

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,  
METROLOGY  
AND INFORMATION AND  
MEASURING DEVICES  
AND SYSTEMS

УДК 621.793.79

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114

## **Исследование влияния толщины слоя жидкости на частотные характеристики колебательной системы\***

**В.Н. ХМЕЛЕВ<sup>a</sup>, А.В. ШАЛУНОВ<sup>b</sup>, Д.В. ГЕННЕ<sup>c</sup>, Р.В. БАРСУКОВ<sup>d</sup>, В.А. НЕСТЕРОВ<sup>e</sup>**

659305, РФ, г. Бийск, ул. Трофимова, 27, Бийский технологический институт  
(филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова

<sup>a</sup> [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru)   <sup>b</sup> [shalunov@bti.secna.ru](mailto:shalunov@bti.secna.ru)   <sup>c</sup> [gdv@bti.secna.ru](mailto:gdv@bti.secna.ru)

<sup>d</sup> [roman@bti.secna.ru](mailto:roman@bti.secna.ru)   <sup>e</sup> [nva@bti.secna.ru](mailto:nva@bti.secna.ru)

Ультразвуковое распыление жидкостей позволяет получать аэрозоли с высокими потребительскими характеристиками. По этой причине ультразвуковое распылительное оборудование находит применение во многих областях науки (создание новых веществ, распылительная сушка), медицины (напыление антикоагулянта в пробирки для забора крови, напыление препаратов на коронарные стенты) и техники (напыление фоторезиста при производстве полупроводников, напыление различных чувствительных и защитных покрытий).

Известно, что любое воздействие на рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы приводит к изменению ее характеристик (в частности, к изменению резонансной частоты). Контролируя изменения характеристик ультразвуковых распылительных систем, можно определить объем распыляемой жидкости (присоединенной массы) на поверхности рабочего окончания. Кроме резонансной частоты, «присоединенная масса» оказывает влияние на другие характеристики распылительной ультразвуковой колебательной системы, такие как фазочастотная характеристика, сопротивление на частоте резонанса и «антирезонанса». Всё это позволяет не только определять толщину распыляемого слоя, но и дает возможность определения свойств самой распыляемой жидкости, т. е. своеобразная идентификация жидкости. Получение и обработка подобной информации позволит в будущем автоматически производить тестирование распыляемой жидкости с последующим автоматическим выбором оптимального режима.

В связи с этим актуальным является разработка методов косвенного контроля свойств распыляемых веществ, создание алгоритмов и методик, позволяющих автоматизировать процесс контроля ультразвукового распыления. Статья посвящена разработке научных основ автоматизации процесса ультразвукового распыления за счет разработки косвенного контроля толщины (массы) слоя распыляемой жидкости на рабочей поверхности ультразвуковой колебательной системы.

---

\* Статья получена 22 декабря 2018 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00121).

**Ключевые слова:** оптимальный слой, ультразвуковое распыление, аэрозоль, капиллярные волны, изменение резонансной частоты, средняя толщина слоя распыляемой жидкости, присоединенная масса, рабочий инструмент

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое распыление находит применение в различных областях науки и отраслях производства. При распылении жидкости под действием механических колебаний переход в аэрозольное состояние происходит из-за увеличения поверхностной энергии пленки жидкости.

Ультразвуковое распыление жидкости обладает рядом преимуществ [1–3] по сравнению с традиционными способами, например:

- малая энергоемкость процесса распыления;
- относительно высокая производительность;
- возможность высокодисперсного распыления жидкости;
- получение монодисперсных аэрозолей;
- способность получать аэрозоли из высоковязких жидкостей без предварительного их разведения.

Все вышеперечисленные достоинства позволили ультразвуковому распылению занять прочную позицию в медицине, химической, радиоэлектронной и других отраслях промышленности [4].

## 1. СПОСОБЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В аэрозольное состояние под действием ультразвуковых колебаний жидкость переходит на границе раздела газовой и жидкой сред. Акустическая энергия может быть подведена к зоне распыления как со стороны жидкости, так и со стороны газа. Известны несколько способов подвода акустической энергии к распыляемой жидкости.

1. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через газ.

2. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость также реализуется двумя способами:

а) распыление жидкости в фонтане (высокочастотное ультразвуковое распыление) [5, 6];

б) распыление жидкости в слое (низкочастотное УЗ распыление).

В работе рассматривается только акустическое распыление в слое с подводом энергии через жидкость.

Процесс образования аэрозоля схематично представлен на рис. 1. Волны образуются на поверхности слоя жидкости, покрывающей колеблющуюся поверхность [7]. С увеличением амплитуды колебаний поверхности амплитуда волн увеличивается, достигая предельной величины, при которой происходит отделение от них капель жидкости. Экспериментально установлено, что для образования капиллярных волн толщина пленки жидкости должна находиться в определенных пределах, зависящих от частоты колебаний и свойств распыляемой жидкости. В общем случае толщина слоя жидкости, покрывающего колеблющуюся поверхность, является конечной величиной

и не может выходить за рамки интервала, при котором распыление прекращается [7]:

$$0 < h < (\lambda/2). \quad (1)$$

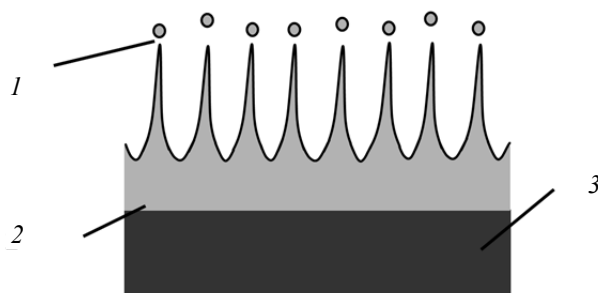


Рис. 1. Механизм образования аэрозоля под действием УЗ колебаний:

1 – капли аэрозоля; 2 – слой жидкости и капиллярные волны; 3 – поверхность преобразователя

Fig. 1. The mechanism of aerosol formation under the action of ultrasonic vibrations:

1 is aerosol droplets, 2 is a liquid layer and capillary waves, 3 is a transducer surface

При реализации ультразвукового распыления в слое жидкости возникают стоячие капиллярные волны. Внутри интервала (1) существует экстремальная зависимость производительности распыления от толщины слоя [8–10]. Например, распыление воды акустическими колебаниями с частотой 20 кГц происходит только в том случае, если толщина слоя распыляемой жидкости составляет от 0,4 до 3,2 мм, причем максимум производительности соответствует толщине  $h \approx 0,8$  мм.

Из вышесказанного следует сделать вывод о том, что толщина слоя жидкости на колеблющейся поверхности является одним из ключевых факторов, влияющих на производительность процесса распыления.

Соответственно, актуальной задачей является контроль толщины слоя жидкости в процессе распыления для управления процессом и поддержания оптимального значения.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Поскольку непосредственный инструментальный контроль толщины слоя в процессе распыления невозможен, возникает необходимость поиска такого метода контроля толщины слоя.

Слой жидкости на колеблющейся поверхности с акустической точки зрения является дополнительной (присоединенной) массой [11] и влияет на свойства всей колебательной системы в целом. Как показано в работах [12, 13], колебательная система в процессе воздействия может выступать в роли датчика. Существуют методы [14, 15], позволяющие оценивать это влияние. Согласно теории электромеханических аналогий, пьезопреобразователь вблизи

своей резонансной частоты можно представить в виде эквивалентной схемы на рис. 2 [16–18].

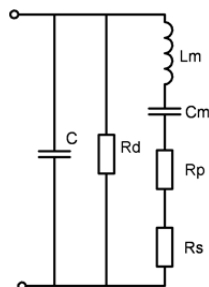


Рис. 2. Электрическая эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя:

$Lm$  – эквивалентна колеблющейся массе системы,  $Cm$  – гибкость,  $Rp$  – сопротивление механических потерь,  $Rs$  – сопротивление излучения колебательной системы,  $C$  – электрическая (статическая) емкость преобразователя,  $Rd$  – диэлектрические потери в пьезоматериале

Fig. 2. An equivalent electric circuit of a piezoelectric transducer:

$Lm$  is an equivalent to the oscillating mass of the system,  $Cm$  is flexibility,  $Rp$  is the resistance of mechanical losses,  $Rs$  is the resistance of the radiation of the oscillatory system,  $C$  is the electric (static) capacitance of the converter,  $Rd$  is a dielectric loss in the piezoelectric material

Из эквивалентной схемы следует, что резонансная частота преобразователя определяется последовательным колебательным контуром  $Lm Cm$ . Как было сказано выше, слой жидкости на поверхности преобразователя является присоединенной массой и, следовательно, влияет на элемент  $Lm$ . Из этого следует, что наличие слоя жидкости будет влиять на резонансную частоту УЗКС.

В состав эквивалентной схемы входит статическая емкость преобразователя, определяемая конструкцией и материалом пьезопреобразователя. Эта емкость также влияет на резонансную частоту УЗКС.

### 3. СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований была использована полуволновая [19, 20] пьезоэлектрическая колебательная система, эскиз и основные резонансные размеры которой приведены на рис. 3.

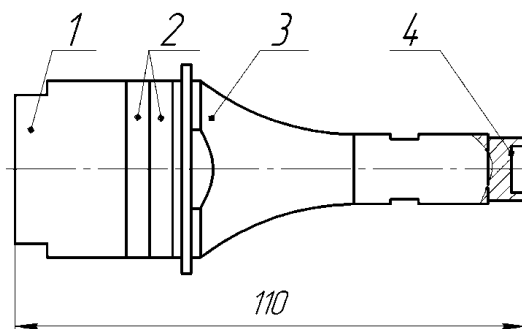


Рис. 3. Эскиз ультразвуковой колебательной системы:

1 – отражающая накладка, 2 – пьезоэлемент, 3 – концентрирующее звено, 4 – рабочий инструмент

Fig. 3. A drawing of an ultrasonic oscillatory system:

1 is a reflecting plate, 2 is a piezoelectric element, 3 is a concentrating element, 4 is a working tool

Резонансная частота колебательной системы равна 22 кГц. Рабочий торец концентрирующего звена 3 колебательной системы снабжен сменными рабочими инструментами 4, присоединяемыми при помощи резьбового соединения. На излучающем торце рабочего инструмента выполнено цилиндрическое углубление, на дне которого формировался слой жидкости, толщину и массу которого предстояло измерять. Эскизы использованных рабочих инструментов с основными размерами приведены на рис. 4. Размеры цилиндрического углубления инструментов представлены в табл. 1.

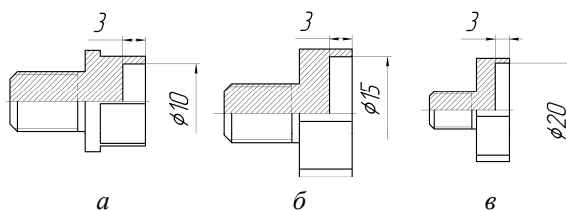


Рис. 4. Чертежи рабочих инструментов:

*a* – инструмент 1, *б* – инструмент 2, *в* – инструмент 3

Fig. 4. Drawings of working tools:

*a* is tool 1, *b* is tool 2, *c* is tool 3

Таблица 1

Table 1

#### Размеры рабочих инструментов

##### Dimensions of working tools

Номер инструмента	Диаметр внутренней полости, мм	Максимальный объем внутренней полости, см <sup>3</sup>
1	10	0,3
2	15	0,45
3	20	0,6

В качестве модельных жидкостей при проведении экспериментов использовали спирт, вода и глицерин, основные физические свойства которых приведены в табл. 2. Выбор жидкостей обусловлен необходимостью исследования максимально широкого диапазона жидкостей по вязкости.

Таблица 2

Table 2

#### Свойства модельных жидкостей

##### Properties of model fluids

№	Название	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Вязкость при 20 °С
1	Спирт	0,7893	1,2
2	Вода	1	1
3	Глицерин	1,261	1412

Для получения частотных характеристик УЗКС в экспериментах использовался измерительный прибор, описанный в работе [21]. Работа измерителя заключается в подаче на исследуемую колебательную систему переменного напряжения в заданном диапазоне частот, и по потребляемому току и напряжению питания УЗКС рассчитываются и строятся частотные характеристики исследуемой колебательной системы. Используемое при проведении экспериментальных исследований оборудование позволяло получать следующие характеристики колебательных систем: амплитудно-частотная характеристика потребляемого тока, фазочастотная характеристика, а также зависимости активного, реактивного и полного импеданса преобразователя колебательной системы от частоты.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований включал в себя следующие этапы.

1. Измерение частотных характеристик УЗКС с пустым (сухим) рабочим окончанием.
2. Добавление (в углубление на рабочем инструменте) жидкостей в объеме (0,05 мл или 0,1 мл в зависимости от рабочего инструмента).
3. Измерение частотных характеристик УЗКС.
4. Добавление порции модельных жидкостей в углубления рабочих инструментов.
5. Действия по пунктам 2–4 повторяются до заполнения цилиндрического углубления рабочего инструмента модельной жидкостью.

Для реализации представленной последовательности действий был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 5.

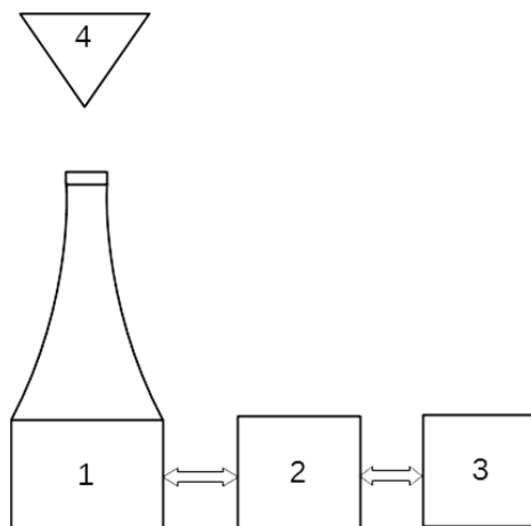


Рис. 5. Структурная схема измерительного стенда:

1 – УЗКС, 2 – измерительный модуль, 3 – ПК,  
4 – дозатор

Fig. 5. Block diagram of the measuring stand:

1 is an ultrasonic vibrating system, 2 is a measuring module,  
3 is a PC, 4 is a dispenser

Стенд, показанный на рис. 5, состоит из УЗКС, укомплектованной набором рабочих инструментов (табл. 1), измерительного прибора для снятия частотных характеристик и дозатора.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведенных экспериментов по описанному выше алгоритму были получены частотные характеристики УЗКС в зависимости от толщины слоя (объема) для модельных жидкостей.

На рис. 6–8 представлены результаты эксперимента для инструмента 1.

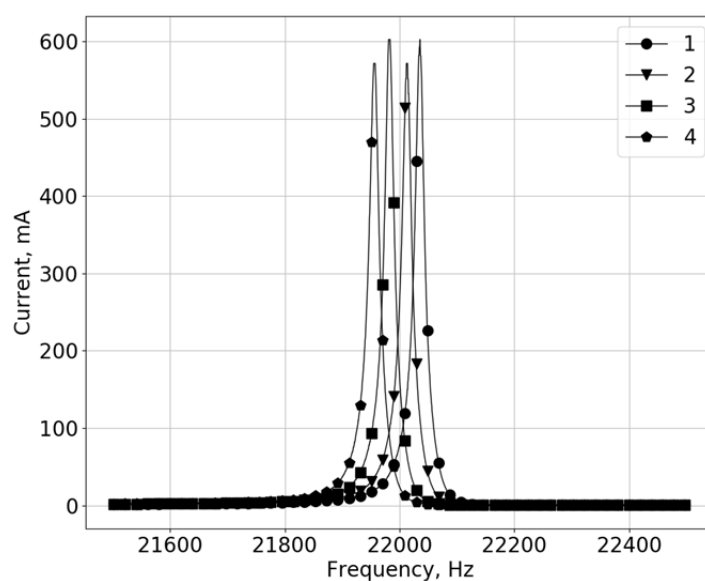


Рис. 6. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл воды, 3 – объем 0,1 мл воды,  
4 – объем 0,15 мл воды

Fig. 6. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of water, 3 is 0.1 ml of water,  
4 is 0.15 ml of water

На рис. 6–8 представлена зависимость частотных характеристик УЗКС с инструментом 1 от объема модельных жидкостей. Из анализа зависимостей, представленных на рис. 4–7, можно сделать заключение о существенном влиянии изменения объема модельной жидкости на положение резонанса УЗКС. Прослеживается зависимость между изменением частоты на единицу объема и плотностью модельной жидкости, что подтверждает теоретическое заключение о влиянии присоединенной массы на положение резонанса колебательной системы.

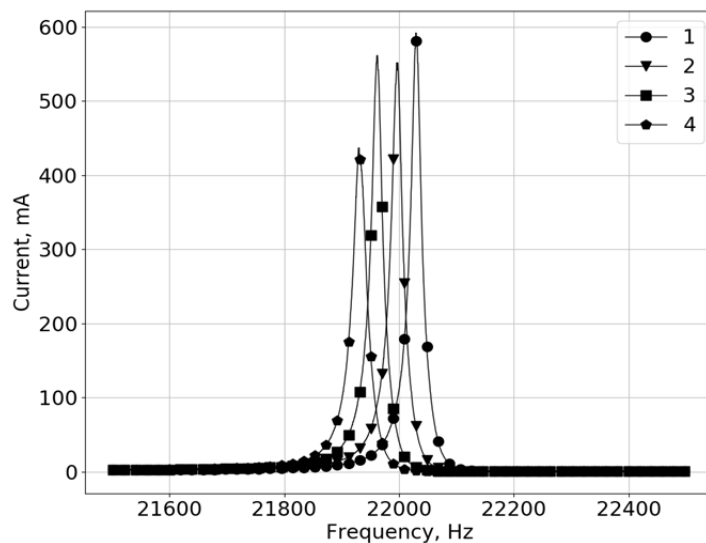


Рис. 7. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл глицерина, 3 – объем 0,1 мл глицерина, 4 – объем 0,15 мл глицерина

Fig. 7. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of glycerin, 3 is 0.1 ml of glycerin, 4 is 0.15 ml of glycerin

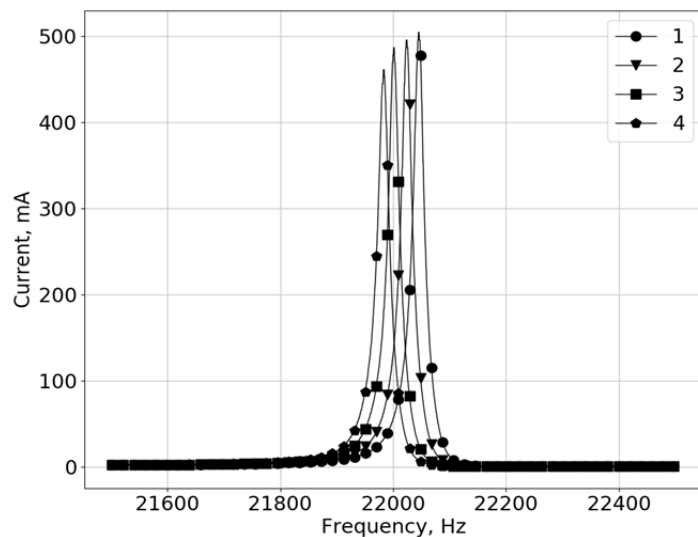


Рис. 8. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл спирта, 3 – объем 0,1 мл спирта, 4 – объем 0,15 мл спирта

Fig. 8. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of alcohol, 3 is 0.1 ml of alcohol, 4 is 0.15 ml of alcohol



На рис. 9–11 представлены результаты экспериментов для инструмента 2 на разных модельных жидкостях.

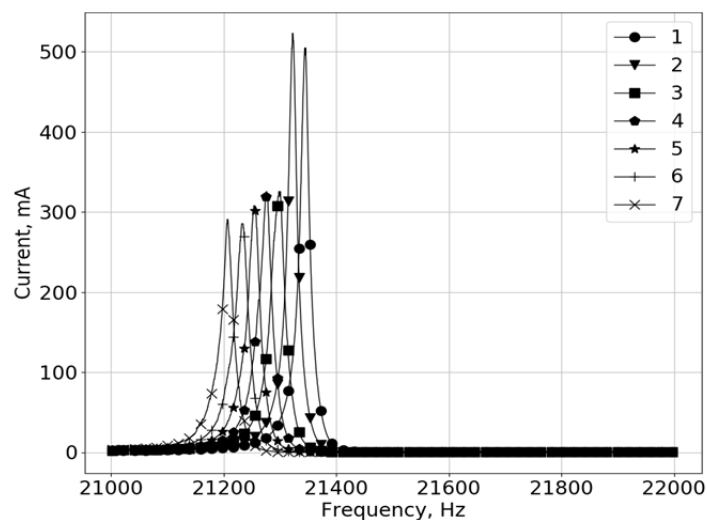


Рис. 9. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл воды, 3 – объем 0,1 мл воды, 4 – объем 0,15 мл воды, 5 – объем 0,2 мл воды, 6 – объем 0,25 мл воды, 7 – объем 0,3 мл воды

Fig. 9. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of water, 3 is 0.1 ml of water, 4 is 0.15 ml of water, 5 is 0.2 ml of water, 6 is 0.25 ml of water, 7 is 0.3 ml of water

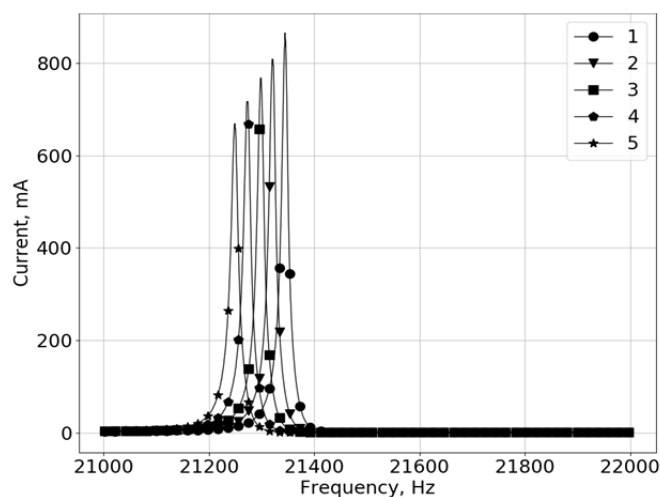


Рис. 10. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл глицерина, 3 – объем 0,1 мл глицерина, 4 – объем 0,15 мл глицерина, 5 – объем 0,2 мл глицерина

Fig. 10. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of glycerin, 3 is 0.1 ml of glycerin, 4 is 0.15 ml of glycerin, 5 is 0.2 ml of glycerin

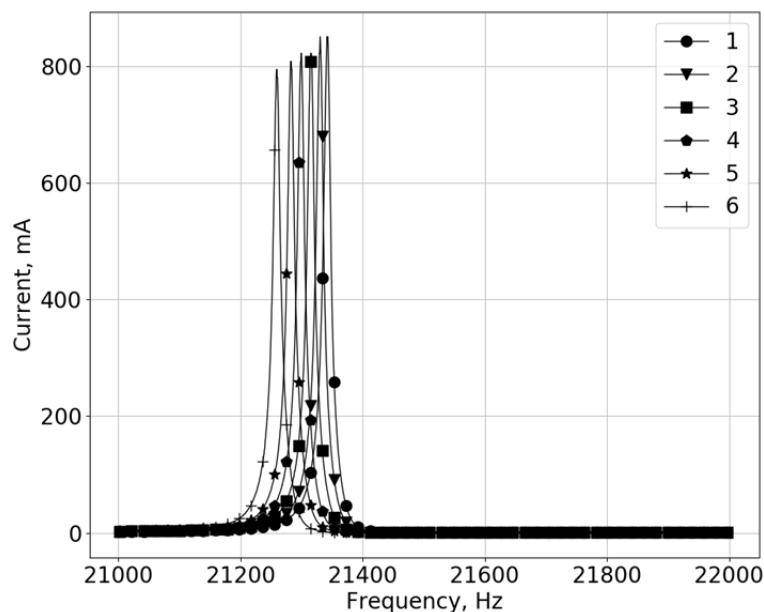


Рис. 11. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл спирта, 3 – объем 0,1 мл спирта, 4 – объем 0,15 мл спирта, 5 – объем 0,2 мл спирта, 6 – объем 0,25 мл спирта

Fig. 11. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of alcohol, 3 is 0.1 ml of alcohol, 4 is 0.15 ml of alcohol, 5 is 0.2 ml of alcohol, 6 is 0.25 ml of alcohol

Зависимости, представленные на рис. 9–11, подтверждают справедливость заключения о влиянии присоединенной массы на резонансную частоту УЗКС вне зависимости от размеров рабочего инструмента. Следовательно, изменение резонансной частоты может быть использовано для оценки массы жидкости на рабочей поверхности распылительного инструмента.

## 5. ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ УЗКС ОТ ОБЪЕМА РАСПЫЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

Как было показано на эквивалентной схеме замещения рис. 2, у преобразователя присутствует статическая емкость, образованная обкладками пьезоэлементов и пьезоматериалом. Ввиду низкой температурной стабильности диэлектрических свойств пьезоматериала имеется значительная зависимость статической емкости от температуры пьезопреобразователя, что, в свою очередь, влияет на положение резонанса УЗКС в целом.

Для исключения влияния температуры УЗКС было принято решение использовать изменение резонансной частоты относительно частоты сухой (без жидкости) УЗКС, полученное непосредственно перед проведением экспериментов. На рис. 12–14 представлены зависимости изменения резонансной частоты от массы модельной жидкости.

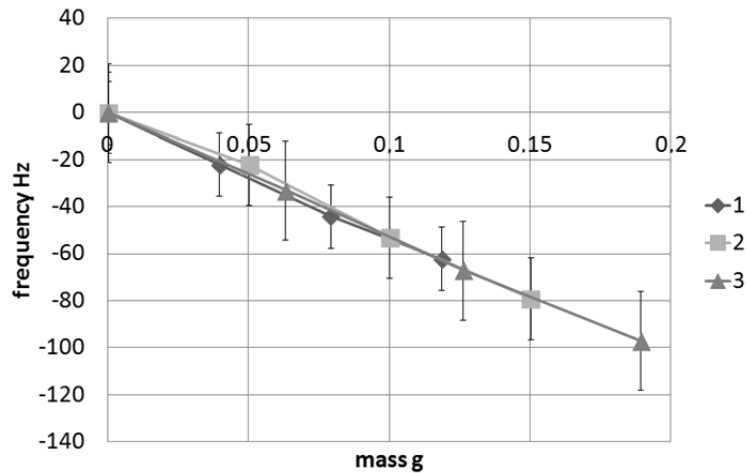


Рис. 12. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 12. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

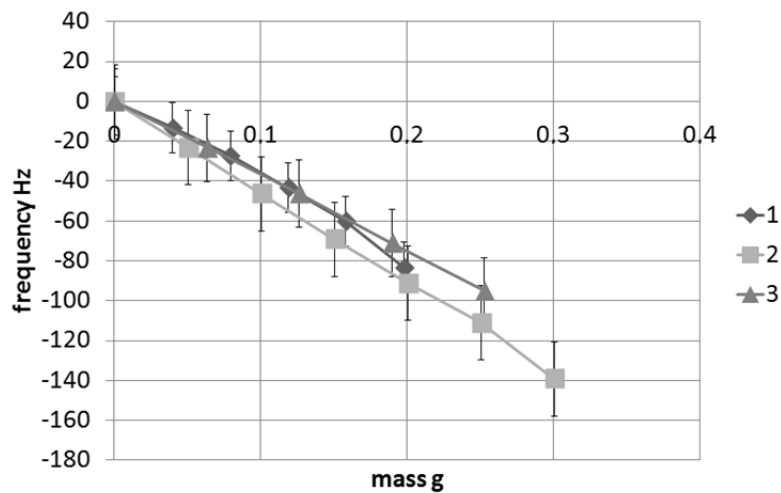


Рис. 13. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 2 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 13. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 2 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

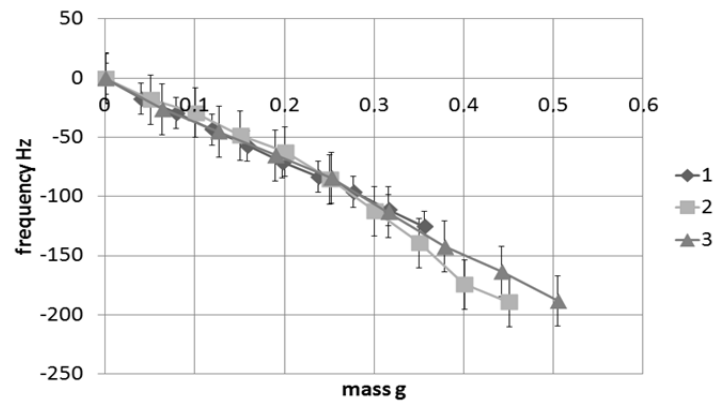


Рис. 14. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 3 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 14. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 3 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Проведенные эксперименты подтвердили наличие зависимости изменения резонансной частоты от массы распыляемого материала.

Из зависимостей на рис. 12–14 следует, что изменение частоты мало зависит от свойств самой жидкости. Также полученные зависимости свидетельствуют о близкой к линейной зависимости резонансной частоты от массы жидкости.

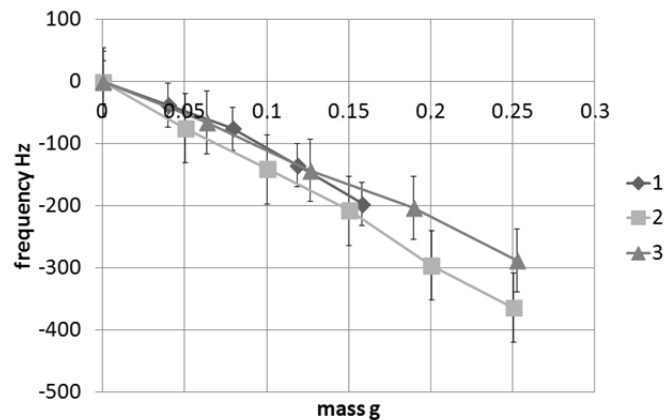


Рис. 15. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от массы модельной жидкости при работе на удвоенной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 15. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 based on the mass of the model fluid when operating at a double resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Исходя из анализа электрической эквивалентной схемы рис. 2 можно сделать заключение, что при работе УЗКС на второй моде (удвоенной частоте) влияние присоединенной массы должно увеличиться. Для проверки этих предположений были проведены исследования на удвоенной частоте УЗКС. На рис. 15 и 16 представлены зависимости при работе УЗКС на частоте 44 кГц.

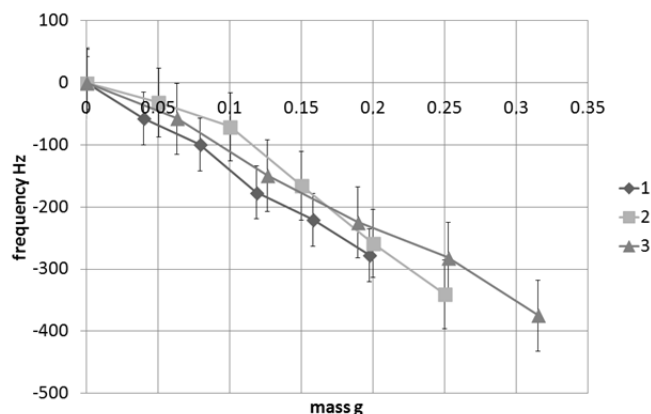


Рис. 16. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 2 от массы модельной жидкости при работе на удвоенной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 16. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 2 based on the mass of the model fluid when operating at a doubled resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Как можно видеть из сравнения изменений в частотных диапазонах 22 и 44 кГц, во втором случае зависимость изменения частоты от массы жидкости усилилась. Это может позволить повысить точность измерения, переводя УЗКС в режим работы на удвоенной частоте. К сожалению, запуск на удвоенной частоте не всегда возможен, при этом падает эффективность УЗКС. В представленном эксперименте не удалось получить устойчивую работу УЗКС на удвоенной частоте с самым тяжелым инструментом (диаметром 20 мм), это может быть связано с недостаточной мощностью генератора измерительного модуля.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследований были получены зависимости изменения частоты УЗКС от массы жидкости (рис. 12–16), вместе с тем практическую значимость для систем распыления представляет именно толщина слоя жидкости на поверхности распылительного инструмента.

На рис. 17 представлены графики зависимости изменения резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от объема жидкости на поверхности инструмента.

Из графиков рис. 18 следует, что зависимость изменения частоты от объема для разных жидкостей сильно отличается. Вместе с тем эти зависимости остаются близкими к линейным. Всё это косвенно подтверждает отсутствие зависимости от свойств жидкости.

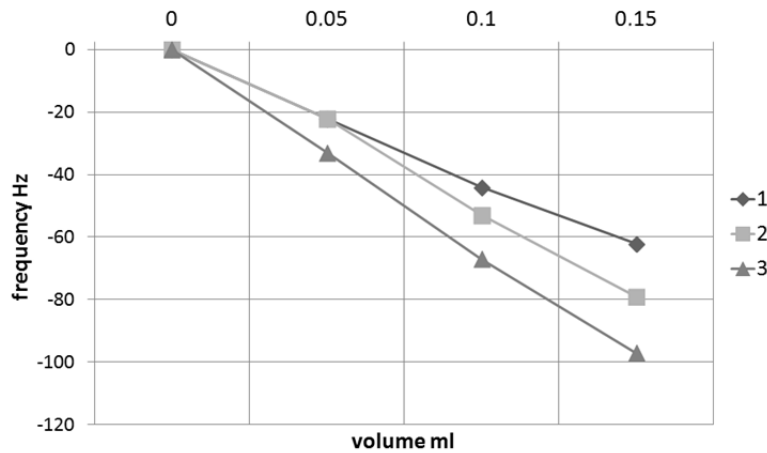


Рис. 17. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от объема модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 17. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 on the volume of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

В таком случае можно ввести коэффициент пропорциональности между зависимостями частоты от массы и объема, основанный на плотности распыляемой жидкости. Этот способ мало пригоден для практического применения, так как при этом придется вносить данные о жидкости.

Однако если на начальном этапе процесса на распылительную поверхность подать известный тестовый объем жидкости, то этот процесс может быть автоматизирован. В этом случае объем жидкости на поверхности распылительного инструмента можно вычислить по формуле

$$V_m = (\Delta F \cdot V_{tst}) / (\Delta F_{tst}), \quad (2)$$

где  $V_m$  – объем распыляемой жидкости;  $\Delta F$  – изменение резонансной частоты;  $V_{tst}$  – тестовый объем жидкости;  $\Delta F_{tst}$  – изменение резонансной частоты при от тестового объема жидкости.

Принцип реализации процесса измерения в этом случае заключается в предварительном проведении измерения на образце распыляемой жидкости заранее известного объема. Получая объем жидкости, находящийся на поверхности рабочего инструмента, и зная диаметр рабочего инструмента (площадь поверхности), можно найти среднюю толщину слоя распыляемой жидкости с использованием выражения

$$h = V_m / S, \quad (3)$$

где  $h$  – средняя толщина слоя распыляемой жидкости;  $V_m$  – объем жидкости полученный в результате измерения;  $S$  – площадь распылительного инструмента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате экспериментальных исследований зависимости подтвердили возможность косвенного контроля толщины (массы) распыляемого материала на колеблющейся поверхности УЗКС. Основным контролируемым параметром является изменение резонансной частоты УЗКС при формировании на ее рабочей поверхности распыляемого материала. Контроль резонансной частоты УЗКС на удвоенной частоте позволяет повысить точность получаемых результатов. Применение несложных математических вычислений (пригодных для реализации на микроконтроллерах) позволит рассчитывать среднюю толщину слоя распыляемой жидкости и обеспечивать установку необходимой толщины слоя.

Вместе с тем представляют интерес дальнейшие исследования при работе УЗКС на повышенной мощности. Это должно повысить стабильность работы рабочих инструментов с увеличенной площадью распылительной поверхности на повышенных частотах и получить более детальные зависимости частотных характеристик с применением различных модельных жидкостей (масла, смолы и т. п.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramisetty K.A., Pandit A.B., Gogate P.R. Investigations into ultrasound induced atomization // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – Vol. 20. – P. 254–264.
2. Berger H.L. Ultrasonic liquid atomization. – Hyde Park, NY: Partridge Hill Publishers, 1998.
3. Экнадиосянц О.К. Получение аэрозолей // *Физические основы ультразвуковой технологии* / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337–395.
4. Spray coating for MEMS, NEMS and micro systems / B. Wieder, C. Brubaker, T. Glinser, P. Kettner, N. Nodes // *Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies*. – Xiamen, China, 2002. – P. 135–138.
5. High-frequency ultrasonic atomization with pulsed excitation / A. Lozano, H. Amadeva, F. Barreras, X. Jordà, M. Lozano // *Journal of Fluids Engineering*. – 2003. – Vol. 125. – P. 941–945.
6. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron scale particles / T.D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, M. Schubmehl, N. Schommer, A.J. Bernoff, S. Dasnurkar, T. Ditmire // *Review of Scientific Instruments*. – 2005. – Vol. 76. – P. 113301-1–113301-10.
7. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (процессы и аппараты химической и нефтехимической техники). – М.: Химия, 1983. – 192 с.
8. Shalunov A.V. Khmelev V.N. Smerdina E.S. The cavitation spraying of the viscous liquids // *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2006. – P. 269–273.
9. An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization / T.D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, N. Schubmehl, M. Schommer, A.J. Bernoff, B. Forrest // *Physics of Fluids*. – 2004. – Vol. 16 (8). – P. 2843–2851.
10. Sindayihebura D., Dobre M., Bolle L. Experimental study of thin liquid film ultrasonic atomization. High speed photography of ultrasonic atomization / B. Howard. – Brown university, 2010. – 39 p.
11. Макаров Л.О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. – М.: Машиностроение, 1983. – 56 с.
12. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. – М.: Машгиз, 1959. – 331 с.
13. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976. – 318 с.
14. The system of checking and operating power of ultrasonic technological apparatus / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, A.N. Slivin, S.N. Tchyganok // *Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2001. – P. 54, 55.
15. Adjusting and Calibration Electronic Ultrasonic Generators / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tchyganok, V.N. Steer, A.N. Lebedev // *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2003. – P. 202–204.

16. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
17. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
18. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
19. Theoretical and experimental study of transducers aimed at low-frequency ultrasonic atomization of liquids / D. Sindayihebura, L. Bolle, A. Cornet, L. Joannes // Journal of the Acoustical Society of America. – 1998. – Vol. 103. – P. 1442–1448.
20. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
21. Measuring instrument of impedance characteristics of the ultrasonic vibrating systems / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, E.V. Ilchenko // 19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: workshop proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 347–349.

*Хмелев Владимир Николаевич*, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые технологии и оборудование. Имеет более 800 публикаций. E-mail: vnh@bti.secna.ru

*Шалунов Андрей Викторович*, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – процессы ультразвуковой коагуляции, ультразвуковое оборудование. Имеет более 350 публикаций. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

*Генне Дмитрий Владимирович*, инженер кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковое распыление, ультразвуковые генераторы. Имеет более 140 публикаций. E-mail: gdv@bti.secna.ru

*Барсуков Роман Владиславович*, кандидат технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые электронные генераторы, ультразвуковое оборудование. Имеет более 290 публикаций. E-mail: roman@bti.secna.ru

*Нестеров Виктор Александрович*, кандидат технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые технологии, разработка ультразвуковых колебательных систем. Имеет более 180 публикаций. E-mail: nva@bti.secna.ru

*Khmelev Vladimir Nikolawvich*, D.Sc. (Eng.), professor, deputy director for research in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic technologies and equipment. He is the author of over 800 publications. E-mail: vnh@bti.secna.ru

*Shalunov Andrei Victorovich*, D.Sc. (Eng.), associate professor, head of the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on the processes on ultrasonic coagulation and ultrasonic equipment. He has published more than 350 research papers. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

*Genne Dmitry Vladimirovich*, an engineer at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic spraying and ultrasonic generators. He has published over 140 research papers. E-mail: gdv@bti.secna.ru

*Barsukov Roman Vladislalovich*, PhD (Eng.), an associate professor at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic electronic generators and ultrasonic equipment. He is the author of more than 290 publications. E-mail: roman@bti.secna.ru



Nesterov Victor Alexandrovich, PhD (Eng.), an associate professor at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov. His research interests are focused on ultrasonic technologies and development of ultrasonic oscillating systems. He is the author of over 180 publications. E-mail: nva@bti.secna.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114

### ***Investigation of the thickness effect of a sprayed liquid layer on the frequency characteristics of an oscillatory system***\*

V.N. KHMELEV<sup>a</sup>, A.V. SHALUNOV<sup>b</sup>, D.V. GENNE<sup>c</sup>,  
R.V. BARSUKOV<sup>d</sup>, V.A. NESTEROV<sup>e</sup>

Technological Institute (branch) of Altai Technical University after I.I. Polzunov, 27 Trofimova Street, Biysk, 659305, Russian Federation

<sup>a</sup> vnh@bti.secna.ru    <sup>b</sup> shalunov@bti.secna.ru    <sup>c</sup> gdv@bti.secna.ru  
<sup>d</sup> roman@bti.secna.ru    <sup>e</sup> nva@bti.secna.ru

#### **Abstract**

Ultrasonic spraying of liquids allows obtaining aerosols with high consumer characteristics. For this reason, ultrasonic spray equipment is used in many fields. In science it is used for creating new substances, spray drying, etc. In medicine it is used for spraying an anticoagulant into blood collection tubes, and spraying drugs onto coronary stents. In technology it is used for spraying photore-sists in the manufacture of semiconductors and spraying various sensitive and protective coatings).

It is known that any impact on the working tool of an ultrasonic oscillatory system leads to a change in its characteristics, for example, to a change in the resonant frequency. By monitoring changes in the characteristics of ultrasonic spray systems, it is possible to determine the volume of the sprayed liquid (attached mass) on the surface of the working end. Also, the “added mass” influences other characteristics of the spray ultrasonic oscillatory system, for example the phase-frequency characteristic, resistance at the resonance frequency and “antiresonance”. This allows not only determining the thickness of the sprayed layer. It makes it possible to determine the properties of the sprayed liquid itself. Obtaining and processing this information will allow us in the future to automatically test sprayed liquids with a subsequent automatic selection of the optimal mode.

In this regard, it is urgent to develop methods for indirect control of the properties of sprayed substances, the creation of algorithms and techniques to automate the process of monitoring ultrasonic atomization. The article deals with the development of a scientific basis for the automation of the ultrasonic atomization process by developing indirect control of the thickness (mass) of the layer of atomized liquid on the working surface of the ultrasonic oscillatory system.

**Keywords:** optimal layer, ultrasonic atomization, aerosol, capillary waves, change in resonant frequency, average thickness of the sprayed liquid layer, added mass, working tool

#### **REFERENCES**

1. Ramisetty K.A., Pandit A.B., Gogate P.R. Investigations into ultrasound induced atomization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, vol. 20, pp. 254–264.
2. Berger H.L. *Ultrasonic liquid atomization*. Hyde Park, NY, Partridge Hill Publishers, 1998.
3. Eknadiosyants O.K. Poluchenie aerolei [Obtaining aerosols]. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physical bases of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 337–395.
4. Wiedner B., Brubaker C., Glinser T., Kettner P., Nodes N. Spray coating for MEMS, NEMS and micro systems. *Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies*, Xiamen, China, 2002, pp. 135–138.
5. Lozano A., Amadeva H., Barreras F., Jordà X., Lozano M. High-frequency ultrasonic atomization with pulsed excitation. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, vol. 125, pp. 941–945.

---

\* Received 22 December 2018.

The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00121).

6. 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, pp. 113301-1–113301-10.
7. Novitskii B.G. *Primenenie akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tehnologicheskikh protsessakh (protsessy i apparaty khimicheskoi i neftekhimicheskoi tekhniki)* [The use of acoustic oscillations in chemical-technological processes (Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology)]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 192 p.
8. Shalunov A.V., Khmelev V.N., Smerdina E.S. The cavitation spraying of the viscous liquids. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2006, pp. 269–273.
9. Donnelly T.D., Hogan J., Mugler A., Schubmehl M., Schommer N., Bernoff A.J., Forrest B. An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization. *Physics of Fluids*, 2004, vol. 16 (8), pp. 2843–2851.
10. Sindayhebura D., Dobre M., Bolle L. *Experimental study of thin liquid film ultrasonic atomization*. Howard B. *High speed photography of ultrasonic atomization*. Brown university, 2010. 39 p.
11. Makarov L.O. *Akusticheskie izmereniya v protsessakh ul'trazvukovoi tekhnologii* [Acoustic measurements in the processes of ultrasonic technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 56 p.
12. Teumin I.I. *Ul'trazvukovye kolebatel'nye sistemy* [Ultrasonic oscillatory systems]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 331 p.
13. Gershgal D.A., Fridman V.M. *Ul'trazvukovaya tekhnologicheskaya apparatura* [Ultrasonic the technological equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 318 p.
14. Shalunov A.V., Khmelev V.N., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tchyganok S.N. The system of checking and operating power of ultrasonic technological apparatus. *Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2001, pp. 54, 55.
15. Shalunov A.V., Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Steer V.N., Lebedev A.N. Adjusting and calibration electronic ultrasonic generators. *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2003, pp. 202–204.
16. Donskoi A.V., Keller O.K., Kratysh G.S. *Ul'trazvukovye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Ultrasonic electrotechnological utility]. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 208 p.
17. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepei* [Theory of radio engineering circuits]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 816 p.
18. Kolesnikov A.E. *Ul'trazvukovye izmereniya* [Ultrasonic measurements]. 2nd ed. Moscow, Standards Publishing House, 1982. 248 p.
19. Sindayhebura D., Bolle L., Cornet A., Joannes L. Theoretical and experimental study of transducers aimed at low-frequency ultrasonic atomization of liquids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, vol. 103, pp. 1442–1448.
20. Baldev R., Rajendran V., Palanichamy P. *Science and technology of ultrasonics*. New Delhi, Narosa Publishing House, 2003 (Russ. ed.: Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primeneniya ul'trazvuka*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 576 p.).
21. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Ilchenko E.V. Measuring instrument of impedance characteristics of the ultrasonic vibrating systems. *19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 347–349.

Для цитирования:

Исследование влияния толщины слоя жидкости на частотные характеристики колебательной системы / В.Н. Хмелев, А.В. Шалун, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, В.А. Нестеров // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 97–114. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114.

For citation:

Khmelev V.N., Shalunov A.V., Genne D.V., Barsukov R.V., Nesterov V.A. Issledovanie vliyaniya tolshchiny sloya zhidkosti na chastotnye kharakteristiki kolebatel'noi sistemy [Investigation of the thickness effect of a sprayed liquid layer on the frequency characteristics of an oscillatory system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 97–114. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114.