

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПО СВОЙСТВАМ ЖИДКОСТЕЙ

**В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, Р. С. Доровских,  
В. А. Нестеров, А. В. Шалунова**

*Кафедра «Методы и средства измерений и автоматизации»,  
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический университет им. И. И. Ползунова»,  
г. Бийск, Россия; shalunov@btu.secna.ru*

**Ключевые слова:** аэрозоль; распыление; ультразвук.

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментальных исследований по определению среднего диаметра, среднеквадратичного отклонения диаметра формируемых капель и производительности распыления от свойств распыляемых жидкостей (вязкость и поверхностное натяжение) при различных режимах ультразвукового воздействия (амплитуда и частота).

---

В настоящее время большинство технологических процессов реализуются в гетерогенных системах (двуфазные системы жидкость–газ), основой которых является распыление различных жидкостей и нанесение покрытий [1 – 3].

Примеры технологических процессов:

- в химической промышленности: мокрая очистка газов от дисперсных примесей, абсорбция газов, распылительная сушка;
- радиоэлектронной промышленности: нанесение фоторезистов и химико-механическое полирование полупроводниковых пластин при производстве полупроводниковых микросхем;
- оптико-электронной промышленности: нанесение полирующих жидкостей и технологических покрытий;
- медицине: нанесение покрытий на сердечные клапаны и стенты коронарных сосудов, нанесение дезинфицирующих покрытий при производстве медицинской техники и имплантов, дезинфекция помещений;
- получение наночастиц и нанесение нанопокрытий при производстве функциональных наноматериалов.

От возможности обеспечения требуемых дисперсных характеристик создаваемого распыла – однородности капель, их размера, производительности распыления зависит общая эффективность реализации технологического процесса [2, 3].

Одним из современных и перспективных способов является распыление жидкостей за счет использования энергии механических колебаний ультразвуковой частоты – ультразвуковое (УЗ) распыление [1 – 10]. На сегодняшний день применение УЗ-способа распыления ограничивает недостаточное число научных данных, позволяющих определять дисперсные характеристики формируемых ка-

пель жидкости и производительность распыления от свойств жидкости и параметров УЗ-воздействия. Таким образом, задача исследования влияния свойств жидкости (поверхностное натяжение, вязкость) на процесс ее распыления и определения необходимых режимов (частота, амплитуда) УЗ-воздействия является актуальной.

Для определения размеров формируемых капель жидкости и производительности, получаемых при различных режимах работы УЗ-распылителей и свойствах жидкостей, проведены экспериментальные исследования, заключающиеся в измерении:

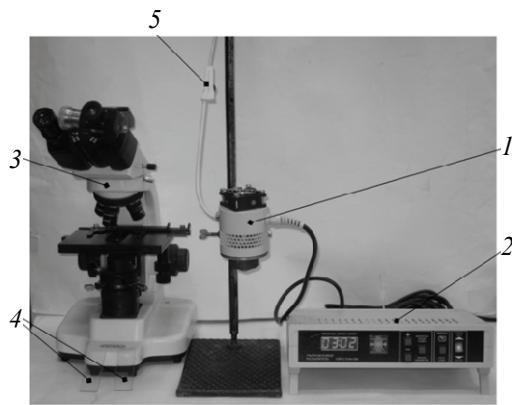
- 1) среднего диаметра формируемых капель при изменении амплитуды и частоты УЗ-воздействия;
- 2) среднего диаметра формируемых капель в зависимости от свойств жидкости (вязкости и поверхностного натяжения);
- 3) зависимости производительности распыления от частоты УЗ-воздействия.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан измерительный стенд (рис. 1). Для измерения размеров частиц при проведении экспериментов предметное стекло 4 покрывалось слоем иммерсионной среды – трансформаторным маслом.

После стабилизации работы распылителя, предметное стекло с иммерсионным слоем проносилось равномерно через факел распыленной жидкости, нормально к его оси на расстоянии 380 мм. Затем стекло устанавливалось на предметный столик микроскопа 5 и проводилось микрофотографирование капель распыленной жидкости. Далее снимки передавались на персональный компьютер, где с помощью разработанной компьютерной программы для распознавания графических объектов определялись средние диаметры капель.

Для проведения экспериментов использовались четыре ультразвуковых распылителя с рабочими частотами 22, 44, 60 и 130 кГц [1]; в качестве распыляемых жидкостей [4 – 6]: вода; водные растворы с различной концентрацией глицерина и этилового спирта (для создания жидкостей с различной вязкостью и равным поверхностным натяжением и для создания жидкостей с различным поверхностным натяжением и равной вязкостью, соответственно).

На рисунке 2 представлены полученные типичные фотографии сформированных капель жидкости. Отмечен рост диаметра капель с увеличением амплитуды

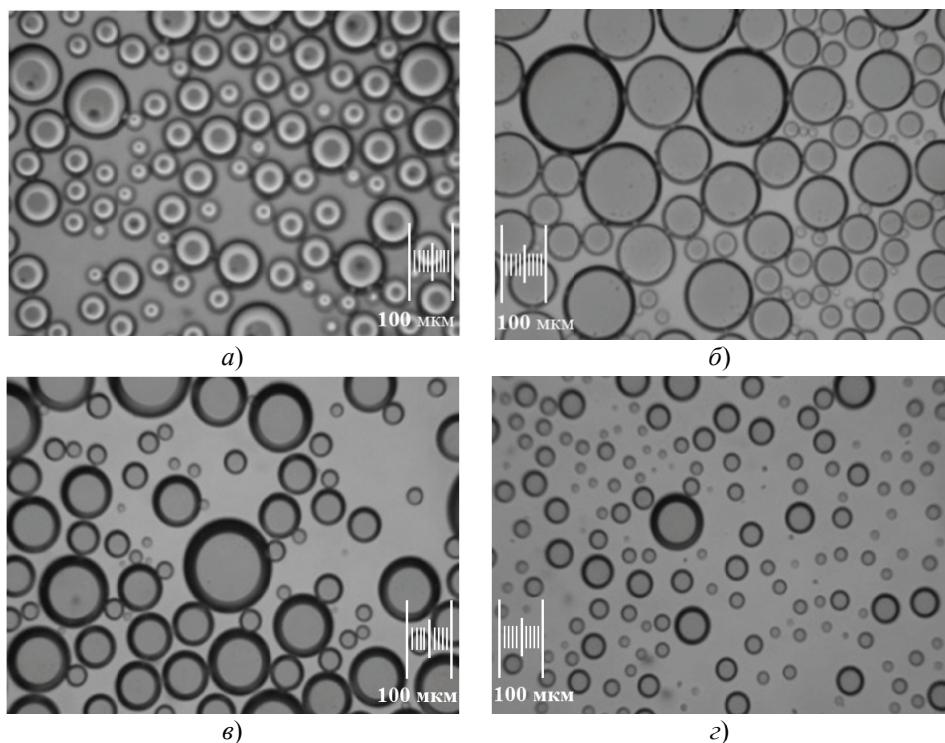


**Рис. 1. Измерительный стенд для определения дисперсного состава формируемых капель жидкости:**

1 – ультразвуковой распылитель;  
2 – электронный генератор; 3 – микроскоп МИКМЕД-63; 4 – предметное стекло; 5 – дозатор

и его уменьшение при увеличении вязкости. На основе полученных экспериментальных данных построены зависимости среднего диаметра и среднеквадратичного отклонения диаметра (СКО) формируемых капель от амплитуды колебаний распылительной поверхности, представленные на рис. 3.

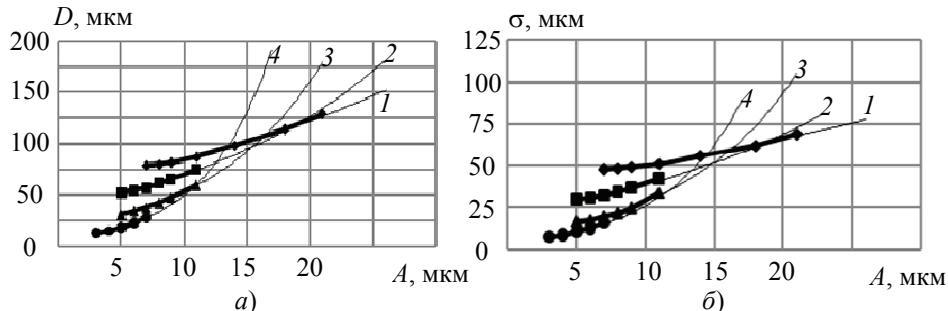
Анализ представленных графиков показал, что с увеличением амплитуды колебаний происходит значительный рост среднего диаметра и СКО диаметра капель. Аппроксимация полученных зависимостей в область высоких амплитуд колебаний позволила установить более быстрое возрастание СКО диаметров капель, и, следова-



**Рис. 2. Фото капель жидкости, полученных при распылении на частоте 22 кГц при амплитудах УЗ-колебаний 8 мкм (а), 14 мкм (б) и вязкости 1 мПа·с и при амплитуде УЗ-колебаний 11 мкм и вязкостях 6 мПа·с (в), 30 мПа·с (г) (цена деления шкалы объект-микрометра – 10 мкм)**

тельно, необходимость более точного поддержания установленной амплитуды колебаний распылительной поверхности для высоких частот. Для практического использования полученных результатов была построена зависимость среднего диаметра формируемых капель жидкости от частоты УЗ-воздействия при минимальной амплитуде УЗ-колебаний (рис. 4).

Представленная зависимость показывает уменьшение диаметров во всем диапазоне исследуемых частот. Проведенная аппроксимация иллюстрирует, что начиная с частот от 100 кГц, скорость уменьшения диаметра капель с ростом частоты несколько падает. Полученная зависимость свидетельствует о необходимости повышения частоты УЗ-колебаний выше 100 кГц и создания УЗ-колебательных систем, способных обеспечивать воздействие с амплитудами, достаточными для



**Рис. 3. Зависимости среднего диаметра формируемых капель (а) и СКО (б) от амплитуды УЗ-воздействия:**  
1 – 22 кГц; 2 – 44 кГц; 3 – 60 кГц; 4 – 130 кГц

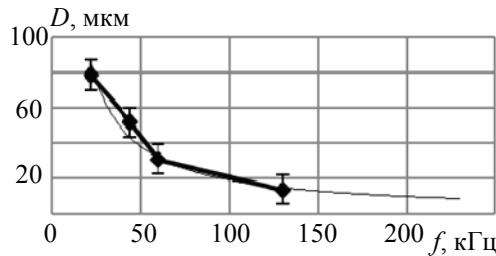


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра формируемых капель от частоты УЗ-воздействия

ний приводит к увеличению среднего диаметра и СКО диаметра формируемых капель, что обуславливает необходимость определения амплитуды УЗ-колебаний распылительной поверхности, при которой обеспечивается достаточная производительность распыления, но СКО диаметра и средний диаметр формируемых капель не превышают установленных (задаваемых) значений. Измерения значения удельной производительности распыления в зависимости от амплитуды колебаний для всех исследуемых частот УЗ-воздействия представлены на рис. 5.

После некоторого значения амплитуды рост производительности практически прекращается и дальнейшее ее увеличение приводит только к ухудшению дисперсных характеристик формируемых капель (см. рис. 5).

На основе полученных результатов практического применения УЗ-распыления в технологических процессах установлено, что их эффективная реализация обеспечивается, если СКО диаметров формируемых капель жидкости не превышает 60 % [1, 5, 7]. Данное условие выполняется при выборе амплитуды УЗ-колебаний на уровне, обеспечивающем 80 % от разницы между максимальной и минимальной производительностью распыления. Для рассматриваемых частот УЗ-воздействия 22, 44, 60, 130 кГц – это амплитуды 14, 8, 7 и 5 мкм, соответственно.

На рисунке 6 показаны зависимости среднего диаметра и СКО диаметра формируемых капель от частоты, измеренные при выявленных амплитудах УЗ-колебаний. В результате исследований установлены частота и амплитуда УЗ-колебаний, обеспечивающие формирование факела распыления с заданными дисперсными характеристиками; определены зависимости среднего диаметра формируемых капель жидкости от ее вязкости и поверхностного натяжения.

На основании проведенных измерений построены зависимости среднего диаметра и СКО диаметра формируемых капель от вязкости жидкости (рис. 7) и от поверхностного натяжения (рис. 8) при оптимальных амплитудах колебаний распылительной поверхности.

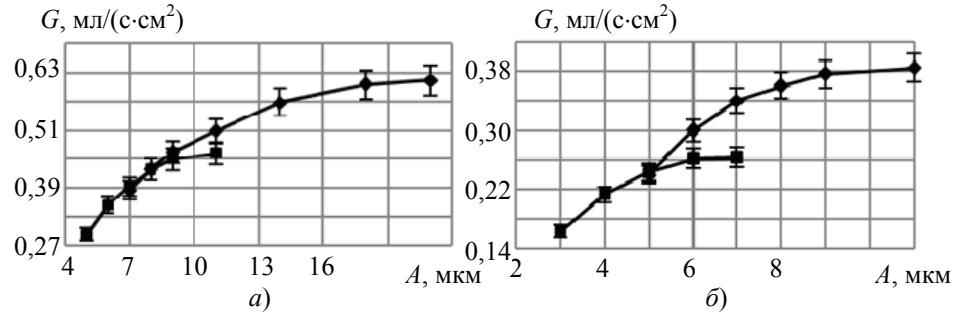


Рис. 5. Зависимость производительности распыления от амплитуды УЗ-воздействия при различных частотах колебаний:  
a) —◆— 22 кГц; —■— 44 кГц; б) —◆— 60 кГц; —■— 130 кГц

распыления жидкостей. Полученная зависимость является базовой, необходимой для начального определения рабочей частоты распылителя, обеспечивающего формирование капель с требуемым средним диаметром.

Очевидно, что для увеличения производительности УЗ-распыления жидкостей необходимо увеличивать амплитуду УЗ-колебаний. Но, как было экспериментально установлено, увеличение амплитуды колебаний

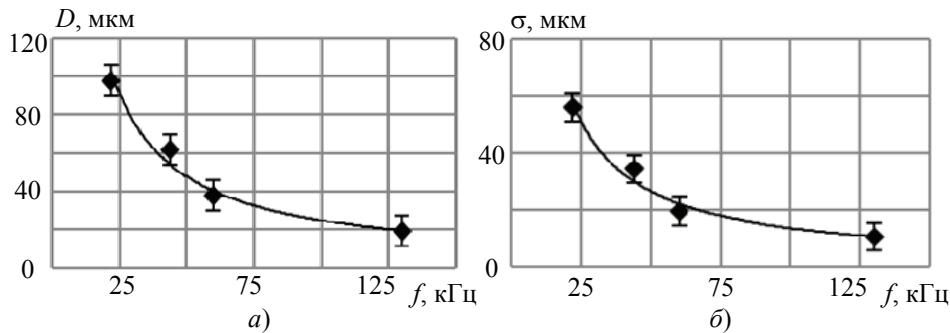


Рис. 6. Зависимости среднего диаметра (а) и СКО диаметра (б) формируемых капель от частоты УЗ-воздействия

С ростом частоты уменьшается максимально допустимое значение вязкости распыляемой жидкости (см. рис. 7). При малых поверхностных натяжениях средний диаметр формируемых капель уменьшается (см. рис. 8). Увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению диаметра формируемых капель.

Проведенные исследования позволили установить, что при воздействии УЗ-колебаниями на частоте 22 кГц изменение вязкости распыляемых жидкостей в пределах 1...30 мПа·с вызывает уменьшение диаметра формируемых капель с 96 до 56 мкм; 44 кГц (1...23 мПа·с) – с 61 до 39 мкм; 60 кГц (1... 15 мПа·с) – с 38 до 22 мкм; 130 кГц (1...10 мПа·с) – с 19 до 13 мкм. При этом, изменение поверхностного натяжения в пределах от 22 до 72 мН/с вызывает увеличение среднего диаметра капель: на частоте 22 кГц – с 80 до 98 мкм; 44 кГц – с 47,2 до 62 мкм; 60 кГц – с 31,2 до 38 мкм; 130 кГц – с 13,4 до 19,3 мкм.

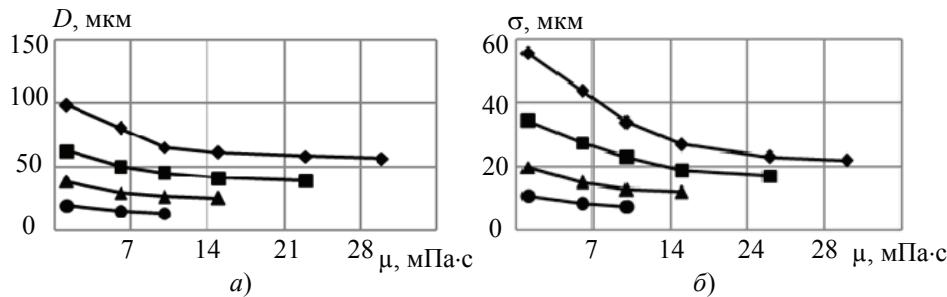


Рис. 7. Зависимости среднего диаметра (а) и СКО диаметра (б) формируемых капель от вязкости распыляемой жидкости:

- ◆ – 22 кГц;
- – 44 кГц;
- ▲ – 60 кГц;
- – 130 кГц

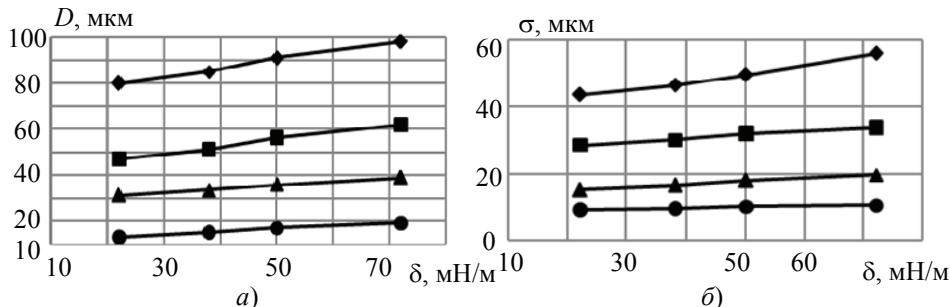


Рис. 8. Зависимости среднего диаметра (а) и СКО (б) формируемых капель от поверхностного натяжения распыляемой жидкости:

- ◆ – 22 кГц;
- – 44 кГц;
- ▲ – 60 кГц;
- – 130 кГц

Среднеквадратичное отклонение диаметра формируемых капель жидкости при изменении вязкости уменьшается на 60, 59, 54, 40 %, соответственно на частотах 22, 44, 60 и 130 кГц. Среднеквадратичное отклонение диаметра формируемых капель жидкости зависит от поверхностного натяжения. Например, при уменьшении поверхностного натяжения с 72 до 22 мН/м СКО диаметра уменьшается на 24 % при частоте УЗ-воздействия 22 кГц.

Установленные зависимости значений формируемых средних диаметров и СКО диаметров распыляемых капель жидкости от режимов УЗ-воздействия и свойств самой жидкости могут быть использованы для определения частоты и амплитуды УЗ-воздействия при распылении жидкостей различной вязкости и поверхностного натяжения в реальных технологических процессах.

Поскольку важнейшим параметром, влияющим на эффективность процессов, основанных на распылении жидкости, является производительность распыления, проведены исследования по определению максимальной производительности, обеспечиваемой каждым из распылителей. При помощи дозатора (см. рис. 1), расход жидкости устанавливался таким образом, чтобы распыляемая жидкость покрывала всю поверхность рабочего инструмента, но в то же время не происходило срыва распыления. Объем распыленной жидкости за определенный период времени (120 с) измерялся мерной колбой.

На рисунке 9 приведена полученная зависимость максимальной удельной производительности распыления от частоты УЗ-воздействия. Полученная зависимость может использоваться для определения площади поверхности распыления (колеблющейся поверхности распылителя), необходимой для обеспечения заданной производительности распыления.

В результате проведенных исследований получены зависимости дисперсных характеристик распыления от режимов УЗ-воздействия и свойств распыляемых жидкостей. Установлено, что с увеличением амплитуды УЗ-колебаний происходит значительный рост среднего диаметра и СКО диаметра формируемых капель. Установлена целесообразность повышения частоты УЗ-колебаний выше 100 кГц и создания УЗ-колебательных систем, способных обеспечивать на указанных частотах воздействие с амплитудами, достаточными для распыления жидкостей.

Выявлены значения амплитуды УЗ-колебаний для распыления жидкостей, обеспечивающие достаточную производительность распыления при СКО диаметров формируемых капель жидкости не более 60 %. Полученные зависимости диаметров и СКО диаметров формируемых капель от свойств жидкости можно использовать для определения изменения среднего диаметра капель, вызванного сменой типа распыляемой жидкости или изменением ее физических свойств. Определена зависимость максимальной удельной производительности распыления от частоты УЗ-воздействия, которая позволяет определять площадь поверхности распыления, необходимую для обеспечения заданной производительности распыления.

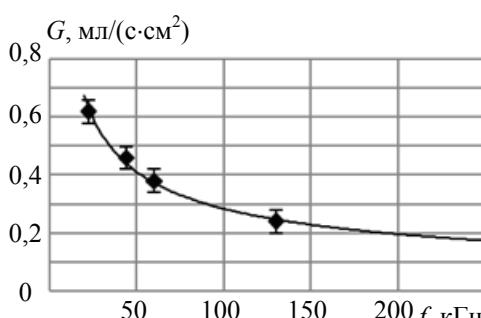


Рис. 9. Зависимость удельной производительности распыления от частоты УЗ-воздействия

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60082 мол\_а\_дк.

## *Список литературы*

1. Хмелев, В. Н. Ультразвуковое распыление жидкостей : монография / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 250 с.
2. Ультразвук. Аппараты и технологии : монография / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 688 с.
3. Физика и техника мощного ультразвука : в 3 т. Т. 3 : Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л. Д. Розенберга. – М. : Наука, 1970. – 689 с.
4. Khmelev, V. N. The Cavitation Spraying of the Viscous Liquids / V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, E. S. Smerdina // Conference proceedings 7<sup>th</sup> Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials 2006, EDM, 01 – 05 June, 2006. – Novosibirsk : NSTU, 2006. – P. 269 – 273. doi: 10.1109/SIBEDM.2006.231298
5. Управление процессом ультразвукового распыления вязких жидкостей / В. Н. Хмелев [и др.] // Изв. Туль. гос. университета. Техн. науки. – 2006. – № 8. – С. 12 – 19.
6. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для распыления вязких жидкостей / В. Н. Хмелев [и др.] // Техн. акустика. – 2011. – № 11. – 10 с.
7. Хмелев, В. Н. Технологии ультразвукового мелкодисперсного распыления на службе охраны здоровья / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова // Нанотехнологии и охрана здоровья. – 2011. – № 1. – С. 30 – 33.
8. Ultrasonic Atomization of Liquids in Drop-Chain Acoustic Fountains / J. C. Simon [et al.] // J. Fluid Mech. – 2015. – Vol. 766. – P. 129 – 146. doi: 10.1017/jfm.2015.11
9. Balik, G. The Use of Air Atomizing Nozzles to Produce Sprays with Fine Droplets / G. Balik // 14<sup>th</sup> International Water Mist Conference, 22–23 October 2014, Istanbul, Turkey, 2014. – 7 p.
10. Using Ultrasonic Atomization to Produce an Aerosol of Micron-Scale Particles / T. D. Donnelly [et al.] // Review of scientific instruments. – 2005. – Vol. 76, Issue 11. – P. 1 – 10. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2130336>

---

## **Research into Ultrasonic Exposure Modes for Spraying Liquids with Different Properties**

**V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. S. Dorovskikh,  
V. A. Nesterov, A. V. Shalunova**

*Department “Methods and Tools for Measurement and Automation”,  
Biysk Technological Institute (Branch) of Polzunov Altai State Technical University,  
Biysk, Russia; shalunov@btu.secna.ru*

**Keywords:** aerosol; spraying; ultrasound.

**Abstract:** The article presents the results of experimental research into determination of an average diameter, a root-mean-square deviation of the diameter of formed droplets and spray performance depending on properties of sprayed liquids (viscosity and superficial tension) for various modes of ultrasonic exposure (amplitude

and frequency). The obtained dependences allow defining all initial parameters necessary for design of ultrasonic oscillatory systems for spraying liquids with the different properties, defined dispersed characteristics and performance.

### References

1. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova A.V. *Ul'trazvukovoe raspylenie zhidkostei : monografiya* [Ultrasonic atomization of liquids: monograph], Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. universiteta, 2010, 250 p. (In Russ.)
2. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii : monografiya* [Ultrasound. Machines and technology: a monograph], Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. universiteta, 2015, 688 p. (In Russ.)
3. Rozenberg L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka : v 3 t. T. 3 : Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and technology of high-power ultrasound. Vol. 3 : Physical basis of ultrasound technology], Moscow: Nauka, 1970, 689 p. (In Russ.)
4. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Smerdina E.S. *Conference proceedings 7<sup>th</sup> Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials 2006, EDM.*, 01-05 June, 2006, Novosibirsk: NSTU, 2006, pp. 269-273, doi: 10.1109/SIBEDM.2006.231298
5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Slivin A.N. [Management of ultrasonic atomization of viscous liquids], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU], 2006, no. 8, pp. 12-19. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova A.V. [Identification of optimal conditions and modes of ultrasonic influence for spraying viscous liquids], *Tekhnicheskaya akustika* [Technical Acoustics], 2011, no. 11, 10 p. (In Russ.)
7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova A.V. [Technology ultrasound fine spray in the service of health], Nanotekhnologii i okhrana zdorov'ya [Nanotechnology and health], 2011, no. 1, pp. 30-33. (In Russ.)
8. Simon J.C., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A., Crum L.A., Bailey M.R. Ultrasonic Atomization of Liquids in Drop-Chain Acoustic Fountains, *J. Fluid Mech.*, 2015, vol. 766, pp. 129-146. doi: 10.1017/jfm.2015.11
9. Balik G. *Materials 14<sup>th</sup> International Water Mist Conference*, 22-23 October 2014, Istanbul, Turkey, 2014, 7 p.
10. Donnelly T.D., Hogan J., Mugler A., Schubmehl M., Schommer N., Bernoff A.J., Dasnurkar S., Ditmire T. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron-scale particles, *Review of scientific instruments*, 2005, vol. 76, issue 11, pp. 1-10, doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2130336>

---

### Forschung der Regimes der Ultraschalleinwirkung für das Zersprühen der nach den Eigenschaften verschiedenen Flüssigkeiten

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der experimentalen Forschungen nach der Bestimmung des mittleren Durchmessers, der Mittelwertabweichung des Durchmessers der gebildeten Tropfen und der Produktivität des Zersprühens von den Eigenschaften der zersprühenden Flüssigkeiten (die Zähigkeit und die

oberflächliche Spannung) bei den verschiedenen Regimes der Ultraschalleinwirkung (die Amplitude und die Frequenz) dargelegt.

---

### **Etude des modes de l'action ultra-sonique pour la pulvérisation des liquides ayant de différentes propriétés**

**Résumé:** Sont présentés les résultats des études expérimentales sur la définition du diamètre moyen, de l'écart quadratique moyen du diamètre des gouttes générées et des performances de la pulvérisation compte tenu des propriétés des liquides (viscosité et tension superficielle) lors de différents modes de l'action ultra-sonique (amplitude et fréquence).

---

**Авторы:** Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе; Шалунов Андрей Викторович – доктор технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации»; Доровских Роман Сергеевич – аспирант кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации»; Нестеров Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации»; Шалунова Анна Викторовна – кандидат технических наук, начальник отдела кадров, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Бийск, Россия.

**Рецензент:** Блазнов Алексей Николаевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, ФГБУН «Институт химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН», г. Бийск, Россия.

---