



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.069.832: 534-8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.026



## МЕХАНИЗМЫ ВТОРИЧНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Ольга Борисовна Кудряшова<sup>1</sup>, Андрей Викторович Шалунов<sup>2</sup>,  
Сергей Сергеевич Титов<sup>3</sup>, Роман Сергеевич Доровских<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

<sup>2, 3, 4</sup> Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, Бийск, Россия

<sup>1</sup> olgakudr@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0404-8736>

<sup>2</sup> shalunov@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

<sup>3</sup> titov.sergey.s@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5286-173X>

<sup>4</sup> dorovskih\_roman@mail.ru

**Аннотация.** Распыление жидкости является основой различных практических приложений, таких как производство лекарственных препаратов, косметики, пищевой промышленности и т.д. Чаще всего на практике необходимо получить аэрозоль высокой дисперсности с достаточно большой производительностью. Однако создание аэрозоля с максимальной дисперсностью и высокой производительностью является сложной задачей. Одни методы распыления обладают высокой дисперсностью, но низкой производительностью, а другие обеспечивают достаточную производительность, но генерируют капли больших размеров. Вторичное ультразвуковое распыление может решить эту проблему, позволяя бесконтактно дробить капли или струи с помощью мощного ультразвукового поля. Для этого предварительно генерированный каким-либо способом поток капель или струя жидкости направляется в ультразвуковой излучатель в виде полого цилиндра, в котором создается ультразвуковое поле. При достаточно высокой интенсивности ультразвука реализуются условия для дальнейшего дробления капель или разрушения струй жидкости, и на выходе будут получены капли высокой дисперсности. Производительность такого процесса ограничена лишь скоростью поступления потока жидкости в устройство вторичного распыления. В данной статье рассматриваются возможные механизмы вторичного ультразвукового распыления, предложена математическая модель этого процесса и найдены закономерности процесса в зависимости от определяющих параметров ультразвукового поля и физико-химических свойств жидкости. Предложены следующие возможные механизмы разрушения струй и капель: непосредственное разрушение капель при попадании во фронт ультразвуковой волны; кавитационный механизм разрушения капель и струй. Доминирующий механизм дробления зависит от параметров задачи и, в свою очередь, определяет минимальный размер получающихся капель. Выявлены свободные параметры модели, которые необходимо определить экспериментально. Результаты работы помогут оптимизировать процесс вторичного ультразвукового распыления и совершенствовать технологии распыления жидкости в различных областях применения.

**Ключевые слова:** распыление, аэрозоль, вторичное распыление, минимальный размер капель, дисперсность, механизм разрушения капель, кавитация, математическая модель.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875>.

---

**Для цитирования:** Механизмы вторичного ультразвукового распыления жидкости / О. Б. Кудряшова [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 2, С. 200–207. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/ZXFXYU>.

---

Original article

**MECHANISMS OF SECONDARY ULTRASONIC LIQUID SPRAY****Olga B. Kudryashova<sup>1</sup>, Andrey V. Shalunov<sup>2</sup>, Sergey S. Titov<sup>3</sup>,  
Roman S. Dorovskikh<sup>4</sup>**<sup>1</sup> Institute for problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia<sup>2, 3, 4</sup> The Biysk Technological Institute (Branch) of Altai State Technical University, Biysk, Russia<sup>1</sup> olgakudr@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0404-8736><sup>2</sup> shalunov@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931><sup>3</sup> titov.sergey.s@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5286-173X><sup>4</sup> dorovskikh\_roman@mail.ru

**Abstract.** *Liquid atomization is the basis of various practical applications such as the production of pharmaceuticals, cosmetics, and food processing. In practice, it is often necessary to obtain an aerosol of high dispersion with sufficient productivity. However, creating an aerosol with maximum dispersion and high productivity is a difficult task. Some spray methods provide high dispersion but low throughput, while others provide sufficient throughput but generate large droplets. Secondary ultrasonic atomization can solve this problem by allowing non-contact atomization of droplets or jets using a powerful ultrasonic field. To do this, a stream of droplets or a stream of liquid previously generated in some way is directed into an ultrasonic emitter in the form of a hollow cylinder, in which an ultrasonic field is created. At a sufficiently high ultrasound intensity, conditions are realized for further fragmentation of droplets or destruction of liquid jets, and the output will be highly dispersed droplets. The productivity of such a process is limited only by the rate at which the liquid flow enters the secondary spraying device. This article discusses possible mechanisms of secondary ultrasonic atomization, proposes a mathematical model of this process, and finds patterns of the process depending on the defining parameters of the ultrasonic field and the physicochemical properties of the liquid. The following possible mechanisms for the destruction of jets and droplets have been proposed: direct destruction of droplets when they hit the front of an ultrasonic wave; cavitation mechanism of destruction of drops and jets. The dominant crushing mechanism depends on the parameters of the problem and, in turn, determines the minimum size of the resulting droplets. The free parameters of the model, which need to be determined experimentally, have been identified. The results of this work will help optimize the process of secondary ultrasonic atomization and improve liquid atomization technologies in various fields of application.*

**Keywords:** *spraying, aerosol, secondary spraying, minimum droplet size, dispersion, droplet destruction mechanism, cavitation, mathematical model.*

**Acknowledgements:** *The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875>.*

**For citation:** Kudryashova, O.B., Shalunov, A.V., Titov, S.S. & Dorovskikh, R.S. (2024). Mechanisms of secondary ultrasonic liquid spray. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 200-207. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.02.026. EDN: <https://RUBQIF>.

**ВВЕДЕНИЕ**

Ультразвуковое распыление жидкости широко используется в промышленных приложениях, таких как сжигание топлива [1], эмульгирование наноэмульсий [2], охлаждение распылением [3], мокрое удаление пыли [4] и увлажнение воздуха [5], пиролиз распылением [6] и т.д. Преимуществами ультразвукового распыления перед другими методами является высокая дисперсность получаемых капель с узким распределением по размерам, что бывает важно особенно в медицинских, химических и фармацевтических отраслях производства [7–9]. Другое преимущество метода ультразву-

кового распыления жидкости является высокий по сравнению с другими методами распыления КПД, до 1 % [10, 11].

Однако для некоторых практических целей необходимо обеспечить высокую производительность генерации жидких капель, что является проблемой для ультразвукового метода распыления. Причем, чем выше требуемая дисперсность аэрозоля, тем ниже производительность [10]. Например, не более 0,1 мл/(с·см<sup>2</sup>) при генерации капель диаметром до 10 мкм.

В работе [12] предложен модифицированный способ двухстадийного ультразву-

вого распыления жидкости. Его особенность заключается во втором этапе, когда поток аэрозоля, образованного традиционным ультразвуковым способом, подвергается снова мощному ультразвуковому воздействию. В соответствии с предложенной в работе моделью капли будут продолжать дробиться по мере прохождения через ультразвуковое поле. Увеличение производительности при сохранении целевого размера капель (менее 10 мкм в диаметре) обеспечивается благодаря следующей идее. Первичное ультразвуковое распыление жидкости предлагается проводить с максимальной производительностью, но с низкой дисперсностью капель. А при вторичном ультразвуковом дроблении добиваться необходимой дисперсности.

Предложенная идея обладает очевидными перспективами практического применения и заслуживает дальнейшего исследования и усовершенствования. В качестве метода первичного распыления нет необходимости использовать именно ультразвуковое. Вторичному ультразвуковому дроблению можно подвергнуть поток капель жидкости, образованный любым способом, а также струю сплошной жидкости, подаваемую в область с мощным ультразвуковым полем под давлением.

Механизмы ультразвукового распыления слоя жидкости хорошо изучены [13, 14]. Диспергирование происходит за счет отрыва капель жидкости с гребнем капиллярных волн, создаваемых на поверхности жидкости с помощью ультразвуковых колебаний. На ультразвуковое диспергирование также влияет кавитационная активность в слое жидкости. Согласно теории «конъюнкции», образование капель является результатом взаимодействия случайных гидравлических ударных волн, возникающих в результате кавитационного возмущения, и капиллярных волн [15].

Однако процессы вторичного распыления, происходящие в потоке капель или струй жидкости, проходящих через мощное ультразвуковое поле, до сих пор не рассматривались. Очевидно, эти процессы комплексны, при этом могут быть реализованы разные механизмы дробления, а не один. Также может происходить коагуляция капель и испарение жидкости, поэтому следует ожидать, что на результат распыления (размер капель, производительность процесса) влияют как параметры ультразвукового воздействия и условия (температура, влажность), так и свойства жидкости.

Целью работы является теоретическое исследование процесса вторичного ультразвукового распыления и выявление его возможных механизмов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим источник мощного ультразвукового поля в виде полого цилиндра. С торца цилиндра подается поток капель или струя жидкости (рисунок 1). На выходе получаем облако мелкодисперсного аэрозоля.

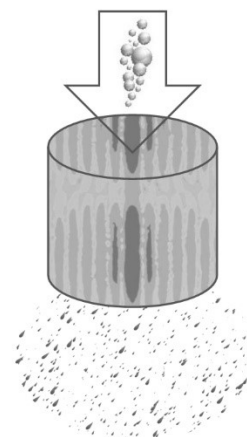


Рисунок 1 – Схема вторичного ультразвукового распыления жидкости

Figure 1 - Diagram of secondary ultrasonic liquid spraying

Будем решать две задачи. Первая – разрушение потока капель. Вторая – распыление струи, поданной в ультразвуковой излучатель под давлением.

1. Рассмотрим поток капель с начальным диаметром  $D_0$ , движущийся в воздушной среде в полом цилиндре со скоростью  $v$ . В цилиндре создается мощное ультразвуковое поле с уровнем звука  $L_p$ , частотой  $\omega$ . До каких размеров могут разрушиться капли?

2. Рассмотрим случай разрушения струи жидкости диаметра  $D_f$ , движущейся под давлением  $p_0$  в цилиндре в мощном ультразвуковом поле. Каков будет размер капель в этом случае?

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВТОРИЧНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Рассмотрим несколько вероятных механизмов дробления капель и струй.

### 1. Непосредственное разрушение капель

на фронте ультразвуковой волны. Рассмотрим каплю диаметра  $D$ , попавшую во фронт звуковой волны. Анализируя действующие на нее силы, получим, следуя [14], значения пороговой интенсивности разрушения частицы:

$$I_i = 2W_l \left( \frac{\sigma_{sp}}{D\omega\rho_l} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_{stp}$  – предел прочности частицы, Н/м<sup>2</sup>,  $\omega$  – частота излучения,  $\rho_l$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $W_l = \rho_l c$  – волновое сопротивление,  $c$  – скорость звука, м/с<sup>2</sup>. Следует иметь в виду, что предел прочности воды при импульсном воздействии на несколько порядков меньше, чем справочная (теоретическая) величина [16].

Из уравнения (1) получим выражение для минимального диаметра капли, до которого может быть разрушена капля при заданном уровне интенсивности воздействия  $I$ :

$$D_{min} = \frac{\sigma_{stp}}{\omega \rho_l} \sqrt{\frac{2W_l}{I}}, \quad (2)$$

Интенсивность воздействия связана с уровнем звукового давления  $p$  известным соотношением:

$$I = \frac{p^2}{2W_l}. \quad (3)$$

Учитывая выражение, связывающее уровень звука  $L_p$  со звуковым давлением  $p = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}$ , получим зависимость минимального диаметра  $D_{min}$ , до которого может дробиться капля, от уровня звука (рисунок 2).

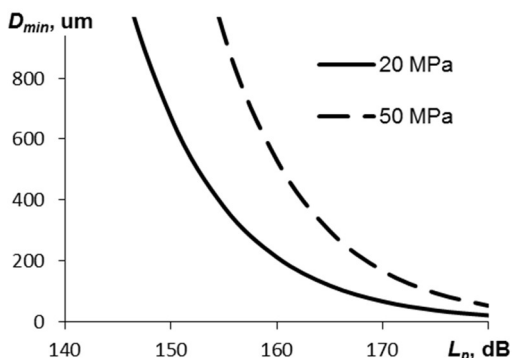


Рисунок 2 – Зависимость минимального размера капли от уровня звука для разных значений предела прочности частицы  $\sigma_{stp}$

Figure 2 - Dependence of the minimum droplet size on the sound level for different values of the particle strength limit  $\sigma_{stp}$

Если начальный размер капли более 150 мкм, то уровень звука менее 160 дБ не приведет к ее разрушению в соответствии с предложенным механизмом прямого разрушения. Отметим, что предел прочности капли  $\sigma_{stp}$  является свободным параметром модели, требующим экспериментального определения. Минимальный размер капель зависит также и от частоты воздействия (рисунок 3).

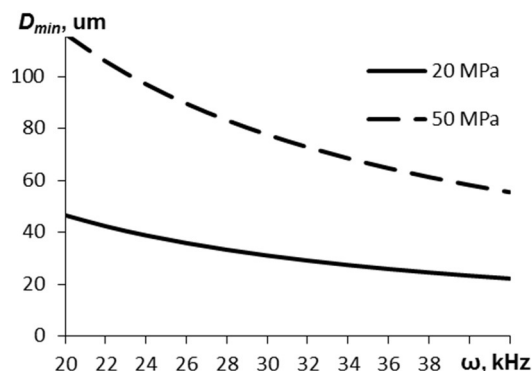


Рисунок 3 – Зависимость минимального размера капли от частоты УЗ, расчет для  $L_p = 174$  дБ

Figure 3 - Dependence of the minimum droplet size on the ultrasonic frequency, calculation for  $L_p = 174$  dB

Далее определим время, которое необходимо капле находиться в ультразвуковом поле, чтобы разрушиться до минимальных значений. Пусть скорость разрушения  $\frac{dD}{dt} = v_f$  постоянна. Необходимо, чтобы за время движения в ультразвуковом поле капля успела разрушиться от начальной до минимальной величины. Время нахождения в поле  $t_{exp}$  определится скоростью движения капли  $v_l$  и длиной цилиндра  $L_t - t_{exp} = L_t / v_l$ . Время разрушения:  $t_f = \frac{D_0 - D_{min}}{v_f}$ . Тогда необходимым

условием разрушения будет  $t_{exp} \geq t_f$ , или

$$\frac{v_f}{v_l} > \frac{D_0 - D_{min}}{L_t}. \quad (4)$$

Учитывая, что длина полого цилиндра много больше размеров капли, условие (4) выполняется в большинстве случаев.

## 2. Кавитационное разрушение капли.

Далее представлен возможный механизм разрушения капли, если энергии в соответствии с уравнением (1) будет недостаточно (интенсивность воздействия меньше пороговой для данного размера капли).

Известно, что ультразвук допороговой интенсивности может создавать кавитацию внутри жидкой капли, если для этого будет достаточно времени и энергии. При этом, поскольку капля движется, кавитационные пузырьки не будут схлопываться, а лишь расширяться [17].

Предположим, что пузырьки, расширяясь, сливаются внутри сферической капли в один пузырек. Если давление в пузырьке больше атмосферного, то в какой-то момент капля разрушится, подобно мыльному пузырю, с образованием мелких капель, диаметр

которых соответствует толщине стенки «мыльного пузыря» в момент разрушения. Такая модель предложена и подтверждена экспериментально в работе [18] для двух способов распыления жидкости. Рассмотрим ее применительно к поставленной задаче.

В работе Кедринского [17] введено понятие коэффициента кавитации, равного отношению объема кавитационных пузырьков к объему жидкости. В случае развитой кавитации это отношение равно  $k = 0.2-0.3$ .

Пусть объем капли до расширения пузырька –  $W_0 = \frac{\pi D_0^3}{6}$ . В ультразвуковом поле

создаются условия для развития кавитации, и суммарный объем пузырьков  $W_b$  практически мгновенно становится равен 20–30 % от объема жидкости в капле ( $W_b / W_0 = k$ ). Так как капля имеет небольшие размеры (от десятков мкм до мм), близко расположенные пузырьки в ней сливаются в один и продолжают расширяться, растягивая стенки капли. Диаметр пузырька  $D_b$  определится как

$$D_b = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_b}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot k \cdot W_0}{\pi}} = \sqrt[3]{k} D_0. \quad (5)$$

Объем расширившегося пузырька перед разрушением «мыльного пузыря» будет равен

$$W_{\max} = \frac{\pi D_{\max}^3}{6}.$$

Рассматриваемые процессы обладают высокой скоростью, поэтому расширение кавитационного пузырька можно считать адиабатическим:

$$\frac{D_{\max}}{D_b} = \left( \frac{p_0}{p_{\min}} \right)^{\frac{1}{3\gamma}}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты паров жидкости,  $p_{\min}$  – давление в пузырьке в момент разрушения, Па,  $p_0$  – начальное давление в капле, Па.

Давление в пузырьке перед разрушением можно вычислить из соотношения равенства внутренней энергии пара в пузырьке и поверхностной энергии:

$$p_{\min} W_b = \sigma S_b, \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) получим уравнение для определения  $D_{\max}$ :

$$D_{\max} = \sqrt[3]{k} D_0 \left( \frac{p_0 D_{\max}}{6\sigma} \right)^{\frac{1}{6\gamma}}. \quad (8)$$

Внешний диаметр капли в момент разрушения обозначим  $D_{end}$ . Учитывая условие равенства массы жидкости капли,

$$D_{end}^3 = D_0^3 + D_{\max}^3. \quad (9)$$

Можно предположить, что минимальный размер новых капель будет равен толщине слоя жидкости при разрушении кавитацион-

ного пузырька. Толщина водяного слоя в момент разрушения, а значит размер новых капель, составит  $D_{drop} = (D_{end} - D_{\max}) / 2$ . Или с учетом (9)

$$D_{drop} = \left( \sqrt[3]{D_0^3 + D_{\max}^3} - D_{\max} \right) / 2, \quad (10)$$

где  $D_{\max}$  определяется из уравнения (8).

На рисунке 4 приведена зависимость результирующих капель от начального диаметра капель (до разрушения) при разных значениях коэффициента  $k$ . Расчет сделан для воды при  $p_0 = 0.1$  МПа. Чем меньше исходная капля, тем на более мелкие фрагменты она разрушится.

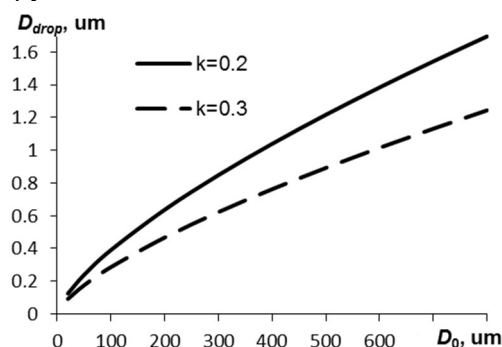


Рисунок 4 – Зависимость минимального диаметра новых капель воды, образующихся в результате кавитационного разрушения капель диаметром  $D_0$  от исходного диаметра

Figure 4 - Dependence of the minimum diameter of new water droplets formed as a result of cavitation destruction of droplets with diameter  $D_0$  on the initial diameter

### 3. Кавитационное разрушение струй.

Рассмотрим случай разрушения струи жидкости диаметра  $D_f$ , движущейся в мощном ультразвуковом поле. Пусть жидкость распыляют под давлением  $p_0$ . При выполнении условия (1), где  $D = D_f$ , струя будет разрушаться по описанному в п. 1 прямому механизму, вплоть до величины капель  $D_{min}$ . Однако, если  $D_f$  больше некоторой критической величины, прямого разрушения не произойдет. Но возможен механизм кавитационного разрушения струи. Оценим размер капель в этом случае.

В струе, проходящей в ультразвуковом поле, генерируются акустические колебания, создающие условия для возникновения кавитации. В фазе разгрузки звуковой волны в жидкости возникает разрыв шириной  $Z$ , в котором накапливаются пары. Следующая затем фаза сжатия вызывает образование пузырька, заполненного парами жидкости. Величину  $Z$  получим известных соотношений для волновых процессов:

$$Z = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{I}{W_l}}. \quad (11)$$

Поскольку кавитационный пузырек формируется на основе разрыва, в объеме струи можно выделить элементы, состоящие из пузырьков, окруженных жидкостью, причем, объем паров в пузырьке по отношению к объему жидкости будет выражаться коэффициентом кавитации  $k$ , рассмотренным выше. Каждый элемент, состоящий из пузырька и жидкости, будет представлять собой «мыльный пузырек», который разрушится в момент максимального расширения кавитационного пузырька. Максимальный диаметр пузырька перед разрушением:

$$D_{\max} = \frac{\sqrt[3]{k}}{\omega} \sqrt{\frac{I}{W_l}} \left( \frac{p_0 D_{\max}}{6\sigma} \right)^{\frac{1}{6\gamma}}. \quad (12)$$

Вместо уравнения (10) получим:

$$D_{\text{drop}} = \left( \sqrt[3]{Z^3 + D_{\max}^3} - D_{\max} \right) / 2. \quad (13)$$

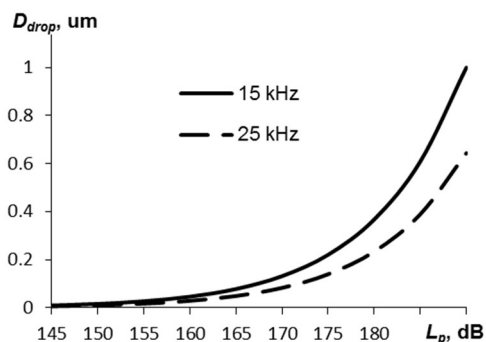


Рисунок 5 – Зависимость диаметра новых капель воды, образующихся при кавитационном разрушении струи, от уровня звука

Figure 5 - Dependence of the diameter of new water droplets formed during cavitation destruction of the jet on the sound level

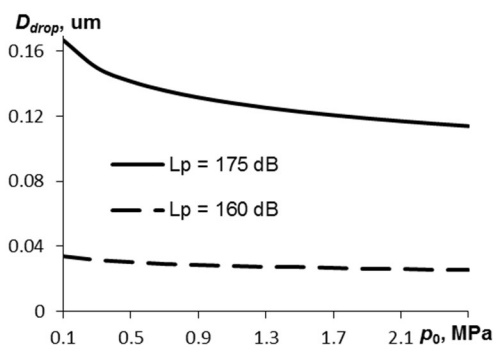


Рисунок 6 – Зависимость диаметра новых капель воды, образующихся при кавитационном разрушении струи, от гидростатического давления

Figure 6 - Dependence of the diameter of new water droplets formed during cavitation destruction of the jet on hydrostatic pressure

Совместное решение уравнений (11), (12) и (13) даст оценку минимального размера новых

капель в зависимости от характеристик ультразвукового воздействия и свойств жидкости.

На рисунке 5 приведена зависимость капель от гидростатического давления. Расчет сделан для воды,  $k = 0.25$ .

На рисунке 6 показана зависимость минимального размера капель от гидростатического давления.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье предложены два механизма разрушения капель и струй жидкости при попадании в мощное ультразвуковое поле – непосредственный и кавитационный.

Если размер капель не превышает некоторого критического (в наших оценках, около 150 мкм для уровня звука 160 дБ), то она может быть разрушена непосредственным воздействием фронта звуковой волны, когда она влетает в этот фронт. Минимальный размер результирующих капель при этом существенно и нелинейно зависит от уровня звука, падая с ростом уровня звука (рисунок 2) и с частотой (рисунок 3), и не зависит от размера исходной капли.

Если размер капли превышает критический размер для данного уровня звука, она может быть разрушена по кавитационному механизму. Возникает ультразвуковая кавитация внутри достаточно крупной капли, кавитационные пузырьки сливаются в один и расширяются. Капля при этом становится подобной мыльному пузырю. Когда достигается предел прочности стенки, зависящий от сил поверхностного натяжения, пузырек лопается на фрагменты с диаметром, порядка толщины стенки пузырька. Размер результирующих капель тем меньше, чем меньше был размер исходной капли и чем выше коэффициент кавитации (рисунок 4).

Разрушение струи по кавитационному механизму также возможно. При этом будет наблюдаться небольшое уменьшение размера капель с ростом давления распыления струи (рисунок 6).

При описании кавитационного механизма разрушения струй расчеты выявили контринтуитивное увеличение диаметра капель с ростом уровня звука (рисунок 5). Это объясняется тем, что величина кавитационного разрыва в сплошной среде струи с ростом уровня звука растет в соответствии со степенью  $\frac{1}{2}$ , растет и размер кавитационного элемента, то есть объем воды, несомый пузырьком. Значит, в соответствии с данной моделью размер капель также будет расти. Но рассматриваемый механизм будет работать только при превышении некоторого уровня

звука, когда устанавливается кавитационный режим в струе. Таким образом, если реализуется кавитационный механизм вторичного распыления струй, то с ростом уровня звука размер капель только увеличивается. Если требуется достичь минимального размера капель при кавитационном разрушении струи, следует воздействовать на нее с минимальным уровнем звука, при котором вообще возникает кавитация.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распыление жидкости – важный для практики технологический процесс (особенно сложно получить у мелкодисперсного аэрозоля с высокой производительностью). Для этого предлагается использовать вторичное ультразвуковое распыление, которому подвергается поток относительно крупных капель или струя сплошной жидкости. Механизмы такого распыления до сих пор не изучены.

Мы предложили и рассмотрели модель вторичного разрушения капель и сплошных струй жидкости при их перемещении в ультразвуковом поле, предполагающую два возможных механизма разрушения – непосредственное разрушение при попадании жидкости на фронт акустической волны и кавитационный механизм. В зависимости от уровня звука и условий распыления может реализоваться тот или иной механизм разрушения капель и струй (при относительно более низких уровнях звука – кавитационный, при более высоких – непосредственный). Модель позволяет оценить минимальный размер капель при разрушении в зависимости от начального размера капель, свойств жидкости, гидростатического давления. Таким образом, созданы предпосылки для оптимизации процесса вторичного ультразвукового распыления жидкости.

Свободные параметры модели, требующие экспериментального определения, – предел прочности жидкости  $\sigma_{stp}$ , коэффициент кавитации  $k$ . В качестве развития модели можно рассмотреть зависимость этого коэффициента от параметров ультразвукового поля: чем больше интенсивность ультразвука, тем коэффициент кавитации будет больше. От частоты возможна более сложная зависимость.

Мы не рассматривали более медленные процессы коагуляции и испарения, которые могут проходить под действием мощного ультразвука. Эти процессы происходят более длительное время. С другой стороны, испарение мелких капель, которые образуются при вторичном распылении, происходит тем быстрее и проще, чем меньше размер капли.

А при высоких концентрациях таких капель нельзя пренебрегать их коагуляцией. Учет указанных процессов входит в планы развития предложенной модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of Ultrasonic Atomization on a Micro Jet Engine Using Biofuel for Improving Performance / A. Alajmi [и др.] // *Processes*. 2021. № 9. С. 1963. doi : 10.3390/pr9111963.
2. Recent advances in ultrasound-assisted synthesis of nano-emulsions and their industrial applications / P. Thakur [и др.] // *Current Pharmaceutical Biotechnology*. 2021. № 22(13). С. 1748–1758. doi : 10.2174/1389201021666201104150102.
3. Y. Wang, L. Ruan. Application of Ultrasonic Atomization in a Combined Circulation System of Spray Evaporative Cooling and Air Cooling for Electric Machine // *Processes*. 2021. № 9(10). С. 1773. doi : 10.3390/pr9101773.
4. A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction / Q. Zhan [и др.] // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Т. 166. С. 86–98. doi : 10.1016/j.psep.2022.07.065.
5. Investigation on application of ultrasonic humidifier for air conditioning system / Putra I. [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2020. № 1 (1450). С. 012050. doi : 10.1088/1742-6596/1450/1/012050.
6. A comprehensive review on ultrasonic spray pyrolysis technique: Mechanism, main parameters and applications in condensed matter / Ardekani S.R. [и др.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019. Т. 141. С. 104631. doi : 10.1016/j.jaap.2019.104631.
7. K.C. Castro, J.M. Costa, M.G.N. Campos Drug-loaded polymeric nanoparticles: a review // *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2022. № 1(71). С. 1–13. doi : 10.1080/00914037.2020.1798436.
8. P. Majerič, R. Rudolf. Advances in ultrasonic spray pyrolysis processing of noble metal nanoparticles // *Materials*. 2020. № 16(13). С. 3485. doi : 10.3390/ma13163485.
9. H. Naidu, O. Kahraman, H. Feng. Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Т. 86. С. 105984. doi : 10.1016/j.ultsonch.2022.105984.
10. Ультразвук. Аппараты и технологии : монография / В.Н. Хмелев [и др.]. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. 687 с.
11. Разработка высокочастотных ультразвуковых колебательных систем для мелкодисперсного распыления жидкостей / В.Н. Хмелев [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2010. № 3. С. 315–320.
12. Теоретическое выявление режимов воздействия, обеспечивающих формирование высокодисперсного аэрозоля при двухстадийном ультразвуковом распылении / Хмелёв В.Н. [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2017. № 2. С. 99–104.
13. В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров. Применение ультразвуковых колебаний для распыления жидкостей // *Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы : материалы Международной научной конференции*. Уфа : Башкирский государственный университет, 2017. С. 80–82.
14. Л.Д. Розенберг. Физические основы ультразвуковой технологии. Москва : Наука, 1970. 688 с.
15. Ю.Я. Богуславский, О.К. Экнадиосян. О физическом механизме распыления жидкости акустическими колебаниями. *Акустический Журнал*. 1969. № 1(15). С. 17.
16. А.А. Богач, А.В. Уткин. Прочность воды при импульсном растяжении // *Прикладная механика и техническая физика*. 2000. № 4(41). С. 198–205.
17. В.К. Кедринский. Гидродинамика взрыва // *Прикладная механика и техническая физика*. 1987. № 4 (28). С. 23–48.
18. The role of cavitation in submicron aerosol dispersion /

Kudryashova O. [и др.] // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. Т. 243. С. 00003. doi : 10.1051/mateconf/201824300003.

### Информация об авторах

О. Б. Кудряшова – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. В. Шалунов – доктор технических наук, заведующий кафедрой МСИА Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

С. С. Титов – доктор технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

Р. С. Доровских – кандидат технических наук, научный сотрудник Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

### REFERENCES

1. Alajmi, A., Alajmi, F., Alrashidi, A., Alrashidi, N. & Adam, N.M. (2021). Application of Ultrasonic Atomization on a Micro Jet Engine Using Biofuel for Improving Performance. *Processes*, 9(11), 1963. doi : 10.3390/pr9111963.
2. Thakur, P., Sonawane, S., Potoroko, I. & Sonawane, S.H. (2021). Recent advances in ultrasound-assisted synthesis of nano-emulsions and their industrial applications. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 22(13), 1748-1758. doi : 10.2174/1389201021666201104150102.
3. Wang, Y. & Ruan, L. (2021). Application of Ultrasonic Atomization in a Combined Circulation System of Spray Evaporative Cooling and Air Cooling for Electric Machines. *Processes*, 9(10), 1773. doi:10.3390/pr9101773.
4. Zhang, Q., Fan, L., Wang, H., Han, H., Zhu, Z., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 86-98. doi : 10.1016/j.psep.2022.07.065.
5. Putra, I.D.G.A.T., Sunu, P.W., Temaja, I.W., Sugiarta, N., Sugina, I.M. & Suiyrya, I.W. (2020, February). Investigation on application of ultrasonic humidifier for air conditioning system. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1450, No. 1, p. 012050. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1450/1/012050.
6. Ardekani, S.R., Aghdam, A.S.R., Nazari, M., Bayat, A., Yazdani, E. & Saievar-Iranizad, E. (2019). A comprehensive review on ultrasonic spray pyrolysis technique: Mechanism, main parameters and applications in condensed matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 141, 104631. doi : 10.1016/j.jaap.2019.104631.
7. Castro, K.C.D., Costa, J.M. & Campos, M.G.N. (2022). Drug-loaded polymeric nanoparticles: a review. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 71(1), 1-13. doi : 10.1080/00914037.2020.1798436.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 06 мая 2024.

The article was received by the editorial board on 8 Dec 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 06 May 2024.

8. Majerič, P. & Rudolf, R. (2020). Advances in ultrasonic spray pyrolysis processing of noble metal nanoparticles. *Materials*, 13(16), 3485. doi : 10.3390/ma13163485.

9. Naidu, H., Kahraman, O. & Feng, H. (2022). Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 105984. doi : 10.1016/j.ultsonch.2022.105984.

10. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Khmelev, S.S. & Tsyganok, S.N. *Ultrasound. Devices and technologies: monograph* (2015). Biysk : Alt Publishing House. state techn. un-ta. (In Russ.).

11. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Khmelev, M.V., Khmelev, S.S., Genne, D.V., Barsukov, R.V. & Shalunova, A.V. (2010). Development of high-frequency ultrasonic oscillating systems for fine atomization of liquids. *Polzunovsky Bulletin*, (3), 315-320. (In Russ.).

12. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golykh, R.N., Dorovskikh, R.S. & Nesterov, V.A. (2017). Theoretical identification of exposure modes that ensure the formation of a highly dispersed aerosol during two-stage ultrasonic spraying. *Polzunovsky Bulletin*, (2), 99-104. (In Russ.).

13. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golykh, R.N. & Nesterov, V.A. (2017). Application of ultrasonic vibrations for atomizing liquids. *Proceedings of the international scientific conference. Ultrasound: problems, developments, prospects*. Ufa : Bashkir State University. (pp. 80-82). (In Russ.).

14. Rosenberg, L.D. (Ed.). (1970). *Physical foundations of ultrasonic technology*. Moscow : Nauka. (In Russ.).

15. Boguslavsky, Y.Y. & Eknadiosyans, O.K. (1969). On the physical mechanism of liquid atomization by acoustic vibrations. *Acoustic Journal*, 1(15), 17. (In Russ.).

16. Bogach, A.A. & Utkin, A.V. (2000). Strength of water under pulsed tension. *Applied Mechanics and Engineering Physics*, 41(4), 198-205. (In Russ.).

17. Kedrinsky, V.K. (1987). Hydrodynamics of explosion. *Applied mechanics and technical physics*, 28(4), 23-48.

18. Kudryashova, O., Muraviev, E., Vorozhtsov, B. & Akhmadeev, I. (2018). The role of cavitation in submicron aerosol dispersion. In *MATEC. Web of Conferences* (Vol. 243, p. 00003). EDP Sciences. doi 10.1051/mateconf/201824300003.

### Information about the authors

O.B. Kudryashova - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher at the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS.

A.V. Shalunov - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of MIMA, Biysk Technological Institute of Altai State Technical University.

S.S. Titov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of MSIA, Biysk Technological Institute of Altai State Technical University.

R.S. Dorovskikh - Candidate of Technical Sciences, researcher at the Biysk Technological Institute of Altai State Technical University.