

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА НА ПОРОГОВУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ, ПРИВОДЯЩУЮ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТЯХ РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

Р.Н. Голых¹, Г.А. Боброва¹, В.Н. Хмелев¹, Р.В. Барсуков¹, Д.В. Генне¹, Д.С. Абраменко¹,
В.А. Шакура¹, Г.А. Титов², Е.В. Ильченко²

¹ БТИ АлтГТУ, г. Бийск

² ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», г. Бийск

В статье представлены результаты теоретических исследований импульсного ультразвукового воздействия на пороговую интенсивность, приводящую к возникновению кавитации. Предложена физико-математическая модель, которая описывает процесс возникновения кавитационных пузырьков при воздействии импульсным ультразвуком (высокочастотными синусоидальными колебаниями, модулированными по амплитуде прямоугольными импульсами), позволяет выявить динамику прямой диффузии газа, растворённого в жидкости, в полость кавитационного пузырька и, в конечном итоге, рассчитать пороговые интенсивности, при которых кавитационный пузырёк начинает схлопываться, от длительности ультразвукового импульса и вязкости жидкости.

Ключевые слова: ультразвуковой импульс, кавитация, длительность, пороговая интенсивность.

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве химико-технологических процессах для повышения эффективности их реализации используют ультразвуковые колебания. Одним из основных действующих факторов воздействия ультразвуковыми колебаниями является кавитация, при которой низкая плотность энергии распространяющейся волны трансформируется в высокую плотность энергии формируемой после схлопывания кавитационного пузырька коммутативной струи или ударной волны. Действие кавитации позволяет ускорять многочисленные технологические процессы, связанные с изменением структуры и свойств жидких материалов.

Однако кавитационный процесс оказывает и отрицательное воздействие на протекание процессов [1]. Обусловлено это возникновением зоны парогазовых пузырьков вблизи излучателя, характеризующейся аномально высоким поглощением энергии колебаний и ограничивающей дальнейшее распространение колебаний.

Кроме того кавитация является абсолютно недопустимой для множества процессов, где ультразвуковые колебания создают направленное стимулирующее и объединяющее воздействие. К таким процессам относятся разрушения эмульсий, коагуляция твердых частиц (где кавитация может разрушать образованные агломераты), процессы равномерного распределения нано частиц в вязких средах, бактериальной очистки вод, брожения (где кавитация может разрушать дрожжевые бактерии), процессы разжижения натуральных веществ – например, мёда (где кавитация может оказывать отрицательное воздействие на полезные свойства) [2].

Возникновение кавитации происходит по следующему механизму [3]. На первой стадии происходит процесс диффузии газа, растворенного в жидкости, в полость образующегося в месте разрыва жидкости кавитационного пузырька. Процесс прямой диффузии, как показала скоростная киносъёмка, происходит в течение нескольких периодов ультразвуковых колебаний (5...20 периодов). Во время прямой диффузии кавитационный пузырёк, за счёт проникновения газа во внутрь, постепенно расширяется с малой скоростью стенок (не более 0,005 м/с), пока не достигнет критического размера (1...10 мкм), зависящего от интенсивности вводимых УЗ колебаний. Когда зародыш выходит на критический размер, он начинает в течение полупериода разрежения быстро расширяться до крупного пузырька (размером более 100 мкм). В фазе быстрого расширения скорость движения стенок превышает 4 м/с. Затем, в течение полупериода сжатия зародыш схлопывается за время не более 1 мкс (модуль скорости движения стенок превышает 300 м/с). Тем самым ультразвуковое воздействие реализуется в кавитационном режиме.

Многokrатно установлено на практике, что при непрерывном синусоидальном воздействии [4] возможно образование схлопывающихся кавитационных пузырьков при интенсивностях, начиная от 0,3 Вт/см² (в воде).

Тем самым невозможно вводить и распространять на большие расстояния большие энергии и эффективно реализовывать процессы, не допускающие возникновения кавитации.

Решением проблемы может стать использование для воздействия на процессы коротких ультразвуковых импульсов, которые можно сформировать путем

излучения синусоидальных колебаний, модулированных по амплитуде периодическими прямоугольными импульсами. В таком случае формируемые ультразвуковые импульсы будут представлять собой следующие друг за другом волновые пакеты конечной длительности, большей, чем период ультразвуковых колебаний, но меньшей, чем период следования пакетов.

Для исследования влияния импульсных воздействий на процесс возникновения и протекания кавитации необходимо рассмотреть особенности формирования кавитационных пузырьков при таких воздействиях.

Поскольку критический размер пузырька, при котором он начинает быстро (в течение 0,5...1 периода колебаний) расти и схлопываться, зависит от вводимой интенсивности колебаний, рядом авторов [5-9] была выявлена возможность управления пороговой интенсивностью, необходимой для возникновения кавитации.

Механизм управления интенсивностью при реализации УЗ воздействия в виде волновых пакетов (рисунок 1) заключается в формировании пакетов, длительностью 0,5...10 мс, меньшей периода их следования 1...20 мс (коротких импульсов). В таком случае кавитационный зарождающийся пузырек в фазе прямой диффузии (медленного расширения) за время длительности волнового пакета не успеет вырасти до размера 1 мкм и более, необходимого для реализации кавитационного режима, поскольку скорость прямой диффузии является конечной.

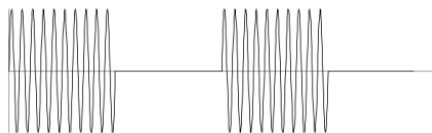


Рис. 1. Форма колебаний УЗ импульсов

В соответствии с этим, чем меньше длительность импульса, тем меньше максимально достигаемый размер ядра. Следовательно, с уменьшением длительности импульса возрастает пороговая интенсивность, при которой реализуется кавитационный режим, как показано на рисунке 2 [4].

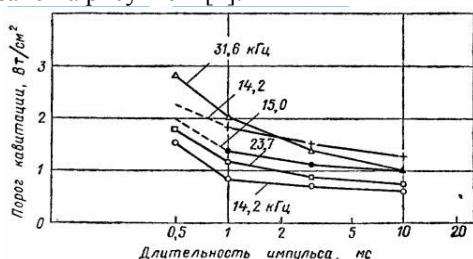


Рис. 2. Зависимость пороговой интенсивности, необходимой для возникновения кавитации, от длительности импульса при различных частотах ультразвукового воздействия

Таким образом ультразвуковое воздействие в импульсном режиме позволяет увеличить пороговую

интенсивность, требуемую для возникновения кавитации до 3-х раз. Это означает, что УЗ импульсное воздействие может служить одним из перспективных подходов к увеличению вводимой УЗ энергии в устойчивом докавитационном режиме и более эффективной реализации процессов, не допускающих возникновения кавитации.

Однако, данные исследования, в своем большинстве имеют только экспериментальное обоснование. При этом не изучалось влияние вязкости жидкости на пороговую интенсивность при различных длительностях импульса. Так как эксперименты, учитывающие данные факторы, достаточно трудоемки, то необходимо разработать физико-математическую модель зарождения кавитации под действием ультразвуковых импульсных колебаний.

Разработанная модель представлена далее.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Размер кавитационного пузырька зависит от времени прохождения каждой из трех стадий процесса:

- 1) зарождение;
- 2) расширение;
- 3) схлопывание.

Далее рассмотрено математическое описание каждой из них.

На стадии зарождения, проникновение газа в полость кавитационных пузырьков описывается уравнением диффузии (1).

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\frac{8}{3}\pi DC_0 R_0 \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^2}{(1 - \varepsilon^2(R_0))^2 + \varepsilon^2(R_0)d^2(R_0)} - 4\pi D_r C_0 R_0 \quad ; (1)$$

$$\varepsilon^2(R_0) = \left(\frac{\omega}{\omega_0(R_0)}\right)^2 ; (2) \quad d(R_0) = \frac{1}{Q(R_0)} = \frac{\omega\eta}{K_c(R_0)} ; (3)$$

где m – масса газа внутри пузырька, кг; D – эквивалентный коэффициент прямой диффузии растворённого газа в жидкости, м²/с; D_r – эквивалентный коэффициент обратной диффузии растворённого газа в жидкости, м²/с; R_0 – радиус кавитационного зародыша, м; p_m – амплитуда звукового давления в жидкости, Па; p_0 – статическое давление в жидкости; ω – круговая частота акустического воздействия, с⁻¹; ω_0 – резонансная частота кавитационного пузырька, определяемая по формуле Миннаерта [10]; K_c – коэффициент сжимаемости кавитационного пузырька.

Поскольку предполагается, что ультразвуковое воздействие осуществляется в теплоизолированных технологических объёмах то, ввиду адиабатического закона, справедливо считать постоянной плотность газа внутри пузырька на протяжении всей длительности импульса. А так как пузырек совершает малые колебания, то составляющая, определяющая влияние сдвига на вязкость намного меньше единицы. Это говорит о том, что неньютоновское поведение

жидкости на скорость медленного роста радиуса пузырька (до начала быстрого расширения) в стадии его зарождения не оказывает влияния.

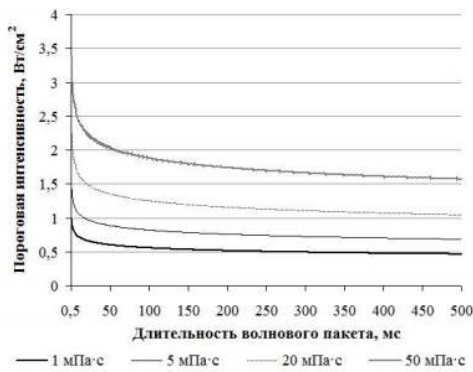
Максимальный размер пузырька, достигаемый за время длительности стадии зарождения пузырька τ , определяется согласно полученному выражению (4):

$$R_0(\tau) = \sqrt[3]{R_0^3(0) + \frac{3841DC_0\sigma^2}{\rho^2\rho_0^4\omega^6\eta^2}\tau} \quad (4)$$

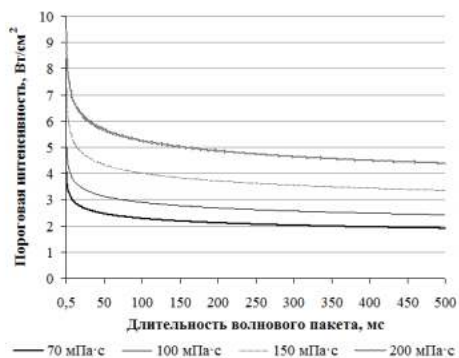
Когда радиус пузырька достигает критического значения $R_0(\tau) > R_{crit}$, пузырёк может начать быстро расширяться в течение одного периода колебаний и схлопываться.

Зависимость радиуса пузырька в стадиях быстрого расширения и схлопывания описывается уравнением Кирквуда-Бете [11]. Данное уравнение позволяет определить радиус пузырька в зависимости от реологических свойств жидкости. Критерием начала схлопывания служит достижение скоростью стенок пузырька скорости звука в сплошной жидкости (1500 м/с).

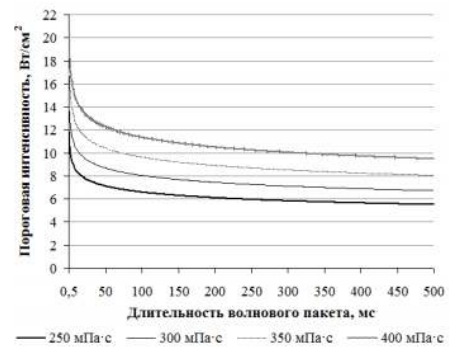
Далее на рисунках 3–4 представлены зависимости минимальной пороговой интенсивности, при которой возникает кавитация, от длительности ультразвукового импульса при различных вязкостях жидкости.



а)

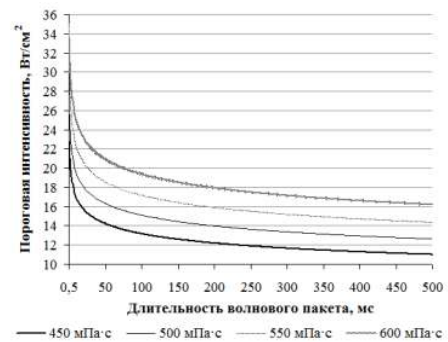


б)

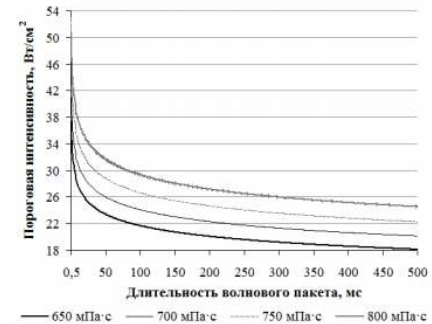


в)

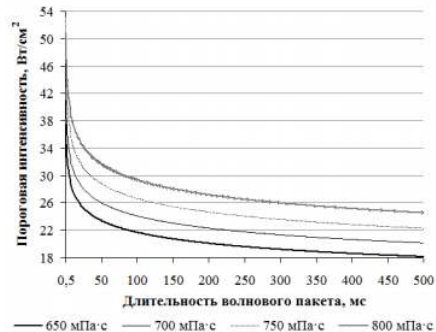
Рис. 3. Зависимости минимальной пороговой интенсивности, при которой возникает кавитация, от длительности ультразвукового импульса при различных вязкостях жидкости (диапазон вязкостей 1–400 мПа·с)



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимости минимальной пороговой интенсивности, при которой возникает кавитация, от длительности ультразвукового импульса при различных вязкостях жидкости (диапазон вязкостей 450–1000 мПа·с)

Зависимости интенсивностей ультразвукового воздействия, при котором возникает кавитация, от вязкости жидкости могут быть представлены следующим образом (рисунок 5).

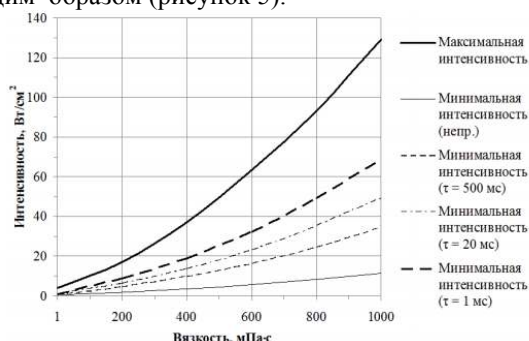


Рис. 5. Диапазон интенсивностей УЗ воздействия для обработки сред с линейно-вязкими жидкими фазами (при различных длительностях импульса)

При максимальной интенсивности УЗ воздействия наступает вырожденная кавитация (пузырьки не схлопываются в течение длительного времени).

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что уменьшение длительности импульса позволяет увеличить минимальную пороговую интенсивность, при которой начинается переход из бескавитационного режима в кавитационный режим, в широком диапазоне вязкости жидкости от 1 до 1000 мПа·с. Это обусловлено тем, что если интенсивность совпадает с минимальной пороговой интенсивностью при импульсном ультразвуковом воздействии, за время длительности импульса кавитационный пузырек не успевает вырасти до размера, при котором он начинает быстро расширяться и схлопываться.

Кроме того, при обработке жидких сред с вязкостями до 1000 мПа·с теоретически достигаемый эффект увеличения пороговой интенсивности, при которой возникает кавитация превышает 5 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов, позволяет сделать вывод о том, что уменьшение длительности импульса позволяет увеличить минимальную пороговую интенсивность, при которой может реализовываться ультразвуковая обработка жидких сред в докавитационном режиме, до 5 раз и более. За время длительности такого импульса кавитационный пузырек не успевает вырасти до размера, при котором он начинает быстро расширяться и схлопываться.

Следовательно, это позволяет сделать вывод о применимости импульсного ультразвукового воздействия для увеличения вводимой энергии при реализации процессов, для которых недопустимо возникновение кавитации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и

науки Алтайского края в рамках научного проекта 19-48-220014 «Физические основы глубокой очистки жидкостей от нежелательных примесей наложением акустических (ультразвуковых) волновых пакетов».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунев; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Издво Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с
2. Leadley, C., Williams, A. Power ultrasound - current and potential applications for food processing [Publication]/ Leadley, C., & Williams, A.– UK: Campden & Chorleywood Food Research Association Group., 2002.
3. Brennen, C.E. Cavitation and bubble dynamics [Текст] / С.Е. Brennen. – New York: Oxford University Press, 1995. – 294.
4. Urick, R.J. Principles of underwater sound [Текст] / R.J. Urick. – McGraw-Hill Book Co., 1983.
5. Красильников, В.А. Введение в физическую акустику [Текст] / В.А. Красильников, В.В. Крылов – М.: Наука, 1984. — 403 с.
6. Xie, W. Pulsed ultrasound assisted dehydration of waste oil [Текст] / W. Xie, R. Li, X. Lu // Ultrason Sonochem, 2015. – Sep 26. – P. 136–141.
7. Urick, R.J. Principles of underwater sound [Текст] / R.J. Urick. – McGraw-Hill Book Co., 1983.
8. Khmelev, V.N. Pulse mode of the electronic generator of the ultrasonic technological apparatus [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, G.V. Leonov, E.V. Ilchenko // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – IEEE, 2014. – P. 217–220.
9. Brujan, E.A. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids [Текст] / E.A. Brujan, P.R. Williams // Rheology reviews. – The British Society of Rheology, 2005. – P. 147–172.
10. Рудяк В.Я. Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред [Текст] / В.П.Т. 1. Кинетическая теория. – Новосибирск: ИГАСУ (Сибстрин), 2004. – 320 с
11. Minnaert, M. On musical air-bubbles and the sounds of running water [Текст] / M. Minnaert // Philos. Mag., 1933. – Vol. 16, Iss. 17. – P. 235.
12. Khmelev, V.N. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, A.V. Shalunova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – Springer, 2017. – Vol. 90, Iss. 4. – P. 831–844.

Гольх Роман Николаевич. – БТИ АлтГТУ, доцент кафедры МСИА, к.т.н. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Боброва Галина Алексеевна. – БТИ АлтГТУ, научный сотрудник кафедры МСИА, (3854)432570, e-mail: bobrovagalja@mail.ru.

Хмелёв Владимир Николаевич. – БТИ АлтГТУ, зам. директора по научной работе, д.т.н. (3854)432570, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Барсуков Роман Владиславович. – БТИ АлтГТУ, доцент кафедры МСИА, к.т.н. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru

Генне Дмитрий Владимирович – БТИ АлтГТУ, ведущий инженер кафедры МСИА, (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru

Абраменко Денис Сергеевич – БТИ АлтГТУ, доцент кафедры МСИА, к.т.н. (3854)432570, e-mail: ades@bti.secna.ru

Шакура Владислав Анатольевич – БТИ АлтГТУ, научный сотрудник кафедры МСИА, (3854)432570, e-mail: shakura.va@bti.secna.ru

Титов Геннадий Андреевич – ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», инженер, (3854)432570, e-mail: titov.ga@bti.secna.ru

Ильченко Евгений Владимирович – ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», инженер, (3854)432570, e-mail: iev@bti.secna.ru

INFLUENCE OF THE DURATION OF THE ULTRASONIC PULSE ON THE THRESHOLD VIBRATION INTENSITY THAT LEADS TO CAVITATIONS IN LIQUIDS WITH DIFFERENT VISCOSITY

R. N. Golykh¹, G. A. Bobrova¹, V. N. Khmelev¹, R. V. Barsukov¹, D.V. Genne¹, D.S. Abramenko¹, V.A. Shakura¹, G.A. Titov², E.V. Ilchenko²

¹BTI AltSTU, Biysk

²Center of ultrasonic technologies of AltSTU Ltd., Biysk

Abstract – The article presents the results of theoretical studies of pulsed ultrasonic exposure to a threshold intensity leading to cavitation. A physical and mathematical model is proposed that describes the process of cavitation bubble formation under the influence of pulsed ultrasound (high-frequency sinusoidal oscillations modulated by the amplitude of rectangular pulses), which allows to reveal the dynamics of direct diffusion of a gas dissolved in a liquid into the cavity of a cavitation bubble and, in ultimately, calculate the threshold intensities at which the cavitation bubble begins to collapse, from the duration of the ultrasonic pulse and the viscosity of the liquid.

Index terms: ultrasonic pulse, cavitation, duration, threshold intensity

REFERENCES

1. Khmelev, V. N. Application of high intensity ultrasound in industry [Text] / V. N. Khmelev, A. N. Slivin, R. V. Barsukov, S. N. Tsyganok, A.V. Shalunov; Alt. state technical University. UN-t, BTI. - Biysk: Izdvo Alt. GOS. tehn. University press, 2010. – 203 c
2. Leadley, C., Williams, A. Power ultrasound - current and potential applications for food processing [Publication]/ Leadley, C., & Williams, A.-UK: Campden & Chorleywood Food Research Association Group., 2002.
3. Brennen, C. E. Cavitation and bubble dynamics [Text] / C. E. Brennen. - New York: Oxford University Press, 1995. - 294.
4. Urick, R. J. Principles of underwater sound [Text] / R. J. Urick – McGraw-Hill Book Co., 1983.
5. Krasilnikov, V. A. Introduction to physical acoustics [Text] / V. A. Krasilnikov, V. V. Krylov-Moscow: Nauka, 1984. - 403 p.
6. Xie, W. Pulsed ultrasound assisted dehydration of waste oil [Text] / W. Xie, R. Li, X. Lu // Ultrason Sonochem, 2015. - Sep 26. - P. 136-141.
25. Urick, R. J. Principles of underwater sound [Text] / R. J. Urick. – McGraw-Hill Book Co., 1983.
7. Khmelev, V. N. Pulse mode of the electronic generator of the ultrasonic technological apparatus [Text] / V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, G. V. Leonov, E. V. Ilchenko // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. - IEEE, 2014. - P. 217-220. 259
8. Brujan, E. A. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids [Text] / E. A. Brujan, P. R. Williams // Reology reviews. – The British Society of Rheology, 2005. – P. 147-172.
9. Rudyak V. Ya. Statistical aerohydrodynamics of homogeneous and heterogeneous media [Text] / in II vol. 1. Kinetic theory.- Novosibirsk: ngasu (sibstrin), 2004. - 320 s
10. Minnaert, M. On musical air-bubbles and the sounds of running water [Text] / M. Minnaert // Philos. Mag., 1933. - Vol. 16, Iss. 17 – - P. 235.
11. Khmelev, V. N. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization [Text] / V. N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V. A. Nesterov, R. S. Dorovskikh, A.V. Shalunova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – Springer, 2017. – Vol. 90, Iss. 4. – P. 831-844.

Golykh Roman Nikolaevich – BTI AltSTU, associate Professor of the Department of methods and means of Informatization and automation, Ph. D. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Bobrova Galina Alekseevna. - BTI AltSTU, research associate of the department of methods and means of informatization and automation, (3854)432570, e-mail: bobrovagalja@mail.ru.

Khmelev Vladimir Nikolaevich. - BTI AltSTU, deputy director of research, doctor of technical sciences (3854)432570, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Barsukov Roman Vladislavovich. - BTI AltSTU, associate professor of the Department of methods and means of Informatization and automation, Ph. D. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru

Genne Dmitry Vladimirovich - BTI AltSTU, leading engineer of the Department of methods and means of Informatization and automation, (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru

Abramenko Denis Sergeevich - BTI AltSTU, associate professor of the department of methods and means of informatization and automation, Ph. D. (3854)432570, e-mail: ades@bti.secna.ru

Shakura Vladislav Anatolyevich - BTI AltSTU, research associate of the department of methods and means of informatization and automation, (3854)432570, e-mail: shakura.va@bti.secna.ru

Titov Gennadiy Andreevich – "Center of ultrasonic technologies of AltSTU", engineer, (3854)432570, e-mail: titov.ga@bti.secna.ru

Ilchenko Evgeniy Vladimirovich – "Center of ultrasonic technologies of AltSTU", engineer, (3854)432570, e-mail: iev@bti.secna.ru