

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ДИСКОВЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

Д. А. МИХЕЕВ, ЧЖАН ЮН

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 26.09.2025)

*Предпосевная обработка семян значительно влияет на получаемый урожай сельскохозяйственных культур. Использование современных, эффективных способов предпосевной обработки семян обеспечивает получение хорошего урожая. Современным и высокоэффективным способом предпосевной обработки семян является способ создания искусственной оболочки на семенах: протравливание, инкрустирование, дражирование. Для получения равномерной и однородной оболочки на семенах необходимо выбрать оптимальные режимы работы используемого оборудования (протравливателя, инкрустатора, дражирователя). Для нанесения жидких компонентов различной вязкости на семена целесообразно применять центробежные дисковые распылители.*

*Центробежные дисковые распылители широко используются в процессах создания искусственных оболочек на поверхности семян, при протравливании, инкрустации и дражировании. Эффективность распыления жидкого компонента напрямую влияет на качество получаемых семян с оболочкой и энергопотребление, а также оно зависит от множества факторов, включая конструктивные параметры диска, рабочие параметры оборудования и свойства наносимой жидкости. Для повышения эффективности создания искусственных оболочек на поверхности семян, а также эффективности распыления центробежным дисковым распылителем жидких компонентов, являющегося одним из основных элементов оборудования для создания искусственных оболочек, в данной работе исследована математическая модель размера капель жидкого компонента от параметров центробежного дискового распылителя. Определена взаимосвязь эффективности распыления от таких параметров, как радиус диска, скорость вращения диска, расхода жидкости, количество лопастей. Определено влияние этих параметров на размер капель. Результаты проведенных исследований определяют направления оптимизации каждого параметра дискового распылителя и предлагается теоретическая основа для проектирования центробежных дисковых распылителей.*

**Ключевые слова:** искусственная оболочка, дисковый распылитель, семена, распыление, капли.

*Pre-sowing seed treatment significantly impacts the yield of agricultural crops. Using modern, effective pre-sowing seed treatment methods ensures good yields. A modern and highly effective pre-sowing seed treatment method involves creating an artificial seed coating: seed dressing, encrusting, and pelleting. To achieve a uniform and homogeneous seed coating, it is necessary to select the optimal operating modes for the equipment used (seed dressing, encrusting, and pelleting). Centrifugal disc atomizers are recommended for applying liquid components of varying viscosities to seeds. Centrifugal disc atomizers are widely used in the creation of artificial seed coatings, including dressing, encrustation, and pelleting. Liquid component atomization efficiency directly impacts the quality of the resulting coated seeds and energy consumption, and depends on numerous factors, including the disk design, equipment operating parameters, and the properties of the applied liquid. To improve the efficiency of creating artificial seed coatings, as well as the efficiency of spraying liquid components using a centrifugal disc atomizer, a key component of artificial seed coating equipment, this paper examines a mathematical model of liquid component droplet size as a function of centrifugal disc atomizer parameters. The relationship between atomization efficiency and parameters such as disk radius, disk rotation speed, liquid flow rate, and number of blades is determined. The influence of these parameters on droplet size is also determined. The results of the study identify areas for optimization of each disk atomizer parameter and propose a theoretical basis for the design of centrifugal disc atomizers.*

**Key words:** artificial casing, disc atomizer, seeds, spraying, drops.

### Введение

Для получения высокого урожая хорошего качества необходимо использовать современные, высокоэффективные способы предпосевной обработки семян. Одним из таких способов является способ создания искусственной оболочки на поверхности семян – дражирование.

Технология создания искусственных оболочек на поверхности семян (инкрустирование и дражирование) имеет большой потенциал в повышении урожайности многих сельскохозяйственных культур. Недостаток микро- и макроэлементов в почве компенсируется искусственным их нанесением на поверхность семян. Наиболее актуальна такая обработка для семян, имеющих небольшую норму высева, таких как рапс, свекла, кукуруза и др. [2, 7, 8, 10].

Для получения качественных дражированных семян необходимо использовать эффективное оборудование позволяющее создавать равномерную оболочку на семенах. При использовании технологии постепенного наслаивания оболочки, важным этапом в процессе создания искусственной оболочки является этап распыления связующей жидкости [1, 2]. От равномерности нанесения жидкости на семена зависит качество получаемого семенного драже. В процессе дражирования жидкость распыляется на мелкие капли, которые прилипают к поверхности семян. Затем добавляется сухой порошок. Поскольку поверхность семян влажная, порошок прилипает к поверхности семян, образуя слой искусственной оболочки на поверхности семени [1, 2].

Для распыления жидкости в процессе создания искусственных оболочек применяются различные технологии. Наиболее универсальной и эффективной технологией распыления жидкости является использование вращающегося диска [3, 9].

Технология центробежного распыления преобразует жидкость в мелкие капли с помощью высокоскоростного вращающегося диска. Ее основное преимущество заключается в том, что для процесса распыления не требуется создавать высокое давление в подающем трубопроводе, что позволяет эффективно избегать проблемы засорения распылителей, характерной для традиционного распыления под давлением. Изменяя скорость диска, можно точно контролировать размер капель. Кроме этого, центробежный диск позволяет распылять вязкие жидкости [2, 3, 9].

Исследование закономерностей влияния конструктивных параметров центробежного диска и режимов его работы на размер капель жидкости является важным этапом в определении оптимальных параметров работы оборудования и достижении максимально качественных дражированных семян.

В данной статье изучена математическая модель распыления жидкости с оценкой влияния различных параметров на качество распыления для оптимизации оборудования.

В УО БГСХА был разработан экспериментальный дражиратор семян, позволяющий применять способ постепенного насаивания оболочки и создавать дражированные семена различных сельскохозяйственных культур. На экспериментальном дражираторе были получены дражированные семена сахарной свеклы, рапса и др. культур [2, 4, 5, 6]. Для получения качественных дражированных семян в дражираторе необходимо определить оптимальные конструктивно-технологические параметры и режимы его работы. Кроме этого, в процессе эксплуатации оборудования необходимо проводить эргономические изменения и его оптимизацию.

Для построения математической модели распыления жидкости центробежным дисковым распылителем, основанной на инженерной практике и методах обработки гидромеханики, были определены следующие принципы [9]:

1. Жидкость является несжимаемой ньютоновской жидкостью, то есть плотность жидкости остается постоянной на протяжении всего процесса течения и не меняется во времени и пространстве, что обеспечивает сохранение массы жидкости в модели и служит основой для последующего анализа эффекта распыления.

2. Поскольку метод распыления дискового распылителя – центробежный, центробежная сила является основной движущей силой в процессе распыления. Поэтому влияние поверхностного натяжения и вязкости жидкости не учитывается в процессе анализа. Однако в реальном процессе распыления поверхностное натяжение и вязкость жидкости являются объективными и влияют на эффект распыления. Чтобы сделать созданную математическую модель более соответствующей фактическому распылению, в окончательную модель необходимо ввести поправочный коэффициент. Поправочный коэффициент – это параметр, который учитывает влияние таких неучтенных факторов, как поверхностное натяжение и вязкость. Он корректирует математическую модель, чтобы приблизить результаты прогнозирования модели к фактическому эффекту распыления.

3. Жидкость равномерно распределена в центральной области, с равными расходами в каждом канале лопасти, что позволяет избежать помех в модели, вызванных смещенным потоком. Более того, поток в канале лопасти стабилен. Величина и направление скорости в каждой точке пространства зависят только от пространственного положения.

4. Поскольку центробежное ускорение, возникающее в процессе распыления, значительно превышает ускорение свободного падения, влияние силы тяжести на траекторию жидкости и процесс распыления минимально, поэтому влиянием силы тяжести пренебрегаем.

После того, как жидкость поступает в центр диска с постоянным расходом через трубку для подачи жидкости, она сначала образует кольцевую пленку жидкости в горизонтальном сечении центра диска. При вращении диска с постоянной угловой скоростью жидкость под действием центробежной силы инерции движется к краю. Достигнув лопастей, она разделяется лопастями на несколько потоков, которые поступают в веерообразные каналы. В горизонтальной области поток жидкости ускоряется радиально вдоль каналов лопастей. При этом высота лопасти остается постоянной, а площадь сечения потока изменяется только в зависимости от радиального положения. При входе в наклонную область высота лопасти постепенно увеличивается в зависимости от радиального положения благодаря наклону наружу верхней и нижней кромок диска. Кроме того, наклон лопастей создает определенный угол с горизонтальной плоскостью, сообщая потоку жидкости осевую составляющую скорости. Внутри канала поток жидкости непрерывно испытывает действие центробежной силы, накапливая кинетическую энергию. Достигнув края диска, скорость потока постепенно увеличивается в радиальном направлении до максимального значения. Когда поток жидкости отходит от края диска, дисбаланс между инерцией и поверхностным натяжением приводит к дроблению жидкости. Перво-

начально образовавшиеся нити жидкости под действием сопротивления воздуха распадаются на капли, в конечном итоге образуя облако капель [3, 9].

### Основная часть

Нами предлагается теоретический метод исследования влияния конструктивных и динамических параметров дискового распылителя для их оптимизации с целью получения качественного распыла в процессе создания искусственных оболочек на поверхности семян.

На рис. 1 представлен центробежный дисковый распылитель, который имеет радиус  $R$  и толщину  $a$  во всех сечениях. Во время работы он вращается вокруг центральной оси со скоростью  $\omega$ . Он имеет двухслойную структуру: центральные области верхнего и нижнего дисков горизонтальны, разделены расстоянием  $h$  и имеют радиус  $r$ . Края дисков наклонены наружу, образуя угол  $\alpha$  с горизонтальной плоскостью.  $n$  наклонных лопаток равномерно распределены между двумя дисками, образуя веерообразный проточный канал под углом  $\beta$  к горизонтальной плоскости. Впускное отверстие для жидкости расположено в центре верхнего диска, через который жидкость протекает с расходом  $U$ . После попадания в центральную область через канал она ускоряется вдоль веерообразного проточного канала под действием центробежной силы, в конечном итоге распыляясь по краям с образованием однородных капель.

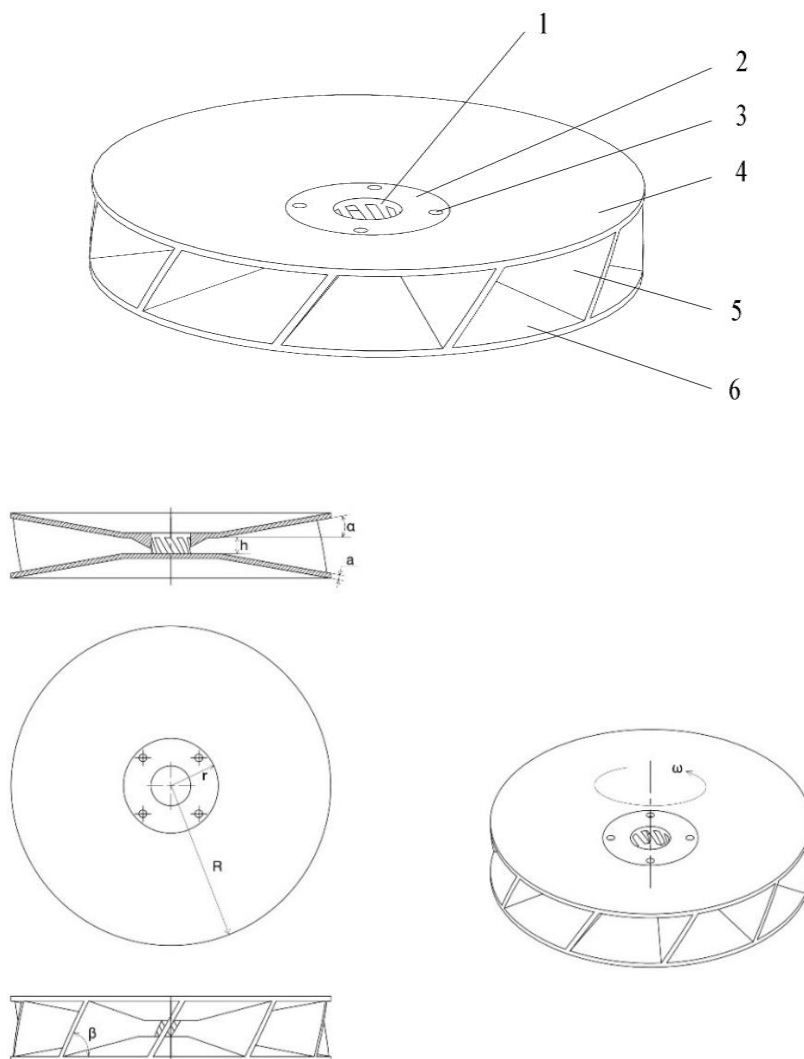


Рис. 1. Принципиальная схема центробежного дискового распылителя

1 – входное отверстие для жидкости; 2 – центральная горизонтальная зона; 3 – отверстия для крепления диска;  
4 – верхний диск; 5 – наклонные лопасти; 6 – нижний диск

### Анализ изменения высоты лопасти

Поскольку только центральный радиус  $r$  верхнего и нижнего дисков горизонтален, а края наклонены наружу под углом  $\alpha$  к горизонтали, высота лопасти, между двумя дисками, меняется.

В горизонтальной области с радиусом  $r' \leq r$  высота лопасти постоянна и обозначается как  $b_0$ .

В наклонной области с радиусом  $r' > r$  высота лопасти изменяется в зависимости от радиуса и обозначается как  $b(r')$ . Исходя из геометрических соотношений, выражение для высоты лопасти  $b(r')$  имеет вид:

$$b(r') = b_0 + 2(r' - r) \tan \alpha \quad (1)$$

где  $r'$  – радиальная координата положения, м.

*Расчет площади проходного сечения канала лопастей*

Канал лопастей имеет веерообразную форму поперечного сечения, и его структурные параметры играют ключевую роль в пропускной способности жидкости. В процессе работы распылителя количество и угол наклона лопаток напрямую влияют на радиальную ширину канала лопастей, траекторию потока жидкости и эффективность потока. Поэтому необходимо всесторонне рассмотреть и рассчитать площадь проходного сечения канала лопастей.

Поскольку канал лопасти имеет веерообразную форму поперечного сечения, то, учитывая угол  $\beta$  между лопастью и горизонтальной плоскостью, исходя из геометрических характеристик диска, можно узнать, что радиальная ширина  $s$  канала определяется числом лопаток  $n$ , то есть  $s = 2\pi r' \frac{\sin(\pi/n)}{n}$ .

В горизонтальной области с радиусом  $r' \leq r$  эффективная площадь поперечного сечения потока жидкости  $A_{r1}$  равна:

$$A_{r1} = b_0 s \cos \beta = \frac{2b_0 \pi r' \sin(\pi/n) \cos \beta}{n} \quad (2)$$

В наклонной области с радиусом  $r' > r$  эффективная площадь поперечного сечения потока жидкости  $A_{r2}$  равна:

$$A_{r2} = b(r') s \cos \beta = [b_0 + 2(r' - r) \tan \alpha] \frac{2\pi r' \sin(\pi/n) \cos \beta}{n} \quad (3)$$

где  $A_{r1}$  и  $A_{r2}$  – эффективные площади поперечного сечения потока жидкости,  $m^2$ ;  $\cos \alpha$  – косинус угла между лопастью и горизонтальной плоскостью, используемый для изменений площади сечения потока, вызванных наклоном лопасти.

*Моделирование дисковых распылителей с помощью уравнения неразрывности.*

Уравнение неразрывности, являющееся одним из основных уравнений гидромеханики, основано на законе сохранения массы, который гласит, что при стационарном течении несжимаемой жидкости объёмный расход, протекающий через любое поперечное сечение в единицу времени, остаётся постоянным. В процессе работы центробежного дискового распылителя жидкость поступает в диск через несколько параллельных каналов. Поскольку геометрическая структура и условия входа жидкости в каждый канал согласованы, согласно уравнению неразрывности, расход в каждом канале должен быть одинаковым. Следовательно, можно получить:

$$Q_i = \frac{U}{n \times 60 \times 1000} \quad (4)$$

где  $Q_i$  – объёмный расход через любое поперечное сечение в единицу времени,  $m^3/c$ ;  $U$  – общий расход через инфузионную трубку, л/мин;  $n$  – количество лопастей, шт.

Ограничивая уравнение непрерывности, можно построить более точную математическую модель для анализа производительности распылителя в различных условиях эксплуатации.

В горизонтальной области с радиусом  $r' \leq r$  радиальная скорость потока  $v_{r1}(r')$  равна:

$$v_{r1}(r') = \frac{Q_i}{A_{r1}} = \frac{U}{60000 \cdot 2\pi b_0 r' \sin(\pi/n) \cos \beta} \quad (5)$$

В наклонной области с радиусом  $r' > r$  радиальная скорость потока  $v_{r2}(r')$  равна:

$$v_{r2}(r') = \frac{Q_i}{A_{r2}} = \frac{U}{60000 \cdot 2\pi [b_0 + 2(r' - r) \tan \alpha] r' \sin(\pi/n) \cos \beta} \quad (6)$$

*Анализ центробежных сил и изменения кинетической энергии.*

При высокоскоростном вращении диска жидкость находится в неинерциальной системе отсчёта. Согласно принципу Даламбера, центробежная сила инерции вводится для построения системы равновесия. Для анализа жидкость можно поместить в цилиндрическую систему координат  $(r, \theta, z)$ , где  $r$

– радиальная координата (от оси вращения наружу),  $\theta$  – окружная координата (угол вокруг оси вращения), а  $z$  – осевая координата (перпендикулярная плоскости диска), как показано на рис. 2.

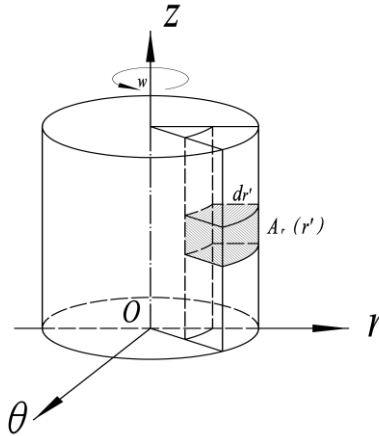


Рис. 2.  $(r, \theta, z)$  цилиндрическая система координат

Сначала проанализируем центробежную силу, действующую на жидкость. В цилиндрической системе координат радиальная толщина элемента жидкости равна  $dr'$ , а площадь сечения потока равна  $A_r(r')$ . В этом случае объём элемента жидкости можно выразить как:

$$dV = A_r(r') dr' \quad (7)$$

где  $dV$  — объём элемента жидкости,  $m^3$ ;  $A_r(r')$  — площадь сечения потока жидкости,  $m^2$ ;  $dr'$  — радиальная толщина элемента жидкости, м.

В это время радиальная центробежная сила  $dF_{cr}$ , действующая на элемент жидкости, равна:

$$dF_{cr} = \rho A_r(r') \omega^2 r' dr' \quad (8)$$

где  $dF_{cr}$  — радиальная центробежная сила, действующая на элемент жидкости, Н;  $\rho$  — плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $\omega$  — угловая скорость диска,  $rad/c$ .

Далее анализируем изменение кинетической энергии. При радиальном движении работа центробежной силы преобразуется в приращение кинетической энергии. Интегрирование радиальной центробежной силы даёт полную работу  $W_c$ .

В горизонтальной области работа центробежной силы  $W_{c1}$  равна:

$$W_{c1} = \int_{r_0}^R \rho A_{r1} \omega^2 r' dr' = \rho \omega^2 \cos \beta \cdot \frac{2\pi b_0 \sin(\pi/n)}{n} \int_{r_0}^R r' \cdot r' dr' = \rho \omega^2 \cos \beta \cdot \frac{2\pi b_0 \sin(\pi/n)}{3n} (R^3 - r_0^3) \quad (9)$$

В наклонной области работа центробежной силы  $W_{c2}$  равна:

$$\begin{aligned} W_{c2} &= \int_r^R \rho A_{r2} \omega^2 r' dr' = \rho \omega^2 \cos \beta \cdot \frac{2\pi \sin(\pi/n)}{n} \int_r^R [b_0 + 2(r'-r) \tan \alpha] r' \cdot r' dr' = \\ &= \rho \omega^2 \cos \beta \cdot \frac{2\pi \sin(\pi/n)}{n} \left[ \int_r^R b_0 r'^2 dr' + 2 \tan \alpha \int_r^R r'^3 dr' - 2r \tan \alpha \int_r^R r'^2 dr' \right] = \\ &= \rho \omega^2 \cos \beta \cdot \frac{2\pi \sin(\pi/n)}{n} \left[ \frac{b_0}{3} (R^3 - r^3) + \frac{\tan \alpha}{2} (R^4 - r^4) - \frac{2r \tan \alpha}{3} (R^3 - r^3) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

где  $r_0$  — начальный радиус жидкости, поступающей в канал лопатки (Радиус впуска жидкости), м;  $W_{c1}$  — работа центробежной силы в горизонтальной области, Дж;  $W_{c2}$  — работа центробежной силы в наклонной области, Дж.

Тогда полная центробежная работа  $W_c$  равна:

$$W_c = W_{c1} + W_{c2} \quad (11)$$

Согласно теореме о кинетической энергии, работа, совершаемая центробежной силой, равна изменению кинетической энергии, то есть:

$$W_c = \Delta E_k = \frac{1}{2} \rho (v_R^2 - v_{r0}^2) \int_{r_0}^R A_r(r') dr' \quad (12)$$

где  $v_R$  – скорость жидкости на краю диска, м/с;  $v_{r0}$  – начальная радиальная скорость, м/с.

Поскольку начальная радиальная скорость потока  $v_{r0} \ll v_R$ , можно приближённо считать, что  $v_{r0} \approx 0$ . В этом случае формулу (12) можно упростить до:

$$W_c = \frac{1}{2} \rho v_R^2 \int_{r_0}^R A_r(r') dr' \quad (13)$$

#### *Характеристика эффекта распыления и создание модели*

Размер капли является основным показателем для измерения эффекта распыления. Ее размер зависит от кинетической энергии и поверхностной энергии жидкости на краю диска. Эта зависимость связана с центробежной силой, площадью сечения потока и расходом, полученными выше.

Когда жидкость отрывается от края диска, кинетическая энергия движущейся с высокой скоростью жидкости преодолевает поверхностное натяжение и приводит к её разрыву. Этот процесс можно рассматривать как преобразование кинетической энергии в поверхностную энергию капли.

Если предположить, что масса капли равна  $m$ , то её кинетическая энергия  $E_k$  на краю диска равна:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_R^2 \quad (14)$$

В процессе распыления жидкости увеличение площади поверхности после распыления составляет  $\Delta A$ , а увеличение ее поверхностной энергии  $E_s$  составляет:

$$E_s = \sigma \Delta A \quad (15)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;  $\Delta A$  – Увеличение площади поверхности жидкости после распыления, м<sup>2</sup>.

Согласно закону сохранения энергии, энергия жидкости до и после распыления остаётся неизменной, то есть кинетическая энергия  $E_k$  жидкости до распыления равна приращению поверхностной энергии  $E_s$  после распыления. Можно установить следующее уравнение:

$$\frac{1}{2} m v_R^2 = \sigma \Delta A \quad (16)$$

Когда жидкость существует в виде сплошной жидкой пленки или жидких нитей на краю диска, можно предположить, что площадь поверхности жидкости в исходном состоянии относительно мала (например, если жидкость образует кольцевую жидкую пленку на краю диска, то ее площадь поверхности пренебрежимо мала по сравнению с общей площадью поверхности большого числа капель, образующихся при последующем дроблении).

При дроблении жидкости на капли общая площадь поверхности значительно увеличивается. Это увеличение представляет собой прирост площади поверхности после распыления. Поскольку начальная площадь поверхности пренебрежимо мала, прирост площади поверхности после распыления приблизительно равен сумме площадей поверхностей всех капель. Если предположить, что капли, образующиеся при дроблении жидкости на краю диска, имеют сферическую форму, диаметр всех капель равен  $d$ , а количество капель равно  $N$ , то общая площадь поверхности после распыления составит  $N\pi d^2$ . Тогда для одной капли прирост площади поверхности после распыления составит  $\Delta A$ :

$$\Delta A = \pi d^2 \quad (17)$$

Его объём  $V$  равен:

$$V = \frac{\pi d^3}{6} \quad (18)$$

Его масса  $m$  равна:

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi d^3}{6} \quad (19)$$

Подставляя формулы (17) и (19) в формулу (16), можно получить:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot v_R^2 = \sigma \cdot \pi d^2 \quad (20)$$

Дальнейшее упрощение даёт:

$$d = \frac{6\sigma}{\rho v_R^2} \quad (21)$$

Объединяя формулы (13) и (21), получаем:

$$d = \frac{6\sigma}{\rho \frac{2W_c}{\rho \int_0^R A_r(r') dr'}} = \frac{3\sigma \int_0^R A_r(r') dr'}{W_c} \quad (22)$$

В то же время, учитывая совокупное влияние угла наклона лопасти  $\beta$  и угла наклона кромки диска  $\alpha$  на течение жидкости и процесс распыления, например, изменение направления потока жидкости и площади сечения потока под углом наклона лопасти, а также влияние угла наклона кромки диска на скорость изменения высоты лопасти, эти факторы отражены в предыдущем выводе высоты лопасти, площади сечения потока и т.д. Чтобы компенсировать отклонение, вызванное игнорированием некоторых факторов в идеальной модели, и приблизить результаты прогнозирования модели к инженерной практике, для количественной оценки этих эффектов вводится поправочный коэффициент  $f(\alpha, \beta)$  (безразмерная величина, полученная путем анализа экспериментальных данных). В конечном итоге математическая модель размера капли, содержащая все ключевые параметры, получается следующим образом:

$$d = \frac{3\sigma f(\alpha, \beta) \int_0^R A_r(r') dr'}{W_{c1} + W_{c2}} \quad (23)$$

где  $f(\alpha, \beta)$  – поправочный коэффициент, комплексный фактор, количественно характеризующий фактическое влияние неучтенных факторов, таких как поверхностное натяжение, вязкость и не идеальность потока, на размер капель. Это гарантирует, что погрешность между рассчитанным по модели размером капель и фактически измеренным значением находится в приемлемых инженерных пределах, обеспечивая более полную корреляцию между структурными параметрами и эффективностью распыления. Более того, применимость модели может быть расширена путем корректировки параметров поправочной функции для жидкостей с различными свойствами (например, растворов покрытий с различными поверхностными натяжениями и вязкостью). Этот коэффициент должен быть определен экспериментальным путем.

Подставляя формулы (9) и (10) в формулу (23), можно получить следующую упрощенную формулу:

$$d = \frac{3\sigma f(\alpha, \beta)(R^2 - r_0^2)}{4\pi\rho\omega^2 \cos\beta \sin(\pi/n) \left[ b_0(r^3 - r_0^3) + \frac{3 \tan\alpha}{2}(R^4 - r^4) - 2r \tan\alpha(R^3 - r^3) \right]} \quad (24)$$

Из анализа формулы (24) видно, что эффект распыления центробежного дискового распылителя (основным показателем которого является размер капель) имеет значительную количественную корреляцию со структурными параметрами, как показано ниже:

- Радиус диска  $R$  – Большой радиус диска удлиняет радиальный путь потока жидкости, увеличивается накопленная работа, совершаемая центробежной силой, жидкость получает большую кинетическую энергию на краю, а капли после дробления становятся мельче.

- Радиус горизонтальной области  $r$ . При увеличении радиуса горизонтальной области увеличивается доля работы, совершаемой в горизонтальной области, и уменьшается размер капель; если  $r$  близок к  $R$ , уменьшается доля наклонной области, ослабевает влияние изменения высоты лопасти на скорость потока и увеличивается размер капель.

- Число лопастей  $n$  – увеличение числа лопастей уменьшит размер капель, но слишком большое значение сузит веерообразный канал и увеличит сопротивление потоку.

- Увеличение угла наклона кромки диска  $\alpha$  – с увеличением  $\alpha$  высота лопасти увеличивается в радиальном направлении, увеличивая площадь сечения потока и уменьшая размер капель. Однако слишком большое значение приведет к чрезмерной осевой скорости жидкости, что увеличит разбрызгивание капель.

- Увеличение угла наклона лопасти  $\beta$  – с увеличением  $\beta$  (т.е. по мере приближения лопастей к вертикали) осевая скорость жидкости увеличивается, радиальная скорость уменьшается, а работа центробежной силы уменьшается, что приводит к увеличению размера капель.

- Начальная высота лопасти  $b_0$  – увеличение начальной высоты лопасти увеличивает площадь горизонтального потока и уменьшает размер капель. Однако, если  $b_0$  слишком велико, площадь горизонтального потока становится избыточной, что ослабляет сопротивление потоку до попадания жид-

кости в каналы лопасти. В этом случае даже незначительные отклонения в положении лопасти могут привести к неравномерному распределению жидкости между различными каналами, что в конечном итоге снижает равномерность распределения размера капель после распыления (капли кажутся слишком крупными в одних областях и слишком мелкими в других).

– Скорость вращения диска  $\omega$  – увеличение скорости вращения диска значительно увеличивает центробежную работу, существенно уменьшая размер капель. Это наиболее чувствительный параметр для управления размером капель. На практике регулировка скорости позволяет быстро и точно контролировать размер капель.

### **Заключение**

Получена зависимость размера капель жидкого компонента от конструктивных и динамических параметров центробежного дискового распылителя путем создания математической модели. Эта модель учитывает такие ключевые параметры, как радиус диска, количество лопастей и угол. Она связывает размер капель с центробежной силой, а также вводит поправочные коэффициенты  $f(\alpha, \beta)$  для компенсации пренебрежения поверхностным натяжением и силами вязкости, точно отражая физические механизмы процесса распыления жидкости.

Размер капель уменьшается с увеличением радиуса диска  $R$ , скорости диска  $\omega$ , количества лопастей  $n$  и горизонтального радиуса  $r$ , и увеличивается с увеличением угла наклона лопастей  $\beta$ . Среди них скорость диска  $\omega$  оказывает наиболее существенное влияние на размер капель и должна рассматриваться как основной параметр для управления рабочими условиями.

В данном исследовании предлагаются направления оптимизации каждого параметра и предоставляется теоретическая основа для проектирования центробежных дисковых распылителей.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Михеев, Д. А. Исследования нанесения жидких компонентов на поверхность семян с помощью дискового распылителя в камере смешивания дражироватора / Д. А. Михеев // Молодежь и инновации – 2015: материалы Междунар. науч.- практ. конф. молодых ученых (г. Горки, 27–29 мая, 2015 г.): в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: П. А. Саскевич [и др.]. – Горки, 2015. – Ч. 2. – С. 243–245.
2. Михеев, Д. А. Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражироватом с лопастным отражателем: монография / Д. А. Михеев; под ред. Д. А. Михеева. – Горки. 2017. – 180 с.
3. Червяков А. В. Динамика движения капли связующей жидкости при ее отрыве с дискового распылителя в камере смешивания дражироватора / А. В. Червяков; С. В. Курзенков; Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2013. – № 1. – С. 119–123.
4. Михеев, Д. А. Инкрустирование семян рапса минеральным составом на основе трепла с добавлением бора / Д. А. Михеев, В. Н. Исаченко // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2021. – № 3. – С. 176–180.
5. Петровец, В. Р. Эффективность дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражироватом / В. Р. Петровец, Д. А. Михеев, В. П. Гнилозуб // Вестн. Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2020. – Т. 58. – № 3. – С. 364–372.
6. Петровец, В. Р. Результаты полевых исследований дражированных семян гречихи органическими удобрениями на основе гуминовых кислот с обоснованием конструктивно-технологических параметров центробежного дражироватом с лопастным отражателем / В. Р. Петровец, Д. А. Михеев // Вестн. Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2018. – Т. 56. – № 3. – С. 357–365.
7. Taylor A G, Amirkhani M, Hill H. Modern seed technology// Agriculture. – 2021. – № 11. – С. 630.
8. Ван Сиси. Гранулирование семян и прогресс в исследованиях / Ван Сиси, Пи Нана, Вэн Цюньфань // Хунаньская сельскохозяйственная наука. – 2024. – № 3. – С. 85–90.
9. Оптимизация конструкции центробежной распылительной форсунки и характеристики осаждения капель / Гао Сюэцин, Ван Дин, Ли Синьдэ, et al // Журнал «Инженерия ирригационных и дренажных машин». – 2023. – № 7 (41) . – С. 749–756.
10. Korakianiti E. S. Rekkas D. M. Dallas P. P, et al. Optimization of the pelletization process in a fluid-bed rotor granulator using experimental design // Aaps Pharmscitech. – 2000. – № 1(4). – С. 35.