

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОМ АЛЮМИНИИ

Р.Ю. Кармокова¹, А.М. Кармоков¹, О.А. Молоканов¹, А.И. Хасанов², А.А. Канаметов¹

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х. М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»

364034, Россия, Чеченская республика, Грозный, ул. А. Шерипова, 32

karrit@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.141

Аннотация: Проведен расчет параметров кавитационного пузырька при облучении расплава алюминия акустическими волнами. Получены зависимости числа Маха от амплитуды при частотах 1-20 кГц, использованных в экспериментах. Установлена связь между резонансной частотой акустических волн и размером кавитационных пузырьков в жидком алюминии. В допущении возможности обобщения линейной теории Миннера на случай вязких жидкостей получена зависимость максимального радиуса кавитационных пузырьков от частоты акустического поля при различных температурах с учетом поверхностного натяжения, плотности и вязкости жидкого алюминия. Установлено, что с увеличением частоты акустического поля радиус кавитационных пузырьков уменьшается. Оценено изменение температуры внутри кавитационного пузырька в зависимости от радиуса пузырька в любой момент его сжатия при адиабатических условиях. Показано, что при уменьшении радиуса пузырька до критического размера, температура внутри него может возрастать на порядок.

Ключевые слова: алюминий, акустические волны, кавитация, кавитационный пузырек, число Маха.

1. Введение

В процессе облучения расплавов акустическими волнами интенсивностью излучения $(8-10) \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ в расплаве возникает кавитация [1]. Количество кавитационных пузырьков и их размеры зависят от частоты и амплитуды акустических колебаний. Число этих пузырьков увеличивается с введением в расплав твердых наноразмерных частиц адсорбентов и с ростом содержания этих частиц в расплаве. Пузырьки, находящиеся в расплаве, пульсируют с частотой акустического воздействия, расширяются и затем схлопываются. При схлопывании возникают ударные волны, давления в которых могут достигать 10^5 МПа , и появляющиеся в кавитационной области микро- и макропотоки перемешивают расплав [2].

В связи с этим, при использовании акустических колебаний для изменения свойств расплава, в частности, для рафинирования жидкости важной задачей является правильный выбор параметров акустических воздействий. В зависимости от значений поверхностного натяжения, вязкости и плотности испытуемой жидкости эти параметры меняются.

В настоящей работе определяется взаимосвязь между параметрами акустических колебаний и характеристиками кавитационных пузырьков, образующихся в жидком алюминии.

2. Результаты расчетов

Основными эффектами, возникающими в расплаве при воздействии звукового поля, являются образование кавитационных пузырьков и возникновение акустических микро- и макропотоков при схлопывании этих пузырьков. Подобные эффекты мы наблюдали при акустическом воздействии на расплав алюминия частотой 1–22 кГц [3]. Эти явления носят нелинейный характер и сопровождаются возникновением разрывов в сплошной жидкой среде и переносом массы вещества. Степень проявления нелинейности эффектов в данной среде при определенных внешних условиях (давление, температура и др.) определяется акустическим числом Маха [4]:

$$M = V/c = 2\pi f A / c, \quad (1)$$

где V и c – соответственно, скорость потока и скорость звука в данной среде (в жидком алюминии – 5200 м/с), f и A – частота и амплитуда колебаний.

Нелинейные эффекты возникают при значениях числа Маха $(0,5-2,2) \cdot 10^{-4}$. Если на частоте 5 кГц амплитуда колебаний составляет ~ 8 мкм, то этого достаточно, чтобы в расплаве алюминия возникли микропотоки, а на частоте 22 кГц – развитая кавитация (см. рис. 1).

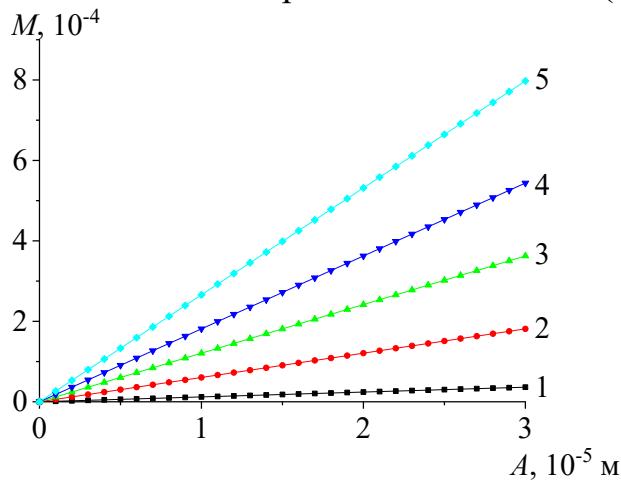


Рис. 1. Зависимость числа Маха от амплитуды при различных частотах колебаний: 1 – 1 кГц, 2 – 5 кГц, 3 – 10 кГц, 4 – 15 кГц, 5 – 22 кГц.

Максимальный радиус R_{MAX} , соответствующий резонансной частоте, определяли преобразованием формулы Миннерта [5]

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_\infty + \frac{2\sigma}{R_{MAX}} \right)}, \quad (2)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты, определяемый как отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_v , ρ и σ – плотность и поверхностное натяжение жидкости, соответственно, P_∞ – статическое давление в жидкости. Далее будем полагать, что $\gamma = 4/3$, так как рафинирующие флюсы для алюминия, в большинстве случаев, имеют многоатомные молекулы. Зависимость $f_r(R_{MAX})$ представлена на рис. 2.

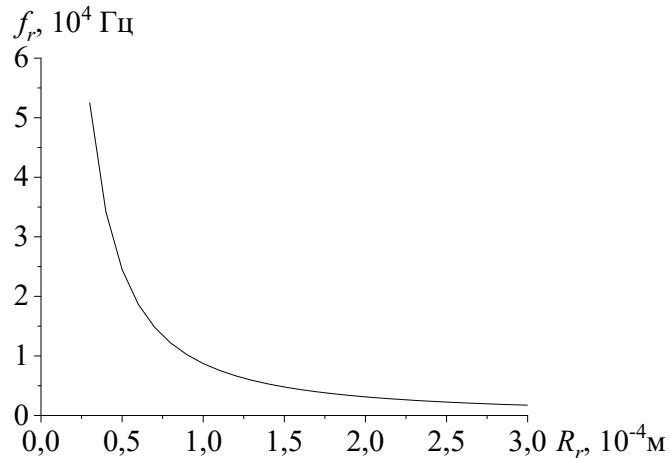


Рис. 2. Связь между резонансной частотой акустических волн и максимальным размером кавитационных пузырьков в жидком алюминии.

Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, которые могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Микро- и наноразмерные нерастворенные пузырьки газа либо твердые частицы, находящиеся во взвешенном состоянии, могут служить зародышами или ядрами кавитации. Таким образом, появление акустической кавитации тесно связано с наличием в жидкостях и расплавах зародышей кавитации – микро- и наноразмерных газовых пузырьков либо твердых частиц.

Для контроля процесса акустического воздействия на расплав алюминия проведены расчеты параметров кавитации следующим образом:

а) зависимость радиуса пузырька от температуры внутри него определяется путём непосредственного численного интегрирования уравнения Нолтинга–Непайраса при заданной амплитуде звукового воздействия;

б) для определения R_{MAX} используется обобщение линейной теории Миннера [6] на случай вязких жидкостей, согласно которой R_{MAX} связан с резонансной частотой колебаний первичного акустического воздействия соотношением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left[3\gamma \left(\frac{2\sigma}{R_{MAX}} + p_0 \right) - \frac{2\sigma}{R_{MAX}} - \frac{8\eta^2}{\rho R_{MAX}^2} \right]}, \quad (3)$$

где p_0 – статическое давление в жидкости, η – динамическая вязкость жидкости.

Численное решение полученного уравнения (3) относительно R_{MAX} позволяет определить максимальный средний радиус пузырька, достигаемый при его вырождении в долгоживущий. В наших расчетах были учтены температурные зависимости физических величин ρ , σ и η для жидкого алюминия особой чистоты марки 4N6 (содержание алюминия 99,996%), которые получались путем аппроксимаций зависимостей экспериментально полученных табличных данных [7-11].

Зависимость поверхностного натяжения алюминия в области температур 933–1217 К имеет прямолинейный характер и может быть выражена уравнением

$$\sigma(T) = 865 - 0,16(T - 933).$$

Эти данные хорошо согласуются с результатами работы [7].

Температурная зависимость плотности алюминия описывается уравнением

$$\rho(T) = 2370 - 0,28(T - 933),$$

что согласуется с данными работ [8-11], а температурная зависимость динамической вязкости имеет вид:

$$\eta(T) = -0,002 \ln(T) + 0,0152.$$

Значения ρ , σ и η и T в этих уравнениях выражены в единицах СИ.

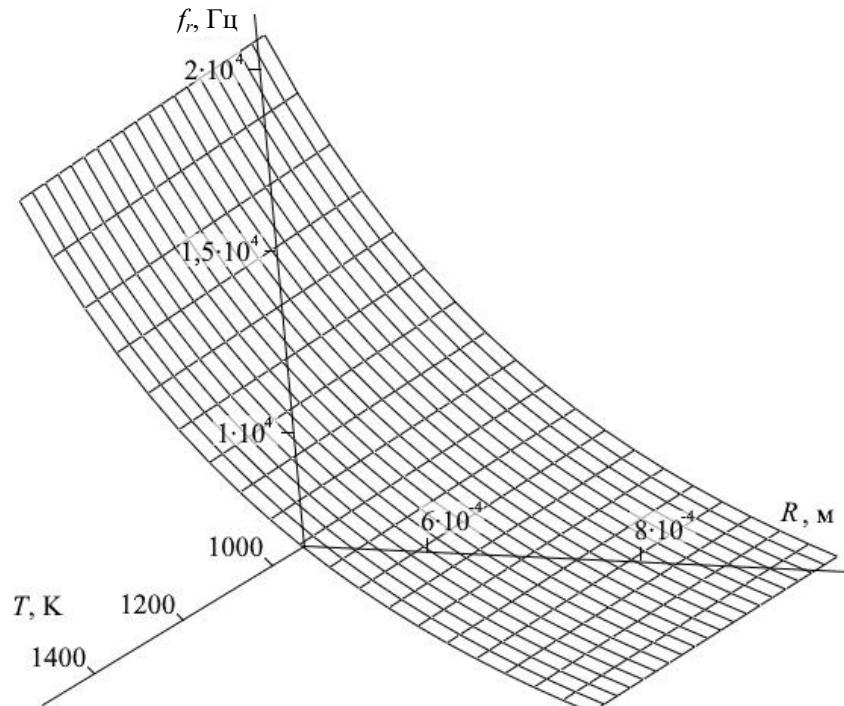


Рис. 3. Влияние частоты акустических волн на максимальный размер кавитационных пузырьков в жидком алюминии при различных температурах.

Подставляя эти соотношения в уравнение (3) получаем выражение для численного расчета влияния температуры на взаимосвязь между резонансной частотой акустических волн и максимальным радиусом кавитационных пузырьков в жидким алюминии:

$$f_r(T, R_{MAX}) = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{1}{2730 - 0,28(T - 933)} \times} \\ \times \sqrt{3\gamma \left\{ \frac{2[865 - 0,16(T - 933)]}{R_{MAX}} + p_0 \right\} - \frac{2[865 - 0,16(T - 933)]}{R_{MAX}} - \frac{8[-0,002 \ln(T) + 0,0152]^2}{[2370 - 0,28(T - 933)] R_{MAX}^2}} \quad (4)$$

Результаты расчета по формуле (4) представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, с увеличением частоты звуковых колебаний уменьшается радиус пузырьков, а с изменением температуры радиус изменяется слабо.

При резонансе температура в пузырьке достигнет больших значений (нескольких тысяч кельвин) [12]. Для оценки температуры T внутри газового кавитационного пузырька текущего радиуса R в любой стадии его сжатия при адиабатических условиях используем уравнение Нолтинга–Непайраса в преобразованном виде:

$$T(R) = T_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)}, \quad (5)$$

где T_0 и R_0 – начальные температура и радиус пузырька, соответственно.

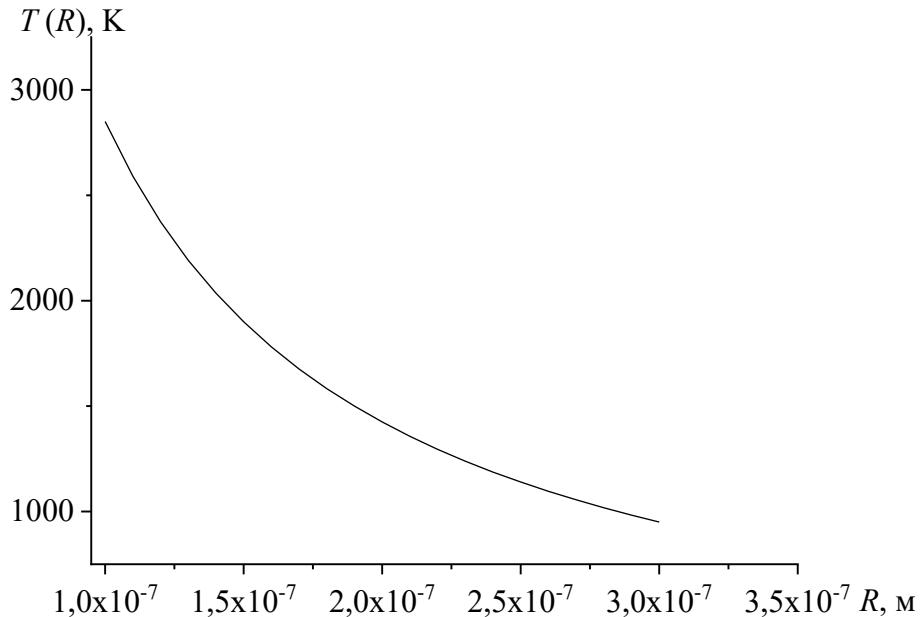


Рис. 4. Зависимость температуры кавитационных пузырьков в алюминии от их размера в процессе образования.

Ранее в [13] нами было определено, что кавитационные пузырьки в момент их образования имеют нанометровый начальный радиус R_0 . При используемом нами значении $\gamma = 4/3$ зависимость (5) вырождается в

простую гиперболу. На рис. 4 представлена зависимость $T(R)$ для жидкого алюминия при $T_0 = 950$ К и $R_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ м и $\gamma = 4/3$. Как видно из рисунка, температура в кавитационном пузырьке повышается с уменьшением его радиуса.

Значение суммарной площади поверхности кавитационных пузырьков при минимальном размере кавитационного пузырька $R_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ м в жидком алюминии достигает $0,4 \text{ м}^2/\text{см}^3$. При этом количество атомов алюминия на этой поверхности составляет $7 \cdot 10^{19} \text{ ат}/\text{см}^2$, а количество атомов сегрегирующей примеси $2 \cdot 10^{16} \text{ ат}/\text{см}^2$.

3. Заключение

Для кавитационных пузырьков в алюминии с учетом нелинейных эффектов для частот акустического воздействия от 1 до 22 кГц проведены расчеты влияния частоты акустического воздействия на максимальный размер кавитационных пузырьков и зависимости температуры в пузырьке от его размера. Из расчетов следует, что нелинейные эффекты возникают при числах Маха начиная от $5 \cdot 10^{-5}$. Зависимость температуры кавитационных пузырьков от их размера имеет вид гиперболы и для пузырьков размеров 10^{-7} м температура внутри пузырька достигает почти 3000 К. Результаты исследования могут быть использованы для получения особо чистого алюминия. Оценка максимальной суммарной площади поверхности кавитационных пузырьков в жидком алюминии показала, что ее значение составляет $\sim 0,4 \text{ м}^2/\text{см}^3$, а количества атомов алюминия и сегрегирующей примеси составляют $\sim 7 \cdot 10^{19}$ и $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ ат}/\text{см}^2$, соответственно.

Библиографический список:

1. **Кундас, С.П.** Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники: в 2 т. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский и др. / под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – Т. 1. – 404 с.
2. Применение ультразвука в промышленности / под ред. А.И. Маркова. – М.: Машиностроение; – София: Техника, 1976. – 239 с.
3. **Кармокова, Р.Ю.** Влияние акустического воздействия на расплав алюминия / Р.Ю. Кармокова, С.Ш. Рехвиашвили, А.М. Кармоков // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 5. – С. 20-26.
4. **Карман, Т. фон** Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии / перевод Е.В. Богатыревой; под ред. А.В. Борисова. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 208 с.
5. Minnaert M. On musical air-bubbles and the sounds of running water / M. Minnaert // Philosophical Magazine Series 7. – 1933. – V. 16. – I. 104. – P. 235-248. DOI: 10.1080/14786443309462277.
6. **Хмелев, В.Н.** Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидкых сред / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых, Р.В. Барсуков // Ползуновский вестник – 2010. – № 3. – С. 321-325.
7. **Найдич Ю.В.**, Метод «большой капли» для определения поверхностного натяжения и плотности расплавленных металлов при высоких температурах / Ю.В. Найдич, В.Н. Ермоленко // Физика металлов и металловедение. – 1961. – Т.11. – № 6. – С. 883-888.

8. **Левин, Е.С.** Политермы плотности и поверхностной энергии жидкого алюминия / Е.С. Левин, Т.Д. Аюшина, П.В. Гельд // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6. – № 3. – С. 432-436.
9. **Гольцова, Е.И.** Экспериментальное исследование плотности жидкого алюминия до $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ / Е.И. Гольцова // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Т. 3. – № 3. – С. 483-486.
10. **Gebhardt, E.** Über die Eigenschaften metallischer Schmelzen VIII. Die Dichte von flüssigem Aluminium und einigen Aluminiumlegierungen / E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner // Zeitschrift für Metallkunde. – 1953. – V. 44. – I. 12. – P. 573-575. DOI: 10.1515/ijmr-1953-441205.
11. **Яценко, С.П.** Экспериментальные исследования температурной зависимости поверхностного натяжения и плотности олова, индия, алюминия и галлия / С.П. Яценко, В.И. Кононенко, А.Л. Сухман // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 66-71.
12. **Эльпинер, И.Е.** Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. – М.: Физматгиз, 1963. – 420 с.
13. **Кармокова, Р.Ю.** Перераспределение примесей в межфазном слое сплава алюминия с кавитационными пузырьками / Р.Ю. Кармокова, А.М. Кармоков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2015. – Т. 17. – № 3. – С. 392-398.

References:

1. Kundas S.P., Lanin V.L., Tyavlovskij M.D. et al. *Ul'trazvukovye protsessy v proizvodstve izdelij elektronnoj tekhniki* [Ultrasonic processes in the production of electronic products], ed. by A.P. Dostanko. Minsk, Bestprint, 2002, vol. 1, 404 p.
2. *Primenenie ul'trazvuka v promyshlennosti* [Application of ultrasound in industry], ed. by A.I. Markova. Moscow, Mashinostroenie Publ.; – Sofia: Tekhnika, 1976. – 239 p. (In Russian).
3. Karmokova R.Yu., Rekhviashvili S.Sh., Karmokov A.M. Vliyanie akusticheskogo vozdejstviya na rasplav alyuminiya [Effects of acoustical action on aluminum melt], *Fizika i ximiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2012, no. 5, pp. 20-26. (In Russian).
4. Kármán T. von *Aerodynamics. Selected topics in light of their historical development*. New York, Cornell University Press, 2004, 224 p.
5. Minnaert M. On musical air-bubbles and the sounds of running water, *Philosophical Magazine Series 7*, 1933, vol. 16, issue 104, pp. 235-248. DOI: 10.1080/14786443309462277.
6. Khmelev, V.N. Khmelev S.S., Golykh R.N., Barsukov R.V. Povyshenie effektivnosti ul'trazvukovoj kavitationsionnoj obrabotki vyazkikh i dispersnykh zhidkikh sred [Improving the efficiency of ultrasonic cavitation treatment of viscous and dispersed liquid media], *Polzunovskij vestnik* [Polzunovskiy Bulletin], 2010, no. 3, pp. 321-325. (In Russian).
7. Najdich Yu.V., Ermolenko B.N. Metod «bol'shoj kapli» dlya opredeleniya poverkhnostnogo natyazheniya i plotnosti rasplavlennykh metallov pri vysokikh temperaturakh [«Large drop» method for determination of surface tension and density of molten metals at high temperatures]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], 1961, vol. 11, no. 6. pp. 883-888. (In Russian).
8. Levin E.S. Ayushina T.D., Gel'd P.V. Politermy plotnosti i poverkhnostnoj ehnergii zhidkogo alyuminiya [Polytherms of density and surface energy of liquid aluminum]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Journal], 1968, vol. 6, no. 3, pp. 432-436. (In Russian).
9. Gol'cova, E.I. Eksperimental'noe issledovanie plotnosti zhidkogo alyuminiya do $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ [Experimental study of the density of liquid aluminum up to $\sim 1500^{\circ}\text{C}$]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Journal], 1965, vol. 3, no. 3. pp. 483-486. (In Russian).
10. Über die Eigenschaften metallischer Schmelzen VIII. Die Dichte von flüssigem Aluminium und einigen Aluminiumlegierungen E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner, *Zeitschrift für Metallkunde*, 1953, vol. 44, issue 12, pp. 573-575. DOI: 10.1515/ijmr-1953-441205.
11. Yatsenko S.P., Kononenko V.I., Suhman A.L. Eksperimental'nye issledovaniya temperaturnoj zavisimosti poverkhnostnogo natyazheniya i plotnosti olova, indiya, alyuminiya i galliya [Experimental studies of the temperature dependence of the surface tension and density of tin, indium, aluminum and gallium], *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Journal], 1972, vol. 10, issue. 1, pp. 66-71. (In Russian).
12. Ehl'piner I.E. *Ul'trazvuk. Fiziko-khimicheskoe i biologicheskoe deistvie* [Ultrasound. Physico-chemical and biological action]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 420 p. (In Russian).
13. Karmokova, R.YU., Karmokov A.M. Pereraspredelenie primej v mezhfaznom sloe splava alyuminiya s kavitationsionnymi puzyrkami [Redistribution of impurities in the interface layer of melted aluminum with cavitation bubbles], *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2015, vol. 17, no 3, pp. 392-398. (In Russian).

**INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF ACOUSTIC WAVES ON THE
CHARACTERISTICS OF CAVITATION BUBBLES IN LIQUID ALUMINUM**

R.Yu. Karmokova¹, A.M. Karmokov¹, O.A. Molokanov¹, A.I. Khasanov², A.A. Kanametov¹

¹*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia*

²*Chechen State University named after A.A. Kadyrov, Grozny, Russia*

DOI: 10.26456/pcascn/2022.14.141

Abstract: Calculation of parameters of a cavitation bubble during irradiation of aluminum melt with acoustic waves is carried out. The dependences of the Mach number on the amplitude at frequencies of 1-20 kHz used in the experiments are obtained. A relationship has been established between the resonant frequency of acoustic waves and the size of cavitation bubbles in liquid aluminum. Allowing the possibility of generalizing the Minnert linear theory to the case of viscous liquids, the dependence of the maximum radius of cavitation bubbles on the frequency of the acoustic field at different temperatures is obtained, taking into account the surface tension, density and viscosity of liquid aluminum. It has been established that with an increase in the frequency of the acoustic field, the radii of the cavitation bubbles decrease. The temperature change inside the cavitation bubble is estimated as a function of the bubble radius at any moment of its compression under adiabatic conditions. It is shown that when the bubble radius decreases to a critical size, the temperature inside it can increase by an order of magnitude.

Keywords aluminum, acoustic waves, cavitation, cavitation bubble, Mach number.

Кармокова Рита Юрьевна – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова»

Кармоков Ахмед Мацевич – д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова»

Молоканов Олег Артемович – к.т.н., научный руководитель кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова»

Хасанов Асламбек Идрисович – д.ф.-м.н., доцент, и. о. заведующего кафедрой физической электроники ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»

Канаметов Анзор Азреталиевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова»

Rita Yu. Karmokova – Ph. D., Senior Lecturer, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University

Ahmed M. Karmokov – Dr. Sc., Professor, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University

Oleg A. Molokanov – Ph. D., Scientific Director, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University

Aslambek I. Khasanov – Ph. D., Associate Professor, Acting Head of the Department of Physical Electronics, Chechen State University named after A.A. Kadyrov

Anzor A. Kanametov – Ph. D., Docent, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University

Поступила в редакцию/received: 02.09.2022; после рецензирования/revised: 30.09.2022; принятa/accepted 07.10.2022.