 –431-434 с.
4. Фукусима К., Саннеси Д., Кикучи Е. Характеристики звукового поля, связанные с работой ультразвуковых преобразователей. // Ультразвуковые преобразователи под ред. Е. Кикучи. М. Мир, 1972. –367–369 с.

5. Балдев Радж, Раджедран В., Паламичани П. Применения ультразвука. //М. Техносфера, 2006 -576с.
6. Гитис М.Б., Михайлов И.Г. Скорость звука и сжимаемость некоторых жидких металлов. // Акуст. журн., т.11, в.4, 1965– 434-437с.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. //М. Госиздат физмат., лит. 1959 – 353 с.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.// 1 изд. М. Наука. 1952 –720 с. 423 с., 2 изд. //М. Наука. 1972 –720 с. 423 с.
9. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. // М. Metallurgia. 1989 –384 с.
10. Семенова Н.Г.и Панов А.П.. Акустический ветер и поглощение звука в кавитирующей жидкости.// Акуст. журнал. Т.32, 5, 1987. – 953–955 с.
11. Абрамов О.В. Физические основы процессов кристаллизации металлов в ультразвуковом поле.// Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность.// Ред. А.И. Манохин. М. Наука. 1986– 275, 52-95 с.
12. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка цветных металлов и сплавов.// Там же. 1986– 6-59 с.
13. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic treatment light alloy melts.// Gordon and Breach. Amsterdam. 1998, CRC press, Amsterdam, 2014
14. Дерягин Ю.В., Сумм Б.Д. Три механизма растекания капли. Природа, М. №9, 1971– 42-50 с.
15. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковой технологии. М. Наука, т.3, 1970 – 639с.
16. Теумин И.И. Введение ультразвуковых колебаний в обрабатываемые среды. //В кн. Физика и техника мощного ультразвука, Ред. Л.Д., Розенберг. т.1, часть 4. М. Наука, 1967– 208-244 с.