

Проведенный теоретический расчет вентиляционной системы и параметров вентилятора позволяет определить требуемую производительность и давление агента сушки для обеспечения оптимальных режимов досушивания и вентилирования слоя зерна.

Выводы

При заданных постоянных значениях параметров вентилятора величина теоретического давления существенно изменяется при постоянной производительности с изменением угла β_2 . При этом лопасти, отогнутые назад ($\beta_2 < \pi/2$), с увеличением производительности вызывают снижение развиваемого теоретического давления, а лопасти, у которых $\beta_2 > \pi/2$, с возрастанием Q_T вызывают увеличение H_T . Для обеспечения одновременного большого объема подачи агента сушки и создания высокого давления для продувания слоя зернового вороха необходимо использовать лопасти, у которых $\beta_2 > \pi/2$.

Литература

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергия, 1977. – 370 с.
2. Шерстюк, А.Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры / А.Н. Шерстюк. – М.: Высшая школа, 1972. – 420 с.
3. Шец, Дж. Процессы вдува и перемешивания / Дж. Шец. – М.: Мир, 1984. – 510 с.
4. Касаткин, А.П. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.П. Касаткин. – М.: Альянс, 2004. – 751 с.

УДК 631.53.01

В.П. Чеботарев, П.М. Немцев
(*РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь*)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
РАБОТЫ ПИТАЮЩЕГО
ВАЛИКА ПРИ ВЕРХНЕЙ
ПОДАЧЕ ЗЕРНА**

Введение

В современных зерноочистительных машинах качественное выделение из зернового вороха легких примесей обеспечивается главным образом пневмосепарирующей системой. Основные факторы и параметры процесса пневмосепарации могут быть определены на основании теоретически разработанной математической модели.

Одними из основных, влияющих на эффективность пневмосепарации, являются факторы, определяющие условия ввода зерновой смеси в канал. Благодаря хорошему распределению зернового вороха в канале, широкое применение в зерноочистительных машинах получили питающие валики. Однако теоретические исследования данного устройства ввода описаны не в полной мере, и для понимания процесса работы питающего валика необходимо проведение более тщательных исследований.

Основная часть

Рассмотрим работу питающего валика с верхней подачей зерна. Схема представлена на рисунке 95. Процесс работы происходит следующим образом. Зерновой материал поступает в желобки питающего валика в четвертом квадранте, затем при повороте валика происходит ввод зернового материала в первом и втором квадрантах.

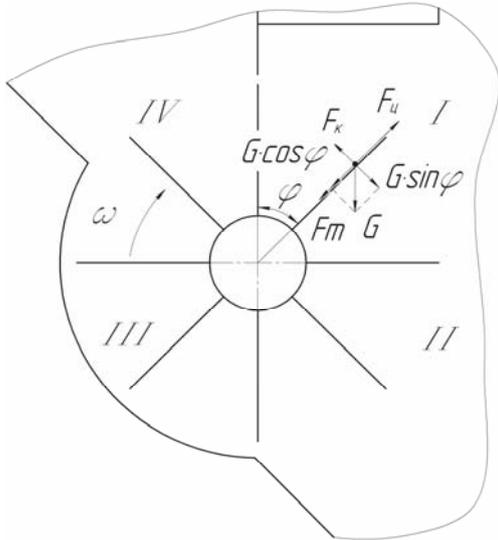


Рисунок 95 – Схема сил, действующих на частицу в питающем валике с верхней подачей зерна

Рассмотрим силы, действующие на частицу, находящуюся в желобках в первом квадранте и движущуюся вдоль лопатки: силу тяжести G , центробежную силу F_u , силу трения F_m , силу Кориолиса F_k . Тогда вектор силы, действующей на частицу, будет равен векторной сумме этих сил, то есть:

$$\vec{F} = \vec{G} + \vec{F}_u + \vec{F}_m + \vec{F}_k. \quad (1)$$

Значения сил определяются по нижеприведенным выражениям.

Сила тяжести:

$$G = m \cdot g, \quad (2)$$

где m – масса частицы, кг;

g – ускорение свободного падения, $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Центробежная сила:

$$F_u = m \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость питающего валика, с^{-1} ;

r – расстояние от оси вращения до центра тяжести частицы, м.

Сила Кориолиса:

$$F_k = 2m \cdot \omega \cdot v_r, \quad (4)$$

где v_r – радиальная скорость движения частицы по лопатке, м/с.

Сила трения:

$$F_m = f \cdot N, \quad (5)$$

где f – коэффициент трения частицы по поверхности лопатки валика (для стали $f=0,3 \dots 0,5$ [1, с.117]);

N – нормальная реакция, Н.

Нормальная реакция N определяется действием сил тяжести и Кориолиса. Спроецировав их на плоскость, перпендикулярную плоскости лопатки валика, и подставив в выражение (5), получим:

$$F_m = f \cdot (G \cdot \sin \varphi - F_k), \quad (6)$$

где φ – угол поворота лопатки от вертикали, рад.

Предположим, что в начальный момент движения $F_k < G \cdot \sin \varphi$, то есть частица прижимается к задней стороне лопатки, в отличие от [1], где рассматривается движение частицы по передней стороне лопатки. Тогда, спроецировав силы на плоскость лопатки, получим:

$$F = F_y - F_m - G \cdot \cos \varphi. \quad (7)$$

Подставив значения сил в выражение (7) и разделив все члены уравнения на m , получим дифференциальное уравнение относительного движения частицы по лопатке:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \omega^2 \cdot r + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} - f \cdot g \cdot \sin \varphi - g \cdot \cos \varphi. \quad (8)$$

Подставим $\varphi = \omega \cdot t$, где t – время, c , в выражение (8):

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - 2 \cdot f \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} - \omega^2 \cdot r = -f \cdot g \cdot \sin \omega t - g \cdot \cos \omega t. \quad (9)$$

Это неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Общее решение этого уравнения:

$$r = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + a \cdot \cos \omega t + b \cdot \sin \omega t, \quad (10)$$

где λ_1, λ_2 – корни характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= f \cdot \omega - \sqrt{\omega^2 + f^2 \cdot \omega^2}; \\ \lambda_2 &= f \cdot \omega + \sqrt{\omega^2 + f^2 \cdot \omega^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

a и b – постоянные коэффициенты:

$$a = \frac{g \cdot (1 - f^2)}{2 \cdot \omega^2 \cdot (1 + f^2)}; \quad (12)$$

$$b = \frac{f \cdot g}{\omega^2 \cdot (1 + f^2)}. \quad (13)$$

Продифференцировав уравнение (10), получим уравнение изменения скорости частицы по поверхности лопатки в зависимости от времени t :

$$v_r = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 t} - a \cdot \omega \cdot \sin \omega t + b \cdot \omega \cdot \cos \omega t, \text{ м/с.} \quad (14)$$

Заменив в уравнениях (10), (14) $t = \varphi / \omega$, получим систему уравнений, описывающих движение частицы по лопатке валика в зависимости от угла поворота:

$$\begin{cases} r = C_1 \cdot e^{\frac{\lambda_1 \cdot \varphi}{\omega}} + C_2 \cdot e^{\frac{\lambda_2 \cdot \varphi}{\omega}} + a \cdot \cos \varphi + b \cdot \sin \varphi \\ v_r = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\frac{\lambda_1 \cdot \varphi}{\omega}} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\frac{\lambda_2 \cdot \varphi}{\omega}} - a \cdot \omega \cdot \sin \varphi + b \cdot \omega \cdot \cos \varphi \end{cases}. \quad (15)$$

Прежде чем находить постоянные интегрирования C_1 и C_2 , определим характер движения частиц, находящихся на лопатке валика. Для этого построим графики изменения критического расстояния от оси вращения валика до час-

тицы $r_{кр}$ в зависимости от угла поворота валика при различных ω и $f = 0,3$, исходя из условия, что $F_y = F_m + G \cdot \cos \varphi$, то есть по следующей формуле:

$$r_{кр} = \frac{g}{\omega^2} \cdot (f \cdot \sin \varphi + \cos \varphi). \quad (16)$$

Графики представлены на рисунке 96.

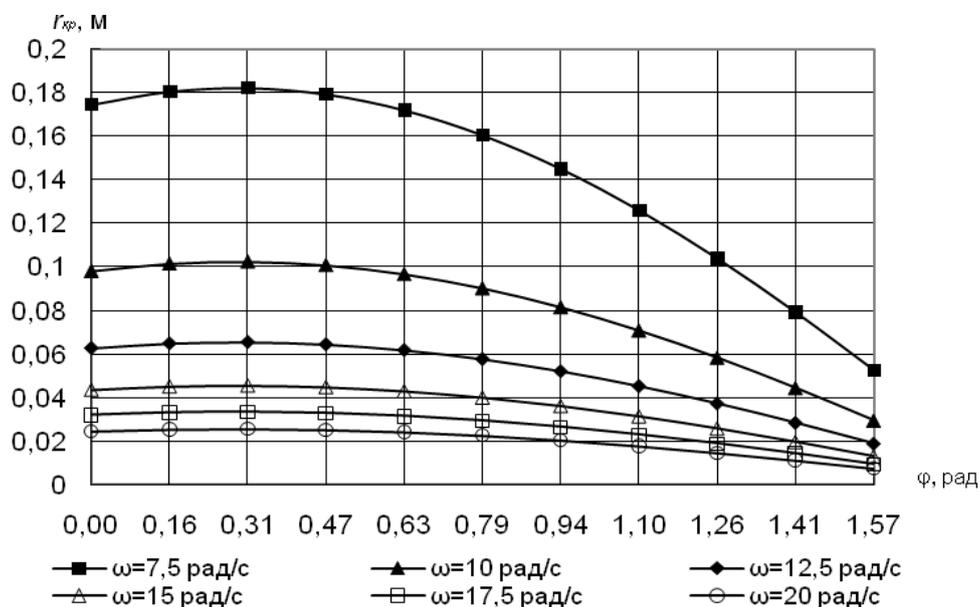


Рисунок 96 – Графики изменения критического расстояния от оси вращения валика до частицы $r_{кр}$ в зависимости от угла поворота валика φ при различных ω

При условии подпора зернового материала в четвертом квадранте и отсутствии его выталкивания из межлопастного пространства валика при $r > r_{кр}$ на основании полученных графиков можно предположить три варианта движения частиц, в зависимости от их расположения, по лопатке валика в первом квадранте.

Первый вариант – движение частиц, занимающих положение $r > r_{кр}$ при $\varphi = 0$, за исключением частиц, описанных в третьем варианте. Частицы, исходя из условия, что в начальный момент движения в первом квадранте $F_y > F_m + G \cdot \cos \varphi$ и теряется подпор, отрываются от нижнего слоя зернового материала и поднимаются вдоль лопатки, при сходе с которой направляются в пневмосепарирующий канал.

Второй вариант – движение частиц, занимающих положение $r \leq r_{кр}$ при $\varphi = 0$. Так как в этой зоне $F_y \leq F_m + G \cdot \cos \varphi$, то частицы находятся в покое относительно лопатки валика. И только с поворотом лопатки валика на угол, больший, чем критический угол $\varphi_{кр}$, при котором уравниваются силы $F_y = F_m + G \cdot \cos \varphi$, начнется движение частицы вдоль лопатки валика в направлении схода с нее.

Третий вариант – движение тонкого слоя частиц, занимающих положение $r > r_{кр}$ при $\varphi = 0$ сразу же над $r_{кр}$. Частицы в начальный момент движения под действием силы $F_y > F_m + G \cdot \cos \varphi$ отрываются от нижнего слоя зернового материала и поднимаются вдоль лопатки в направлении схода с нее. Однако с дальнейшим поворотом лопатки $F_y < F_m + G \cdot \cos \varphi$, и частицы начинают двигаться обратно до тех пор, пока не займут свое начальное положение и будут находиться в покое относительно лопатки валика, пока с поворотом лопатки снова не изменится направление сил $F_y > F_m + G \cdot \cos \varphi$, и они начнут свое движение по направлению к сходу с лопатки.

В первом варианте также возможно движение частиц в обратном направлении под действием силы $F_y < F_m + G \cdot \cos \varphi$. Однако частицы не достигают при этом своего начального положения, а под действием изменившейся силы $F_y > F_m + G \cdot \cos \varphi$ изменяют свое движение по направлению к сходу с лопатки.

Из системы уравнений (15) значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 для первого варианта движения частиц при начальных условиях движения $r = r_0$, $\varphi = 0$, $v_r = 0$ будут равны:

$$C_1 = \frac{\lambda_2 \cdot a - \lambda_2 \cdot r_0 - b \cdot \omega}{\lambda_1 - \lambda_2}; \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \cdot r_0 - \lambda_1 \cdot a + b \cdot \omega}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (18)$$

Аналогично из системы уравнений (15) значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 для второго варианта движения частиц при начальных условиях движения $r = r_{кр}$, $\varphi = \varphi_{кр}$, $v_r = 0$ будут равны:

$$C_1 = \frac{-\lambda_2 \cdot r_{кр} + \lambda_2 \cdot a \cdot \cos \varphi_{кр} + \lambda_2 \cdot b \cdot \sin \varphi_{кр} + a \cdot \omega \cdot \sin \varphi_{кр} - b \cdot \omega \cdot \cos \varphi_{кр}}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot e^{\frac{\lambda_1 \cdot \varphi_{кр}}{\omega}}}; \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \cdot r_{кр} - \lambda_1 \cdot a \cdot \cos \varphi_{кр} - \lambda_1 \cdot b \cdot \sin \varphi_{кр} - a \cdot \omega \cdot \sin \varphi_{кр} + b \cdot \omega \cdot \cos \varphi_{кр}}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot e^{\frac{\lambda_2 \cdot \varphi_{кр}}{\omega}}}. \quad (20)$$

Подставляя в систему уравнений (15) значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 , рассчитанных по формулам (17), (18), можем построить графики изменения r и v_r для первого варианта движения частиц. Подставляя в систему уравнений (15) значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 , рассчитанных по формулам (19), (20), можем построить графики изменения r и v_r для второго варианта движения частиц. Для построения графиков изменения r и v_r по третьему варианту движения сначала (с момента начала движения частицы и до момента ее покоя) подставляем в систему уравнений (15) значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 , рассчитанных по формулам (17), (18), затем (с момента возобновления движения частицей) в ту же систему уравнений (15)

подставляем значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 , рассчитанных по формулам (19), (20).

Полученная система уравнений (15) справедлива для определения r и v_r как в первом, так и во втором квадрантах. Построенные зависимости изменения r и v_r представлены на рисунках 97 и 98.

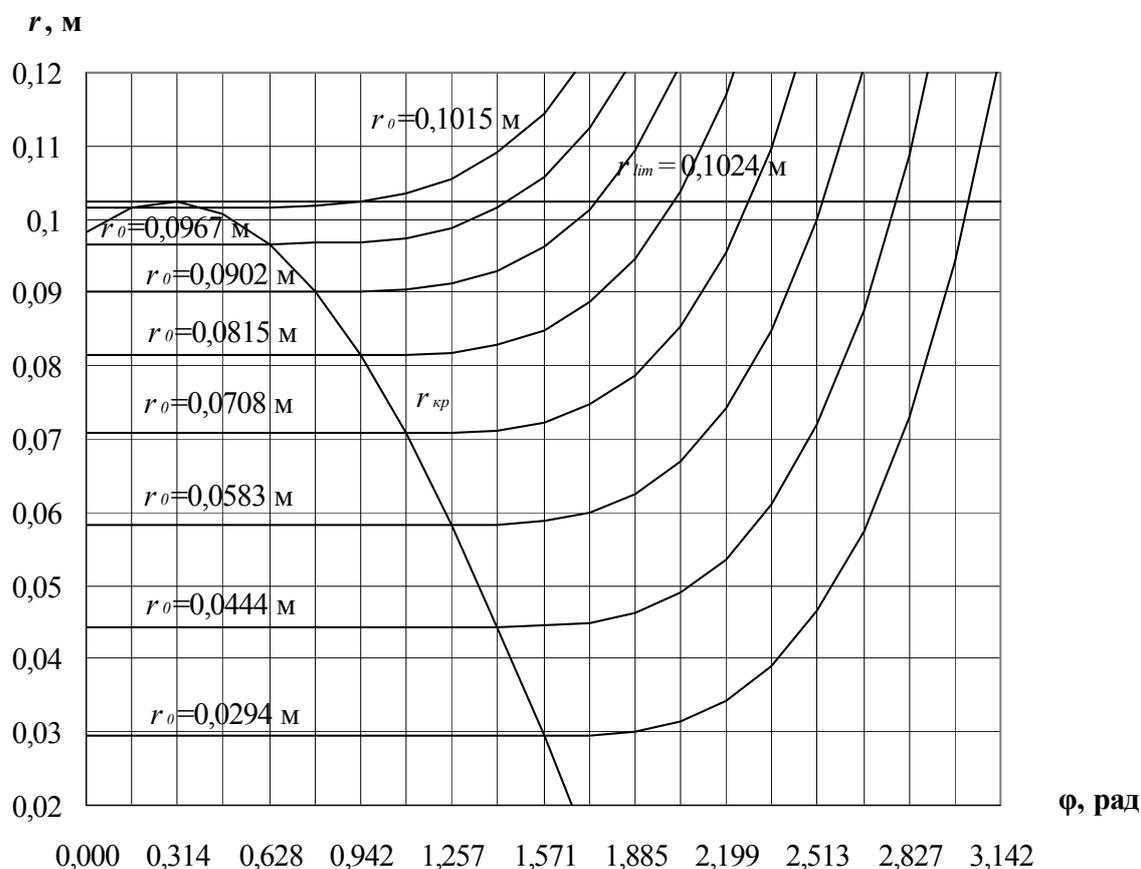


Рисунок 97 – Зависимости изменения положения частиц на лопатке питающего валика от угла поворота при $\omega = 10 \text{ рад/с}$ и различных начальных r_0

Анализ полученных зависимостей (рисунок 97, 98) при радиусе лопатки $r_{\text{lim}} = 0,1024 \text{ м}$ и угловой скорости $\omega = 10 \text{ рад/с}$ показывает, что при повороте лопатки от 0 до $0,942 \text{ рад}$ с нее сходит только самый верхний слой зерна. При повороте от $0,942$ до $1,571 \text{ рад}$ с лопатки питающего валика сходит незначительный слой зернового материала. Оставшийся зерновой материал сходит во втором квадранте. Расчетные данные показывают, что при данных параметрах валика и внутреннем радиусе $r_{\text{внутр}} = 0,04 \text{ м}$ в первом квадранте сходит слой зернового материала, соответствующий примерно $17,7\%$ подачи питателя. Таким образом, основная масса зернового материала сходит во втором квадранте. Также следует отметить, что угол раскрытия потока зернового материала при данных параметрах валика составляет около $1,89 \text{ рад}$.

Зависимости изменения скорости движения частиц, занимающих различное положение r_0 на лопатке валика, а также зависимость критической ради-

альной скорости $v_{кр}$, при превышении которой произойдет отрыв частицы от лопатки, показаны на рисунке 98.

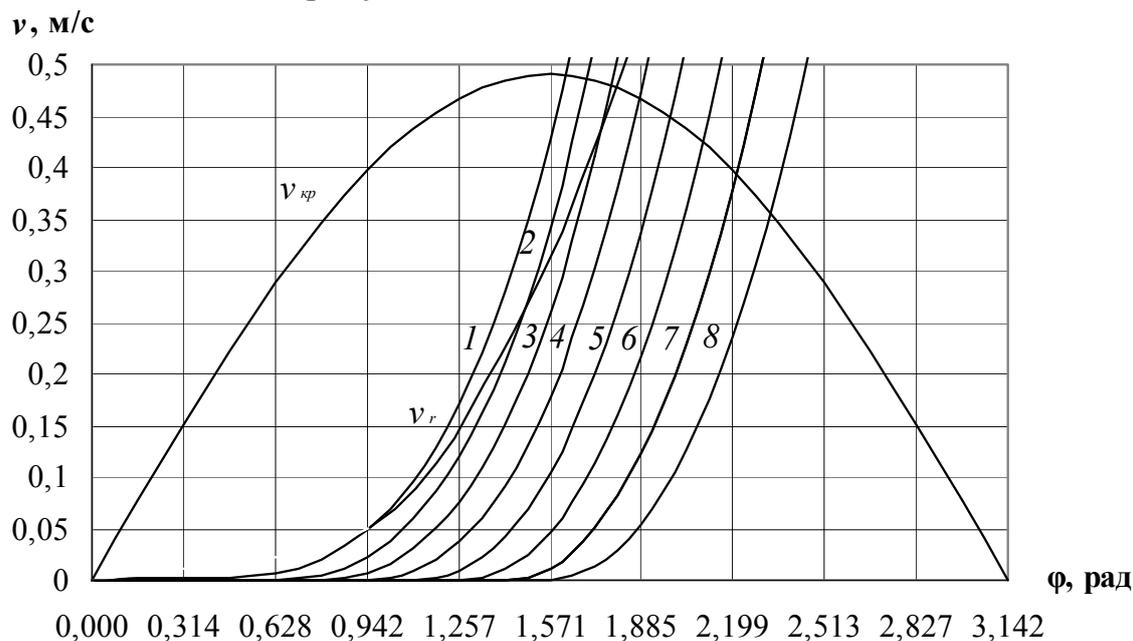


Рисунок 98 – Зависимости изменения скорости движения частиц по лопатке питающего валика от угла поворота при $\omega = 10 \text{ рад/с}$ и различных начальных r_0 : 1 – $r_0 = 0,1015 \text{ м}$; 2 – $r_0 = 0,0967 \text{ м}$; 3 – $r_0 = 0,0902 \text{ м}$; 4 – $r_0 = 0,0815 \text{ м}$; 5 – $r_0 = 0,0708 \text{ м}$; 6 – $r_0 = 0,0583 \text{ м}$; 7 – $r_0 = 0,0444 \text{ м}$; 8 – $r_0 = 0,0294 \text{ м}$

Для построения зависимости критической радиальной скорости исходили из условия, что $F_k = G \cdot \sin \varphi$, или $2m \cdot \omega \cdot v_{кр} = m \cdot g \cdot \sin \varphi$. Таким образом, получим:

$$v_{кр} = \frac{g \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \omega}. \quad (21)$$

Также на рисунке 98 показана зависимость скорости частицы v_r от угла поворота валика в точке $r_{lim} = 0,1024 \text{ м}$ для различных r_0 .

Как видно из построенных зависимостей (рисунок 98), скорости движения частиц в первом квадранте не превышают критической радиальной скорости $v_{кр}$, за которой последовал бы отрыв частиц от лопаток валика. Это доказывает верность предположения о том, что в начальный момент движения $F_k < G \cdot \sin \varphi$, то есть частица прижимается к задней стороне лопатки, в отличие от [1], где рассматривается движение частицы по передней стороне лопатки. И для расчета движения частицы по лопатке валика в первом квадранте следует руководствоваться полученной системой уравнений (15). Во втором квадранте видно, что частицы, прижимаясь к задней стороне лопатки, разгоняются до скорости $v_{кр}$, то есть $F_k > G \cdot \sin \varphi$. И при дальнейшем движении начинают отрываться от лопатки и лететь в свободном полете (в случае рассмотрения работы с одиночными частицами) или прижиматься к слою зернового материала, находящегося над ними, и скользить вдоль него. Для прибли-

зительных расчетов будем полагать, что частицы движутся в радиальном направлении вдоль лопаток до момента схода с нее (до момента достижения r_{lim}).

Пользуясь формулой (15) и методом интерполирования, можем вычислить положение лопатки (угол φ) и радиальную скорость частицы v_r , при которых она достигает r_{lim} .

Угол и скорость ввода частиц в канал определяются по выражениям:

$$\alpha = \varphi - \arctg(v_r / u); \quad (22)$$

$$v_0 = \sqrt{u^2 + v_r^2}, \quad (23)$$

где u – окружная скорость, м/с, $u = \omega \cdot r$.

Выводы

Полученная математическая модель расчета движения частицы по лопатке питающего валика с верхней подачей позволяет определить условия ввода частиц в канал с помощью данного устройства и получить модель поведения частиц зернового вороха в канале.

Литература

1. Бурков, А.И. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание / А.И. Бурков, Н.П. Сычугов. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. – 261 с.
2. Нелюбов, А.И. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин / А.И. Нелюбов, Е.Ф. Ветров. – М.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

УДК 665.6

В.А. Шаршунов

(УО «МГУП»,
г. Могилев, Республика Беларусь)

А.В. Червяков

(УО «БГСХА»,
г. Горки, Республика Беларусь)

ВЫБОР КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УГЛУБЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Введение

Существующие методики оценки эффективности технологических систем и комплексов оборудования для обработки зерна, как правило, базируются на экономических показателях, без увязки с качественными [1]. В лучшем случае отдельные показатели качества учитывались в виде количественных характеристик конечного продукта предельного или допустимого уровня. В УО «БГСХА» разработана новая методика оценки эффективности технологических комплексов оборудования, которая предполагает использование комплексного показателя. Он является обобщающим для значительного числа как отдельных технологических, технических, экономических параметров эффективности комплекса машин и оборудования, так и для качественных характеристик готового продукта. Этот показатель позволяет также учитывать их те-