

Также можно определить, что при случайных изменениях производительностей узлов эффективность алгоритма стохастического управления падает, уступая алгоритму без прогнозирования.

Алгоритм перераспределенная оправдывает себя при малом времени передачи заявок между узлами.

Разработанная имитационная модель позволяет подобрать рациональные значения интервала управления  $\Delta t$ , выбрать наиболее подходящий алгоритм перераспределения в различных ситуациях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульгин, М. Компьютерные сети. Практика построения для профессионалов [Текст] / М. Кульгин - 2-изд. Изд. - М.-С.-Пб.: Питер, 2003. - 462с.

2. Бройдо, В.Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации [Текст] / В.Л. Бройдо - 2-изд. - М. - С.-Пб.: Питер, Н.Новгород-Воронеж, 2004. - 703 с.

3. Кузнецов, С.Д. Основы современных баз данных [Эл. ресурс] / Информационно-аналитические материалы. Режим доступа: [www:http://www.citforum.ru](http://www.citforum.ru).

4. Пранявичюс, Г.И. Модели и методы исследования вычислительных систем [Текст] / Г.И. Пранявичюс - Вильнюс.: Мокслас. - 1982.

5. Тукубаев, З.Б. Динамическое распределение нестационарных приоритетных потоков в системе с потерями требований [Текст] / З.Б. Тукубаев, Б.Н. Камареддинов // Вопросы кибернетики: Сб., Вып. 130. - Ташкент, 1985.

6. Тукубаев, З.Б. Модель эффективной загрузки узлов сети [Текст] / З.Б. Тукубаев, Б.Н. Камареддинов // Тезисы докл. XI – Всесоюзного совещания по проблемам управления. М.: Ташкент, 1989.

7. Тукубаев, З.Б. Моделирование и исследование алгоритмов распределения нестационарных приоритетных потоков в сети СМО [Текст] / З.Б. Тукубаев, Б.Н. Камареддинов // Алгоритмы. Вып. 60. - Ташкент, 1986.

Сведения об авторах

Тукубаев Зукурхан Бейсекович, кандидат технических наук, доцент Международного Казахско-Турецкого Университета им. Х.А. Ясави.

Умаров Амантур Амангельдыевич, магистр информационных технологий Международного Казахско-Турецкого Университета им. Х.А. Ясави.

УДК 66.069.832

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РАСПЫЛЕНИИ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО

"Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова"

В статье рассматривается модель процесса формирования факела, образующегося при ультразвуковом распылении жидкостей, позволяющая определять необходимые параметры ультразвукового распылителя. По результатам моделирования созданы практические конструкции распылителей. Проведенные экспериментальные исследования показали, что характеристики факелов аэрозоля, определенные теоретически и измеренные на изготовленных ультразвуковых распылителях, отличаются менее, чем на 15%.

Ультразвуковое (УЗ) распыление находит все более широкое применение в новых наукоемких отраслях промышленности. Напыление паяльных флюсов при изготовлении печатных плат, химико-механическое полирование полупроводниковых пластин, изго-

товление шунтов коронарных сосудов, приготовление порошков из расплавов металлов, распылительная сушка, нанесение покрытий без использования распыляющего воздуха, невозможно без применения УЗ распыления. Такие технологии удалось реа-

лизовать благодаря уникальным возможностям УЗ распыления: монодисперсность, регулирование производительности, распыление вязких и агрессивных жидкостей, распыление без использования газового распыляющего агента и носителя, низкая энергоемкость, длительный срок службы, исключение периодического технического обслуживания УЗ распылителей (очистки).

Эффективность и качество решения каждой из перечисленных задач определяется режимами и параметрами УЗ распылителей, т.е., фактически, характеристиками факела аэрозоля. Этими характеристиками являются:

- дисперсный состав факела аэрозоля;
- производительность формирования аэрозоля;
- геометрические параметры формируемого факела.

Для определения параметров УЗ распылителей, обеспечивающих необходимые характеристики факела аэрозоля, необходимо разработать математическую модель, описывающую взаимосвязь между характеристиками факела аэрозоля и параметрами УЗ распылителя, его формирующего. Графически эти взаимосвязи представлены на рис.1.

Таким образом, разрабатываемая модель должна обеспечить определение рабочей

частоты УЗ распылителя, площади, формы поверхности распыления и количества отверстий, предназначенных для подачи распыляемой жидкости.

На начальном этапе построения математической модели определяется взаимосвязь между частотой УЗ распылителя и средне-медианным диаметром капель аэрозоля, с использованием известного выражения [1]

$$D_{\text{капли}} = a \cdot \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}},$$

где  $a=0,12$ ,  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $\rho$  – плотность распыляемой жидкости;  $f$  – частота УЗ колебаний.

Отсюда частота УЗ колебаний распылителя, обеспечивающая необходимый средне-медианный диаметр капель аэрозоля будет равна

$$f = \sqrt{\frac{8\pi a^3 \sigma}{D_{\text{капли}}^3 \rho}}.$$

На основе полученной частоты УЗ рассчитываются резонансные размеры УЗ рас-

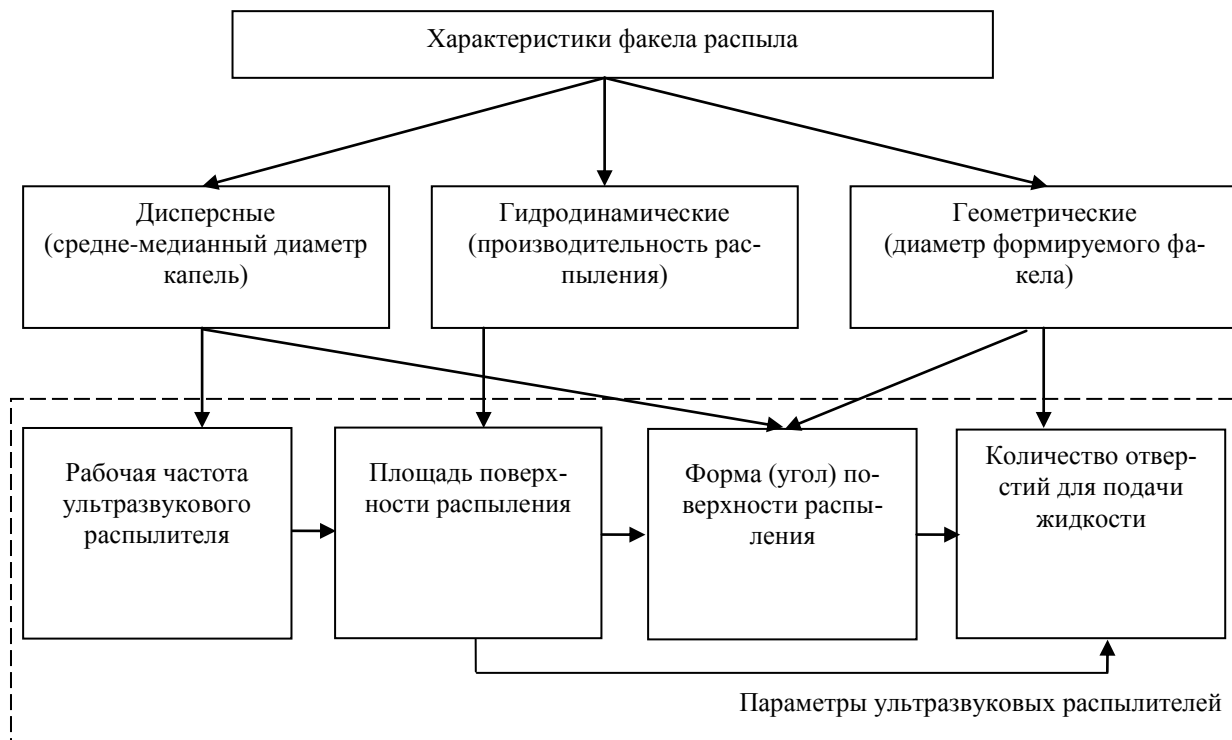


Рис. 1. Взаимосвязь между характеристиками факела распыла и соответствующих им параметров ультразвуковых распылителей

пылителя методике [2].

Далее определяется величина площади поверхности распыления, позволяющей генерировать аэрозоль с заданной для решаемой задачи производительностью. Расчет ведется с использованием выражения для определения удельной производительности распылителя (скорости распыления) [3]:

$$\Pi_{уд} = \frac{2}{3} \pi a^3 \sqrt{\frac{\pi \sigma}{\rho}} \cdot f^{1/3}.$$

Отсюда:

$$S = \frac{\Pi_{max}}{\Pi_{уд}} = \frac{3 \Pi_{max} \rho^{1/3}}{2 \Pi_{уд} a^3 (\pi \sigma f)^{1/3}};$$

где  $S$  – площадь поверхности распыления;  $\Pi_{max}$  – требуемая производительность формирования аэрозоля;  $\Pi_{уд}$  – скорость распыления.

На третьем этапе построения модели производится определение формы поверхности распыления. Искомым параметром является угол направления поверхности распыления  $\beta_{расп}$ , который совместно с площадью поверхности распыления определяет поперечный размер формируемого факела распыла.

На рис. 2 представлены возможные формы поверхности УЗ распылителя в зависимости от угла поверхности распыления (т.е. угла при вершине конуса поверхности распыления).

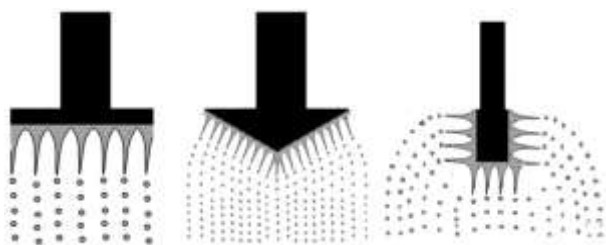


Рис. 2. Возможные формы поверхности распыления:

- а) – плоская ( $\beta_{расп} = 180^0$ );
- б) коническая ( $0 < \beta_{расп} < 180^0$ );
- в) – цилиндрическая ( $\beta_{расп} = 0^0$ )

На рис. 3 схематично показаны силы, действующие на каплю распыляемой жидкости, покинувшую поверхность распылителя.

В начальный момент времени капля движется под некоторым углом к поверхности распыления аэрозоля, равным

$$\alpha' = 90 - (90 - \alpha'') = (90 - \frac{\beta_{расп}}{2}).$$

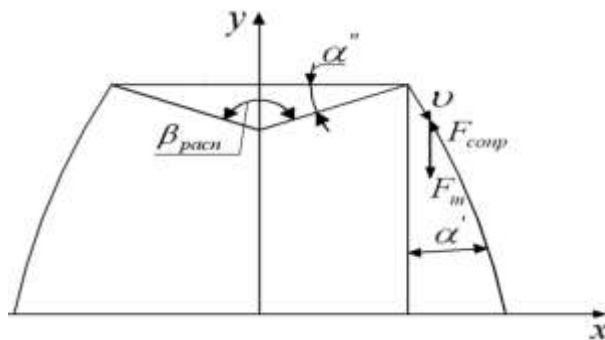


Рис. 3. Система сил, действующих на каплю жидкости после ее отрыва от пленки жидкости, покрывающей поверхность распыления

При движении капли угол  $\alpha'$  будет изменяться по следующему закону:

$$\alpha' = \arctg \left( \frac{v_x(t+\Delta t)}{v_y(t+\Delta t)} \right);$$

$$v_x = \frac{v_x(t) \sin \alpha - \rho S^2 v_x(t)^2 C_D(M) \sin \alpha \cdot \Delta t}{\sin \alpha'};$$

$$v_y = \left( \frac{g}{\cos \alpha} - \frac{\rho S^2 v_y(t)^2 C_D(M)}{m} \right) \Delta t + v_y(t);$$

где  $m$  – масса капли аэрозоля;  $C_D(M)$  – безразмерная функция числа Маха;  $\rho$  – плотность воздуха,  $S$  – площадь поперечного сечения капли.

Используя полученные зависимости и исходя из необходимого медианного диаметра факела аэрозоля, можно определить начальный угол, под которым должна отрываться капля с поверхности распыления  $\alpha'$  и, следовательно, угол поверхности распыления  $\beta_{расп} = 180 - 2\alpha'$ .

На рис. 4 представлена зависимость диаметра факела аэрозоля от угла поверхности распыления на расстоянии от распылителя

$h = 0,8$  м, полученная с использованием разработанной модели. Из рис. 4 следует, что представленная зависимость имеет нелинейный характер и, при углах поверхности распыления меньших  $20^\circ$  (т.е. при приближении формы поверхности распыления к цилиндрической), дальнейшего увеличения ширины факела распыления не происходит. Следовательно, оптимальные значения угла поверхности находятся в диапазоне  $20^\circ - 180^\circ$ .

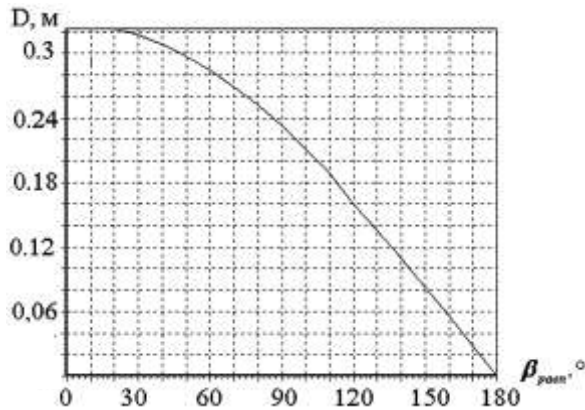


Рис. 4. Зависимость факела распыления от угла распылителя

Завершающим этапом построения модели является расчет количества отверстий, необходимых для обеспечения наличия на поверхности распыления равномерного слоя распыляемой жидкости. При выполнении расчетов предполагается, что жидкость, вытекающая из отверстия, удерживается силами поверхностного натяжения и растекается по поверхности распыления под действием сил радиационного давления (рис. 5).

Максимальный объем удерживаемой жидкости определяется из условия равновесия в момент отрыва капли от поверхности и с учетом конусности поверхности:

$$R = \sqrt[3]{\frac{2\gamma\sigma}{\rho g(\pi \cos^2 \alpha (1 - \sin \alpha) + A)}};$$

где  $A = \pi(1 + \sin \alpha)^2 \left( \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \sin \alpha \right) - \frac{1}{3} \pi \cos^3 \alpha$ . При

воздействии УЗ колебаний радиационное давление сообщает капле некоторую энергию, приводящую к ее растеканию. Выра-

жение для силы радиационного давления, может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{F}_r = 2S\bar{E} \text{kr}^4 \frac{1}{(1+2 \cdot q)^2} \cos(\theta) \cdot V,$$

где  $V = \left( q - \frac{1+2q}{3\mu} \right)^2 + \frac{2}{9} 1 - q^2$ ;  $\bar{E}$  – средняя по времени плотность энергии падающей волны,  $r$  – радиус капли,  $\theta$  – угол между направлением падения волны и нормалью к границе раздела,  $\mu = \frac{c_2}{c_1}$ ,  $q = \frac{p_1}{p_2}$ ,  $\rho$  и  $c$  – плотность среды и скорость распространения звука,  $k$  – волновое число. Индексы 1 и 2 относятся к средам, в которых распространяются падающая и прошедшая волны.

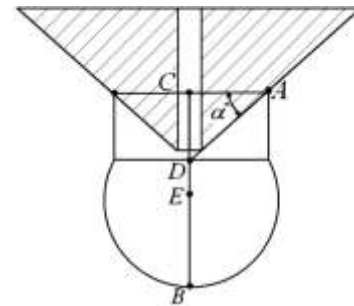


Рис. 5. Жидкость, удерживаемая на поверхности распыления под действием сил поверхностного натяжения

Зная величину энергии радиационного давления, можно определить радиус поверхности распыления, по которому растекается жидкость:

$$l = \frac{2F_r \pi \cos \alpha}{2 \cdot \sigma \pi \cdot \cos \alpha} + \frac{\sqrt{(-2F_r \pi \cos \alpha)^2 - C}}{2 \cdot \sigma \pi \cdot \cos \alpha}.$$

$$C = 4 \cdot \sigma \pi \cos \alpha \cdot (\sigma (\pi R^2 (1 + (1 + \sin \alpha)^2) + 2\pi R^2 \cos \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)) + 2F_r R \cos \alpha).$$

Площадь растекания жидкости будет равна

$$S_{\text{расп}} = \pi l^2.$$

Если площадь, занимаемая жидкостью после ее растекания, оказывается недостаточной (т.е. не вся поверхность распыления покрыта жидкостью), то на поверхности

Таблица 1

## Рассчитанные значения параметров УЗ распылителей

№	Исходные параметры факела распыления			Рассчитанные параметры распылителей				
	Диаметр капель аэрозоля, мкм	Диаметр факела распыления, см	Производительность распыления, мл/сек	Резонансная частота распылителя, кГц	Площадь поверхности распыления, см <sup>2</sup>	Радиус распылителя, см <sup>2</sup>	Угол распылителя, °	Количество отверстий, шт
1	45	5	2	44	3,9	1,1	115	7
2	30	4	1,2	60	2,7	0,9	110	1
3	70	6	2	25	4,75	1,2	130	7

Таблица 2

## Результаты экспериментального определения параметров факела аэрозоля, формируемого УЗ распылителями

№	Исходные параметры факела аэрозоля			Экспериментально установленные характеристики факела аэрозоля					
	Диаметр капель аэрозоля, мкм	Диаметр факела распыления, см	Производительность распыления, мл/сек	Диаметр капель аэрозоля, мкм	Погрешность, %	Диаметр факела распыления, см	Погрешность, %	Производительность распыления, мл/сек	Погрешность, %
1	45	5	2	50	12	4,6	8	2,1	5
2	30	4	1,2	33	10	3,8	5	1,2	0
3	70	6	2	80	14	5,5	9	2,3	15

распыления необходимо выполнить дополнительные отверстия для подачи жидкости. Эти отверстия должны находиться на расстоянии кратном  $2l$  (где  $l$  радиус растекшейся капли). Количество дополнительных отверстий определяется из выражения:

$$N=6 \cdot \frac{\sqrt{S}}{2l}.$$

На основании разработанной модели был осуществлен расчет практических конструкций УЗ распылителей (таблица 1), и проведен ряд экспериментов направленных на определение соответствия характеристик формируемых ими факелов аэрозоля заданным (табл. 2).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что максимальное расхождение между определенными теоретически и экспериментально полученными характеристиками факела аэрозоля не превышает 15%. Это свидетельствует о приемлемой точности и адекватности разработанной модели формирования факела распыления. Расчеты, проведенные с использованием модели, позволяют определять параметры УЗ оборудования, необходимые для обеспечения факела аэрозоля с заданными характеристиками и могут быть рекомендованы для практического применения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых

российских ученых - кандидатов наук и их научных руководителей № МК-383.2008.8.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей [Текст] / О.К. Экнадиосянц, // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337-395.

2. Ультразвуковая колебательная система: пат. 2141386 Российская Федерация: МПК6 В 06 В 3/00. / В.Н. Хмелёв, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок.

3. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности [Текст] / В.Н.Хмелев, А.В. Шалунов [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.

#### Сведения об авторах

Хмелёв Владимир Николаевич, декан факультета информационных технологий автоматизации и управления, доктор технических наук, доцент Бийского технологического института (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова".

Шалунов Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова".

Шалунова Анна Викторовна, кандидат аспирант кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова".