

УДК 631.363

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,
В. И. Передня², доктор технических наук, профессор,
С. Н. Бондарев³, **И. М. Швед**⁴

^{1,3,4}Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

²Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ КОРМОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

Критериями оценки качества работы машин и оборудования для приготовления кормов являются эксплуатационно-технологические показатели: качество выполнения технологического процесса, производительность работы и энергетические показатели.

Измельчение является одним из наиболее важных технологических процессов в кормоприготовлении. Приготовление кормов с использованием современного оборудования сопровождается значительными энергозатратами.

Для измельчения грубых кормов любой влажности, а также измельчения других кормовых компонентов и их перемешивания применяются машины с многоплоскостным измельчающим аппаратом. В этих машинах корма перемещаются в сторону выгрузной камеры, совершая круговые движения по внутренней поверхности рабочей камеры. Во время движения они попадают в рабочую зону лезвия режущих элементов, конструктивно-кинематические параметры которых воздействуют на усилие для резания кормовых компонентов и, как следствие, являются влияющим фактором, изменяющим мощностные показатели установки.

В статье представлены результаты теоретических исследований по определению потребной мощности на привод многоплоскостного измельчающего аппарата многофункционального измельчителя-смесителя кормов с учетом его конструктивных особенностей, физико-механических свойств кормов и возможных колебаний подачи в рабочую камеру кормов.

Ключевые слова: измельчение; ротор; смеситель; нож; динамический режим; камера; момент инерции; транспортер.

Рис. 3. Библиогр.: 3 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. I. Perednya², DSc in Technical Sciences, Professor,
S. N. Bondarev³, **I. M. Shved**³

^{1,3,4}Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

²Republican Unitary Enterprise “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization”, 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

REQUIRED POWER DETERMINATION FOR THE DRIVE VERTICAL FEED SHREDDER-MIXER

The criteria for assessing the work quality of machines and equipment for preparing feed are operational and technological indicators: the quality of the technological process, work productivity and energy indicators. Grinding is one of the most important technological processes in feed preparation. Preparing feed using modern equipment is accompanied by significant energy consumption. At present, the issues of feed grinding mechanization have not yet been sufficiently resolved.

For grinding roughage of any moisture content, as well as grinding other feed components and mixing them, machines with a multiplane grinding apparatus are used. In a chopper with a multiplane grinding apparatus, feed moves towards the unloading chamber, making circular movements along the inner surface of the working chamber. During movement, they enter the working zone of the cutting elements blade, the design and kinematic parameters of which influence the force applied to grind the feed components entering the working chamber and, as a result, are an influencing factor that changes the power indicators of the installation.

The article presents the results of theoretical studies to determine the required power for the multifunctional shredder-mixer drive of feed, taking into account its design features, physical and mechanical properties of feed and possible fluctuations in feed supply to the working chamber.

Key words: grinding; rotor; mixer; knife; dynamic mode; chamber; moment of inertia; conveyor.

Fig. 3. Ref.: 3 titles.

Введение. Для измельчения грубых стебельчатых кормов и корнеклубнеплодов используются ножевые и молотковые рабочие органы. Достоинствами ножевых рабочих органов являются малый удельный расход энергии при лучшем качестве измельчения и возможность измельчать корма любой влажности.

Перечисленные преимущества предопределили наибольшее применение для измельчения корнеклубнеплодов и стебельчатых кормов ножевых рабочих органов, которые могут быть установлены в вертикально или горизонтально расположенной рабочей камере.

Преимуществом измельчителей с вертикально расположенной рабочей камерой является возможность автоматизировать процесс подачи кормов в камеру измельчения и выгрузку готового продукта.

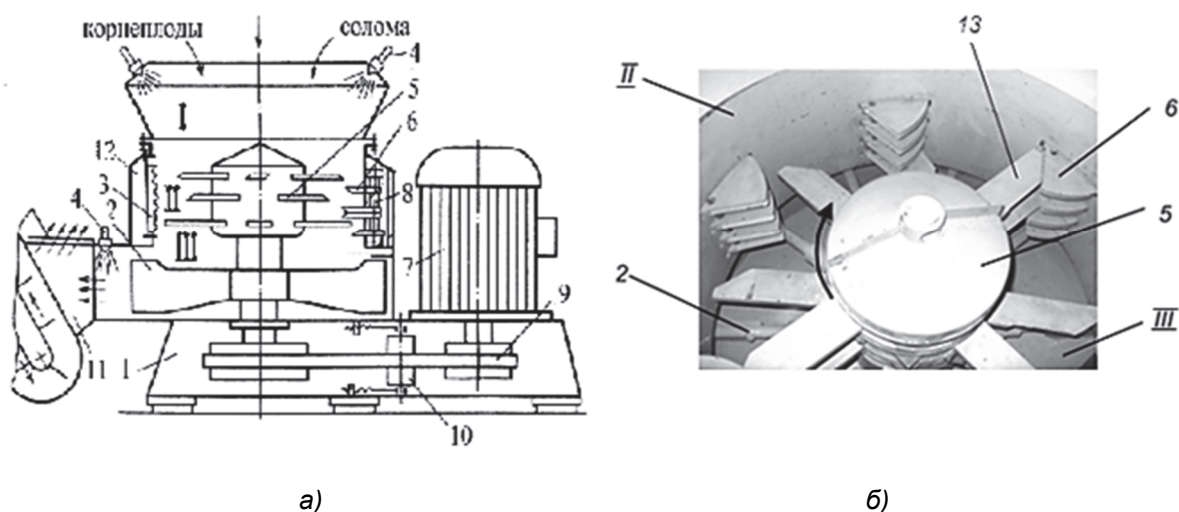
Таким образом, при проектировании машин для измельчения кормов в вертикальном потоке необходимо учитывать параметры, определяющие величину затрат энергии на рабочий процесс машины. Данный показатель обуславливает выбор электродвигателя для привода измельчителя кормов вертикального типа.

Материалы и методы исследования. Измельчитель-смеситель кормов ИСК-3 состоит из вертикально расположенных одна над другой приемной I, измельчения и смешивания (рабочей) II и выгрузной III камер (рисунок 1).

Рабочая камера II имеет шесть окон, в которых устанавливают пакеты ножей-противорезов 6 и (или) зубчатые деки 3. Окна закрывают с наружной стороны кожухами 12. Внутри рабочей камеры II соосно расположен ротор 5.

Ротор 5 измельчителя-смесителя кормов расположен вертикально, на нем закреплены четыре яруса ножей. В каждом ярусе расположено по четыре ножа. Ножи каждого нижнего яруса смещены на 45° относительно ножей верхнего яруса. Расположение ножей по указанным на рисунке 2 схемам позволяет равномерно распределить корма по периметру рабочей камеры и организовать их перемещение в выгрузную камеру по винтовой линии. Изложенный режим позволяет исключить неравномерную нагрузку на ротор и обеспечить оптимальный энергетический режим работы измельчителя.

В рабочем режиме ножи 13 и ножи-противорезы 6 (см. рисунок 1) образуют режущие пары. При работе измельчителя-смесителя корма загружаются в камеру I и попадают в зону взаимодействия ножей-противорезов 6 с ножами ротора 5, где измельчаются и равномерно



1 — приемная камера; II — камера измельчения и смешивания; III — выгрузная камера; 1 — рама; 2 — швырялка; 3 — зубчатая дека; 4 — форсунка; 5 — ротор; 6 — нож-противорез; 7 — электродвигатель; 8 — ось блока противорезов; 9 — клиноременной привод; 10 — ролик; 11 — выгрузной транспортер; 12 — кожух; 13 — нож ротора

Рисунок 1. — Измельчитель-смеситель ИСК-3; а — схема и общий вид измельчителя-смесителя кормов ИСК-3; б — вид сверху

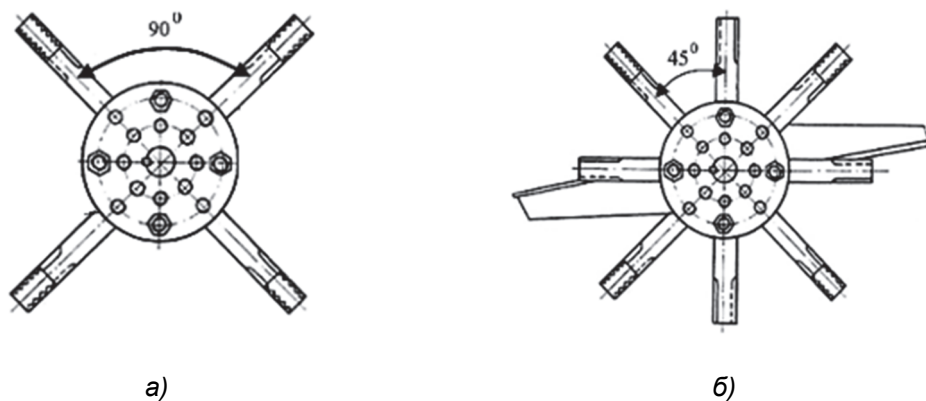


Рисунок 2. — Схемы расположения ножей на роторе измельчителя-смесителя кормов ИСК-3: а — расположение смежных ножей в ярусе ротора; б — расположение ножей относительно смежных ярусов ротора

распределяются по периметру рабочей камеры. Затем частицы кормов увлекаются на гладкий участок внутренней поверхности камеры и под действием силы тяжести по спирали несколько перемещаются вниз.

В нижней части вала 5 ротора, расположенной в выгрузной камере, находится швырялка 2, которая транспортирует кормосмесь в приемный транспортер.

Таким образом, необходимо определить затраты энергии на рабочий процесс в рабочей и выгрузной камерах.

Результаты исследования и их обсуждение. Мощность, затрачиваемая на резание корма в вертикальном потоке, определим на примере конструкции измельчителя-смесителя кормов вертикального типа ИСК-3.

Из перечисленных составляющих камер ИСК-3 корм подвергается механическому воздействию в рабочей II и выгрузной III камерах. Следовательно, потребную мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа определим по формуле

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{изм}} + N_{\text{выгр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{изм}}$ — мощность, затрачиваемая на измельчение корма в рабочей камере, кВт;

$N_{\text{выгр}}$ — мощность, затрачиваемая на транспортировку корма в выгрузной камере, кВт.

Попадая в рабочую камеру, корм под действием гравитационной силы перемещается вниз и встречает на своем пути грани расположенных последовательно в вертикальной плоскости ножей 5 и ножей-противорезов 6 [1].

Следовательно, при работе измельчителя-смесителя кормов вращающийся ротор можно рассматривать как маховик, вращающийся относительно неподвижной оси под действием момента $M_{\text{дв}}$ с угловой скоростью ω . В этом случае уравнение привода ротора в динамическом режиме будет иметь следующий вид:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{с}},$$

где $I \frac{d\omega}{dt}$ — момент инерции ротора измельчителя-смесителя, Н · м;

$M_{\text{дв}}$ — момент, возникающий от электродвигателя, Н · м;

$M_{\text{с}}$ — момент сопротивления вращению ротора, Н · м.

Для привода системы на вращение затрачивается мощность, величину которой можно определить по формуле

$$N_{\text{изм}} = M_{\text{дв}} \omega,$$

где ω — частота вращения ротора, с^{-1} .

Для определения мощности, необходимой для привода ротора измельчителя, следует определить момент, возникающий от электродвигателя. Для этого уравнение привода ротора в динамическом режиме представим в следующем виде:

$$M_{\text{дв}} = I \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{с}}. \quad (2)$$

Определим составляющие уравнения (2).

Сопротивление движению ротора возникает:

- при измельчении кормов $M_{\text{изм}}$;
- при перемещении кормов внутри рабочей камеры $M_{\text{движ}}$;
- на преодоление трения в подшипниках;
- на преодоление сопротивления воздуха.

В общем виде рассмотренные моменты можно представить в следующем виде:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{изм}} + M_{\text{движ}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{воз}}. \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что два последних слагаемых $M_{\text{тр}}$ и $M_{\text{воз}}$ в измельчителе-смесителе вертикального типа будут оказывать небольшое влияние на сопротивление движению системы. В измельчителях этого типа узлы трения размещены за пределами рабочей камеры и надежно изолированы от попадания пыли или других примесей. Горизонтальное расположение боковых плоскостей ножей и небольшая толщина оказывают минимальное сопротивление воздушному потоку.

Таким образом, с принятыми допущениями уравнение (2) будет иметь вид:

$$M_{\text{дв}} = I \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{изм}} + M_{\text{движ}}. \quad (4)$$

При работе измельчителя-смесителя кормов происходит изменение подачи кормовых компонентов в рабочую камеру. В результате колебания поступающих кормов возможно возрастание момента при измельчении кормов [2], т. е.

$$M_{\text{изм}} = M'_{\text{изм}} + \Delta M_{\text{изм}}. \quad (5)$$

где $M'_{\text{изм}}$ — момент при измельчении кормов, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$\Delta M_{\text{изм}}$ — приращение момента при колебании поступающих кормов в рабочую камеру, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Момент, возникающий при измельчении корма, выразим через удельный расход энергии:

$$M'_{\text{изм}} = (\omega, q, f, t) = \frac{A_{\text{уд. изм}}(\omega, q, f, t)}{\omega} q, \quad (6)$$

где $A_{\text{уд. изм}}$ — удельный расход энергии на измельчение и смешивание кормов, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$;

ω — частота вращения ротора, с^{-1} ;

q — производительность измельчителя-смесителя, $\text{кг} / \text{с}$;

f — коэффициент трения;

t — время, затрачиваемое на выполненный процесс, с.

Величину приращения момента $\Delta M_{\text{изм}}$ можно определить по формуле

$$\Delta M_{\text{изм}} = \frac{\Delta A(\omega, q, f, t)}{\omega} (q + \Delta q), \quad (7)$$

где Δq — величина изменения производительности измельчителя-смесителя кормов в процессе работы, кг / с.

В уравнении (7) приращение удельных затрат энергии на измельчение и смешивание кормов при незначительных изменениях независимых переменных можно определить по формуле

$$\Delta A = \frac{dF(\omega, q, f)}{dq} \Delta q - \frac{dF(q, \omega, f)}{d\omega} \Delta \omega + \frac{dF(q, \omega, f)}{df} \Delta f$$

или

$$\Delta A = K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f, \quad (8)$$

где Δq — величина изменения производительности измельчителя-смесителя кормов, кг / с;

$\Delta \omega$ — величина изменения частоты вращения ротора, с⁻¹;

Δf — величина изменения коэффициента трения.

K_q, K_ω, K_f — приращение частных производных исходного режима работы измельчителя-смесителя кормов;

Подставив в формулу (5) значения (6)—(8), определим момент сопротивления при измельчении кормов:

$$M_{\text{изм}} = \frac{KA_{\text{уд. изм}}}{\omega} q + \left(\frac{K_q \Delta q}{\omega} - \frac{K_\omega \Delta \omega}{\omega} + \frac{K_f \Delta f}{\omega} \right) (q + \Delta q)$$

или, упростив,

$$M_{\text{изм}} = \omega^{-1} \left[A_{\text{уд. изм}} q + (K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f) (q + \Delta q) \right]. \quad (9)$$

Момент, затрачиваемый на ускорение корма в рабочей камере, представим в виде:

$$M_{\text{движ}} = M'_{\text{движ}} + \Delta M_{\text{движ}},$$

где $M'_{\text{движ}}$ — момент, затрачиваемый на ускорение корма, Н · м;

$\Delta M_{\text{движ}}$ — приращение момента, затрачиваемого на ускорение корма в рабочей камере измельчителя, Н · м.

Момент

$$M'_{\text{движ}}(\omega, q, t) = \frac{m(\omega, q) v_{\text{ск}}^2(\omega, q, t)}{2}, \quad (10)$$

где m — масса корма в рабочей камере, кг;

$v_{\text{ск}}$ — скорость слоя корма в рабочей камере, м / с.

В рабочей камере измельчителя вертикального типа корм действием ножей увлекается в круговое движение и под действием силы тяжести перемещается в выгрузную камеру. Таким образом, частицы корма в рабочей камере совершают равномерное винтовое движение, скорость которого можно определить по формуле

$$v_{\text{ск}} = \frac{S_{\text{ч}} \omega_{\text{ч}}}{2\pi},$$

где $S_{\text{ч}}$ — шаг винтовой линии движения частиц корма, м;

$\omega_{\text{ч}}$ — угловая скорость частиц корма в рабочей камере измельчителя, с^{-1} .

Шаг винтовой линии движения частиц корма в измельчителе вертикального типа можно определить по формуле [3]

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi D_{\text{к}} H_{\text{к}}}{L_{\text{ч}}},$$

где $D_{\text{к}}$ — диаметр рабочей камеры измельчителя, м;

$H_{\text{к}}$ — высота рабочей зоны камеры измельчителя, м;

$L_{\text{ч}}$ — путь частиц корма в рабочей камере, м.

Тогда скорость движения корма внутри рабочей камеры можно определить по формуле

$$v_{\text{ск}} = \frac{D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}}}{2L_{\text{ч}}}.$$

Подставляя в формулу (10) значение (11), можно определить момент, затрачиваемый на ускорение корма в рабочей камере измельчителя-смесителя вертикального типа:

$$M_{\text{движ}} = \frac{m (D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}})^2}{4L_{\text{ч}}^2} + K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega. \quad (12)$$

Приращение момента, затрачиваемого на ускорение корма, зависит от колебания массы корма в рабочей камере:

$$m = F(q, \omega)$$

или приращение

$$\Delta M_{\text{движ}} = \frac{dF(q, \omega)}{dq} \Delta q - \frac{dF(q, \omega)}{d\omega} \Delta \omega. \quad (13)$$

Упростив уравнение (13), получим

$$\Delta M_{\text{движ}} = K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega.$$

Момент инерции ротора измельчителя в общем виде можно определить по формуле

$$I \frac{d\omega}{dt} = \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2, \quad (14)$$

где ω — частота вращения ротора измельчителя, с^{-1} ;

m_p — масса ротора, кг;

r_p — радиус инерции i -го элемента ротора относительно оси вращения, м.

Удельный расход энергии на измельчение и смешивание кормов

$$A_{\text{уд.изм}} = \frac{A_{\text{изм}}}{m},$$

где $A_{\text{изм}}$ — работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления резанию корма, Дж.

Для определения работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления резанию корма, рассмотрим силы, возникающие при выполнении данного процесса.

При движении ножа в рабочем режиме слой корма, находящийся между ножом и противорезом, сжимается. Силу сжатия корма для этого случая найдем по формуле

$$F_{\text{обж}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{2 \Delta_1},$$

где μ — коэффициент Пуассона;

E — модуль деформации корма, $\text{Н} / \text{м}^2$;

$h_{\text{сж}}$ — величина сжатого слоя корма, м;

Δ_1 — зазор между ножом и противорезом, м.

Работа, затрачиваемая на преодоление силы $F_{\text{обж}}$, определяется по формуле

$$A_{\text{тр1}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{2 \Delta_1} f_k l_{\text{н.пр}},$$

где f_k — коэффициент трения корма по металлу;

$l_{\text{н.пр}}$ — длина ножа, движущегося над плоскостью противореза, м.

В процессе работы измельчителя корм поступает в зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом. В результате возникает горизонтально направленная сила обжатия, величину которой можно рассчитать по формуле

$$F_{1\text{обж}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{\Delta_2},$$

где Δ_2 — зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом, м.

Работу, затрачиваемую на преодоление силы обжатия $F_{1\text{обж}}$, можно найти по формуле

$$A_{\text{тр2}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{\Delta_2} f_k b_n.$$

При резании корма лезвием ножа на его активной части возникает критическая сила резания, работу, затрачиваемую на ее преодоление, можно определить по формуле

$$A_{\text{кр.рез}} = F_{\text{рез}} l_{\text{лезв}},$$

где $F_{\text{рез}}$ — сила резания, Н;

$l_{\text{лезв}}$ — длина активной части лезвия ножа, м.

Сопротивление резанию $F_{рез}$ состоит из силы, связанной с преодолением сопротивления слоя материала сжатию $F_{1сж}$, силы непосредственного резания $F_{1рез}$, т. е.

$$F_{рез} = F_{1рез} + F_{1сж}.$$

Сопротивление резанию

$$F_{1рез} = \delta l_{лезв} \sigma_p,$$

где δ — толщина (острота) лезвия ножа, м;
 σ_p — разрушающее контактное напряжение, Н / м².
 Сила сжатия на фаске ножа

$$F_{1сж} = \frac{ES_n h_{сж}}{h},$$

где E — модуль деформации корма, Н / м²;
 S_n — площадь лезвия ножа, участвующая в сжатии, м²;
 $h_{сж}$ — величина сжатия корма, м;
 h — толщиной слоя корма, м.

Тогда работа, затрачиваемая на преодоление критической силы резания,

$$A_{кр.рез} = \left(\delta l_{лезв} \sigma_p + \frac{ES_n h_{сж}}{h} \right) l_{лезв}. \quad (15)$$

Подставив в формулу (4) значение формул (9), (12), (14) и (15), определим мощность, затрачиваемую на привод ротора измельчителя при выполнении технологического процесса измельчения:

$$N_{изм} = \omega^{-1} \left[\frac{\left(\delta l_{лезв} \sigma_p + \frac{ES_n h_{сж}}{h} \right) l_{лезв}}{m} A_{уд.изм} q + (K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f) (q + \Delta q) \right] + \frac{m(D_k H_k \omega_q)^2}{4L_q^2} + K_{двиг. q} \Delta q - K_{двиг. \omega} \Delta \omega + \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2. \quad (16)$$

Формула (16) позволяет определить мощность на привод ротора измельчителя в режиме измельчения корма с учетом его конструктивных особенностей, физико-механических свойств кормов и возможных колебаний подачи кормов в рабочую камеру.

Выгрузная камера III измельчителя-смесителя ИСК-3 представляет собой цилиндр с выгрузным окном, соединенным с трубопроводом. Для транспортировки сыпучего материала внутри камеры на роторе 5 установлена швырляка 2 (см. рисунок 1). Во время работы измельчителя материал под действием гравитационной силы поступает на лопасти швырляки и перемещается вдоль ее оси ко внутренней поверхности цилиндра. Достигнув выгрузного окна, частицы материала лопастями швырляки выбрасываются в трубопровод.

Мощность, затрачиваемую на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3, в общем виде можно определить по формуле

$$N_{выгр} = Q_{ш} \omega_{ш} R^2, \quad (17)$$

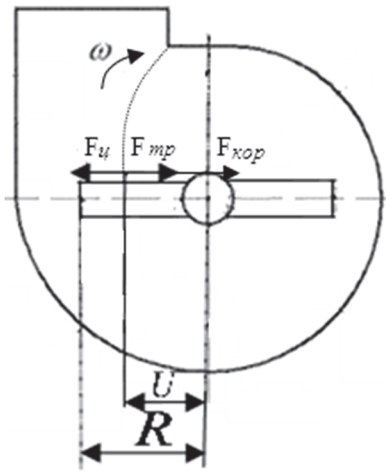


Рисунок 3. — Схема к определению производительности выгрузной камеры измельчителя-смесителя ИСК-3

где $Q_{ш}$ — производительность швырляки, кг / с;
 $\omega_{ш}$ — угловая скорость лопасти швырляки, c^{-1} ;
 R — радиус лопастей швырляки, м.

Для определения производительности швырляки рассмотрим перемещения корма внутри выгрузной камеры. Так, момент схода частиц материала начинается на некотором расстоянии U от края лопасти (рисунок 3).

Производительность вентилятора есть величина, пропорциональная изменению разности $R - U$, т. е.

$$Q_{ш} = b(R^2 - U^2)\rho\omega_{ш}, \quad (18)$$

где b — ширина лопасти, м;
 R — радиус, описываемый лопастью, м;
 U — расстояние до момента схода частиц материала с лопасти в рабочей зоне выгрузного окна, м;
 ρ — плотность материала, $кг / м^3$;
 $\omega_{ш}$ — угловая скорость лопасти, c^{-1} .

Определим расстояние до момента схода частиц материала с лопасти. Для этого рассмотрим силы, действующие на частицу материала в момент схода ее с лопасти:

1) сила тяжести —

$$G = mg,$$

где m — частицы материала, кг;

g — ускорения свободного падения, $м / с^2$;

2) сила трения частицы материала о плоскость лопасти —

$$F_{тр} = fG, \quad (19)$$

где f — коэффициент трения;

3) центробежная сила —

$$F_{ц} = m\omega_{ш}^2 U;$$

4) сила Кориолиса —

$$F_{кор} = 2f m \omega_{ш} \frac{dU}{dt}, \quad (20)$$

где $\frac{dU}{dt}$ — скорость перемещения частицы по плоскости лопасти в радиальном направлении, $м / с$;

t — время перемещения частицы корма по плоскости лопасти в радиальном направлении, с.

С учетом формул (19) и (20) определим силу трения частицы материала о плоскость лопасти:

$$F_{тр.л} = f(F_{тр} + F_{кор}).$$

Тогда с учетом перечисленных сил получим дифференциальное уравнение относительного движения частицы корма по лопасти:

$$-m \frac{d^2 U}{dt^2} + m \omega_{ш}^2 U - f \left(2m \omega_{ш} \frac{dU}{dt} + fmg \right) - fmg = 0.$$

После преобразования дифференциальное уравнение относительного движения частицы корма по лопасти имеет вид:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2f\omega_m \frac{dU}{dt} - \omega_m^2 U = f. \quad (21)$$

Полученное выражение (21) представляет собой полное дифференциальное уравнение второго порядка. Полное решение этого уравнения равно сумме общего линейного и частного уравнения.

Общее решение неполного дифференциального уравнения:

$$U_1 = C_1 e^{\left(f\omega_m + \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} + C_2 e^{\left(f\omega_m - \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t}, \quad (22)$$

где C_1, C_2 — производные постоянной интегрирования.

Частное решение уравнения (21) ищем в подобии правой части $U_2 = C$. Отсюда $\frac{d^2U}{dt^2} = 0$ и $\frac{dU}{dt} = 0$. Тогда уравнение (21) будет иметь вид: $0 + 0 - \omega_m^2 C = f$. Откуда $C = -\frac{f}{\omega_m^2}$.

Искомое решение уравнения (22) будет иметь вид:

$$U = U_1 + U_2 = C_1 e^{\left(f\omega_m + \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} + C_2 e^{\left(f\omega_m - \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} - \frac{f}{\omega_m^2}. \quad (23)$$

При начальных условиях $t = 0; \frac{dU}{dt} = 0; U = 0$ получим

$$\begin{cases} U_0 = C_1 + C_2 - \frac{f}{\omega_m^2} = 0; \\ U_0 = C_1 \omega_m (f + \sqrt{f^2+1}) + C_2 \omega_m (f - \sqrt{f^2+1}) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Решая систему (24), получим

$$\begin{cases} C_1 = \frac{f}{\omega_m^2} \left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right); \\ C_2 = f \frac{(f + \sqrt{f^2+1})}{2 \omega_m^2 \sqrt{f^2+1}}. \end{cases} \quad (25)$$

Полученные значения (25) подставим в уравнение (23):

$$U = \frac{f}{\omega_m^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right) e^{t\omega_m(f + \sqrt{f^2+1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right) e^{t\omega_m(f - \sqrt{f^2+1})} - 1 \right]. \quad (26)$$

Подставив значения (26) в уравнение (18), определим производительность вентилятора:

$$Q_{\text{ш}} = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}. \quad (27)$$

Из формулы (27) видно, что производительность швырялки зависит от конструктивных особенностей лопастей и физико-механических свойств транспортируемого материала.

Увеличить производительность вентиляционного пневмотранспортного оборудования можно, уменьшив силу трения материала между лопастями и внутренней поверхностью цилиндрического корпуса.

Подставив в уравнение (17) формулу (27), определим мощность, затрачиваемую на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3:

$$N_{\text{выгр}} = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}^3 R^2. \quad (28)$$

Из формулы (28) видно, что мощность, затрачиваемая на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3, зависит от конструктивных параметров выгрузной камеры и физико-механических свойств корма.

Подставив в уравнение (1) формулы (16) и (28), определим мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа:

$$N_{\text{дв}} = \omega^{-1} \left[\frac{\left(\delta l_{\text{лезв}} \sigma_p + \frac{ES_{\text{н}} h_{\text{сж}}}{h} \right) l_{\text{лезв}}}{m} A_{\text{уд. изм}} q + (K_q \Delta q - K_{\omega} \Delta \omega + K_f \Delta f)(q + \Delta q) \right] + \\ + \frac{m(D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}})^2}{4L_{\text{ч}}^2} + K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega + \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2 + N_{\text{выгр}} = \\ = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}^3 R^2. \quad (29)$$

Из формулы (29) видно, что мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа зависит от физико-математических и конструктивно-кинематических параметров машины.

Заключение. Полученная формула (29) показывает, что при определении мощности на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа необходимо учитывать комплекс показателей:

- рассматривать физико-механические свойства обрабатываемых кормов. Если при выполнении рабочего процесса обработке подвергается одновременно несколько видов кормов с различными физико-механическими свойствами, то удельные затраты энергии на выполняемый процесс будут варьироваться;

- учитывать колебания подачи исходных кормов в рабочую камеру измельчителя-смесителя. В целях исключения перегрузок машины необходимо минимизировать рассматриваемый параметр;

– формировать рабочую и выгрузную камеры для выполнения конкретных задач. Измельчающий аппарат должен обеспечивать обработку кормов в соответствии с заданными зоотехническими требованиями. Швырялка выгрузной камеры должна обеспечивать эвакуацию готового продукта в приемное устройство с учетом колебаний поступления обрабатываемых кормов.

Список цитированных источников

1. *Китун, А. В.* Механизация процесса приготовления и раздачи кормов на скотоводческих фермах на основе многофункциональных модульных агрегатов : монография / А. В. Китун. — Минск : БГАТУ, 2009. — 207 с.
2. *Китун, А. В.* Минимизация энергозатрат в кормоизмельчителе / А. В. Китун, В. И. Передня // Тракторы и с.-х. машины. — 2006. — № 9. — С. 31—32.
3. *Ревенко, И. И.* О зазоре между молотками и рабочей поверхностью дробильной камеры / И. И. Ревенко, К. Ф. Рожковский // Механизация и электрификация социалист. сел. хоз-ва. — 1973. — № 3. — С. 19—21.

Поступила в редакцию 28.03.2024.