

УДК 631.333:631.1

UDC 631.333:631.1

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ СЫПУЧИХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**CALCULATION OF THE BASIC PARAMETERS  
OF THE SPREADER OF BULK MATERIALS**

Белоусов Сергей Витальевич  
магистр факультет механизации  
sergey\_belousov\_87@mail.ru

Belousov Sergey Vitalyevich  
Department of mechanization  
sergey\_belousov\_87@mail.ru

Лепшина Анна Игоревна  
студент  
*Кубанский государственный Аграрный  
Университет, Краснодар, Россия*

Lepshina Anna Igorevna  
student  
*Kuban state Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье рассмотрен расчет основных параметров внесения сыпучих материалов на поверхность поля. Данный расчет позволяет получить данные по требуемому объему сыпучего вещества

The article deals with the calculation of basic parameters of making bulk materials on the surface of the field. This calculation makes it possible to obtain data on the required amount of particulate matter

Ключевые слова: СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ,  
РАСЧЕТ, ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ,  
УРАВНЕНИЕ, РАЗБРАСЫВАТЕЛЬ

Keywords: BULK MATERIAL, CALCULATION,  
DERIVATION EQUATION SPREADER

Разбрасыватели сухих не органических смесей имеют по своей особенности схожее строение друг с другом. Главным рабочим органом данных машин является вращающийся диск, который закреплен на угловом редукторе через вал или карданную передачу, реже закреплен непосредственно на самом редукторе. Главным является то, что сход сыпучего материала со всех вращающихся дисков по своей природе одинаков, и зависит только от конкретных конструктивных параметров того или иного рабочего органа выпускаемых фирмами.

Кинематический режим работы аппарата для внесения сыпучих материалов базируется на законах классических физических процессов, которые связаны с центробежной силой и ускорением тел. [1]

Рабочий процесс работы центробежного аппарата состоит из двух фаз: относительного перемещения частиц удобрений по диску с момента их поступления на него и падения туков, брошенных диском в горизонтальной плоскости с определенной скоростью.[2]

В момент схода частиц с диска [3] абсолютная ее скорость,  $v_a$  равна геометрической сумме переносной (окружной) скорости  $v_e$  и относительной скорости  $v_r$  движения частиц вдоль выбросной лопасти, т.е.

$$\bar{v}_a = \bar{v}_e + \bar{v}_r. \quad (1)$$

Численное значение скорости  $v_r$ , как показывают расчеты и эксперименты по сравнению с переменной скоростью  $v_e$  будет небольшим, и ее влияние на абсолютную скорость,  $v_a$  незначительно.

Поэтому при практических расчетах полагают, что частица сходит с выбросной лопасти и с края диска с абсолютной скоростью, приблизительно равна скорости  $v_e$ , т.е.

$$v_a \approx v_e. \quad (2)$$

Это условие будет выполняться в том, случае, если центробежный рабочий орган будет иметь постоянный радиус по всей окружности.

Рассмотрим как будет соблюдаться условие  $v_a = \text{const}$ , когда профиль диск выполнен по кривой  $MM_1$  радиус вектор который будет.

$$\rho_k = \rho_0 \frac{1-c^2}{2c} \sin \varphi_k + \rho_0 \cos \varphi_k. \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – радиус-вектор, ближайший к оси вращения, мм.

$c$  – постоянная интегрирования,

$\varphi_k$  – угол, определяющий расчетную часть диска.

Чтобы исследовать различные формы кривых, необходимо получить обобщенное выражение коэффициента абсолютной скорости.

Для этого обозначим

$$\alpha = \frac{\rho_k}{\rho_0} = \frac{R_k}{R_0};$$

$$X = \frac{(1 - c^2)}{2c},$$

где  $R_k$  – конечный радиус профиля, мм.

$R_0$  – начальный радиус профиля, мм.

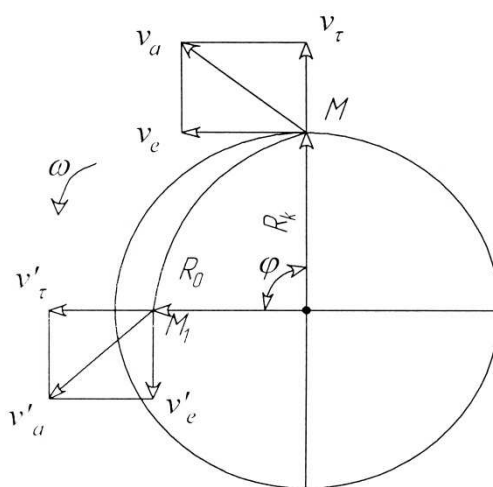


Рисунок 1 - Разложение абсолютной скорости на составляющие.

Подставим это значение в уравнение (3), получим выражение полного превращения радиуса по профилю в безразмерных величинах:

$$\alpha = x \sin \varphi_k + \cos \varphi_k \tag{4}$$

из которого

$$X = \frac{(\alpha - \cos \varphi_k)}{\sin \varphi_k}, \tag{5}$$

Если обозначить приращение текущего радиуса в любой точке линии профиля к начальному радиусу через  $\rho = \frac{R}{R_0}$ , то, подставив значения (3) в

выражение (2), то уравнение профильной линии выбросного диска безмерных величинах можно записать так,

$$\rho = \frac{(\alpha - \cos \varphi_k) \sin \varphi}{\sin \varphi_k + \cos \varphi}. \quad (6)$$

Так как

$$v = (v_e^2 + v_r^2)^{1/2},$$

где

$$v_r = \frac{dR}{d\varphi} \omega,$$

где  $\omega$  – угловая скорость ротора,  $c^{-1}$ ,

и равно

$$v_e = \omega R,$$

То абсолютная скорость будет

$$v_a = \omega \sqrt{R^2 + \left(\frac{dR}{d\varphi}\right)^2} \quad (7)$$

Приведем (5) к виду

$$v_a(\varphi) = R_0 \omega \sqrt{\rho^2(\varphi) + \left[\frac{d\rho d\varphi}{d\varphi}\right]^2}, \quad (8)$$

где  $\rho(\varphi) = \frac{R(\varphi)}{R_0}$  – относительное изменение радиуса произвольной точки профиля диска, характеризуемого углом  $\varphi$ .

Введем понятие коэффициента абсолютной скорости и для этого обозначим;

$$\frac{v_a(\varphi)}{R_0\omega} = v(\varphi)$$

Тогда в относительных величинах (6) запишется так:

$$v(\varphi) = \sqrt{\rho^2(\varphi) + \left[ \frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi} \right]^2}, \quad (9)$$

Выражение (7), представляющее собой коэффициент абсолютной скорости, пригодно для оценки абсолютной скорости точек кривых любых форм.

Для профиля, описываемого уравнением (1) или (4) при условии  $v(\varphi)=const$ ,  $v$  может быть определено подставкой уравнения (4) в уравнение (7).

В самом деле, обозначив

$$\frac{(\alpha - \cos\varphi_k)}{\sin\varphi_k} = x = const,$$

Получим

$$v = \left[ (x\sin\varphi + \cos\varphi)^2 + (x\cos\varphi - \sin\varphi)^2 \right]^{1/2} = (x^2\sin^2\varphi + 2x\sin\varphi\cos\varphi + \cos^2\varphi + x^2\cos^2\varphi - 2x\cos\varphi\sin\varphi + \sin^2\varphi)^{1/2} = (x^2 + 1)^{1/2} = const$$

Из результатов расчета и рисунка 2 (кривая 1) видно, что коэффициент абсолютной скорости и сама скорость в пределах угла  $\varphi$  – величина постоянная.

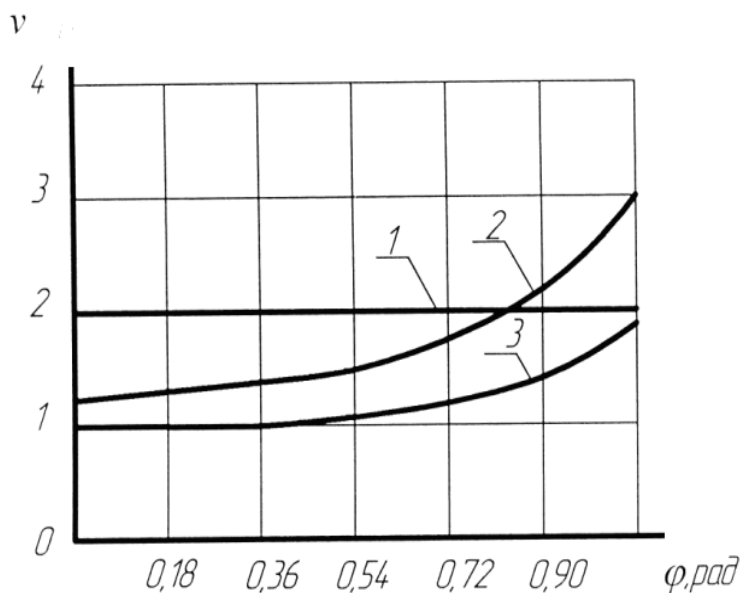


Рисунок 2 - Зависимость  $v = f(\varphi)$  для различных форм центробежного диска.

Определим значение  $v$  для профиля диска, выполненного по спирали Архимеда, которая в полярных координатах описывается выражением

$$R = \alpha \varphi ,$$

где  $R$  - радиус вектор, мм.

$\alpha$  и  $\varphi$  – постоянная и текущая координаты.

В безразмерных координатах это же выражение будет таким:

$$\rho = \frac{R}{\alpha} = \varphi ,$$

Тогда

$$v = \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)^2} = \sqrt{\varphi^2 + 1} .$$

В интервале  $0 \dots 1$  рад значений  $v$  для формы диска, выполненного по спирали Архимеда, показана на рисунок 2, кривая 3.

Проанализируем, как изменяется абсолютная скорость выброса частиц, если профиль диска выполнена в виде логарифмической спирали.

Логарифмическая спираль в безразмерных величинах координатах описывается уравнением

$$\rho = e^{b\varphi},$$

где  $b = \operatorname{ctg}\alpha$ .

$\alpha$  – угол между касательной и радиусом вектором, град.

Подставим это в выражение (4.7) и получим

$$v = \sqrt{e^{2b\varphi} + b^2 e^{2b\varphi}} = e^{b\varphi} \sqrt{b^2 + 1}.$$

В интервале  $0 \dots 1$  рад значений  $v$  разбросанного диска выполненного по логарифмической спирали, показано на рис.2.5, кривая 2.

Из анализа рисунок 2 следует, что  $v$  для кривой, описываемой уравнением (1) или (4) постоянен, значит, постоянна и абсолютная скорость.

У архимедовой и логарифмической спирали коэффициент  $v$  переменный, значит, соответственно изменяется и абсолютная скорость. Следовательно, изменение абсолютной скорости приводит к различным скоростям к выбросу частиц с периферии диска, что скажется на равномерности распределения туков по поверхности поля.

Предлагаемая методика исследования кривых по коэффициенту абсолютной скорости позволяет определить степень увеличения, уменьшения или стабилизации абсолютной скорости выброса частиц

центробежных дисков и тем самым точнее установить оптимальный режим работы разбрасывателя минеральных удобрений.

Дальность полета частиц удобрений, сходящих с диска центробежного рабочего органа. Во второй фазе рабочего процесса частица, получив необходимую скорость, должна совершать свободный полет в воздушной среде и упасть на поверхность почвы. После отрыва от края диска или с конца лопасти частица совершает движение в плоскости, совпадающей с направлением абсолютной скорости  $V_a$  рассева. При этом на частицу массой  $M$  будут действовать две силы: сила тяжести –  $mg$  и сила сопротивления воздуха –  $R_v$ .

Дифференциальное уравнение движения частиц при полете в указанном выше направлении, совпадающем с осью  $X$  (рисунок 3) имеет вид:

$$mX'' = -R(X')^2. \quad (10)$$

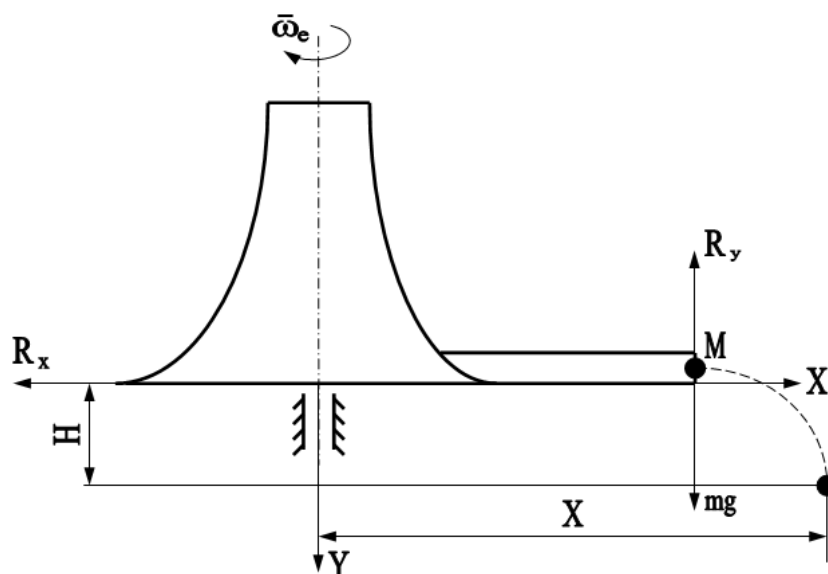


Рисунок 3 – Схема к определению дальности полета частиц удобрений

Сила сопротивления воздуха равна:



$$R_{\text{в}} = k \frac{\gamma}{g} F(x')^2, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент сопротивления воздуха;

$\gamma$  – удельный вес воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – миделево сечение, мм.

Уравнение (1) удобнее представить в таком виде:

$$X'' = -\frac{k\gamma F}{mg}(x')^2 = -k_n (x')^2, \quad (12)$$

где  $k_n$  – коэффициент парусности:

$$k_n = \frac{kF \gamma}{mg}.$$

Для решения уравнения (13) следует понизить его порядок. С этой целью положим, что  $X' = V$ , тогда:

$$X'' = \frac{dV}{dx} V. \quad (13)$$

Подставляя эти значения в уравнение (14) получим:

$$V \frac{dV}{dx} = -k_n V^2,$$

или

$$\frac{dV}{dx} = -k_n V. \quad (14)$$

Разделим переменные

$$\frac{dV}{V} = -k_n dx. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (16), найдем

$$\begin{aligned} \ln V &= -k_n x + \ln C_1. \\ \ln V &= \ln e^{-k_n x} + \ln C_1. \end{aligned} \quad (16)$$

Потенцируя выражение (17), будем иметь.

$$V = C_1 e^{-k_n x}. \quad (17)$$

Постоянную интегрирования следует определить из начальных условий при  $x=0$ , скорость частицы  $V=V_p$ .

Следовательно, уравнение полета частицы в окончательном виде будет представлено в следующем виде:

$$V_p = V_p e^{-k_n x}. \quad (18)$$

Для определения дальности полета  $X$  полученное уравнение необходимо проинтегрировать по времени, для чего перепишем его в таком виде:

$$\frac{dx}{dt} = V_p e^{-k_n x},$$

или

$$e^{k_n x} dx = V_p dt. \quad (19)$$

После интегрирования получим

$$\frac{1}{k_n} e^{k_n x} = V_p t + C. \quad (20)$$

Постоянную интегрирования определим из начальных условий: при  $t=0$ ,  $x=0$ .

Тогда

$$C = \frac{1}{k_n}.$$

С учетом этого найдем:

$$\frac{1}{k_n} e^{k_n x} = V_p t + \frac{1}{k_n}. \quad (21)$$

Умножив на  $k_n$  и логарифмируя обе части равенства (21), получим

$$k_n x = \ln(k_n V_p t + 1),$$

откуда выражение для дальности полета в функции времени получит вид

$$X = \frac{\ln(k_n V_p t + 1)}{k_n}. \quad (22)$$

Однако в уравнение (22) имеются две неизвестных  $X$  и  $t$ , поэтому для решения его требуется привлечь дополнительные условия. С этой целью рассмотрим движение частицы по вертикали, т.е. в направлении оси  $Y$  под действием силы тяжести и составляющей  $R_y$  силы сопротивления воздуха. Так как скорость движения частицы в этом направлении от начальной

скорости  $V_p$  не зависит, а высота  $H$  падения небольшая, то влиянием силы  $R_y$  – сопротивление воздуха, можно пренебречь. С учетом этого можно принять, что при свободном падении частицы высота  $H$  будет равна:

$$H = \frac{gt^2}{2},$$

Откуда

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Если полученное значение времени  $t$  подставить в выражение (23), то уравнение дальности полета в окончательном виде будет:

$$X = \frac{\ln\left(k_n V_p \sqrt{\frac{2H}{g}} + 1\right)}{k_n}. \quad (23)$$

Анализируя уравнение (14) можно отметить, что на дальность полета частиц туков влияют:

- начальная скорость рассева  $V_p$ ;
- высота установки центробежного аппарата  $H$ ;
- коэффициент парусности удобрений  $k_n$ .

Построенные по уравнению (14) расчетные зависимости (рисунок 4) показывают, что наибольшее влияние на максимальную дальность полета частиц удобрений оказывают угловая скорость, коэффициент парусности удобрений и высота установки рабочего органа.

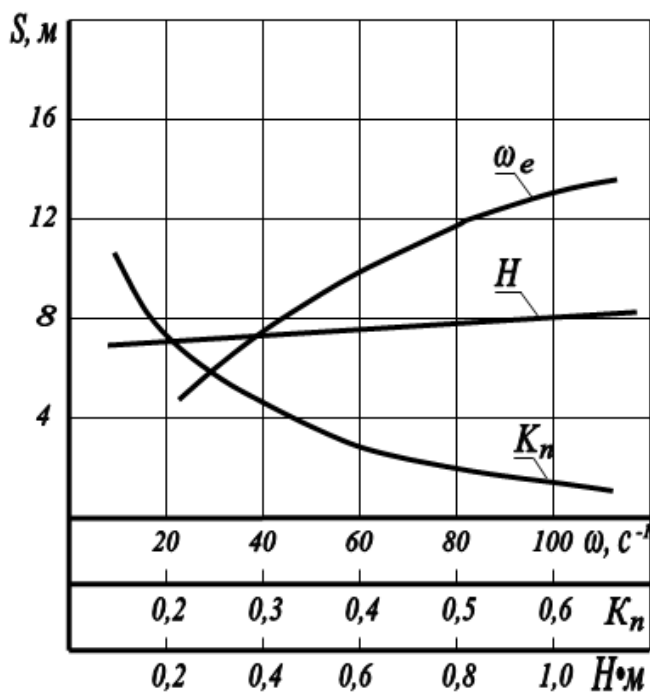


Рисунок 4 – Зависимости дальности полета частиц удобрений от конструктивных и кинематических параметров рабочего органа

Коэффициент полезного действия центробежного рабочего органа можно определить как отношение минимальных затрат энергии к общим затратам. При равномерном распределении удобрений в безвоздушном пространстве и оптимальном угле и скорости рассева, необходимая мощность на привод рабочего органа определяется уравнением:

$$N_{\min} = \frac{QB_p V_m kg}{7,2 \cdot 10^7} \left( \frac{\Delta}{4} - 1 \right) + \frac{QH^2 V_m g}{7,2 \cdot 10^7} \ln \frac{1}{2} \left( \frac{B_p}{H} + \Delta \right), \quad (24)$$

где  $Q$  – норма внесения удобрений, кг/га;

$B_p$  – рабочая ширина захвата, м;

$H$  – высота расположения рабочего органа, м;

$V_M$  – скорость агрегата, км/ч.

Но поскольку из-за неравномерности распределения туков приходится работать с перекрытием, а углы схода и рассева на практике далеки от оптимальных, в действительности требуется значительно

большая мощность. Чтобы найти ее, примем отклонение дальности полета отдельных частиц от средней дальности соответствующим нормальному распределению.

Масса сыпучего материала, разбрасываемых за 1 сек., будет:

$$M_y = \frac{QB_p V_M}{3,6 \cdot 10^4}.$$

На элементарное кольцо или часть кольца  $dx$  (рисунок 5), удаленное на расстояние  $X$  от оси рабочего органа, попадает удобрений:

$$dM = \frac{QB_p V_M}{3,6 \cdot 10^4} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m^2)}{2\sigma^2}\right] dx, \quad (25)$$

где  $m$  – математическое ожидание дальности полета частиц;  
 $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

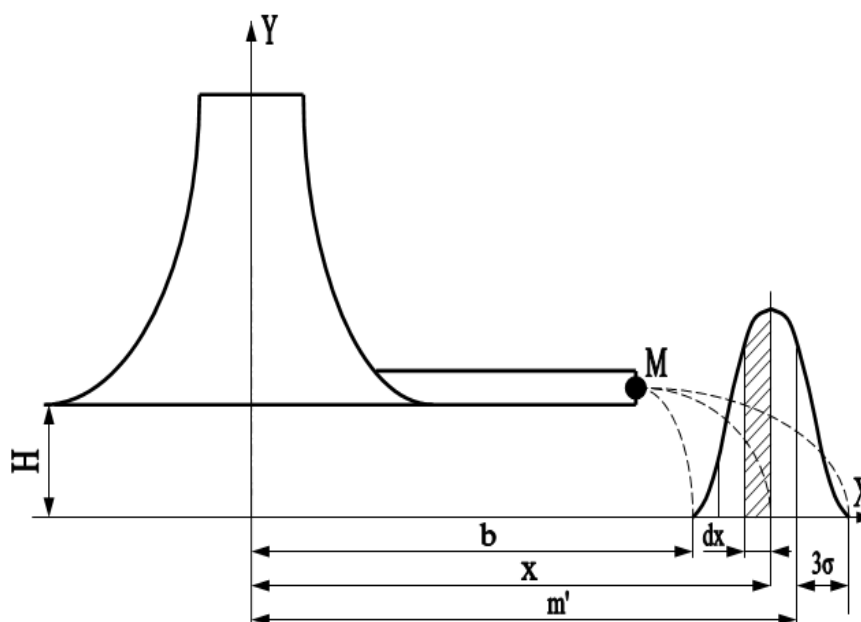


Рисунок 5 – Схема к определению массы высеянных удобрений

По правилу «трех сигм», для однодискового аппарата:

$$\sigma_1 = \left( \frac{B_p}{2} - b \right) 6^{-1},$$

где  $B_p$  – ширина полосы разбрасывания удобрений, м;

$b$  – внутренний радиус кольца разбрасывания, м.

Математическое ожидание дальности полета:

$$m_1 = \left( \frac{B_p}{2} + b \right) 2^{-1}.$$

Чтобы массу  $dM$  забросить на расстояние  $X$ , необходимо затратить энергию:

$$dN = V_p^2 dM M^{-1}. \tag{26}$$

В зависимости от его дальности и с учетом сопротивления воздуха:

$$V_0^2 = \frac{g}{4k_n^2 h} \left[ \exp \left( 2R_n x \right) - 2k_n x - 1 \right] \tag{27}$$

С учетом зависимости (25) и (27) формула (26) примет вид:

$$dN = \frac{B_p V_m g}{28,8 \cdot 10^4 k_n^2 H} \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(x - m)^2}{2\sigma^2} \right] \cdot [\exp (2k_n x) - 2k_n x - 1] dx. \tag{28}$$

Мощность, необходимая для распределения удобрений одним дисковым аппаратом:

$$N_{\phi} = \frac{B_p V_M g}{28,8 \cdot 10^4 k_n^2 H} \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_b^{\frac{B}{2}} \exp \left[ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] [\exp(2k_n x) - 2k_n x - 1] dx \quad (29)$$

Упростив полученное выражение, находим:

$$N_{\phi} = \frac{QB_p V_M g}{28,810^7 k_n^2 H} \cdot \exp(2k_n m + 2k_n^2 \sigma^2) [\Phi(2k_n \sigma + 3) - \Phi(2k_n \sigma - 3)] \cdot \quad (30)$$

Сопротивление воздуха будет:

$$N_B = 2,95 \cdot 10^7 \cdot z h_0 n (R^4 - R_{\min}^4), \quad (31)$$

где  $n$  – число оборотов диска,

$z$  – число лопастей, шт;

$h_0$  – высота лопастей, мм.

С учетом сопротивления воздуха общие затраты энергии в единицу времени:

$$N_{\text{об}} = N_{\phi} + N_B \cdot \quad (32)$$

Коэффициент полезного действия центробежного аппарата определяется:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{N_{\min}}{N_{\text{общ}}} \cdot \quad (33)$$

#### Литература

1. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. – М.: КолосС, 2004. – 624с.: ил. Стр. 559-569
2. Кленин Н.И., Егоров В.Г. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: КолоС, 2004. – 464с.: ил. Стр. 105-151.
3. Загора В.А. Основы технологии и расчета мобильных процессов растениеводства: учебное пособие / В.А. Загора, В.И. Толокольников, С.Н. Васильев. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. 263 с.



Bibliography

1. Halanskij V.M., Gorbachev I.V. Sel'skhozjastvennyj mashiny. – M.: KolosS, 2004. – 624s.: il. Str. 559-569
2. Klenin N.I., Egorov V.G. Sel'skhozjastvennye i meliorativnye mashiny. – M.: KoloS, 2004. – 464s.: il. Str. 105-151.
3. Zavora V.A. Osnovy tehnologii i rascheta mobil'nyh processov rastenievodstva: uchebnoe posobie / V.A. Zavora, V.I. Tolokol'nikov, S.N. Vasil'ev. Barnaul: Izd-vo AGAU, 2008. 263 s.