

Разработка Методики Расчета Диспергаторов Жидких Сред для Распылительной Сушки

Владимир Н. Хмелёв, д.т.н., *Senior Member* IEEE, Андрей В. Шалунов, к.т.н.,
Анна В. Шалунова, *Student Member*, IEEE.

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

Аннотация – в статье предлагается методика расчета диспергаторов жидких сред для ультразвуковой сушки в зависимости от требуемых параметров распылительной сушки

Ключевые слова – распыление, ультразвуковой распылитель, распылительная камера, подача жидкости

I. ВВЕДЕНИЕ

СУШКА, УДАЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ веществ и материалов тепловыми способами. Осуществляется путем испарения жидкости и отвода образовавшихся паров при подводе к высушиваемому материалу теплоты, чаще всего с помощью, так называемых сушильных агентов (нагретый воздух, топочные газы и их смеси с воздухом, инертные газы, перегретый пар).

Распылительная сушка применяется для жидких веществ повышенной вязкости, которые распыляются в потоке горячего сушильного агента. Благодаря большой удельной поверхности распыленного материала процесс испарения влаги происходит интенсивно.

Сушка распылением представляет собой совокупность следующих процессов: диспергирование материала, движение диспергированного материала и сушильного агента и тепломассообмен между ними, перенос теплоты и массы высушиваемых частиц. Таким образом, размеры сушильной камеры в значительной степени будут определяться углом факела распыла и тепломассообменных процессами, а соответственно, и зависит от количества тепла необходимого для высушивания материала.

Эффективность сушки зависит от реализации распыливающего устройства. Используемые традиционные распыливающие устройства (пневматические, механические) обладают существенными недостатками: использование распыливающего реагента. Альтернативой им может служить ультразвуковое распыление жидкостей, обладающее следующими преимуществами:

- низкая энергоемкость;
- высокая производительность процесса;

– возможность получать мелкодисперсное распыление;

– возможность получать монодисперсное распыление;

– возможность распылять высоковязкие жидкости без применения дополнительного распыливающего агента;

– наличие в каплях жидкости циркуляционных токов, способствующих ускорению процессов теплообмена, массопереноса и др. на поверхности капли.

II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Как правило, при проектировании ультразвукового распылителя имеются следующие основные параметры:

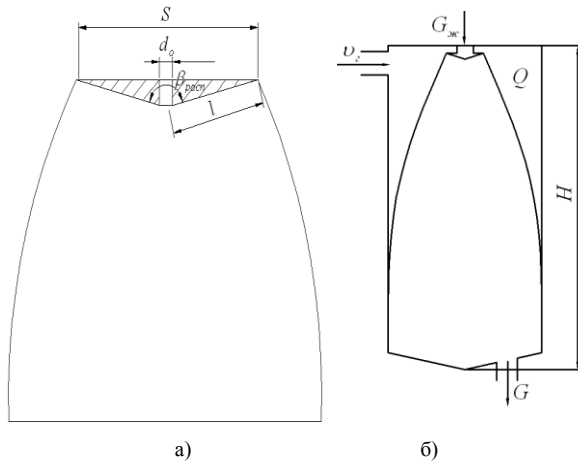
а) параметры жидкости: плотность, поверхностное натяжение, вязкость, расход жидкости;

б) параметры распылителя: угол, площадь, длина образующей и внешний диаметр распылителя, частота и амплитуда ультразвуковых колебаний;

в) параметры сушильной камеры: объем камеры, скорость и начальная температура газа, производительность сушилки по сухому продукту.

По всем вышеперечисленным данным необходимо определить такие параметры самого ультразвукового распылителя как: площадь поверхности распыления, угол наклона $\beta_{расп}$ образующей конической поверхности распыления и определение количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости на поверхность распыления.

На Рис. 1 представлены параметры распылительной сушилки.



а) параметры камеры : v_2 - скорость газа, H - высота камеры, $G_{ж}$ - расход жидкости, G - количество сухого порошка, Q - количество тепла, необходимое для высушивания материала.

б) параметры распылителя: S - площадь распылителя, $\beta_{расп}$ - угол распылителя, l - длина образующей поверхности распылителя, d_0 - диаметр сопла для подачи жидкости

Рис. 1. Параметры распылительной сушилки

Для решения данной проблемы предложена следующая методика расчета.

III. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ

Величина площади поверхности распыления рассчитывается с использованием выражения для определения удельной производительности распылителя (скорости распыления) [1]:

$$P_{y\partial} = \frac{2}{3} \pi a^3 \sqrt{\frac{\pi \sigma}{\rho}} \cdot f^{1/3}.$$

Откуда:

$$S = \frac{P_{\max}}{P_{y\partial}} = \frac{3 P_{\max} \rho_{ж}^{1/3}}{2 P_{y\partial} a^3 (\pi \sigma f)^{1/3}};$$

где S – площадь поверхности распыления m^2 ; P_{\max} – требуемая производительность формирования аэрозоля; $P_{y\partial}$ – скорость распыления; $a = 0,12$; σ – поверхностное натяжение; f – частота УЗ колебаний и определяется следующим образом.

Поскольку частота УЗ колебаний распылителя, должна обеспечивать необходимый среднедиаметр каплей аэрозоля, то она будет равна:

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

где $D_{капли}$ - средний медианный диаметр каплей аэрозоля.

Далее определяем угол ультразвукового распылителя. Для этого необходимо найти среднее объемно – поверхностный диаметр каплей жидкости. Для нахождения данной величины необходимо определить такие параметры как количество тепла, которое передается от газа к частицам раствора, идет на испарение и нагрев частиц, среднюю разность температур, объемный коэффициент теплообмена между газами и частицами.

Для оценки среднего объемно – поверхностного диаметра при ультразвуковом распылении предложена следующая формула[2]:

$$\delta_{3,2} = \frac{0,252}{A} \sqrt[3]{\frac{3 G_{ж} \eta \sigma}{\pi D \rho_{ж}^2 f^2 g \cos \frac{\beta_{расп}}{2}}},$$

где η - коэффициент динамической вязкости в Па/с; $\rho_{ж}$ - плотность распыляемой жидкости в $кг/м^3$; $\frac{\beta_{расп}}{2}$ - угол между

образующей поверхности насадки и вертикалью в градусах; $G_{ж}$ - расход жидкости $м^3/с$; A - амплитуда колебаний ультразвукового распылителя в м; f - частота колебаний насадки в $1/с$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; D - внешний диаметр рабочего участка распыливающей насадки в м, который определяется из выражения (1):

$$D = \sqrt{\frac{6 P_{\max} \rho_{ж}^{1/3} \sin \frac{\beta_{расп}}{2}}{P_{y\partial} a^3 (\pi \sigma f)^{1/3}}}, \quad (1)$$

Тогда

$$\sin \frac{\beta_{расп}}{2} - \sin^3 \frac{\beta_{расп}}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} G_{ж}^2 \eta^2 \sigma^7 P_{y\partial} a^3}{\pi^5 \delta_{3,2}^6 A^6 P_{\max} \rho_{ж}^{13/3} f^{11/3}}$$

Средний объемно – поверхностный диаметр находится следующим образом. Так, учитывая общую поверхность частиц F' средний объемно – поверхностный диаметр будет равен:

$$\delta_{3,2} = \frac{6G}{F' \gamma},$$

где G - количество сухого продукта в $мл/м^3$; γ - удельный вес высушенного продукта в $Н/м^3$; $\delta_{3,2}$ - средний объемно – поверхностный диаметр каплей жидкости в м.

Общая поверхность частиц находится через суммарную поверхность частиц, находящихся во взвешенном состоянии в сушильной камере, которая зависит от длительности падения. С учетом этого величина F' будет определяться выражение (2):

$$F' = \frac{F}{\tau}, \quad (2)$$

где τ - время падения;

Поскольку скорость витания частиц v_e в процессе сушки изменяется, то время падения будет определять по следующей формуле (3)

$$\tau = \frac{H}{v_e \pm v_z}; \quad (3)$$

Поэтому далее необходимо определить скорость витания частиц. Для этого рассмотрим Рис. 2, где схематично показаны силы, действующие на каплю распыляемой жидкости, покинувшую поверхность распылителя.

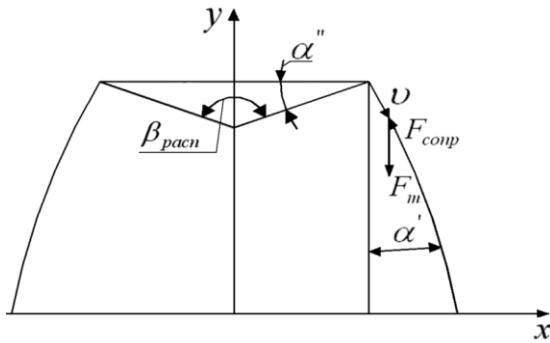


Рис. 2. Система сил, действующих на каплю жидкости после ее отрыва от пленки жидкости, покрывающей поверхность распыления

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

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

При движении капли угол α' 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;

ρ – плотность воздуха, S – площадь поперечного сечения капли.

Тогда скорость движения капли в произвольный момент будет определять по следующей формуле:

$$v_e = \frac{v_y}{\cos \alpha'}.$$

Так как объемный коэффициент теплообмена связан с коэффициентом теплообмена, отнесенным к единице поверхности испарения, то суммарная поверхность частиц определяется уравнением (4):

$$F = \frac{\alpha_v V_k}{\alpha_m}; \quad (4)$$

где V_k - объем сушильной камеры в m^3 ;

α_m - коэффициент теплообмена в $Дж/м^3 \cdot C$;

α_v - объемный коэффициент теплообмена между газами и частицами $Дж/м^3 C$

$$\alpha_v = \frac{Q}{K_1 K_2 \Delta t_{cp} V_k};$$

где Δt_{cp} - средняя разность температур между газом и частицами в C ; K_1 - коэффициент, учитывающий уменьшение движущей силы за счет перемешивания газа в камере; K_2 - поправочный коэффициент на равномерность распределения теплоносителя и частиц жидкости по объему камер; Q - количество тепла, которое передается от газа к частицам жидкости, идет на испарение и нагрев частиц в $Дж$.

Учитывая материальный и тепловой баланс сушилки необходимое количество тепла определяется формуле (5):

$$Q = W(595 + 0,47t_2 - \vartheta_1) + c_0 G(\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (5)$$

где W - количество испаряемой влаги в $Дж/с$; G - производительность сушилки по сухому продукту в $мл/м^3$; t_2 - температура газов в процессе сушки в $^{\circ}C$; ϑ_1, ϑ_2 - температура соответственно жидкости и продукта после сушки в C ; c_0 - теплоемкость безводного продукта в $Дж/Н C$;

$$c_0 = c_{сух} \frac{100 - w_2}{100} + \frac{w_2}{100};$$

w_2 - конечная влажность продукта в %; $c_{сух}$

- теплоемкость безводного продукта в $Дж/Н C$.

Весь процесс нагрева частиц в процессе сушки можно разделить на два основных: в первом периоде температура частиц приблизительно равна температуре адиабатного испарения чистой жидкости; во второй период она изменяется и достигает температуры среды.

Средняя разность температуры в первый период может быть определена по формуле (6):

$$\Delta t_1 = \frac{t_1 - t_2'}{\ln \frac{t_1 - t_m}{t_2' - t_m}}, \quad (6)$$

где t_1 - начальная температура газов в С; t_m - средняя температура мокрого термометра (способность воздуха принять влагу при неизменном теплосодержании, т.е без подведения тепла) в С; t_2' - температура газов, соответствующая окончанию первого периода сушки, °С;

Температуру t_2' нетрудно определить из процесса сушки по $i-d$ диаграмме.

Средняя разность температур между газом и частицей будет равна во второй период:

$$\Delta t_2 = \frac{(t_2' - t_m) - (t_2 - \mathcal{G}_2)t_1 - t_2'}{\ln \frac{t_2' - t_m}{t_2 - \mathcal{G}_2}}, \quad (7)$$

где $\mathcal{G}_2 = (t_2' - t_m) \frac{w_2 - w_2}{w_2 - w_p}$;

w_1 - начальная влажность жидкости в процентах; w_2 - максимальная гигроскопическая влажность в процентах; d_1 - начальное влагосодержание газов в кг влаги/кг материала; w_p - равновесная влажность в %.

Среднюю разность температур между газом и частицей можно определить, если будет известно соотношение длительности сушки между первым и вторым периодами сушки. Отношение длительности сушки во втором периоде к общей длительности сушки может быть описано следующей величиной

$$X = \frac{1}{1 + \frac{(t_2' + t_2)(w_1 - w_2)}{(t_1 + t_2')(w_2 - w_p) \ln \frac{w_2 - w_p}{w_2 - w_p}}}$$

Средняя разность температур будет равна

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_1(1 - X) + \Delta t_2 X;$$

Общее выражение для нахождения среднего объемно – поверхностного диаметра будет иметь следующий вид:

$$\delta_{3,2} = \frac{6GH\alpha_m K_1 K_2 \Delta t_{cp}}{\gamma(v_g \pm v_v)\alpha_v}. \quad (23)$$

Конечное уравнением для расчета угла распылителя будет иметь следующий вид:

$$\sin \frac{\beta_{расч}}{2} - \sin^3 \frac{\beta_{расч}}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} G_{жс}^2 \eta^2 \sigma^7 P_{уд} a^3}{\pi^{\frac{5}{3}} \left(\frac{6GH\alpha_m K_1 K_2 \Delta t_{cp}}{\gamma(v_g \pm v_v)\alpha_v} \right)^6 A^6 P_{max} \rho_{жс}^{\frac{13}{3}} f^{\frac{11}{3}}}$$

Полученное уравнение решается методом Виета-Кардано.

Завершающим этапом является расчет количества необходимых отверстий. При выполнении расчетов, предполагается что жидкость, вытекающая из отверстия, удерживается силами поверхностного натяжения и растекается по поверхности распыления под действием сил радиационного давления (Рис. 3).

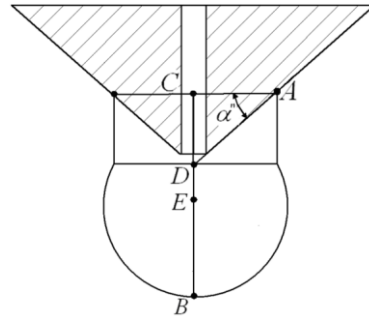


Рис. 3. Жидкость, удерживаемая на поверхности распыления под действием сил поверхностного натяжения

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

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

где

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

При воздействии УЗ колебаний радиационное давление сообщает капле некоторую энергию, приводящую к ее растеканию. Выражение для силы радиационного давления, может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{F}_r = 2S\bar{E}(kr)^4 \frac{1}{(1 + 2 \cdot q)^2} \cos(\theta) \cdot [C];$$

где $C = \left(q - \frac{1 + 2q}{3\mu} \right)^2 + \frac{2}{9}(1 - q)^2$;

\bar{E} – средняя по времени плотность энергии падающей волны, r – радиус капли м, θ – угол между направлением падения волны и нормалью к границе раздела,

$$\mu = c_2/c_1,$$

$$q = p_1 / p_2,$$

ρ и c – плотность среды кг/м³ и скорость распространения звука м/с, k – волновое число м⁻¹.

Индексы 1 и 2 относятся к средам, в которых распространяются падающая и прошедшая волны.

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

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

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

Площадь растекания жидкости будет равна:

$$S_{расп} = \pi l^2. \quad (31)$$

Если площадь, занимаемая жидкостью после ее растекания, оказывается недостаточной (т.е. не вся поверхность распыления покрыта жидкостью), то на поверхности распыления необходимо выполнить дополнительные отверстия для подачи жидкости. Эти отверстия должны находиться на расстоянии, не превышающем $2l$ (где l радиус растекшейся капли), Рис. 4.

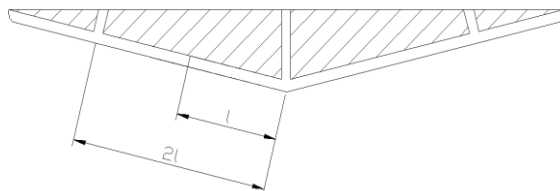


Рис. 4. Расположение отверстий на поверхности распыления

Если значение расстояния $2l$ оказывается большим чем радиус $R_{расп}$ поверхности распыления, то отверстия должны быть выполнены на расстоянии $\frac{R_{расп}}{2}$.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, были получены зависимости для нахождения площади поверхности распыления по заданной производительности распыления, угла наклона $\beta_{расп}$ образующей конической поверхности распыления, количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости на поверхность распыления в

зависимости от заданных параметров распылительной камеры. Соответственно данная методика расчета позволит повысить эффективность и безопасность ультразвуковой распылительной сушики.

БЛАГОДАРНОСТЬ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев В.Н., Шалунов А.В. [и др.] Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности / – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.
- [2] Лыков М.В., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. Основы теории и расчета/ - М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.



Владимир Н. Хмелев (М'00, SM'04)— заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



Андрей В. Шалунов родился в г. Бийске, Россия, 1980. Кандидат технических наук. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – разработка программного обеспечения для ультразвуковых технологических аппаратов.



Анна В. Шалунова родилась в Бийске, Россия, 1986. Она получила степень инженера по специальности «Информационно-измерительная техника и технология» в БТИ в 2008 году. Она является аспирантом первого года обучения БТИ. Областью ее научных интересов является исследование процессов и создание устройств ультразвукового распыления (диспергирования) жидких сред.