

УДК 621.647.23

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.111878>

Повышение производительности ультразвуковых распылителей жидкости

А.Ф. Луговской • В.П. Фесич • А.И. Зилинский • А.Д. Лавриненков

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 14 August 2017 / Accepted: 22 September 2017

***Анотация.** Рассмотрены вопросы создания ультразвуковых резонансных систем для реализации способа ультразвукового распыления жидкости в тонком слое. Детально рассмотрена физическая модель такого способа распыления и показаны возможности увеличения производительности подобных распылителей при сохранении высокого качества получаемого аэрозоля. Предложена методика расчета геометрических размеров акустической резонансной системы ультразвукового распылителя с трубчатым вибратором. Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования ультразвукового распылителя, подтверждающие достаточную для инженерных расчетов точность предложенной методики. Показан путь дальнейшего возможного повышения производительности ультразвукового распылителя с трубчатым вибратором, возбуждаемым на основной радиальной моде колебаний.*

***Ключевые слова:** ультразвуковая резонансная система, ультразвуковое распыление в тонком слое, методика расчета колебательных систем, мелкодисперсный аэрозоль, трубчатый вибратор, пьезоэлектрический привод продольных перемещений.*

Жидкостный мелкодисперсный аэрозоль широко используется во многих технологических процессах в машиностроении, медицине и в сельском хозяйстве. При этом необходимая производительность получения мелкодисперсного аэрозоля колеблется от 10 мл/мин до 3000 мл/мин и более. Известно много способов распыления жидкостей [1-3], среди которых важными преимуществами по качеству получаемого аэрозоля и возможности управления процессом распыления в составе мехатронных систем автоматизации отличается способ ультразвукового распыления жидкостей в тонком слое [4-18]. При ультразвуковом распылении в тонком слое реализуется, так называемый, кавитационно-волновой механизм распыления жидкости [3-6], при котором жидкость подается в виде тонкого слоя на нормально вибрирующую поверхность ультразвукового излучателя. При этом на поверхности слоя жидкости возникают стоячие капиллярные волны, частота которых в два раза ниже частоты резонансных колебаний излучателя. Амплитуда капиллярных волн возрастает по мере увеличения амплитуды колебаний излучающей поверхности. Когда амплитуда капиллярных волн достигает величины, при которой нарушается ее устойчивость вследствие преобладания инерционных сил над силами поверхностного натяжения, с гребней капиллярных волн срываются близкие к монодисперсным капли аэрозоля [19]. Это, так называемая волновая часть механизма ультразвукового распыления. Однако одновременно с волновым механизмом процесса распыления присутствует и кавитационный механизм, вызванный тем, что при повышении интенсивности ультразвуковых колебаний излучающей поверхности, в слое жидкости образуется кавитационная прослойка, которая, будучи двухфазной, поглощает и рассеивает ультразвук, снижая КПД процесса распыления. По краям слоя жидкости, смачивающего вибрирующую поверхность, кавитационные пузырьки выходят к поверхности слоя жидкости, схлопываются, создавая взрывное распыление за счет расходящихся ударных волн. Кавитационный механизм распыления приводит к частичному нарушению монодисперсности получаемого аэрозоля. Нарушению монодисперсности способствуют и коагуляционные процессы в отлетающем аэрозоле.

Следует отметить, что присутствие кавитационных процессов в тонком слое жидкости обеспечивает рассматриваемому способу распыления еще и возможность инактивации вредных как для здоровья человека, так и для технологических процессов, микроорганизмов [20].

Исходя из описанного механизма распыления в тонком слое, производительность такого ультразвукового распылителя определяется, прежде всего, площадью излучающей поверхности, которая

определяет количество стоячих капиллярных волн, производящих аэрозоль [21]. Однако, для возможности создания нормальных поршневых колебаний излучающей поверхности ее размер, определяющий площадь поверхности распыления, должен быть существенно меньше половины длины волны резонансных колебаний излучателя. Это условие и ограничивает возможную производительность ультразвуковых распылителей, реализующих способ ультразвукового распыления в тонком слое.

Целью предлагаемой работы является создание ультразвукового распылителя для мехатронных систем автоматики, обладающего возможностью регулирования производительности в широких пределах при сохранении высокого уровня монодисперсности аэрозоля.

Задачу увеличения площади поверхности распыления, колеблющейся с ультразвуковой частотой и одинаковой амплитудой, предлагается решить за счет применения трубчатой конструкции излучателя, возбуждаемой на первой моде радиальных резонансных колебаний. При этом все точки цилиндрической поверхности трубчатого излучателя будут совершать только радиальные колебания с одинаковой амплитудой, чем и будет обеспечено равномерное распыление со всей большой вибрирующей поверхности при смачивании ее тонким слоем жидкости. Для возбуждения подобных колебаний трубчатого вибратора предлагается использовать составной пьезоэлектрический привод продольных перемещений с ультразвуковым трансформатором скорости. Свести к минимуму искажающее влияние места крепления пьезоэлектрического привода к наружной образующей поверхности трубчатого вибратора предлагается за счет выполнения выходного торца трансформатора скорости в виде ножевидного профиля.

Определение геометрических размеров предложенной акустической системы распылителя может быть выполнено по методике, предложенной в работах [4, 22, 23].

Для кольцевой трубчатой формы поверхности распыления, продольный размер которой существенно меньше половины длины волны радиально-изгибных колебаний по высоте трубчатой поверхности распыления, собственная частота радиально-изгибных колебаний в радиальном направлении определяется зависимостью [23].

$$f_k = \frac{1}{2r_{cp}^2 \pi} c_k \frac{h_k}{\sqrt{12}} K_\lambda ,$$

где h_k - толщина кольца; r_{cp} - средний радиус кольца; $K_\lambda = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}}$; i - число волн, разместившихся по окружности кольца.

i	2	3	4	5	6	7	8
K_λ	2,683	7,589	14,553	23,534	34,522	47,518	62,516

При $i = 0$ и $i = 1$ радиально-изгибные колебания в кольце отсутствуют и оно движется как единая масса.

В нашем случае максимальная производительность распылителя может быть достигнута только при одинаковой амплитуде колебаний всей излучающей поверхности, т.е. при чисто радиальной форме колебаний. При радиально-изгибной моде колебаний вблизи узловых образующих линий трубчатого вибратора амплитуды колебаний будет недостаточно для реализации процесса ультразвукового распыления в тонком слое. Основная собственная частота чисто радиальных колебаний определяется зависимостью

$$f_k = \frac{1}{2r_{cp} \pi} c_k .$$

Составной пьезоэлектрический привод продольных перемещений, возбуждающий ультразвуковые радиальные резонансные колебания в трубчатой конструкции с поверхностью распыления, может быть выполнен по 1 или $\frac{1}{2}$ волновой акустической схеме. Полуволновая акустическая система позволяет обеспечить распылителю минимальные масса-габаритные характеристики.

Уравнение продольных колебаний пьезоэлектрического составного привода в общем виде можно записать как

$$S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где U - продольное перемещение; c - скорость звука в материале привода; S - площадь поперечного сечения.

Для колебательной системы, совершающей гармонические колебания и имеющей некоторую собственную частоту, решение уравнения (1) в общем виде может быть записано как

$$U(x, t) = U(x)(P \sin \omega t + Q \cos \omega t) .$$

Тогда, в соответствии с расчетной схемой (рис.1) для составляющих элементов пьезоэлектрического привода, решения уравнения (1) могут быть представлены в виде

$$U_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \phi); \quad (2)$$

$$U_2(x, t) = \left(C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \phi); \quad (3)$$

$$U_3(x, t) = \left(Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi), \quad (4)$$

где c_1, c_2, c_3 и U_1, U_2, U_3 - скорости звука и продольные перемещения в материале частотопонижающей накладки, пьезокерамической шайбы и трансформатора скорости соответственно.

Граничные условия для случая полуволновой колебательной системы в соответствии с расчетной схемой (рис.1) могут быть записаны как

$$U_3 = 0 \quad \text{при } x = -a_3; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial U_3}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{при } x = 0; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{при } x = 2a_2; \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = a_1 + 2a_2, \quad (8)$$

где $a_1, E_1, S_1, a_2, E_2, S_2$ и a_3, E_3, S_3 - толщина, модуль упругости на растяжение и площадь торцевой поверхности частотопонижающей накладки, пьезокерамической шайбы и входной ступени акустического трансформатора скорости соответственно.

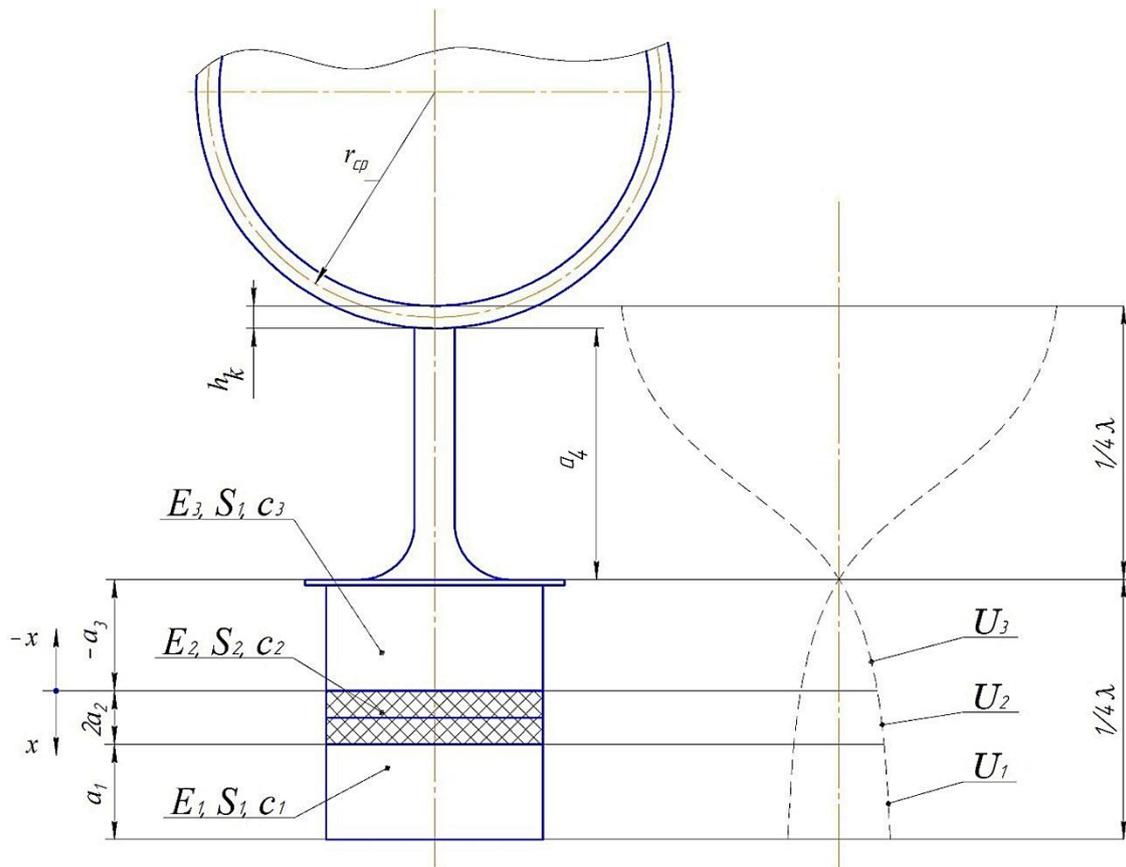


Рис. 1. Расчетная схема полуволнового пьезоэлектрического привода продольных перемещений с трубчатой поверхностью распыления

Учет условия (5) позволяет из уравнения (4) получить

$$Q \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = G \sin \frac{\omega}{c_3} a_1$$

или

$$Q = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 . \quad (9)$$

При этом уравнение (4) примет вид

$$U_3(x, t) = G \left(\sin \frac{\omega}{c_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi) . \quad (10)$$

Первая половина граничного условия (6) позволяет из уравнений (3) и (10) получить

$$C = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 . \quad (11)$$

Вторая половина условия (6) после дифференцирования уравнений (3) и (10) позволяет записать

$$E_2 S_2 \frac{D}{c_2} = E_3 S_1 \frac{G}{c_3} \quad \text{или} \quad \frac{D}{G} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 c_2}{S_2 c_3} . \quad (12)$$

Тогда, общее решение уравнений (11) и (12) позволяет получить

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 c_2}{S_2 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3} . \quad (13)$$

Граничное условие (8) приводит уравнение (2) к равенству

$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) . \quad (14)$$

С учетом равенства (14), уравнение (2) можно переписать в виде

$$U_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} x \right] \sin(\omega t + \phi) . \quad (15)$$

Учет первой половины условия (7) приводит уравнения (3) и (15) к виду

$$C \left(\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] . \quad (16)$$

Вторая половина граничного условия (7) позволяет после дифференцирования записать равенство

$$\begin{aligned} C \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) &= \\ &= A \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] . \end{aligned} \quad (17)$$

Разделив равенства (16) и (17) и учитывая соотношение (13), после преобразований окончательно получим

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left(Z \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(Z \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)} , \quad (18)$$

где

$$Z = \frac{E_2 S_2 c_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 c_2 \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]} .$$

При определении продольного размера a_4 ступени меньшей площади акустического ступенчатого трансформатора скорости необходимо дополнительно учесть и зависимость этого размера от присоединенной инерционной нагрузки, вызванной соколеблющейся массой кольцевого вибратора, элементов крепления кольцевого вибратора к выходному торцу акустического трансформатора скорости и массой слоя жидкости на поверхности распыления. При условии, что высота трубчатого кольцевого вибратора H больше продольного размера h выходного торца трансформатора скорости вдоль образующей наружной поверхности трубчатого

вибратора, что обычно вызвано стремлением разработчиков к максимальному увеличению площади поверхности распыления, можно записать зависимость

$$a_4 = \frac{1}{4}\lambda - h_k - b_3, \quad (19)$$

где λ - длина волны продольных колебаний привода; b_3 - величина, на которую необходимо укоротить размер a_4 вследствие наличия присоединенной массы.

При выполнении акустического трансформатора скорости и кольцевого вибратора из одинакового материала, а также пренебрежении массой слоя жидкости на поверхности распыления выражение (19) примет вид

$$a_4 = \frac{c_3}{4f_{np}} - h_k - \frac{(H-h)}{h} h_k, \quad (20)$$

где f_{np} - частота вынужденных колебаний привода продольных перемещений.

Для оценки производительности подобного распылителя можно воспользоваться рекомендациями работы [11], в которой представлены фотографии капиллярных волн на смоченной тонким слоем вибрирующей поверхности распыления, совершающей поршневые колебания (рис.2). При такой форме колебаний стоячие капиллярные волны на поверхности слоя жидкости имеют одинаковую амплитуду, что позволяет допустить для каждой из них одинаковые условия для потери устойчивости, т.е. зарождения и отрыва капель аэрозоля.

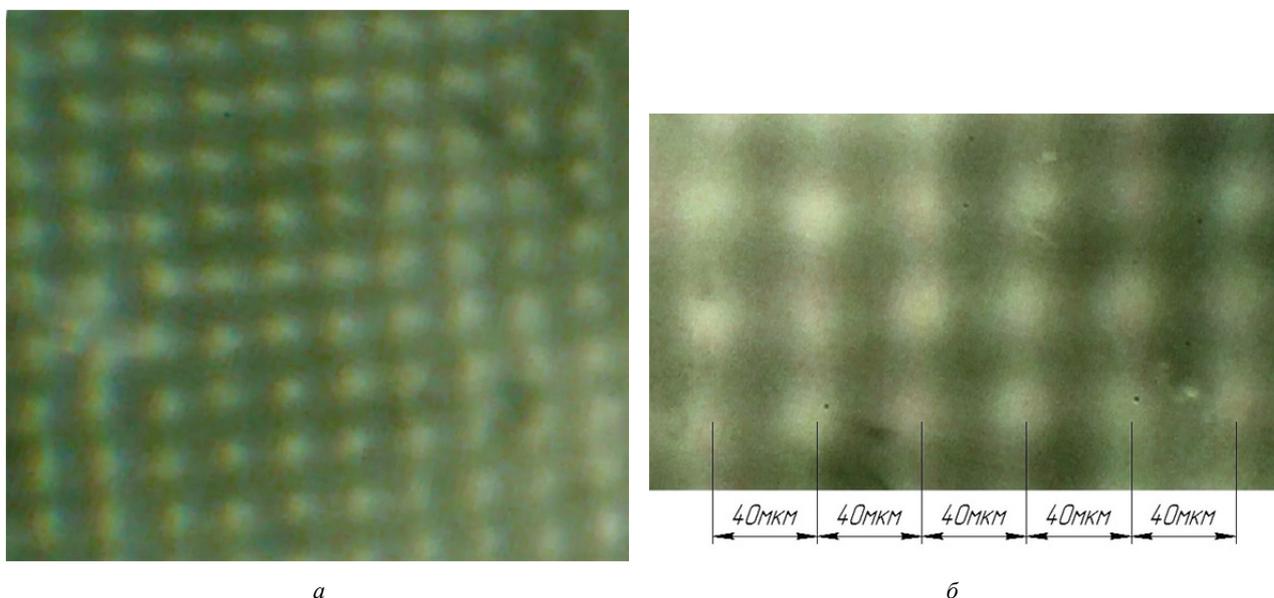


Рис. 2. Фронтальные фото капиллярных волн на нормально вибрирующей с частотой 60 кГц поверхности тонкого слоя жидкости с коэффициентом поверхностного натяжения $\sigma = 72,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$ и плотностью $\rho = 1000 \text{ кг / м}^3$ (а – увеличение в 24 раза; б – увеличение в 35 раз)

Приведенные фото подтверждают известную в работе [3] зависимость для определения длины капиллярных волн

$$\lambda_{кв} = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f_{кв}^2}}. \quad (21)$$

При этом средний диаметр $\bar{d}_к$ капель аэрозоля согласно [3] определяется зависимостью

$$\bar{d}_к = a\lambda_{кв}, \quad (22)$$

где $a \approx 0,3$ - коэффициент поглощения звуковой энергии вязкой теплопроводной средой.

Учитывая, что согласно эффекту Фарадея [3] частота капиллярных волн в два раза ниже частоты колебаний излучающей поверхности, можно записать

$$\bar{d}_к = a\sqrt[3]{\frac{2\pi\sigma}{\rho f_k^2}}. \quad (23)$$

Полагая, что за один период колебания стоячая капиллярная волна обязательно произведет две капли аэрозоля, с поверхности площадью $S_0 = \lambda_{кв}^2$ за один период колебания стоячей волны будут произведены четыре капли аэрозоля, т.е. будет распылен объем жидкости

$$V_0 = \frac{16}{3} \pi \bar{d}_k^3 \quad (24)$$

Тогда расход жидкости при ультразвуковом распылении в тонком слое с элементарной площади S_0 можно определить как

$$Q_0 = \frac{8}{3} \pi \bar{d}_k^3 f_k$$

или с учетом зависимости (23)

$$Q_0 = \frac{16 \pi^2 a^3 \sigma}{3 \rho f_k} \quad (25)$$

При этом общая производительность рассматриваемого ультразвукового распылителя при распылении с внутренней поверхности трубчатого вибратора составит

$$Q = \frac{S}{S_0} Q_0,$$

где S - площадь внутренней излучающей поверхности трубчатого вибратора.

Если для распыления использовать и наружную поверхность трубчатого вибратора, производительность может быть повышена практически в два раза.

На базе приведенной методики расчета была создана система автоматизированного проектирования ультразвуковых распылителей, позволяющая в диалоговом режиме рассчитать необходимые конструктивные размеры элементов составного пьезоэлектрического привода продольных перемещений и поверхности распыления. Пример диалогового окна автоматизированной системы проектирования приведен на рис.3.

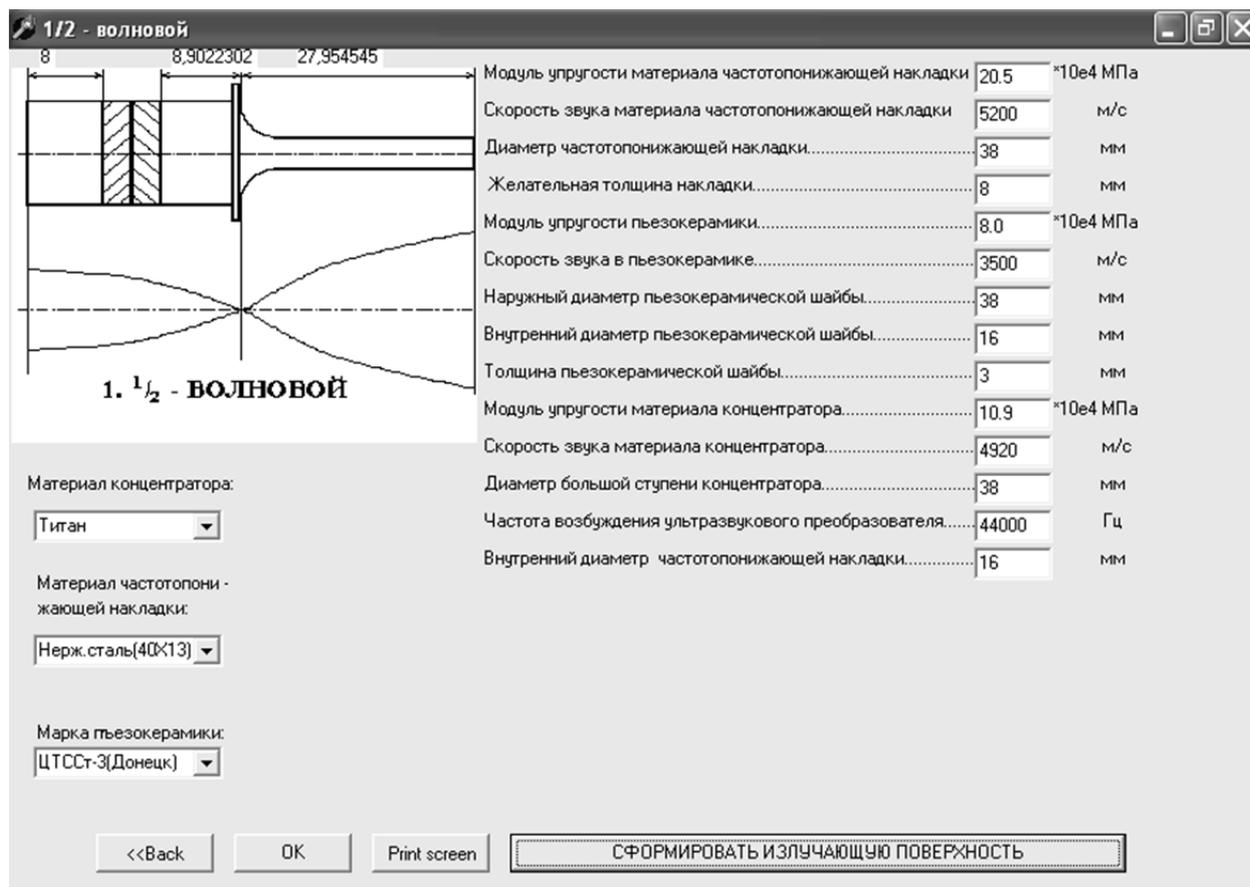


Рис. 3. Диалоговое окно автоматизированной системы проектирования ультразвуковых распылителей

Предложенные методика и система автоматизированного проектирования позволили создать ультразвуковой распылитель с трубчатой конструкцией поверхности распыления (рис.4).



Рис. 4. Ультразвуковой распылитель повышенной производительности

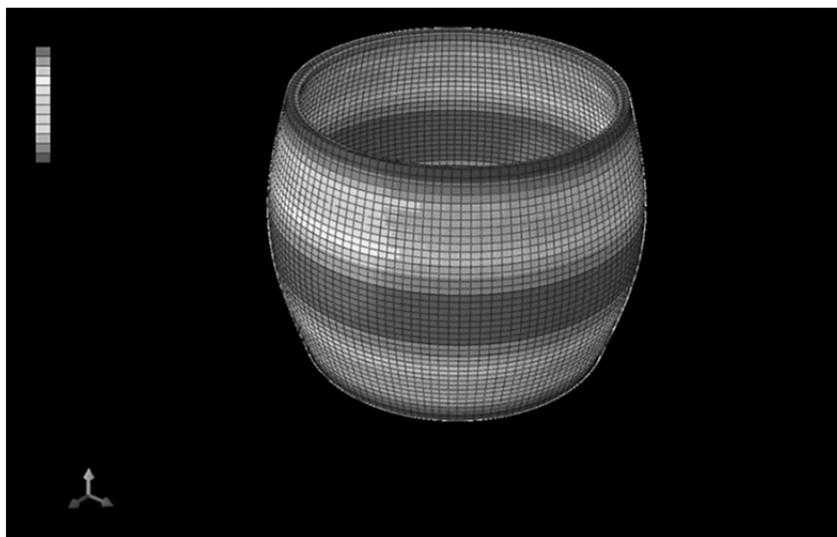


Рис. 5. Результат моделирования работы трубчатого вибратора на основной радиальной моде колебаний

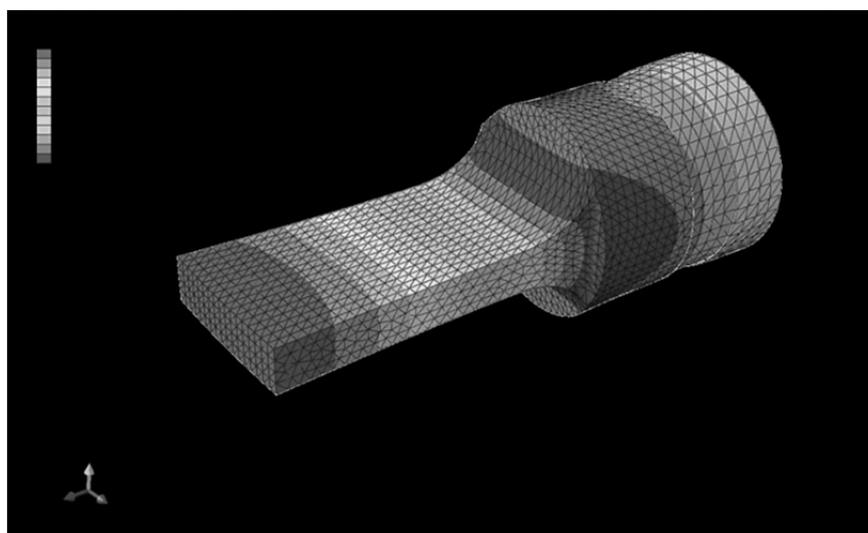


Рис. 6. Результат моделирования работы пьезоэлектрического резонансного привода линейных перемещений

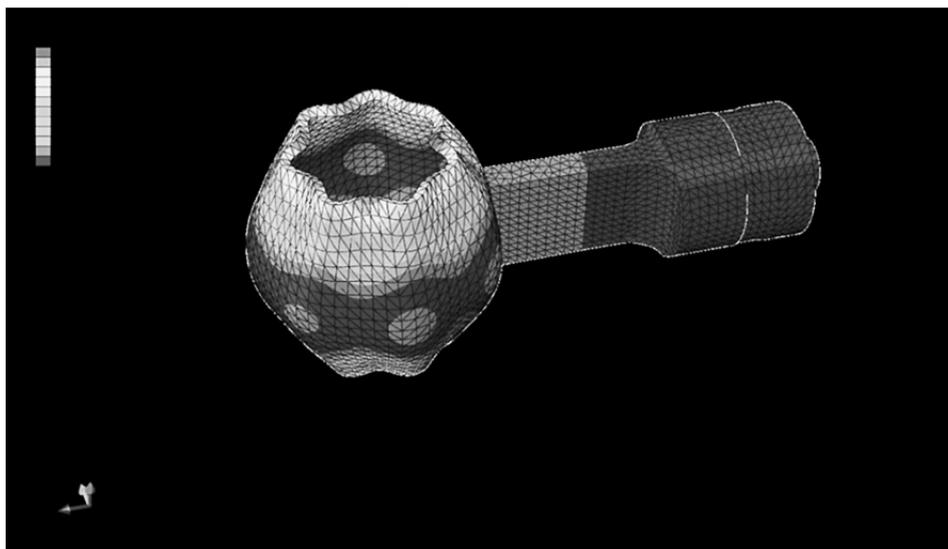


Рис. 7. Результат моделирования работы ультразвукового распылителя с трубчатой поверхностью распыления

Математическое моделирование (рис.5, рис.6, рис.7) подтвердило возможность возбуждения радиальной моды колебаний трубчатого вибратора с помощью ультразвукового привода продольных перемещений с ножевидным трансформатором скорости. Показано возникновение изгибных колебаний на краях трубчатого вибратора.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили практическую работоспособность распылителя и его высокую производительность. Эксперименты проводились на резонансной частоте 18,5 кГц при двух вариантах крепления пьезоэлектрического привода продольных перемещений к трубчатому вибратору.

Визуализация звукового поля внутри трубчатого вибратора (рис.9) показала, что даже выполнение выходного торца акустического трансформатора скорости

привода продольных перемещений узким ножевидным оказывает некоторое влияние на форму колебаний трубчатого вибратора, не позволяя добиться чисто радиальных колебаний поверхности распыления.



Рис. 8. Реализация процесса ультразвукового распыления в тонком слое с внутренней поверхности трубчатого вибратора

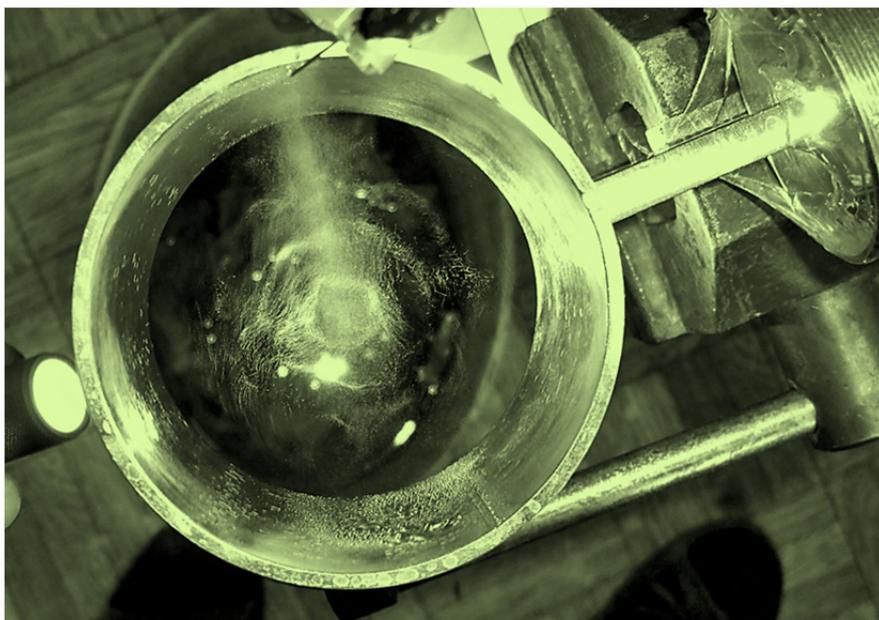


Рис. 9. Визуалізація звукового поля всередині трубчастого вібратора

Предложенная методика расчета ультразвуковых распылителей для реализации способа ультразвукового распыления в тонком слое позволяет с достаточной для инженерных задач точностью рассчитать акустические размеры резонансной системы распылителей жидких сред. Представленные результаты моделирования и экспериментальных испытаний подтвердили возможность получения высокой производительности распыления в случае применения трубчатого вибратора, возбуждаемого на основной радиальной моде колебаний.

Підвищення продуктивності ультразвукового розпилювача рідини

О.Ф. Луговський, В.П. Фесіч, А.І. Зілінський, А.Д. Лавриненков

Анотація. Розглянуті питання створення ультразвукових резонансних систем для реалізації способу ультразвукового розпилення в тонкому шарі. Детально розглянута фізична модель такого способу розпилення та показані можливості збільшення продуктивності подібних розпилювачів при збереженні високої якості аерозолі, що отримується. Запропонована методика розрахунку геометричних розмірів акустичної резонансної системи ультразвукового розпилювача з трубчастим вібратором. Наведені результати моделювання та експериментального дослідження ультразвукового розпилювача, які підтверджують достатню для інженерних розрахунків точність запропонованої методики. Показаний шлях подальшого можливого підвищення продуктивності ультразвукового розпилювача з трубчастим вібратором, що збуджується на основній радіальній моді коливань.

Ключові слова: ультразвукова резонансна система, ультразвукове розпилення в тонкому шарі, методика розрахунку коливальних систем, дрібнодисперсний аерозоль, трубчастий вібратор, п'єзоелектричний привід поздовжніх переміщень.

Performance increase of ultrasound liquid sprayers

O. Luhovskyi, V. Fesich, A. Zilinskyi, A. Lavrynenkov

Abstract. The paper dissolved to a problem of creation of ultrasonic resonance systems for realization of ultrasonic sputtering method in a thin layer. The physical model of such a spray method is considered in detail and the possibilities of increasing the productivity of such sprayers are shown while maintaining the high quality of the resulting aerosol. The method of calculating the geometric sizes of the acoustic resonant system of an ultrasonic spray with a tubular vibrator is proposed. The results of the simulation and experimental research of the ultrasonic sprayer, which confirm the accuracy of the proposed method for engineering calculations, are presented. The way of further possible increase of productivity of the ultrasonic spray with a tubular vibrator excited on the basic radial vibration mode is shown.

Keywords: ultrasonic resonance system, method of calculation of oscillatory systems, Fine aerosol, Tubular vibrator, Piezoelectric drive for longitudinal displacements.

References

1. Pazhi, D.G. and Galustov, V.S. (1984), *Osnovy tekhniki raspyleniya zhidkosti* [Bases liquid spraying technique], Khimiya, Moscow, Russia.
2. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V. and Shalunova, A.V. (2010), *Ul'trazvukovoe raspylenie zhidkosti: monografiya* [Ultrasonic Sputtering of Liquids: monograph], Alt. gos. tekhn. un-ta, Biisk, Russia.
3. Eknadiosyants, O.K. (1970), *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physical basis of ultrasound technology], in Rozenberg, L.D. (ed.), Nauka, Moscow, Russia.
4. Lugovskoi, O.F. and Chukhraev, N.V. (2007), *Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh: monografiya* [Ultrasonic cavitation in modern technologies: monograph], Kiev, Ukraine
5. Avvaru, B., Patil, M., Gogate, P. and Pandit, A. (2006), Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties. *Ultrasonics*, 44(2), pp.146-158, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2005.09.003>.
6. Juan, A., Gallego, Juarez and Karl, F. Graff (2014), *Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound*, Elsevir, pp. 1166.
7. Barba, A., d'Amore, M., Cascone, S., Lamberti, G. and Titomanlio, G. (2009), Intensification of biopolymeric microparticles production by ultrasonic assisted atomization, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(10), pp.1477-1483, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2009.08.004>.
8. Bittner, B. and Kissel, T. (1999), Ultrasonic atomization for spray drying: a versatile technique for the preparation of protein loaded biodegradable microspheres, *Journal of Microencapsulation*, 16(3), pp.325-341, <http://dx.doi.org/10.1080/026520499289059>.
9. Dalmoro, A., Barba, A., Lamberti, G. and d'Amore, M. (2012), Intensifying the microencapsulation process: Ultrasonic atomization as an innovative approach, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 80(3), pp.471-477, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.01.006>.
10. Freitas, S., Merkle, H. and Gander, B. (2004), Ultrasonic atomisation into reduced pressure atmosphere—envisaging aseptic spray-drying for microencapsulation, *Journal of Controlled Release*, 95(2), pp.185-195, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2003.11.005>.
11. Lyashok, A.V. (2012), “The method of calculation ultrasonic disperser for spraying a thin layer”, *Vibration in engineering and technology*, vol. 1(65), pp. 15-20.
12. Shalunov, A.V. and Khmelev, V.N. (2005), “Ultrasonic nebulizer of viscous liquids”, *Sovremennye problemy radioelektroniki* [Modern problems of radio electronics], Krasnoyarsk, Russia, pp. 426-429.
13. Cheng, L. and Cross, W.G. (1975), Production of Single Liquid Drops of controlled Size and Velocity, *Rev. Sci. Instrum*, vol. 46, no 3, pp. 263 – 265.
14. Charuau, J., Tierce, P. and Birocheau, M. (1994), 16.P.11 The ultrasonic generation of droplets for the production of submicron size particles, *Journal of Aerosol Science*, 25, pp. 233-234.
15. Rajan, R. and Pandit, A. (2001), Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization, *Ultrasonics*, 39(4), pp. 235-255.
16. Lugovskoi, A.F., Chorny, V.I., Chukhraev, N.V. and Movchanyuk, A.V. (2000), “Vozmozhnosti polucheniya melkodispersnogo aerizolya v meditsinskikh ingalyatorakh”, *Journal of mechanical engineering*, vol. 38, pp. 163-168.
17. Khmelev, V.N., Slivin, A.N., Barsukov, R.V., Tsyganok, S.N. and Shalunov, A.V. (2006), Controlling the process of ultrasonic spraying of viscous liquids, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*, vol. 8, pp. 12-19.
18. Liashok, A.V. and Luhovskyi, O.F. (2011), Ultrasonic liquid spraying in mechatronic systems of artificial microclimate, *Industrial hydraulics and pneumatics*, vol. 4(34), pp. 20-25.
19. Rajan, R. and Pandit, A. (2001), Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization, *Ultrasonics*, 39(4), pp.235-255, [http://dx.doi.org/10.1016/S0041-624X\(01\)00054-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00054-3).
20. Marchuk, L.V., Prokopenko, G.V., Lugovskoi, A.F. and Grishko, I.A. (2010), Inactivation of microorganisms in a high intensity ultrasound field, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Hirnycho-elektromekhanichna* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Mining and Electromechanical], vol. 22(195), pp. 195-206.
21. Dobre, M. and Bolle, L. (2002), Practical design of ultrasonic spray devices: experimental testing of several atomizer geometries, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2-4), pp.,205-211, [http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00128-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00128-0).
22. Kumabe, D. (1985), Vibrating cutting, in Maslennikova L. (tr.), in Portnova, I.I., Belova, V.V. (ed.), *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.
23. Timoshenko, S.P., Yang, D.Kh., Uiver, U. (1985), Fluctuations in Engineering, in Korneichuka L.G. (tr.), in Grigolyuka E.I. (ed.), *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.