

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ В ТОНКОМ СЛОЕ

Алина Ляшок, Олег Яхно, Александр Луговской

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Адрес: 03056, Украина, г. Киев, прос. Победы, 37:

e-mail: atoll-sonic@rambler.ru

Аннотация. Предложена схема затрат энергии при осуществлении процесса ультразвукового распыления в тонком слое. Обоснованы и расписаны энергии, которые действуют на тонкий слой жидкости при ультразвуковом распылении, а также расширено описаны составляющие всех действующих энергий. Приведены аналитические выражения для задействованных энергий. Представлен баланс энергий технологического процесса ультразвуковой распыления в тонком слое.

Ключевые слова: ультразвуковое распыление, энергетическая модель, энергия, тонкий слой, диспергатор.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые кавитационные технологии широко используются в целом ряде производств [3-8, 11, 21]. Эффективность многих технологических процессов удается повысить за счет применения технологии ультразвукового распыления в тонком слое. Эта технология позволяет получить жидкостный аэрозоль с дисперсностью в пределах 5 ... 30 мкм и обеспечить формирование заданной формы факела аэрозоля. Получены результаты экспериментальных исследований процесса ультразвукового распыления [17, 19]. Предприняты попытки аналитического описания указанного технологического процесса [18]. Одним из вариантов аналитического исследования является анализ энергетических составляющих механизма ультразвукового распыления.

Целью предлагаемой статьи является разработка энергетической модели процесса ультразвукового распыления в тонком слое.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Рассматривая известные математические модели [10, 20], которые описывают процесс ультразвукового распыления в тонком слое, следует отметить, что они не учитывают ряд важных факторов, которые существенно влияют на параметры процесса. Так, например, не учтено влияние окружающей среды или отдельные затраты энергии, связанные с реологическими особенностями распыляемой жидкости. Поэтому для углубленного анализа баланса энергий в процессе ультразвукового распыления целесообразным будет составить расширенную энергетическую модель процесса.

Реализация ультразвукового распыления жидкости происходит за счет подачи синусоидального электрического сигнала на пьезоэлектрический преобразователь, который,

вследствие обратного пьезоэффекта, возбуждает стоячие продольные механические колебания в резонансной системе диспергатора. При этом поверхность распыления размещают в пучности волны перемещения. Для достижения, необходимой для начала процесса распыления, амплитуды колебаний применяют акустические трансформаторы колебательной скорости. На распылительную поверхность подают жидкость, которая покрывает ее слоем толщиной 0,3 ... 1 мм. На поверхности слоя жидкости покрывающего нормально вибрирующую поверхность, образуются капиллярные волны (рис. 1).

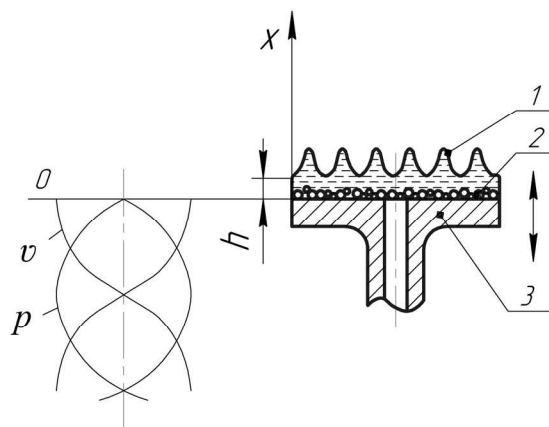


Рис.1 Схема образования капиллярных волн и кавитационного слоя при распылении в тонком слое (1 - капиллярные волны; 2 - кавитационный слой; 3 - излучающая торцевая поверхность диспергатора)

Fig.1. A chart of formation of capillary waves and cavitation layer when spraying in a thin layer (1 – capillary waves; 2 – cavitation layer; 3 – radiating butt-end surface dispersant)

При разрушении капиллярных волн, вследствие потери ими устойчивости, с гребней волн срываются и улетают в пространство близкие к монодисперсным капельки аэрозоля. При этом часть подведенной энергии расходуется на образование капли аэрозоля, часть расходуется на обеспечение полета капли и удержание ее сферической формы, а часть излучается с поверхности жидкости в газовую среду. Поэтому уместным будет записать уравнение энергетического баланса в общем виде как:

$$E_{подв} = E_{обр} + E_{капли} + E_{з.с.}, \quad (1)$$

где $E_{подв}$ - подведенная акустическая энергия;

$E_{обр}$ - энергия, затрачиваемая на образование капли аэрозоля; $E_{капли}$ - энергия на обеспечение полета капли и поддержку сферичности ее формы; $E_{з.с.}$ - энергия, излучаемая с поверхности слоя жидкости в газовую среду.

Состав энергий, которые расходуются на образование капли аэрозоля, может быть представлен согласно схеме (рис. 2).

В общем случае энергия, которая расходуется на образование и разрушение капиллярных волн может включать две составляющие – энергию, затрачиваемую на образование и поддержку кавитации в слое жидкости на вибрирующей поверхности ($E_{кав}$) и энергию, затрачиваемую на образование капиллярных волн ($E_{к.в}$).

Для анализа энергии $E_{кав}$ целесообразно принимать во внимание следующие составляющие:

$$E_{кав} = E_{коз} + E_{в.т} + E_{дисп} + E_{т.м}, \quad (2)$$

где $E_{коз}$ - энергия, расходуемая на преодоление когезии;

$E_{в.т}$ - энергия, затрачиваемая на преодоление вязкого трения в слое жидкости;

$E_{дисп}$ - энергия, затрачиваемая на диспергирование; $E_{т.м}$ - энергия, которая тратится на нагрев жидкости.

Тогда, общий баланс энергий, задействованных в процессе ультразвукового распыления в тонком слое, можно записать как

$$E_{подв} = E_{коз} + E_{в.т} + E_{дисп} + E_{т.м} + E_{к.в} + E_{капли} + E_{з.с.} \quad (3)$$

При расчетах и конструировании ультразвуковых диспергаторов для распыления в тонком слое выбором геометрических размеров обеспечивают резонансный режим работы, т.е. режим, при котором по длине диспергатора в направлении нормальном к поверхности распыления устанавливается стоячая волна упругой деформации. При этом выбором диаметра поверхности распыления и поперечных размеров диспергаторов обеспечивают поршневой характер колебаний. Поэтому правомерным можно считать рассмотрение плоских стоячих волн гармонических колебаний. Тогда в волне деформации средние по времени значения плотностей потенциальной $\bar{E}_{пот}$ и кинетической $\bar{E}_{кин}$ энергий можно записать как [1, 2]:

$$\bar{E}_{пот} = \frac{1}{8} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 (1 - \cos 2kx);$$

$$\bar{E}_{кин} = \frac{1}{8} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 (1 + \cos 2kx),$$

где ρ_k , c_k - соответственно плотность и скорость звука в материале, из которого

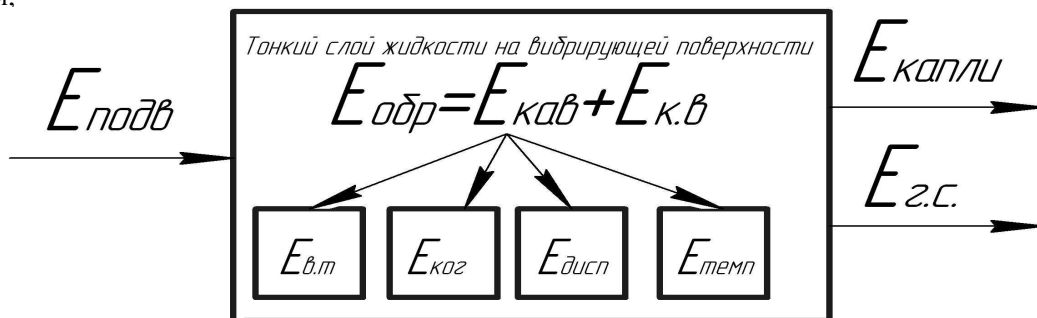


Рис. 2 Схема затрат энергии при осуществлении процесса ультразвукового распыления в тонком слое

Fig.2. A chart of charges of energy is during realization of process of ultrasonic spraying in a thin layer

изготовлен трансформатор колебательной скорости; k - волновое число; P_k - амплитуда колебательного давления в волне деформации ступени малого диаметра трансформатора; X - расстояние от узла в волне деформации.

В принятой системе отсчета (рис.1) для плоской стоячей гармонической волны давление можно выразить зависимостью

$$p = p_k \sin kx \cdot \cos \omega t ,$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

Тогда, полные значения плотностей потенциальной и кинетической энергий будут иметь вид:

$$\tilde{E}_{пот} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 \sin^2 kx \cdot \cos^2 \omega t ;$$

$$\tilde{E}_{кин} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 \cos^2 kx \cdot \cos^2 \omega t . (4)$$

Отсюда следует, что в волне деформации по длине диспергатора значение плотности полной звуковой энергии $\tilde{E}_{дисп} = \tilde{E}_{кин} + \tilde{E}_{пот}$ с учетом уравнений (4) имеет вид:

$$\tilde{E}_{дисп} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 \cos^2 \omega t . (5)$$

Следует отметить, что на торцевой рабочей поверхности диспергатора образуется узел давления, в котором наблюдается максимум кинетической и минимум потенциальной энергий.

Поскольку торцевая распылительная поверхность диспергатора покрыта тонким слоем жидкости, часть ультразвуковой энергии передается ей.

Учитывая нормальное падение плоской волны на плоскую границу раздела двух сред, коэффициент ζ_1 передачи энергии от диспергатора в жидкость можно определить как

отношение волновых сопротивлений контактирующих сред:

$$\zeta_1 = \frac{\rho_k c_k}{\rho_p c_p} , (6)$$

где ρ_p та c_p - соответственно плотность и скорость звука в жидкости которая, распыляется.

Учитывая уравнения (5) и (6), звуковая энергия $E_{подв}$, которая передается в тонкий слой жидкости, находящийся на вибрирующей поверхности диспергатора, может быть записана как

$$E_{подв} = \zeta_1 S_\delta h_p \tilde{E}_{дисп}$$

или

$$E_{подв} = \frac{1}{2} \frac{S_\delta h_p}{\rho_p c_p c_k} p_k^2 \cos^2 \omega t , (7)$$

где S_δ - площадь излучающей поверхности диспергатора; h_p - толщина слоя жидкости.

Следует отметить, что толщина слоя, покрывающего излучающую торцевую поверхность ультразвукового диспергатора, довольно маленькая, а сама поверхность плоская. Поэтому будем считать, что в жидкость излучаются плоские волны длиной λ . В этом случае размеры излучающей поверхности обеспечивают справедливость соотношения

$$h_p < \frac{S_\delta}{\lambda} . (8)$$

Выполнение этого соотношения подтверждает, что волна, которая излучается, плоская по всей толщине слоя жидкости.

При реализации процесса ультразвукового распыления используются определенные

диапазоны параметров: толщина слоя жидкости изменяется от 0,3 до 0,8 мм, а частота возбуждения изменяется от 20 до 100 кГц. Указанные значения не позволяют образоваться стоячей волне деформации по толщине слоя жидкости. Поэтому звуковая энергия будет переноситься плоской бегущей волной деформации от поверхности диспергатора, к свободной поверхности слоя жидкости, с которой происходит процесс распыления. Учитывая, что давление в бегущей плоской гармонической волне определяется зависимостью

$$p = p_m \cos(\omega t - kx),$$

где p_m - амплитуда колебательного давления в распыливаемой жидкости, а $E_{кин} = E_{пот}$, полная энергия, переносимая волной по всему слою жидкости, будет иметь вид

$$\begin{aligned} E_{бег.в} &= \frac{S_d h_p}{\rho_p c_p} p_m^2 \cos^2(\omega t - kx) = \\ &= \frac{S_d h_p}{\rho_p} v_m^2 \cos^2(\omega t - kx), \end{aligned} \quad (9)$$

где v_m - амплитуда колебательной скорости в распыливаемой жидкости.

Сопоставив зависимости (7) и (9) при $x = 0$, т.е. для точки, совпадающей с поверхностью диспергатора, получим

$$p_m^2 = \frac{1}{2} \frac{c_p}{c_k} p_k^2. \quad (10)$$

Тогда, подставляя выражение (10) в (9), уравнение для подведенной к слою жидкости энергии будет иметь вид

$$E_{подв} = \frac{1}{2} \frac{S_d h_p}{\rho_p c_p c_k} p_k^2 \cos^2(\omega t - kx) \quad (11)$$

Для стоячей волны в принятой ранее системе отсчета (рис.1) справедлива зависимость

$$v = \frac{p_k}{\rho_k c_k} \cos kx \cdot \sin \omega t, \quad (12)$$

где v - колебательная скорость в ультразвуковом трансформаторе.

Учитывая, что $v = \frac{d\varepsilon}{dt}$, где ε - величина деформации материала концентратора, а на торцевой поверхности, которая излучает, в точке $x = 0$ справедлива зависимость $\varepsilon = \varepsilon_k \sin \omega t$, где ε_k - амплитуда колебаний излучающей поверхности, получим

$$v = \varepsilon_k \omega \cos \omega t. \quad (13)$$

Решая совместно выражения (12) и (13) при условии $x = 0$ можно записать

$$p_k = \varepsilon_k \omega \rho_k c_k \operatorname{ctg} \omega t. \quad (14)$$

Подставив выражение (14) в (11), уравнение для энергии, которая передается с излучающей поверхности в слой жидкости, окончательно можно записать в виде

$$\begin{aligned} E_{подв} &= \frac{1}{2} \frac{S_d h_p (\varepsilon_k \omega \rho_k)^2 c_k}{\rho_p c_p} \times \\ &\times \operatorname{ctg}^2 \omega t \cdot \cos^2(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (15)$$

При увеличении амплитуды колебаний вибрирующего торца диспергатора на поверхности жидкости образуются стоячие капиллярные волны. Когда силы поверхностного натяжения не в состоянии удерживать целостность вытянутой капиллярной волны, ее гребень разрушается и с него срывается капля аэрозоля.

На отрыв капли затрачивается определенная энергия $E_{капли}$, которая определяется зависимостью [18]

$$E_{капли} = 4\pi\bar{d}_к^2\sigma, \quad (16)$$

где $\bar{d}_к$ - средний диаметр капли аэрозоля.

При этом средний диаметр капли аэрозоля находится по формуле [18]

$$\bar{d}_к = a \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho_p f^2}} \right), \quad (17)$$

где $a \approx 0,3$.

С учетом зависимостей (16) и (17) выражение для энергии $E_{капли}$ окончательно примет вид

$$E_{капли} = \frac{16a^2\sqrt[3]{(\pi\sigma)^5}}{(\sqrt[3]{\rho_p f^2})^2}.$$

Ультразвуковая энергия, которая дошла до поверхности слоя жидкости, частично излучается в газовую среду.

При малой толщине рассматриваемого слоя жидкости принятое ранее предположение о нормальном падении плоской волны на плоскую границу раздела будет справедливым и для границы раздела жидкость-газовая среда.

Тогда можно считать, что энергия, излучаемая с поверхности жидкости в газовую среду, определяется зависимостью

$$E_{г.с.} = \zeta_2 (E_{подв} - E_{обр} - E_{капли}) = \frac{2\rho_г c_г}{\rho_г c_г + \rho_p c_p} (E_{подв} - E_{обр} - E_{капли}),$$

где ζ_2 - коэффициент передачи энергии от жидкости к газовой среде; $\rho_г$ и $c_г$ - соответственно плотность и скорость звука в газовой среде.

В свою очередь, энергию когезии $E_{коз}$, затрачиваемую на поддержание связи между молекулами жидкости, можно представить зависимостью [16]

$$E_{коз} = \left(\frac{\Delta U_{p.i.вип}}{V_{p.i}} \right)^{1/2},$$

где $\Delta U_{p.i.вип}$ - молярная энергия испарения чистой жидкости i ; $V_{p.i}$ - ее молярный объем.

Энергия вязкого трения $E_{в.т.}$, обусловленная действием сил вязкого трения, пропорциональна скорости относительного движения и может быть выражена зависимостью [13]

$$E_{в.т.} = \frac{v \cdot S}{h} \cdot l,$$

где S - площадь; v - скорость относительного движения; h - расстояние между поверхностями; l - длина.

Что касается энергии, которая расходуется на нагрев жидкости (E_{t°), то ею можно пренебречь, поскольку она $\lim_{E_{t^\circ} \rightarrow 0} (E_{t^\circ}) = 0$.

Это объясняется тем, что жидкость на распыливаемой поверхности непрерывно возобновляется благодаря постоянной подачи жидкости. Поэтому слой жидкости не успевает прогреваться до такой температуры, которая влияла бы на процесс распыления.

На диспергирование [15], то есть распыление жидкой фазы нужно потратить определенное количество энергии. Эта энергия состоит из поверхностной энергии мелкодисперсной фазы, которая только что образовалась, и механической энергии [9]:

$$E_{дисп} = E_{повер} + E_{механ}.$$

При этом

$$E_{повер} = U - u^A V_A - u^B V_B,$$

где U – внутренняя энергия системы; u^A, u^B – плотности энергии фаз А и В; V_A, V_B – объемы фаз А и В.

$$E_{механ} = E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

То есть

$$E_{дисп} = U - u^A V_A - u^B V_B + \frac{mv^2}{2}.$$

При незначительной амплитуде колебаний вибрирующей поверхности диспергатора слой жидкости движется как одно целое с вибрирующей поверхностью. Однако при увеличении амплитуды колебаний вследствие инерционных свойств жидкости на ее поверхности образуются стоячие капиллярные волны (рис. 1).

Выведенная из состояния равновесия, жидкость приобретает в поле тяготения и в поле силы поверхностного натяжения некоторую потенциальную энергию. В этом случае учитывается свободная энергия в том смысле, как она понимается в термодинамике, то есть свободная энергия Гельмгольца. До тех пор, пока эта энергия не перейдет в тепло, жидкость не может успокоиться. В ней возбуждается колебательное движение, которое способствует возникновению капиллярно-гравитационных волн [12, 14].

$$E_{к.в} = E_{своб} = U - TS_{ент}$$

где U – внутренняя энергия системы, T – температура; $S_{ент}$ – энтропия.

ВЫВОДЫ

Полученный баланс энергий позволяет оценить значимость влияния отдельных параметров технологического процесса на характеристики

конечного продукта – жидкостного мелкодисперсного аэрозоля. Этот анализ позволит предложить пути повышения эффективности технологии ультразвукового распыления в тонком слое и выяснить пределы допустимого изменения реологических характеристик распыляемых жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг З.А., 1968. Давление звука. Часть II. – В кн.: Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука – С.49-87.
2. Исакович М.А., 1973. Общая акустика. – М., Наука. – 495 с.
3. Луговский, О. Ф., Ляшок А. В., Пижигов Ю. О., 2011. Спосіб та пристрої для отримання рідинного аерозолі // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – № 61, том 1. – С. 107 – 113.
4. Луговской, А.Ф., 2000 Ультразвуковое распыление в системах подготовки топливно-воздушной смеси // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Зб. Наук. Пр.. Кіровоградського держ. Техн. уні-ту. – Вип. 7. – С. 30-33.
5. Луговский, О.Ф., 1999. Отримання дрібнодисперсного аерозолі шляхом ультразвукового диспергування // Вестн. Нац. техн. ун-та України «КПИ». Машиностроение. – Вип. 34. – С. 193– 202.
6. Луговский, А.Ф., Чухраев Н.В., 2007. Ультразвуковая кавтация в современных технологиях: монограф. – К. 2007. – 244 с. – ISBN 966-594-927-6.
7. Луговский, О. Ф., Яхно О. М., 2004. Ультразвукове розпилення рідини та можливості його застосування в технологічних процесах // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. – 2004. – Вип. 64. – С. 49-55.
8. Ляшок А.В. Ультразвукове розпилення рідини у мехатронних системах штучного мікроклімату / А.В. Ляшок, О.Ф. Луговський // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка і пневматика» – №4 (34) 2011. – С. 20– 25.
9. Молекулярная физика. , 1973 Изд. 2-е, доп. Учеб. пособие для университетов. – М.: «Высшая школа». - С. 322-323.
10. Новицкий Б.Г., 1983. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). – М.: Химия. – 192 с.
11. Осадчук П., 2010.: Вплив ультразвукового поля на процес очищення

соняшникової олії// MOTROL. - №12 С, С. 309 – 314.

12. Руководство к лабораторным занятиям по физике. 1973. Под ред. Л.Л. Гольдина, изд. 2-е, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», – С. 209-213

13. Савельев И.В., 1970. Курс общей физики. Механика, колебания и волны, молекулярная физика – М.: Изд. «Наука», Главная ред. физико-математической лит-ы. Том 1. – 512с.

14. Сивухин Д.В., 2005. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т.П. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 544 с. ISBN 5-9221-0601-5.

15. Уминский С., Яковенко А. 2012.: Гидродинамическое диспергирование дизельных топлив для снижения нагарообразования// MOTROL. - № 14-1, С. 34 – 37.

16. Физическая химия. Теоретическое и прикладное руководство. Учеб. пособие для вузов. 1987. Под редакцией академика Б.П. Никольского. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, - С. 249-250.

17. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В., 2010. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 250 с.

18. Экнадиосянц О.К., 1970. Получение аэрозолей. - В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. - М.: Наука. – С. 339-392.

19. Bisa K., Dirnagl K., Esche R. Siemens Z., 1954. Zerstaubung von Flüssigkeiten mit Ultraschall. – 28, 8, 314.

20. Peskin R.L., Raco R.J., 1963. Ultrasonic Atomization of Liquids. – JASA. – 35. - N 9. - 1378.

21. Shushlyakov A., Ovcharenko V., Shushlyakov D., Krivonosov G., 2009.: Energy and environmental efficiency promotion of thermal power generators// MOTROL. - №11A, С. 54 – 59.

ENERGY MODEL PROCESS OF ULTRASOUND SPRAYING IN A THIN LAYER

Summary. The offered chart of charges of energy is during realization of process of ultrasonic spraying in a thin. Well-grounded and described energies which acting on thin layer of liquid at ultrasonic spraying, and extended described components of existing energy. Analytical expressions are resulted for the involved energies. The presented balance of energies in the process of ultrasonic spraying.

Key words: ultrasonic spraying, energy model, energy, thin layer, dispergator