



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)  
УДК 620.179.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.024

 EDN: [YJRQOH](https://elibrary.ru/YJRQOH)

## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕРАХ И ИХ РАСПЛАВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Роман Владиславович Барсуков<sup>1</sup>, Роман Николаевич Голых<sup>2</sup>,  
Александр Романович Барсуков<sup>3</sup>, Алексей Николаевич Сливин<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

<sup>1</sup> roman@bti.secna.ru

<sup>2</sup> grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

<sup>3</sup> barsukov.ar@bti.secna.ru

<sup>4</sup> san@bti.secna.ru

**Аннотация.** Статья посвящена разработке экспериментального стенда, предназначенного для изучения кавитационных явлений, возникающих в расплавах полимеров. В основе работы стенда лежит получение и анализ спектра акустической эмиссии (в звуковом диапазоне) области непосредственного контакта ультразвукового излучателя и расплава полимера. Получены пробные спектры при воздействии на газ, жидкость и расплав этилвинилацетата. Разработанный стенд позволит изучить и максимально раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимеров, в частности, позволит выработать методы эффективной реализации процесса сварки разнородных материалов.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитационные явления, сварка, полимеры, воздействие на вещество, интенсификация диффузии.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314, <https://rscf.ru/project/24-22-00314/>.

**Для цитирования:** Стенд для исследования кавитационных явлений в полимерах и их расплавах при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности / Р.В. Барсуков [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 161–166. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.024, EDN: <https://elibrary.ru/YJRQOH>.

Original article

## STAND FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENA IN POLYMERS AND THEIR MELTS UNDER THE INFLUENCE OF HIGH INTENSITY ULTRASONIC OSCILLATIONS

Roman V. Barsukov<sup>1</sup>, Roman N. Golykh<sup>2</sup>, Aleksandr R. Barsukov<sup>3</sup>,  
Alexey N. Slivin<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

<sup>1</sup> roman@bti.secna.ru

<sup>2</sup> grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

<sup>3</sup> barsukov.ar@bti.secna.ru

<sup>4</sup> san@bti.secna.ru

© Барсуков Р. В., Голых Р. Н., Барсуков А. Р., Сливин А. Н., 2024

**Abstract.** The article is devoted to the development of an experimental stand designed to study cavitation phenomena occurring in polymer melts. The operation of the stand is based on obtaining and analyzing the acoustic emission spectrum (in the audio range) of the direct contact area between the ultrasonic emitter and the polymer melt. Test spectra were obtained upon exposure to gas, liquid, and ethyl vinyl acetate melt. The developed stand will allow to study and maximize the potential of ultrasonic welding of polymers, in particular, it will allow to develop methods for effectively implementing the process of welding dissimilar materials.

**Keywords:** ultrasonic, cavitation phenomena, welding, polymers, effect on matter, diffusion intensification.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 24-22-00314, <https://rscf.ru/en/project/24-22-00314/>.

**For citation:** Barsukov, R.V., Golykh, R.N., Barsukov, A.R. & Slivin, A.N. (2024). Stand for studying cavitation phenomena in polymers and their melts under the influence of high intensity ultrasonic oscillations. *Polzunovskiy vestnik*. (4), 161-166. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.024, EDN: <https://elibrary.ru/YJRQOH>.

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) сварка является перспективным способом соединения полимеров. На сегодняшний день основной реализуемый механизм воздействия ультразвуковыми колебаниями на соединяемые слои полимеров заключается в нагреве до граничной температуры между вязкопластичным и капельным состоянием. Вместе с тем, многочисленные исследования в области полимеров показывают, что тепловые эффекты несут побочные и нежелательные явления, ограничивающие прочность соединения при ультразвуковой сварке, к которым относятся, например, термическая деструкция полимеров и ускорение химических реакций окисления. В то же время на примере неньютоновских жидкостей, в том числе по реологическим свойствам, близких к термопластичным материалам, установлено, что ультразвуковые колебания приводят к возникновению гидродинамических эффектов, способных ускорять диффузионные процессы.

На рисунке 1 представлена схема воздействия УЗ колебаниями на полимер, где при помощи ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) осуществляется при непосредственном контакте с изначально твердым полимером введение в него ультразвуковой энергии.

Условно показаны зоны вблизи области введения УЗ энергии: 1 – текучее состояние полимера; 2 – вязкотекучее состояние полимера; 3 – вязкопластичное состояние полимера; 4 – твердое состояние полимера.

В непосредственной близости к излучающей поверхности УЗКС (зона 1), где материал в какой-то момент времени достигает текучего состояния, возникают кавитационные явления [1–6].

Таким образом, перспективными являются исследования, которые заключаются в установлении вклада гидродинамических эффектов (кавитационных явлений, акустических микропотоков, релаксационных эффектов вязкости) в контролируемое изменение свойств и интенсификацию

диффузии на границе раздела полимеров под действием мощных ультразвуковых колебаний в ходе реализации ультразвуковой сварки.

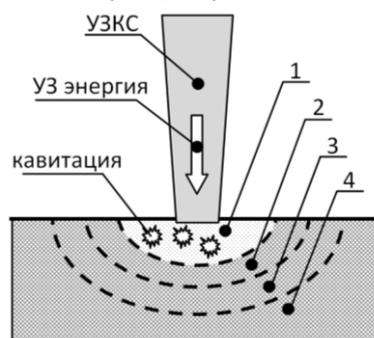


Рисунок 1 – Схема введения УЗ колебаний в полимерный материал

Figure 1 – Diagram of the introduction of ultrasonic vibrations into a polymer material

## МЕТОДЫ

Известно, что явление кавитации, возникающее в различных жидких средах, при воздействии на них УЗ колебаниями высокой интенсивности, как правило, сопровождается звуковыми эффектами (так называемый характерный кавитационный шум). Спектр этого шума зависит от физических свойств озвучиваемых сред, внешних условий (температуры, давления), параметров ультразвукового воздействия (интенсивности, частоты) и т.п.

Для исследования кавитационных явлений, протекающих в полимерах и их расплавах, при воздействии на них УЗ колебаниями высокой интенсивности был разработан стенд, структура которого представлена на рисунке 2.

Измерительный стенд состоит из УЗ электронного генератора Г, излучателя УЗКС, объема с расплавом полимера П, нагревателя Т, микрофона М, микрофонного усилителя У, скоростного аналогово-цифрового преобразователя А, персонального компьютера ПК с программным обеспечением, позволяющим получать спектр сигнала.

## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕРАХ И ИХ РАСПЛАВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

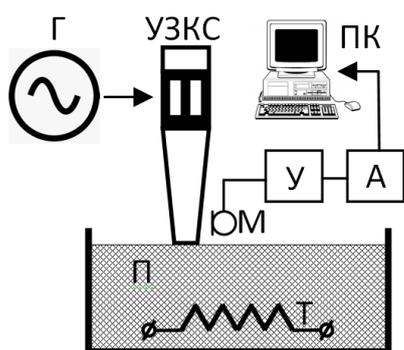


Рисунок 2 – Структурная схема стенда для изучения кавитационных явлений в полимерах и их расплавах

Figure 2 – Block diagram of a stand for studying cavitation phenomena in polymers and their melts

Ультразвуковой генератор с излучателем [7, 8] работает на фиксированной частоте 23 кГц, с возможностью плавного изменения амплитуды колебаний от 5 мкм до 50 мкм. Микрофонный усилитель построен на базе малошумящего усилителя МАХ9814. Аналогово-цифровой преобразователь построен на базе скоростного чипа AD9288. Площадь излучающей поверхности УЗ излучателя составляет 20 мм<sup>2</sup>. Микрофон располагается максимально близко к области контакта УЗ излучателя с озвучиваемой средой. Анализируется диапазон частот от 0 до 10 кГц. Нагреватель способен обеспечить нагрев полимеров до температуры 350 °С.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

При помощи предлагаемого стенда были получены предварительные измерительные данные. На рисунке 3 представлен спектр фо-

нового сигнала, поступающего с микрофона, при отсутствии каких-либо источников шума.

На рисунке 4 представлен спектр сигнала при наличии УЗ излучения в воздушной среде (без непосредственного воздействия на полимер или его расплав). На спектрограмме наблюдается всплеск уровня на частоте 4,31 кГц, что связано с паразитным излучением в звуковом диапазоне данного излучателя (характерная особенность, которую при дальнейших наблюдениях следует учитывать). Паразитное излучение узлов и элементов УЗ излучателей свойственно большинству конструкций.

На рисунке 5 представлен спектр сигнала, полученный при работе УЗ излучателя в водной среде. На спектрограмме явно наблюдаются изменения относительно спектра фонового сигнала (рисунок 3). В том числе на спектре присутствует «всплеск», который обусловлен паразитным излучением, в звуковом диапазоне, элементов конструкции УЗ излучателя. В диапазоне частот от 3 кГц до 7,5 кГц наблюдается изменения в спектре, на некоторых частотах этого диапазона уровень сигнала возрастает от -73dBm до -62dBm.

На рисунке 6 представлен спектр сигнала, полученный при воздействии на расплав этилвинилацетата (ЭВА) УЗ колебаниями. В отличие от спектра кавитационного шума, полученного при озвучивании воды, данный спектр имеет ярко выраженный пик в окрестностях частоты 7,15 кГц шириной в основании около 250 Гц. Субъективно, на слух, также наблюдается акустическая эмиссия из зоны УЗ воздействия на расплав полимера, что очевидно обусловлено кавитационными явлениями, возникающими в расплаве.

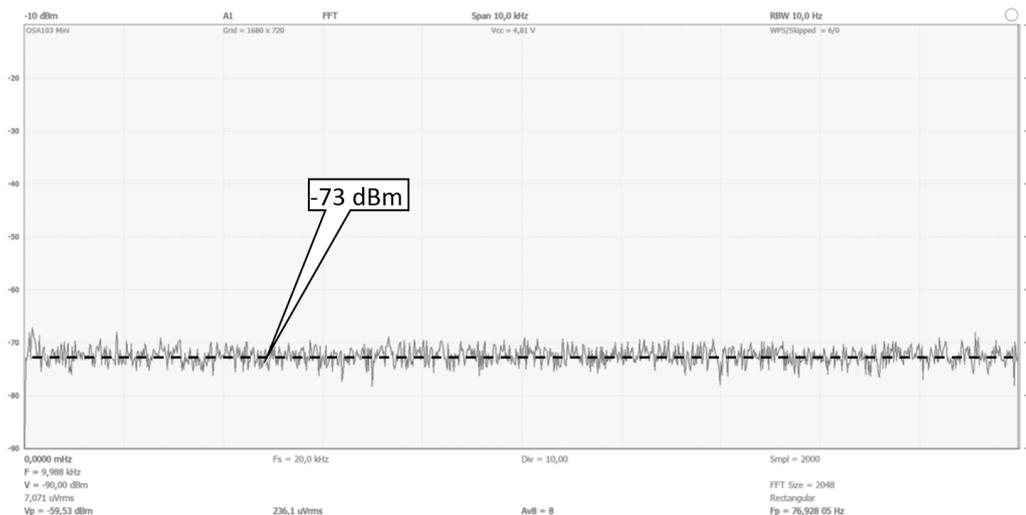


Рисунок 3 – Спектр фонового сигнала при отсутствии каких-либо источников шума

Figure 3 – The spectrum of the background signal in the absence of any noise sources

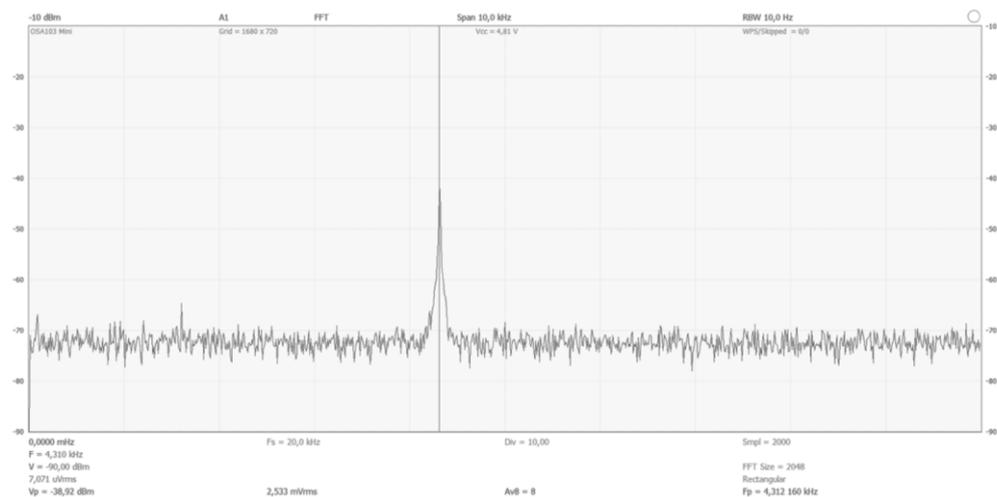


Рисунок 4 – Спектр сигнала при работающем УЗ излучателе в воздушной среде  
Figure 4 – Signal spectrum with a working ultrasonic emitter in an air environment

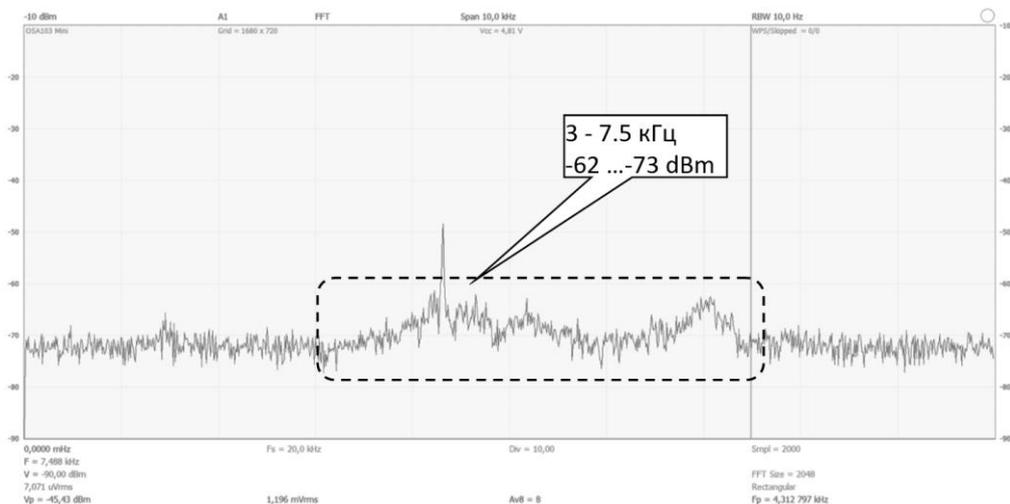


Рисунок 5 – Спектр сигнала, полученный при работе УЗ излучателя в водной среде

Figure 5 – The spectrum of the signal received during operation of the ultrasonic emitter in an aqueous environment

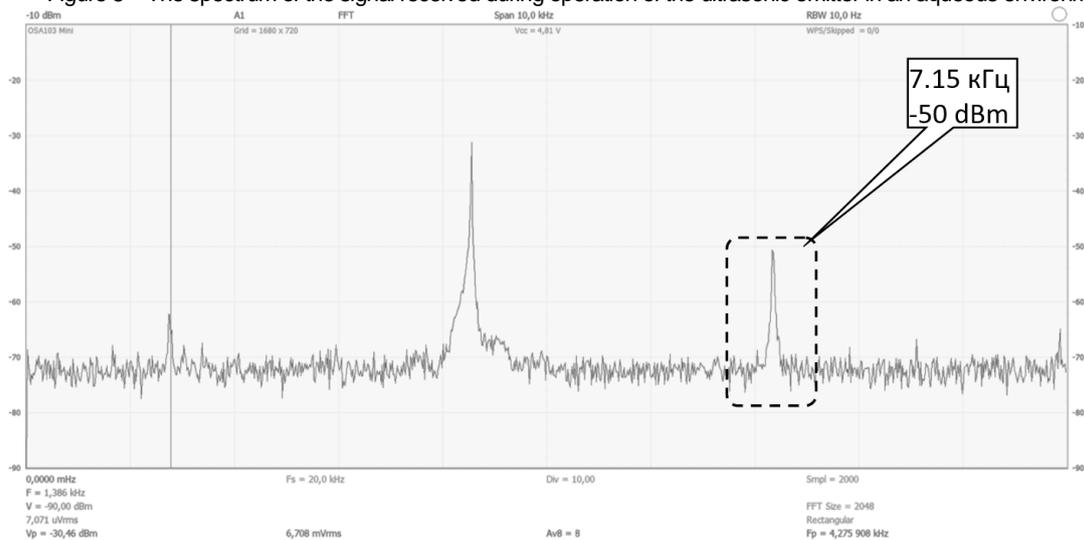


Рисунок 6 – Спектр сигнала, полученный в процессе УЗ воздействия на расплав полимера

Figure 6 – The signal spectrum obtained during ultrasonic action on the polymer melt

# СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕРАХ И ИХ РАСПЛАВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был разработан, изготовлен и апробирован измерительный стенд для исследования кавитационных явлений в полимерах и их расплавах при воздействии на них УЗ колебаниями высокой интенсивности. Предварительные эксперименты показали работоспособность стенда.

Разработка измерительного стенда является первым шагом в изучении новых механизмов инициации взаимной диффузии полимеров под действием ультразвука, изучении возможности кавитационного ускорения диффузии в полимерных материалах, что в конечном итоге позволит развить математический аппарат для описания нелинейной гидродинамики неньютоновских сред, который может быть использован для предсказания контролируемого изменения свойств полимеров при любых быстро меняющихся и мощных механических воздействиях.

Всё это позволит в полной мере раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимеров, обеспечив эффективную сварку разнородных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения / В.М. Приходько [и др.] // Научно-технические технологии электро-физико-химической и комбинированной обработки. 2020. № 9. С. 21–26. doi: 10.30987/2223-4608-2020-9-21-26.
2. Asano Y., Watanabe H., Noguchi H. Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis // *The journal of chemical physics*. 2021. Vol. 155. Issue 1. PP. e014905. doi: 10.1063/5.0056988.
3. Control of nano-cavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ synchrotron X-ray study / Z. Chen [et al.] // *Polymer*. 2024. Vol. 296. PP. e126786. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126786.
4. Технология жидкофазного совмещения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами неорганических соединений под действием ультразвуковых колебаний / Т.А. Охлопкова [и др.] // *Журнал прикладной химии*. 2016. Том 89. № 9. С. 1179–1186.
5. Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching / L. Qian [et al.] // *Polymer*. 2021. Vol. 217. Issue 1. PP. e123428. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123428.
6. Cavitation in thermoplastic melts: new insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation / I. Tzanakis [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 229. Issue 6. PP. e109480. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109480.
7. Ультразвуковые технологии, аппараты. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна». Бийск. URL: [https://ultrasonic.ru/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_rotsestov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/volna\\_v6/](https://ultrasonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_rotsestov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6/) (дата обращения: 12.03.2024).

8. Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами / В.Н. Хмелев [и др.]. Бийск : АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2021. 200 с.

## Информация об авторах

*Р. В. Барсуков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

*Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

*А. Р. Барсуков – инженер кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

*А. Н. Сливин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

## REFERENCES

1. Prihod'ko, V.M., Nigmatzyanov, R.I., Simonov, D.S., Sundukov, S.K. & Fatyuhin, D.S. (2020). Ultrasound in combined mechanical engineering technologies. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, (9), 21-26. (In Russ.). doi: 10.1063/5.0056988.
2. Asano, Y., Watanabe, H. & Noguchi, H. (2021). Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis. *The journal of chemical physics*, 155(1), e014905. doi: 10.1063/5.0056988.
3. Chen, Z., Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., Wan, M., Zheng, N., Xiong, B. & Zhu, J. (2024). Control of nano-cavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ

synchrotron X-ray study. *Polymer*, (296), e126786.doi: 10.1016/j.polymer.2024.126786.

4. Ohlopkova, T.A., Borisova, R.V., Nikiforov, L.A., Spiridonov, A.M., Sharin, P.P. & Ohlopkova, A.A. (2016). Liquid phase combination technologyultra-high molecular polyethylenewith nanoparticles of inorganic compoundsunderthe influence of ultrasonic vibrations. *The journal of applied chemistry*, 89(9), 1179-1186. (In Russ.).

5. Qian, L., Zhang, Y., Zhao, X., Xiang, M., Lu, Y. & Men, Y. (2021). Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching. *Polymer*, 217(1), e123428.doi: 10.1016/j.polymer.2021.123428.

6. Tzanakis, I., Khavari, M., Titze, M. & Eskin, D.G. (2022). Cavitation in thermoplastic melts: newinsights into ultrasound-assisted fibre-impregnation. *Composites Part B: Engineering*, 229(6), e109480.doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109480.

7. Ultrasonic technologies and devices. Ultrasonic technological device of the "Volna" series (2024). Retrieved from [https://u-sonic.ru/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_protsesov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/volna\\_v6/](https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6/). (In Russ.).

8. Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Genne, D.V., Abramenko, D.S. & Barsukov, A.R. (2021). *Ultrasonic. Principles of construction, algorithms and control*

*systems of ultrasonic devices*. Biysk: AltSTU. (In Russ.).

#### **Information about the authors**

*R.V. Barsukov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.*

*R.N. Golykh - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.*

*A.R. Barsukov - Engineer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.*

*A.N. Slivin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 28 января 2024; одобрена после рецензирования 20 ноября 2024; принята к публикации 04 декабря 2024.*

*The article was received by the editorial board on 28 Jan 2024; approved after editing on 20 Nov 2024; accepted for publication on 04 Dec 2024.*