

УДК 631.348.45:519.87

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИАМЕТРА КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ

Сидоренко-Николашина Е.Л., к.п.д., доцент

Сидоренко И.Д., ассистент

Лапин Б.П., к.ф.-м.н., ассистент

ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет»

В статье представлена математическая модель рабочего процесса вращающегося распылителя. Описано движение рабочего раствора по поверхности тарельчатого рабочего элемента и рассмотрены силы, действующие на жидкость. Из уравнений математической модели выведена формула для определения диаметра капель, образующихся при различном радиусе тарелок и числа оборотов распылителя.

Ключевые слова: математическая модель, уравнения Навье-Стокса, скорость истечения жидкости, вращающийся распылитель, диаметр капель.

Проблема. Основное влияние на эффективность проведения аэрозольной обработки растений оказывает качество работы распылителей, главным показателем которого является диаметр капель.

Актуальность. Решение практических задач по распыливанию жидкости вращающимся распылителем требует определения радиуса тарелок и числа оборотов рабочего элемента, которые обуславливают диаметр образующихся капель.

Цель. С помощью уравнений математической модели описать процесс движения жидкости по поверхности тарелки и вывести формулу для определения диаметра капель, образующихся при различном радиусе и числе оборотов вращающегося распылителя.

Анализ существующих сведений. При работе распылителя, применяемого на аэрозольном генераторе АГВ-600, рабочий раствор притекает на вращающуюся тарелку из резервуара непрерывным потоком. Поверхность рабочего элемента хорошо смачивается жидкостью. Следовательно, жидкостная плёнка, образующаяся на поверхности тарелки, является сплошной. Для упрощения описания течения жидкостной плёнки по поверхности рабочего элемента, вращающегося с угловой скоростью ω , может быть принята за основу система уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах r, φ, z , которая в предположении осесимметричности течения жидкости имеет вид [1]:

$$\begin{aligned}
 U \frac{\partial U}{\partial r} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial F_r}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \\
 U \frac{\partial V}{\partial r} + W \frac{\partial V}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial F_\phi}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \\
 U \frac{\partial W}{\partial r} + W \frac{\partial W}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial F_z}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

где U , V , W – соответственно радиальная, окружная и осевая составляющие скорости течения жидкости, м/с; η – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; P_r , P_ϕ , P_z – проекции массовых сил на координатные оси, Н/кг; τ – время, с; F_P – давление, Па.

Радиальная составляющая скорости U направлена по радиусу тарелки, окружная V – перпендикулярно радиальной, осевая W – вертикально вниз перпендикулярно радиальной и окружной составляющим, линейная v – по касательной к окружности кромки тарелки. Очевидно, что направление окружной составляющей V и линейной скорости v истечения жидкости совпадают.

Так как движение рабочей жидкости вблизи вращающейся тарелки является установившимся и осесимметричным, то производные по времени и по координате ϕ равны нулю ($\frac{\partial}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$). Массовые силы тоже равны нулю ($P_r = P_\phi = P_z = 0$). В этом случае система уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах принимают вид [2]:

$$\begin{aligned}
 U \frac{\partial U}{\partial r} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial F_r}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \\
 U \frac{\partial V}{\partial r} + W \frac{\partial V}{\partial z} &= \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \\
 U \frac{\partial W}{\partial r} + W \frac{\partial W}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial F_z}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

Будем считать, что радиус рабочего элемента R_T много больше радиуса $R_{ж}$ набегающей на него струи, т.е. $R_T \gg R_{ж}$.

Второе слагаемое первого уравнения системы (2) – центростремительное ускорение, направленное к оси вращающейся тарелки, противоположно движению жидкости.

С ростом текущего значения радиуса R убывают толщина плёнки жидкости $b=b(R)$ и осевая скорость течения W . Ограничимся рассмотрением течения в периферийной части тарелки ($R=R_T$). В пределах этой области толщина плёнки b достаточно мала, радиальная скорость U имеет заметные значения. Осевая составляющая W мала во всём пространстве, поэтому она значительно меньше радиальной U . Тогда (аналогично тому, как это принято в теории пограничного слоя) [3], можно считать изменение скорости течения в направлении оси z более резким, чем в направлении оси r . Так как образование достаточно тонкой пленки возможно только при существенно

малой вязкости жидкости, в уравнениях системы (2) можно пренебречь производными скорости истечения рабочего раствора по r в членах, содержащих вязкость, двумя слагаемыми правой части и выражениями в скобках левой части третьего уравнения, содержащими бесконечно малую осевую скорость W . Из третьего уравнения системы (2) получим выражение (3):

$$\frac{\partial F_P}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Пренебрегая производными по W и считая жидкость невесомой, получим:

$$\frac{\partial F_P}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что на поверхности плёнки давление F_P является постоянной величиной.

Таким образом, при тождественном равенстве нулю третьего уравнения система (2) сводится к двум уравнениям:

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= \eta \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \\ U \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U \cdot v}{r} + W \frac{\partial V}{\partial z} &= \eta \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Граничными являются следующие условия:

- при высоте над уровнем поверхности тарелки $z=0$ радиальная и угловая скорости равны нулю $U=0$ и $W=0$, а линейная скорость движения жидкости определяется по формуле $v=\omega r$;

- при высоте над уровнем поверхности тарелки $z=b(r)$ изменение радиальной и окружной скорости по оси z равно нулю: $\frac{\partial U}{\partial z} = 0$ и $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$.

Результаты исследований. С помощью уравнений Навье-Стокса производится анализ процесса движения жидкости по поверхности вращающегося элемента. Рабочий раствор поступает на тарелки в виде тонких нитей, которые, распространяясь по поверхности, образуют плёнку малой толщины b . В результате преобразований уравнений Навье-Стокса с учётом условий протекания процесса и граничных условий второе уравнение системы (5) полностью обращается в 0, так как оно состоит из слагаемых, содержащих радиальную скорость $U=0$ и бесконечно малую осевую скорость W . В этом случае система (5) сводится к сумме радиального и окружного ускорений на поверхности плёнки, равной нулю:

$$\eta \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{v^2}{R_T} = 0. \quad (6)$$

На рис. 1 представлена схема сил, действующих на каплю, находящуюся на верхней и нижней кромке тарелки горизонтального вращающегося распылителя.

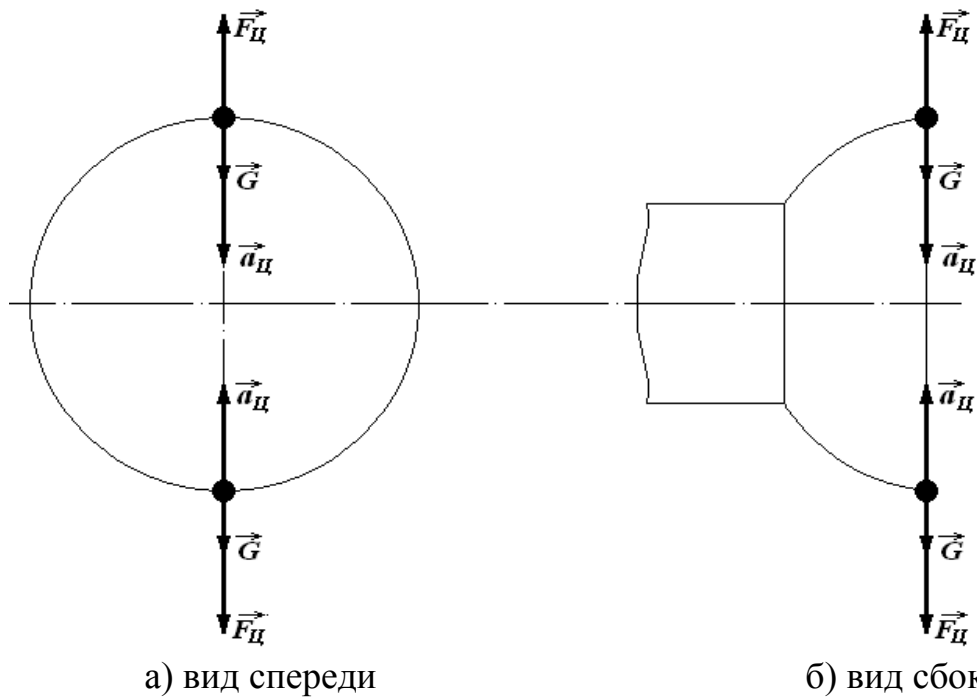


Рис.1. Схема сил, действующих на каплю, находящуюся на кромке вращающейся тарелки

На каплю, находящуюся на кромке тарелки распылителя, вращающегося на горизонтальной оси, действуют сила тяжести G , направленная вертикально вниз, и центробежная сила $F_{ц}$, направленная противоположно центростремительному ускорению $a_{ц} = \frac{v^2}{R_T}$.

Результирующей этих двух сил является возмущающая сила B :

$$B = \frac{\pi d_m^3}{6} \cdot \rho_{ж} \cdot R_T \cdot \omega^2 \pm \frac{\pi d_m^3}{6} \cdot \rho_{ж} \cdot R_T \cdot g = \frac{\pi d_m^3}{6} \cdot \rho_{ж} \cdot (\omega^2 \cdot R_T \pm g). \quad (7)$$

Подставив в выражение (6) значение динамической вязкости ν и центробежной силы $\rho_{ж} R_T \omega^2$, выведем уравнение суммы радиальной и окружной составляющих возмущающей силы:

$$\nu \frac{d^2 U}{dz^2} + \rho_{ж} R_T \omega^2 \cdot \sin \alpha = 0, \quad (8)$$

где z – высота над уровнем поверхности тарелки, м; α – угол между направлением движения жидкости вдоль кромки тарелки и вектором окружной скорости V .

Угловая скорость вращения тарелки ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi n_T}{30}. \quad (9)$$

где n_T – число оборотов распылителя, мин^{-1} .

При этом граничные условия имеют вид:

- радиальная скорость движения жидкости $U=0$ при $z=0$;

- на высоте над уровнем поверхности тарелки $z=b(r)$ изменение радиальной скорости по оси z равно нулю $\frac{\partial U}{\partial z} = 0$.

Первый член выражения (8) – касательное напряжение, равное силе поверхностного натяжения жидкости:

$$S = \pi \cdot d_m \cdot \delta, \quad (9)$$

где δ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Следовательно, на процесс механического распыливания основное влияние оказывают силы поверхностного натяжения S и центробежная $F_{ц}$, взаимодействие которых описывается уравнением [4]:

$$\frac{30}{\pi n_T} \frac{\pi d_m^3 \rho_j R_T^2}{6} = \dots, \quad (10)$$

где d_m – диаметр капли, мкм.

Преобразуем уравнение (10):

$$\frac{30}{\pi n_T} \frac{\pi d_m^3 \rho_j R_T^2}{6} = \dots, \quad (11)$$

Отсюда получаем формулу для вычисления диаметра капель:

$$d_m = \frac{30}{\pi n_T} \sqrt{\frac{6\delta}{\rho_j \cdot R_T}}. \quad (12)$$

Вывод. На основании уравнений математической модели процесса механического распыливания жидкости установлена взаимосвязь между дисперсностью дробления рабочего раствора и параметрами распылителя, в результате чего была выведена формула для расчёта диаметра капель, образующихся при различном радиусе и числе оборотов тарелок.

Список использованных источников:

1. Коптев А.А. Движение жидкости в центробежных полях / Коптев А.А. – Ч.1. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 240 с.
2. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов - М.: Химия, 1984.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с англ. / Под ред. В.С. Авдеевского и В.Я. Лихущина. – М.: Наука, 1974. – 480 с.
5. Дунский В.Ф. Монодисперсные аэрозоли / Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. – М.: Наука, 1975. – 191 с.

Сидоренко-Ніколашина О.Л., Сидоренко І.Д., Лапін Б.П. Встановлення залежності діаметра крапель рідини від параметрів обертового розпилювача

У статті представлена математична модель робочого процесу обертового розпилювача.

Sidorenko-Nikolashina E.L., Sidorenko I.D., Lapin B.P. Determination of a correlation of the liquid droplet diameter from the rotary atomizer parameters

The article presents a mathematical model of the working process of a rotary atomizer. Described

Описано рух робочого розчину по поверхні тарілчастого робочого елемента і розглянуті сили, що діють на рідину. З рівнянь математичної моделі виведена формула для визначення діаметра крапель, що утворюються при різному радіусі тарілок і числі обертів розпилювача.

Ключові слова: математична модель, рівняння Нав'є-Стокса, швидкість витікання рідини, обертовий розпилювач, діаметр крапель.

movement of the working solution to the working surface of the disc element and examined the forces acting on the fluid. From the equations of the mathematical model derived a formula to determine the diameter of the droplets formed at a different radius and the quantity of revolutions of the discs.

Keywords: mathematical model, the Navier-Stokes equations, the velocity of the fluid, rotary atomizer, the droplet diameter.