УДК 635-134

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСКО-ВЕНТИЛЯТОРНОГО УСТРОЙСТВА С ЗУБЧАТЫМИ ДЕЛИТЕЛЯМИ ПОТОКА ДЛЯ МАЛООБЪЁМНОГО ОПРЫСКИВАНИЯ САДОВ

И. И. ГАВРИЛОВ, В. Г. КОВАЛЕВ, В. И. КЛИМЕНКО

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: DivaName@mail.ru

(Поступила в редакцию 10.07.2026)

В статье представлена физико-математическая модель процесса диспергирования рабочей жидкости в диско-вентиляторном распыливающем устройстве с зубчатыми делителями потока, предназначенном для малообъёмного опрыскивания плодовых садов. Модель описывает двухступенчатое формирование аэрозоля: гидродинамику течения тонкой плёнки на вращающемся диске с её принудительной сегментацией делителями и последующий аэродинамический перенос капель воздушным потоком. На основе баланса центробежных, вязких и капиллярных сил получены аналитические зависимости толщины плёнки на диске и медианно-массового диаметра капель, которые учитывают геометрические параметры зубьев делителя – угол наклона наружного ребра, высоту зуба и радиус диска. Показано, что применение зубьев в форме усечённой треугольной пирамиды позволяет уменьшить эффективный диаметр жидких лигаментов и снизить полидисперсность распыла. Расчётным путём определены конструктивно-режимные параметры устройства, обеспечивающие получение капель с медианно-массовым диаметром 150–250 мкм, что соответствует агротехническим требованиям малообъёмного опрыскивания. Установлено, что для формирования капель со средним диаметром 200 мкм необходимы угол наклона наружного ребра зуба 30°, расход жидкости 0,7 л/с, угловая скорость диска 200 рад/с и радиус диска 0,15 м. Анализ движения капель в воздушном потоке показал, что вторичное дробление отсутствует, а гравитационное осаждение на расстоянии 2 м не превышает 7 см, что гарантирует проникновение аэрозоля вглубь кроны. Теоретический коэффициент вариации размера капель составил около 10,3 %, что удовлетворяет требованиям равномерности обработки (не более 25 %). Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для инженерного проектирования и оптимизации параметров диско-вентиляторных опрыскивателей.

Ключевые слова: *диско-вентиляторное устройство, малообъёмное опрыскивание, центробежное распыление, зубчатый делитель.*

This article presents a physical and mathematical model of the working fluid dispersion process in a disc-fan atomizing device with toothed flow dividers, designed for low-volume orchard spraying. The model describes a two-stage aerosol formation: the hydrodynamics of a thin film flow on a rotating disk with its forced segmentation by the dividers, and the subsequent aerodynamic transfer of droplets by the airflow. Based on the balance of centrifugal, viscous, and capillary forces, analytical relationships were obtained for the film thickness on the disk and the median-mass diameter of droplets. These relationships take into account the geometric parameters of the divider teeth, including the inclination angle of the outer edge, the tooth height, and the disk radius. It was shown that the use of truncated triangular pyramid-shaped teeth reduces the effective diameter of liquid ligaments and reduces spray polydispersity. Calculations were used to determine the design and operating parameters of the device, ensuring the production of droplets with a median-mass diameter of 150–250 μm, which meets the agronomic requirements of low-volume spraying. It was found that to form droplets with an average diameter of 200 μm, an outer tooth angle of 30°, a fluid flow rate of 0.7 l/s, a disk angular velocity of 200 rad/s, and a disk radius of 0.15 m are required. Analysis of droplet movement in the airflow revealed that secondary fragmentation is absent, and gravitational settling at a distance of 2 m does not exceed 7 cm, ensuring aerosol penetration deep into the canopy. The theoretical droplet size variation coefficient was approximately 10.3 %, satisfying the requirement for uniform application (no more than 25 %). The obtained analytical relationships can be used for engineering design and optimization of disc-fan sprayers.

Key words*: disc-fan device, low-volume spraying, centrifugal spraying, tooth divider.*

Введение

Химическая защита плодовых садов остаётся наиболее распространённым способом борьбы с болезнями и вредителями. Перспективным направлением совершенствования технологии является переход от полнообъёмного опрыскивания (расход рабочей жидкости 700–1000 л/га) к малообъёмному (100–700 л/га) и ультра-малообъёмному (25–100 л/га), которые обеспечивают более высокую равномерность покрытия, снижение потерь препарата из-за стекания и меньшую экологическую нагрузку на окружающую среду [1, 2]. Для реализации этих способов необходимы распыливающие устройства, формирующие монодисперсный аэрозоль с размером капель 150–300 мкм [1]. Среди существующих технических решений выделяются диско-вентиляторные опрыскиватели, сочетающие центробежное дробление жидкости вращающимся диском и транспортировку капель воздушным потоком [3].

Фундаментальные основы центробежного распыления заложены в работах A. H. Lefebvre, V. G. McDonell [4], где процесс рассмотрен с позиций баланса сил и безразмерных критериев подобия – чисел Рейнольдса, Вебера и Онезорга. Исследования В. А. Вялых [5], Р. Г. Сафиуллина [6], Д. О. Хорта [7] показали эффективность дисковых распылителей с зубчатой периферией для получения мелкодисперсного распыла. Однако существующие теоретические модели описывают главным образом гладкий диск, либо не учитывают специфику двухступенчатого дробления жидкости с при-

менением внутреннего и внешнего зубчатых делителей потока, как это реализовано в конструкции, защищённой патентом РБ № 13550 [8]. В частности, отсутствуют аналитические зависимости, связывающие геометрию зубьев делителей (угол наклона, высоту, шаг) и режимные параметры (расход жидкости, угловую скорость) с медианно-массовым диаметром капель и равномерностью их распределения. Это затрудняет целенаправленное проектирование подобных устройств.

Цель настоящей работы – разработка физико-математической модели процесса центробежного диспергирования жидкости в диско-вентиляторном устройстве с зубчатыми делителями и теоретическое обоснование его конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих получение аэрозоля с характеристиками, соответствующими агротехническим требованиям малообъёмного опрыскивания садов.

Основная часть

Объектом исследования являлось диско-вентиляторное распыливающее устройство [8], в котором рабочая жидкость подаётся на вращающийся диск, растекается под действием центробежной силы, проходит последовательно внутренний и наружный кольцевые зубчатые делители и в виде капель сходит с кромки диска, где подхватывается воздушным потоком осевого вентилятора и транспортируется к кроне деревьев. Зубья делителей имеют форму усечённой треугольной пирамиды с углом наклона наружного ребра β к плоскости диска.

Теоретический анализ включал два основных этапа: моделирование течения и распада плёнки жидкости на вращающемся диске с учётом геометрии зубчатых делителей и анализ движения сформированных капель в радиальном по отношению к оси вращения диска воздушном потоке. При моделировании использовались уравнения гидродинамики тонких плёнок в цилиндрической системе координат, теория капиллярного распада Рэлея-Вебера и методы механики многофазных сред. Свойства жидкости принимались соответствующими типичным водным растворам пестицидов: плотность $\rho_ж = 1000$ кг/м^3, динамическая вязкость $\mu_ж = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с), коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_ж = 0{,}072$ кг/с^2.

Гидродинамика плёнки и формирование лигаментов.

При установившемся ламинарном течении тонкой плёнки по вращающемуся диску основными силами являлись центробежная сила $\vec{F}_{цб}$:

$$\vec{F}_{цб} = \rho_ж \cdot \omega_д^2 \cdot r_д \cdot \vec{e_r}, \quad (1)$$

где $\rho_ж$ – плотность жидкости, кг/м^3; $\omega_д$ – угловая скорость диска, рад/с; $r_д$ – текущий радиус (расстояние от оси вращения до рассматриваемой точки), м; $\vec{e}_r$ – единичный радиальный вектор (от центра к периферии диска), безразмерный.

Сила вязкого трения, характеризуемая касательным напряжением:

$$F_{вяз} = \mu_ж \cdot \left.\frac{dv_r}{dz}\right|_{z=0}, \quad (2)$$

где $\mu_ж$ – динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с); v_r – радиальная скорость движения жидкости, м/с; z – координата по нормали к поверхности диска (толщина пленки), м; dv_r/dz – градиент скорости (изменение радиальной скорости движения жидкости при удалении от поверхности диска), с$^{-1}$.

Влиянием гравитации и силы Кориолиса пренебрегали ввиду их малости по сравнению с центробежным ускорением [4].

Интегрирование уравнения Навье-Стокса для радиальной компоненты скорости при граничных условиях отсутствия скольжения на диске и отсутствия касательного напряжения на свободной поверхности позволило получить параболический профиль скорости и среднюю радиальную скорость. Из условия постоянства объёмного расхода $Q_ж$ (м^3/с) вывели зависимость толщины плёнки $\delta_п$ от текущего радиуса:

$$\delta_п(r_д) = \left(\frac{3 Q_ж \mu_ж}{2\pi \cdot \rho_ж \cdot \omega_д^2 \cdot r_д^2} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

На периферии диска ($r_д = R_д$) толщина плёнки минимальна и определяется выражением:

$$\delta_п(R_д) = \left(\frac{3 Q_ж \cdot \mu_ж}{2\pi \cdot \rho_ж \cdot \omega_д^2 \cdot R_д^2} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где $R_д$ – радиус диска, м.

Внутренний зубчатый делитель, расположенный на радиусе $R_{вд} = R_д - b$, принудительно сегментирует сплошную плёнку на отдельные лигаменты, число которых равно эффективному числу зубьев $N_{эф} = k_{зап}N_з$, где $k_{зап} = 0{,}85…0{,}95$ – коэффициент заполнения. Расход через один лигамент составлял $q_ж = Q_ж/N_{эф}$. Эффективный диаметр лигамента $d_{л\ эф}$ на выходе из межзубового канала, имеющего треугольное поперечное сечение, определяли из равенства площади заполненного сечения $S_{вых\ л} = (\delta_л(R_д))^2/\tan\beta$ и площади круглого сечения:

$$d_{л\ эф} = \frac{2\left[\delta_л(R_д)\right]}{\sqrt{\pi \cdot \tan\beta}}, \quad (5)$$

где β – угол наклона наружного ребра зуба к плоскости диска, рад; $\delta_л(R_д)$ – толщина лигамента на радиусе $R_д$, м, которая с достаточной точностью может быть принята равной $\delta_п(R_д)$.

Медианно-массовый диаметр капель. Сходящий с кромки диска лигамент неустойчив относительно капиллярных возмущений. Длина волны, соответствующая максимальной скорости роста возмущений по теории Рэлея-Вебера определяли как:

$$\lambda_{opt} = \pi \cdot d_л \sqrt{2}\left(1 + Oh\right)^{1/2}, \quad (6)$$

где λ_{opt} – оптимальная длина волны (расстояние между центрами будущих капель вдоль струи), м; $d_л$ – диаметр лигамента, м; $Oh = \mu_ж/(\rho_ж \cdot \sigma_ж \cdot d_{л\ эф})^{1/2}$ – число Онезорга [4].

Из баланса объёмов лигамента и образующихся капель $d_к^3 = 1{,}5 \cdot d^2_{л\ эф} \cdot \lambda_{opt}$ с учётом классического коэффициента 1,88 получили итоговое выражение для медианно-массового диаметра капли:

$$Dv0.5 = \frac{3{,}76 \cdot \left[\delta_л(R_д)\right]}{\sqrt{\pi \cdot \tan\beta}}\left(1 + \frac{3\mu_ж\left(\pi \cdot \tan\beta\right)^{1/4}}{\sqrt{\rho_ж \cdot \sigma_ж \cdot 2\left[\delta_л(R_д)\right]}}\right)^{1/6}, \quad (7)$$

Выражение 7 устанавливает прямую аналитическую связь между конструктивно-режимными параметрами ($Q_ж$, $\omega_д$, $R_д$ через $\delta_л$, а также β) и выходной характеристикой аэрозоля.

Обоснование параметров. С использованием выражения 7 выполнены поисковые теоретические исследования для обеспечения попадания $Dv0.5$ в агротехнически требуемый диапазон 150–250 мкм. При фиксированной толщине лигамента 70 мкм варьирование угла β от 15° до 45° показало, что увеличение β ведёт к монотонному уменьшению диаметра капель (табл. 1). При β = 30° $Dv0.5 \approx$ 196,5 мкм, что является серединой целевого интервала.

Таблица 1. **Влияние угла наклона ребра зуба на $Dv0.5$ ($\delta_л$ = 70 мкм)**

β, град	15	20	25	30	35	40	45
$Dv0.5$, мкм	288,2	247,3	218,6	196,5	178,5	163,1	149,4

При фиксированном β = 30° возрастание толщины лигамента с 55 до 90 мкм вызывает линейный рост диаметра капель (табл. 2).

Таблица 2. **Влияние толщины лигамента на $Dv0.5$ (β = 30°)**

$\delta_л$, мкм	55	60	65	70	75	80	85	90
$Dv0.5$, мкм	154,5	168,5	182,5	196,5	210,5	224,5	238,5	252,3

Толщина лигамента 70 мкм достигается при следующих сочетаниях параметров: $Q_ж = 7 \cdot 10^{-4}$ м³/с (0,7 л/с), $\omega_д$ = 200 рад/с (1910 об/мин), $R_д$ = 0,15 м. При этом числа Рейнольдса и Вебера находятся в допустимых пределах ($Re < 2 \cdot 10^3$, We = 10–50), гарантируя ламинарный режим течения и устойчивый капельный распад. Расстояние от внутреннего делителя до кромки диска $b \approx$ 0,025–0,045 м обеспечивает сплошность плёнки до её встречи с внутренним делителем.

Движение капель в воздушном потоке. Сформированные капли с начальной скоростью $v_д = \omega_д \cdot R_д \approx 30$ м/с попадают в сонаправленный движению капель воздушный поток со скоростью 20–40 м/с. Число Вебера, рассчитанное по относительной скорости $\Delta v \approx 10$ м/с и диаметру 200 мкм, составляет $We = \rho_в \cdot (\Delta v)^2 \cdot Dv0.5/\sigma_ж \approx 0{,}33$, что значительно ниже критического значения $We_{кр} \approx$ 10–12 [4]. Следовательно, вторичного дробления капель не происходит, и размер капель, определённый по выражению 7, является окончательным.

Время релаксации капли $\tau_к = \rho_ж \cdot Dv0.5^2/(18\mu_в) \approx 0{,}12$ с, поэтому капли быстро приобретают скорость воздуха. При расстоянии до кроны 2 м и средней скорости воздуха 30 м/с время полёта $t_к$ = 0,06 с, а гравитационное осаждение $h_к$ = 0,07 м (7 см), что намного меньше высоты кроны (2–3 м). Таким образом, капли эффективно транспортируются вглубь насаждений.

Оценка равномерности распределения капель по размеру дала значение коэффициента вариации $CV \approx 10{,}3$ %, что удовлетворяет агротехническому требованию $CV \leq 25$ % [1].

Заключение

1. Разработана физико-математическая модель центробежного диспергирования жидкости в диско-вентиляторном устройстве с зубчатыми делителями потока, которая в отличие от известных учитывает влияние геометрии делителей (угла наклона β) на эффективный диаметр лигаментов и медианно-массовый диаметр капель.

2. Получены аналитические зависимости толщины плёнки на диске (4) и медианно-массового диаметра капель (7), позволяющие по заданным конструктивно-режимным параметрам ($Q_ж$, $\omega_д$, Rд, β) прогнозировать дисперсность аэрозоля.

3. Теоретически обоснованы рациональные параметры устройства: расход жидкости 0,7 л/с, угловая скорость диска 200 рад/с, радиус диска 0,15 м, угол наклона зуба 30°. При этих параметрах медианно-массовый диаметр капель составляет 196,5 мкм, что соответствует середине агротехнически требуемого диапазона 150–250 мкм.

4. Доказано, что при сонаправленном движении капель и воздушного потока вторичное дробление отсутствует, а гравитационное осаждение не превышает 7 см на дистанции 2 м, что обеспечивает проникновение аэрозоля вглубь кроны.

5. Расчётный коэффициент вариации размера капель составил 10,3 %, что удовлетворяет нормативу равномерности обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопенко, С. Ф. Малообъёмное опрыскивание сельскохозяйственных культур / С. Ф. Прокопенко, В. В. Ченцов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 62 с.

2. Никитин, Н. В. Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве / Н. В. Никитин, Ю. Я. Спиридонов, В. Г. Шестаков. – М.: Печатный Город, 2010. – 200 с.

3. Утков, Ю. А. Технологические и технические требования к сельскохозяйственным опрыскивателям / Ю. А. Утков, В. В. Бычков, В. М. Дринча. – М.: ВСТИСП, 2015. – 186 с.

4. Lefebvre, A. H. Atomization and Sprays / A. H. Lefebvre, V. G. McDonell. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 284 p.

5. Вялых, В. А. Совершенствование и разработка технологий и технических средств защиты растений: автореф. дис. … д-ра техн. Наук / В. А. Вялых. – Зерноград, 2006. – 46 с.

6. Сафиуллин, Р. Г. Моделирование каплеобразования при диспергировании жидкости пористыми вращающимися распылителями: дис. … канд. техн. наук / Р. Г. Сафиуллин. – Казань, 2000. – 168 с.

7. Хорт, Д. О. Цифровые технологические и технические решения для интенсивного садоводства: дис. … д-ра техн. наук / Д. О. Хорт. – 2022. – 452 с.

8. Полезная модель BY № 13550 U, МПК B 05B 3/02, B 05B 3/12. Дисковый узел для распыления жидкого вещества / Клименко В. И., Гаврилов И. И., Печкуров С. В. – Опубл. 05.09.2024.