

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ

В.Н. Хмелёв, С.Н. Цыганок, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ, г. Бийск

Статья посвящена решению проблемы реализации промышленных технологий в крупнотоннажных производствах на основании результатов исследований, проводимых в лабораторных условиях на небольших объемах обрабатываемых материалов. Показывается, что проблема может быть решена правильным выбором специализированного ультразвукового оборудования для проведения экспериментальных исследований. В основу такого лабораторного оборудования положено использование многополуволнового рабочего излучателя (инструмента) малых размеров, аналогичного промышленным излучателям большого диаметра и длины (более 1 м). Возможность обеспечения одинаковых условий ультразвукового воздействия в различных по размерам объемах достигается обеспечением равномерного поля ультразвукового излучения одинаковой интенсивности. Такой подход позволяет реализовать, полученные в результате экспериментальных исследований в лабораторных условиях на малых объемах обрабатываемых материалов оптимальные технологические режимы на промышленных ультразвуковых аппаратах при реализации крупнотоннажных производств без потерь в производительности и качестве получаемых материалов.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, кавитационное воздействие, лабораторное ультразвуковое оборудование, промышленное ультразвуковое оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

При всем многообразии существующих подходов, вопросы интенсификации технологических процессов наиболее эффективно решаются за счет использования новых видов энергии и высокоэффективного подведения энергии к взаимодействующим веществам. За последние десятилетия стало очевидно, что одним из перспективных направлений создания новых и интенсификации существующих технологических процессов является использование энергии акустических (ультразвуковых) колебаний высокой интенсивности. Основным действующим фактором является кавитационное воздействие [1-4].

Для интенсификации технологических процессов под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности необходимы источники ультразвукового воздействия. Основное требование к источникам ультразвуковых колебаний – способность создавать колебания с требуемыми параметрами в различных средах.

Однако прежде чем внедрять ультразвуковое воздействие в существующие технологии, необходимо понять его эффективность, оценить ее количественно и качественно. Любая модернизация существующего технологического процесса должна быть обусловлена и доказана экспериментальными результатами, которые получают на лабораторном ультразвуковом оборудовании. Далее всегда возникает проблема с адекватностью переноса полученных результатов лабораторных исследований на промышленные ультразвуковые аппараты, которые будут интенсифицировать технологический процесс в дальнейшем. Поэтому перед инженером-исследователем стоит задача выбора такого лабораторного ультразвукового оборудования,

чтобы обеспечить вышеуказанный перенос с минимальными затратами, в частности, без дополнительных экспериментальных исследований на промышленном ультразвуковом оборудовании.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На основании вышеизложенного, целью настоящей работы является выработка методологии обеспечения равных условий кавитационного воздействия как лабораторного, так и промышленного ультразвукового оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основании компьютерного моделирования рассмотреть расположение зон эффективности ультразвукового воздействия как лабораторного, так и промышленного ультразвукового оборудования;
- предложить классификацию выбора ультразвукового оборудования при увеличении мощностных и объемных характеристик ультразвуковых технологических аппаратов.

Решению поставленных задач посвящена настоящая работа.

Кавитационное воздействие, которое создается в подобном оборудовании, может возникать только в дисперсионных системах с преимущественно жидкой фазой. К таким технологическим процессам можно отнести массообменные процессы, например: экстрагирование, эмульгирование, растворение, дегазацию, диспергирование и т.п.

В качестве источников ультразвуковых колебаний в лабораторном ультразвуковом оборудовании наибольшее распространение получили пьезоэлектрические колебательные системы оканчивающиеся, как правило, плоским или грибовидным рабочим ин-

струментом. Кавитационное воздействие при этом обеспечивается погружением рабочего инструмента в технологическую среду.

Для эффективного использования акустической энергии необходимо знать формы и распределения зон кавитационного воздействия. Формы и распределения зон были получены на основании решения волнового уравнения распространения ультразвуковых колебаний в кавитирующей среде, приведенного в работе [5]:

$$\Delta(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}) + \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{\rho_0 c_0^2 \overline{\delta_1}(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})})}{\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}} \right) \sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})} = 0$$

где I – интенсивность ультразвуковых колебаний (действительная величина), Вт/м³; φ – фазовый сдвиг колебаний звукового давления в среде; ω – круговая частота первичного ультразвукового поля, с⁻¹; c_0 – скорость звука в жидкой фазе, м/с; ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, кг/м³; ρ – плотность кавитирующей жидкости, кг/м³; c – скорость звука в кавитирующей жидкой фазе, м/с; $\overline{\delta_1}(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})})$ – комплексная амплитуда первой гармоники объёмного содержания кавитационных пузырьков $\delta(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})}, t)$ как функции от времени t при заданной интенсивности ультразвуковых колебаний $I(\mathbf{r})$; \mathbf{x} – радиус-вектор точки жидкой фазы, м.

Результаты решения, полученные методом конечных элементов, приведены на рис. 1.

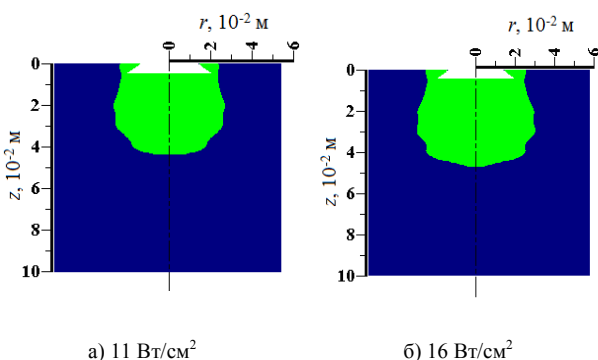


Рис. 1. Распределения зон эффективного кавитационного воздействия (обозначены светлым цветом) при различных интенсивностях ультразвукового воздействия с грибовидным рабочим инструментом

Как следует из представленных распределений, доля объёма зоны эффективного кавитационного воздействия от общего объёма не превышает 12% даже при интенсивности воздействия вблизи излучающей поверхности 16 Вт/см². Это связано с высоким поглощением колебаний (более 20 дБ/м) в кавитирующей жидкости. Поэтому необходимо увеличивать объём зоны эффективного кавитационного воздей-

ствия за счёт увеличения площади излучающей поверхности.

Многokратное увеличение площади поверхности обеспечивается при помощи многополуволнового рабочего инструмента. Он представляет собой стержень переменного сечения с утолщениями в узлах колебаний [6-9].

На рис. 2 приведены распределения зон эффективного кавитационного воздействия многополуволнового рабочего инструмента, помещенного в ограниченный цилиндрический технологический объём.

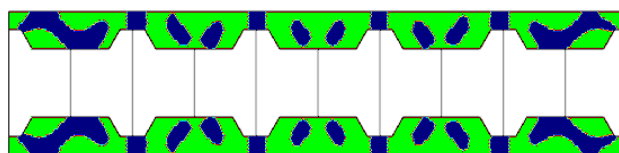


Рис. 2. Распределение зон эффективного кавитационного воздействия (выделено светлым цветом) в цилиндрическом технологическом объёме с многополуволновым рабочим инструментом

Как следует из представленных распределений, доля объёма зоны эффективного кавитационного воздействия (от полного объёма) достигает более 80% [10].

Итак, если конечной целью экспериментальных исследований является внедрение ультразвуковых технологий с существующий технологический процесс, то целесообразнее в качестве лабораторного ультразвукового оборудования использовать ультразвуковой аппарат с многополуволновым рабочим инструментом.

Ранее было показано, что по результатам моделирования многополуволновой рабочий инструмент позволяет создать равномерное кавитационное воздействие в технологическом объёме по сравнению с грибовидным или плоским рабочими инструментами. Лабораторное ультразвуковое оборудование с таким рабочим инструментом, представлено на рис. 3.



Рис. 3. Ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М» модель УЗТА-1/22-0М

Основные его технические характеристики указаны в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики

п/п	Наименование	Значение
1	Мощность, ВА, не более	1000
2	Частота, кГц	22±1,65
3	Питание от сети переменного напряжения, В	220±22
4	Интенсивность излучения, Вт/см ² , не менее	10
5	Диаметр многополуволнового рабочего инструмента, мм, максимальный/минимальны	30/18
6	Количество длин полуволн в материале рабочего инструмента	2

В табл. 2 и 3 представлены основные технические и энергетические параметры ультразвукового технологического оборудования, выпускаемого ООО «Центр ультразвуковых технологий» [7] и предназначенного для кавитационного воздействия на дисперсные системы с преимущественно жидкой фазой.

Табл. 2. Технические параметры

	Аппарат	S _{изл.} , см ²	Кол-во λ/2	I, Вт/см ²	Р _{акт.} , Вт Р _{пол.} , ВА
1	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП	25,2	2	13,0±0,6	575±25 1000
2	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-2/18-ОП	63,0	3	9,2±0,5	825±25 2000
3	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-3/22-ОП	145,2	5	5,1±0,2	1050±50 3000
4	«БУЛАВА-П» модели УЗАП-8/22-ОП и УЗАП-8/22-ОПГ	302,2	7	7,3±0,4	3150±150 8000
5	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-10/18-ОПГ	432,3	8	6,0±0,5	3700±400 10000

Табл. 3. Энергетические параметры

	Аппарат	Разовый обрабатываемый объем, см ³	Средняя объемная интенсивность, Вт/см ³
1	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП	1,5	218,2±9,5
2	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-2/18-ОП	2,25	256,7±7,8
3	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-3/22-ОП	2,7	272,2±13,0
4	«БУЛАВА-П» модели УЗАП-8/22-ОП и УЗАП-8/22-ОПГ	8,0	275,6±13,1
5	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-10/18-ОПГ	10	259,0±21,0

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и 3, показал, что как в лабораторном ультразвуковом аппарате «ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП, так и в промышленных ультразвуковых аппаратах «БУЛАВА-П» разных моделей создаются близкие условия кавитационного воздействия.

Таким образом, можно сделать вывод, что экспериментальные результаты, полученные на первом,

лабораторном аппарате, могут быть перенесены на другие, промышленные аппараты, с целью их дальнейшего внедрения в производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы была достигнута цель – предложена методология решения проблемы реализации промышленных технологий в крупнотоннажных производствах на основании результатов исследований, проводимых в лабораторных условиях на небольших объемах обрабатываемых материалов.

Показана целесообразность создания и применения специализированного ультразвукового оборудования для проведения экспериментальных исследований. В основу такого лабораторного оборудования положено использование многополуволнового рабочего излучателя (инструмента) малых размеров, аналогичного промышленным излучателям большого диаметра и длины (более 1 м). Возможность обеспечения одинаковых условий ультразвукового воздействия в различных по размерам объемах была достигнута обеспечением равномерного поля ультразвукового излучения одинаковой интенсивности в различных по размерам технологических объемах.

Возможность реализации равных условий кавитационного воздействия позволяет перенести данные, полученные в результате экспериментальных исследований в лабораторных условиях на малых объемах обрабатываемых материалов, в оптимальные технологические режимы на промышленных ультразвуковых аппаратах при реализации крупнотоннажных производств без потерь в производительности и качестве получаемых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Slivin A.N., Levin S.V., Demidova T.A. // Automation of Advanced Cavitation Mode Obtaining Process in Liquid Mediums // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2003. - P.222-226.
2. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev M.V., Khmelev S.S., Levin S.V. Development and Application of Piezoelectric Transducer with the Enlarged Radiation Surface for Wastewater Treatment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.254-257.
3. Abramenko D.S., Khmelev V.N., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. Effectiveness Increase of Ultrasonic Cavitation Processing of Viscous Liquid Media // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.262-265.
4. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shakura V.A. The extract production line with the application of ultrasonic technologies // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 243–245.
5. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Bazhin V.E., Nesterov V.A. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 208-212.

6. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Efficiency increase of the processes by the optimization of the ultrasonic vibrating system consisting of half-wave modules of variable cross-section // XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011, Novosibirsk, NSTU, 2011. – P. 275–280.

7. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. The design of the ultrasonic vibrating systems with multi-packet piezoelectric transducer and multi half-wave radiator // XIII International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU, 2012. – P. 174–178.

8. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Rules and Features of the Design of Piezoelectric Sources of High-Intensity Ultrasonic Action // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – P. 153-157.

9. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Efficiency increase of multi half-wave radiators // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 230–232.

10. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Kuzovnikov Y.M. Study of efficiency of ultrasonic treatment in running volumes // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Novosibirsk, NSTU, 2015. – P 221-223.

Хмелев Владимир Николаевич – заместитель директора по науке, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Цыганок Сергей Николаевич – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru.

Гольх Роман Николаевич – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Нестеров Виктор Александрович – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

REALIZATION OF RESULTS OF LABORATORY RESEARCHES IN INDUSTRIAL SCALES

V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, R.N. Golykh, V.A. Nesterov

Biysk Technological Institute, Biysk

Abstract – The article is devoted to solving of problem of realization of industry technologies in large-capacity production based on researches results carrying out in laboratory conditions with small amount of treated materials. It is shown the problem can be solved by correct choosing of specialized ultrasonic equipment for carrying out of experimental researches. As a basis of such equipment it is chosen the using of small size multi-wave radiator (instrument) similar to industrial radiators of big diameter and length (more than 1 m). Possibility of providing of identical conditions of ultrasonic influence in different sizes of volumes is achieved by providing of uniform field of ultrasonic radiation of identical intensity. Such method allows to realize with industrial ultrasonic apparatuses at large-capacity production the optimal technological modes obtained in laboratory experimental researches without loss in productivity and quality of obtained materials.

Index terms: ultrasonic influence, cavitation effect, laboratory ultrasonic equipment, industrial ultrasonic equipment.

REFERENCES

1. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Slivin A.N., Levin S.V., Demidova T.A. // Automation of Advanced Cavitation Mode Obtaining Process in Liquid Mediums // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2003. - P.222-226.
2. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev M.V., Khmelev S.S., Levin S.V. Development and Application of Piezoelectric Transducer with the Enlarged Radiation Surface for Wastewater Treatment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.254-257.
3. Abramenko D.S., Khmelev V.N., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. Effectiveness Increase of Ultrasonic Cavitation Processing of Viscous Liquid Media // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.262-265.
4. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shakura V.A. The extract production line with the application of ultrasonic technologies // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 243–245.
5. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Bazhin V.E., Nesterov V.A. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 208-212.
6. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Efficiency increase of the processes by the optimization of the ultrasonic vibrating system consisting of half-wave modules of variable cross-section // XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011, Novosibirsk, NSTU, 2011. – P. 275–280.
7. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. The design of the ultrasonic vibrating systems with multi-packet piezoelectric transducer and multi half-wave radiator // XIII International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU, 2012. – P. 174–178.
8. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Rules and Features of the Design of Piezoelectric Sources of High-Intensity Ultrasonic Action // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – P. 153-157.
9. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Efficiency increase of multi half-wave radiators // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 230–232.
10. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Levin S.V. Kuzovnikov Y.M. Study of efficiency of ultrasonic treatment in running volumes // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Novosibirsk, NSTU, 2015. – P 221-223.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – deputy director for science, professor, Biysk Technological Institute, заместитель директора по науке, (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Tsyganok Sergey Nikolaevich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grev@bti.secna.ru.

Golykh Roman Nikolaevich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Nesterov Viktor Alexandrovich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.