

# ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

DOI 10.12737/24508

УДК 631.363.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

**Димитриев Николай Владимирович**, аспирант кафедры «Механизация технологических процессов в АПК», ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ.

440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30.

E-mail: sha\_penza@mail.ru

**Коновалов Владимир Викторович**, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова, ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

**Терюшков Вячеслав Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин», ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ.

440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30.

E-mail: sha\_penza@mail.ru

**Чупшев Алексей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин», ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ.

440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30.

E-mail: sha\_penza@mail.ru

**Ключевые слова:** смешивание, неравномерность, спираль, конвейер, энергоемкость, перемешивание.

*Цель исследований – снижение энергоемкости приготовления смеси концентрированных кормов (комбикормов-концентратов) при соблюдении зоотехнических требований на качество смеси за счет применения смесителей-конвейеров. Задачи исследований – установление функциональной зависимости между конструктивными и технологическими параметрами смесителя, и показателями технологического процесса; выявление оптимальных либо рациональных значений параметров смесителя, обеспечивающих требуемое качество смеси и минимальную энергоемкость смесеобразования. Основой современной промышленности является применение самых разнообразных смесей и получаемых на их основе композиционных материалов. Получение смесей осуществляется разнообразными устройствами, в том числе смесителями, экструдерами и шнековыми прессами. Широко распространены в промышленности барабанные смесители, сушилки, бетономешалки и другие устройства. Они низко затратны в потреблении энергии и способны готовить за короткий срок возможную равномерность смеси. В дальнейшем качество смеси практически не улучшается. При этом попытки использовать барабанные смесители, широко представленные в торговых сетях, для приготовления комбикорма на основе белково-витаминных добавок (БВД) и собственного фуража не дали результата ввиду недостаточного качества получаемой смеси. В статье дается описание, конструктивная схема и фотография смесителя-конвейера непрерывного действия со спиральным рабочим органом. Описаны методика и результаты экспериментальных исследований непрерывного смесителя-конвейера. Представлены выражения, описывающие неравномерность смеси и энергоемкость перемешивания*

в зависимости от длины зоны смешения, производительности устройства и доли контрольного компонента. Построены двумерные сечения поверхностей отклика второго порядка. На основе анализа графиков неравномерности смеси и энергоемкости обоснованы параметры смесителя: оптимальна производительность устройства – около 3,6 т/ч; смеситель-конвейер работоспособен для приготовления сухой смеси при доле меньшего компонента смеси – не менее 13% и длине зоны смешивания – не менее 1 м.

Основой современной промышленности является применение самых разнообразных смесей [1] и получаемых на их основе композиционных материалов [2, 3]. Получение смесей осуществляется разнообразными устройствами, в том числе смесителями [3-5], экструдерами и шнековыми прессами [5]. Широко распространены в промышленности барабанные смесители, сушилки, бетономешалки и другие устройства [1]. Они низко затратны в потреблении энергии и способны готовить за короткий срок возможную равномерность смеси. В дальнейшем качество смеси практически не улучшается [6-8]. При этом попытки использовать барабанные смесители, широко представленные в торговых сетях, для приготовления комбикорма на основе БВД и собственного фуража не дали результата ввиду недостаточного качества получаемой смеси [6, 7]. Проведенные исследования позволили определить направление совершенствования барабанных смесителей за счет изменения конструкции его лопастей [8].

**Цель исследований** – снижение энергоемкости приготовления смеси концентрированных кормов (комбикормов-концентратов) при соблюдении зоотехнических требований на качество смеси за счет применения смесителей-конвейеров.

**Задачи исследований** – установление функциональной зависимости между конструктивными и технологическими параметрами смесителя, и показателями технологического процесса; выявление оптимальных либо рациональных значений параметров смесителя, обеспечивающих требуемое качество смеси и минимальную энергоемкость смесеобразования.

**Материалы и методы исследований.** Конструктивная схема барабанного смесителя периодического действия и его перемешивающего аппарата представлены на рисунках 1 и 2 [6-8].

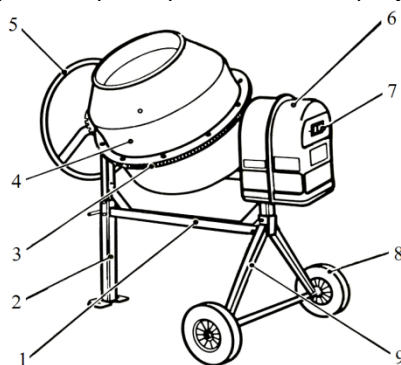


Рис. 1. Барабанный смеситель периодического действия:

1 – перекладина; 2 – опора; 3 – зубчатый венец; 4 – барабан; 5 – штурвал; 6 – силовой блок; 7 – блок управления; 8 – колесо; 9 – опора

Состоит смеситель (рис. 1) из выпускаемой промышленностью рабочей емкости (барабана) 4, силового блока 6 в составе электродвигателя и ременной передачи, зубчатой передачи 3, опор 2, 9, перекладины 1 и штурвала 5 для поворота оси вращения барабана. Ось вращения барабана (рис. 2) располагается под углом  $\alpha$  к горизонтали. Внутри емкости крепятся предлагаемые авторами радиальные лопасти 2, закрепленные на стенках барабана 1 в шахматном порядке под углом  $\beta$  к оси вращения барабана. Лопасти плоские, имеют загиб кромки. Работа смесителя осуществляется следующим образом: барабан смесителя с помощью штурвала устанавливается на угол наклона оси вращения относительно горизонтали  $\alpha$ . После этого в барабан засыпаются компоненты смеси. Последними засыпаются компоненты, имеющие в составе смеси меньшую долю. По окончании времени перемешивания поворачивают штурвал и приготовленная смесь высыпается из барабана под действием силы тяжести и центробежной силы. На период перемешивания устанавливается крышка, позволяющая предотвратить пыление продуктов.

**Результаты исследований.** Известно, что энергоемкость смесеобразования определяется для смесителя периодического действия  $Y$  (Дж/кг) с учетом затраченной энергии (работы)  $A$  (Дж), времени цикла смешивания  $T$  (с) и массы приготовленной смеси  $M$  (кг):

$$Y = \frac{A}{M} = \frac{N_{BC} \cdot T_{Ц}}{M} = \frac{N_{BC} \cdot (T_3 + T_C + T_B + T_{XX})}{M}, \quad (1)$$

где  $A$  – работа, затраченная на привод смесителя за цикл смесеобразования, Дж;  $M = (V \cdot \psi \cdot \rho)$  – масса порции приготовленной смеси, кг;  $V$  – объем барабана, м<sup>3</sup>;  $\psi$  – степень заполнения барабана материалом;

$\rho$  – плотность вороха смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $N_{BC}$  – мощность, потребляемая на привод смесителя при смешивании, Вт;  $T_{Ц}$  – длительность цикла смешивания, с;  $T_3$  – длительность загрузки компонентов смеси, с;  $T_B$  – длительность выгрузки компонентов смеси, с;  $T_C$  – длительность перемешивания (смешивания) компонентов смеси, с;  $T_{ХХ}$  – длительность холостого хода, с. Продолжительность загрузки составляет 10-15 с [7], длительность выгрузки – 15-25 с, возврата барабана в исходное положение – 10-20 с.

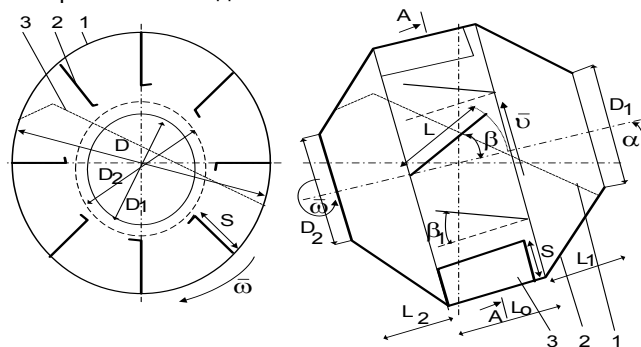


Рис. 2. Конструктивная схема перемешивающего аппарата барабанного смесителя:  
1 – емкость барабана; 2 – лопасть; 3 – свободная поверхность сыпучего материала

По аналогии с процессом диффузии, равномерность приготовленной смеси описывается [4, 9]:

$$\Theta = 1 - e^{-k \cdot T_C}, \quad (2)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент интенсивности перемешивания;  $T_C$  – длительность перемешивания [10]:

$$T_C = -\frac{1}{k} \ln \frac{1-\Theta}{1-\Theta_H}, \quad (3)$$

где  $\Theta_H$ ,  $\Theta$  – равномерность смешивания компонентов на начало смешивания и в конце перемешивания, 0,01%.

Учитывая, что соотношение массы и времени является производительностью, получим выражение энергоемкости:

$$Y = \frac{N_{BC}}{Q_{Ц}} = \frac{N_{BC}}{(Q_3 + Q_C + Q_B + M / T_{ХХ})}, \quad (4)$$

где  $Q_{Ц}$  – производительность смешивания цикловая, кг/с;  $Q_3$  – производительность загрузки компонентов смеси, кг/с;  $Q_B$  – производительность на выгрузке компонентов смеси, кг/с;  $Q_C$  – производительность перемешивания (смешивания) компонентов смеси, кг/с.

Известно выражение работы, затрачиваемой на подъем смеси внутри барабана, Дж:

$$A = G_1 \cdot h_1 \cdot z_1 + G_2 \cdot h_2 \cdot z_2, \quad (5)$$

где  $G_1$  – сила тяжести смеси, поднимаемой под действием сил трения о стенки барабана, Н;  $G_2$  – сила тяжести смеси, поднимаемой лопастями барабана, Н;  $h_1$ ,  $h_2$  – высота подъема смеси стенками барабана и лопастями соответственно, м;  $z_1$ ,  $z_2$  – кратность циркуляции смеси за один оборот барабана, поднимаемой под действием сил трения и лопастями соответственно.

Однако данная формула не учитывает конструктивные параметры лопасти и угол наклона барабана.

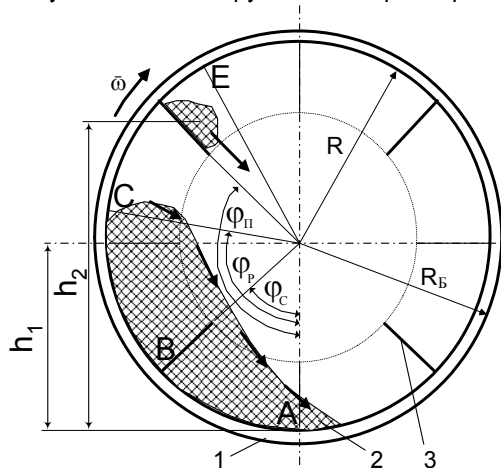


Рис. 3. Схема для расчета мощности барабанных смесителей с гравитационным перемешиванием:  
1 – барабан; 2 – смесь; 3 – лопасть

Согласно схеме (рис. 3) высота подъема смеси лопастями, м [1]:

$$h_2 = R - R \cdot \cos \varphi_n = R \cdot (1 - \cos \varphi_n) \cdot \cos \alpha \approx 1,7R \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

где  $\varphi_n$  – угол подъема лопасти, при котором смесь сходит с нее, град.  $\varphi_n \approx 135^\circ$ .

Движение смеси под действием сил трения сложнее, чем при воздействии лопастей. Приняв угол перемещения смеси из точки А в точку В  $\varphi = 90^\circ$ , высота подъема смеси под действием сил трения  $h_1$  определится, м:

$$h_1 = R \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол наклона оси вращения барабана, рад.

Кратность циркуляции смеси  $z_1$  за один оборот барабана, поднимаемой под действием сил трения известна [1]:

$$z_1 = \frac{2\pi}{2 \cdot \varphi_P} \approx \frac{2\pi}{\pi} \approx 2, \quad (8)$$

где  $\varphi_P$  – действительный угол подъема, рад.

Кратность циркуляции смеси  $z_2$ , поднимаемой лопастями за один оборот барабана:

$$z_2 = \frac{T_{об}}{T_n + T_{оп}}, \quad (9)$$

где  $T_{об}$  – время одного оборота барабана,  $T_{об} = 1/n$ , с;  $n$  – частота вращения барабана, с<sup>-1</sup>;  $T_n$  – время подъема смеси лопастью, с,

$$T_n = \frac{\varphi_n}{2\pi \cdot n} = \frac{0,374}{n}, \quad (10)$$

где  $T_{оп}$  – время падения смеси с высоты  $h_2$ , с,

$$T_{оп} = \frac{2 \cdot h_2}{g} \approx 0,6 \cdot \bar{R}. \quad (11)$$

Таким образом, кратность циркуляции смеси, поднимаемой лопастями,

$$z_2 = \frac{1/n}{\frac{0,374}{n} + 0,6 \cdot \bar{R}}. \quad (12)$$

Объем смеси между лопастями барабана можно определить

$$V_L = L \cdot \cos \beta \cdot \frac{\pi \cdot R^2 - (R-S)^2 \cdot \varphi_P}{2\pi}, \quad (13)$$

где  $R$  – радиус (внутренний) барабана, м;  $L$  – длина лопасти, м;  $S$  – ширина лопасти, м;  $\varphi_P$  – угол подъема лопасти, при котором начинается сход материала с лопасти, рад.

Учитывая, что длина лопасти  $L$  и ширина лопасти  $S$  соответствуют определенной пропорции внутреннему диаметру барабана  $D=2R$ , то выше указанные параметры можем записать [10]:

$$L = D \cdot k_l; S = D \cdot k_s, \quad (14)$$

где  $k_l$  – коэффициент длины лопасти, 0,8...1,2;  $k_s$  – коэффициент ширины лопасти, 0,25.

Массу смеси между лопастями барабана можно определить

$$\begin{aligned} M_2 &= V_L \cdot \rho = L \cdot \rho \cdot \cos \beta \cdot \frac{R^2 - (R-S)^2 \cdot \varphi_P}{\pi} = \\ &= L \cdot \rho \cdot \cos \beta \cdot \frac{0,25D^2 - (0,5D-S)^2 \cdot \varphi_P}{\pi} = D \cdot k_l \cdot \rho \cdot \cos \beta \cdot \frac{0,25D^2 - [D \cdot 0,5 - k_s]^2 \cdot \varphi_P}{\pi}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $D$  – внутренний диаметр барабана, м.

Масса смеси, поднимаемой под действием сил трения о стенки барабана, определится, кг:

$$M_1 = M - M_2. \quad (16)$$

Подставив полученные значения в формулу (5), получим выражение для расчета работы на подъем смеси, Дж:

$$A = M_1 \cdot g \cdot 2R \cdot \cos \alpha + M_2 \cdot g \cdot 1,7R \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{\frac{0,374}{n} + 0,6 \cdot \bar{R}}. \quad (17)$$

Указанная работа состоит из двух слагаемых:

$$A = A_1 + A_2,$$

где  $A_1$  – работа, затрачиваемая на подъем материала стенками барабана, Дж;  $A_2$  – работа, затрачиваемая на подъем материала лопастями барабана, Дж.

Поскольку данные выражения не учитывают внутреннее трение материала, а также турбулизацию материала под воздействием лопастей, следует ввести поправочные коэффициенты, учитывающие конструктивные параметры смесителя.

В таком случае:

$$A_1 = k_{wb} \cdot g \cdot D \cdot \cos \alpha \cdot M - M_2, \quad (18)$$

$$A_2 = k_{wl} \cdot g \cdot D \cdot \cos \alpha \cdot \left[ 0,85 \cdot M_2 \cdot \frac{\frac{1}{n}}{\frac{0,374}{n} + 0,6 \frac{D}{z}} \right], \quad (19)$$

где  $k_{wb}$ ,  $k_{wl}$  – поправочные коэффициенты слагаемых мощности, соответственно подъема и перемешивания материала вращающимся барабаном и подъема и перемешивания материала лопастями барабана.

Мощность, затрачиваемая на подъем смеси, кВт:

$$N_1 = A \cdot n / 1000. \quad (20)$$

Двигатель затрачивает также энергию на преодоление сил трения в опорном узле барабана, определяемую по выражению

$$N_2 = \frac{M + M_6 \cdot g \cdot r_0 \cdot \mu \cdot \omega}{1000}, \quad (21)$$

где  $M_6$  – масса барабана, кг;  $r_0$  – радиус оси, м;  $\mu$  – коэффициент трения в подшипнике;  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана, рад/с.

Мощность двигателя привода вращения барабана определится [10], кВт:

$$N_d = K_3 \cdot N_1 + N_2 + N_{xx}, \quad (22)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса мощности на запуск смесителя в случае непредвиденного останова;  $N_{xx}$  – затраты мощности на холостой ход смесителя.

Результаты компьютерного моделирования мощности, затрачиваемой на привод барабанного смесителя сухих кормов с объемом барабана 0,18 м<sup>3</sup> и углом наклона оси вращения 15 градусов [9] представлены на рисунке 4. Коэффициент корреляции – 0,9891,  $\chi^2$ -тест – 0,99999.

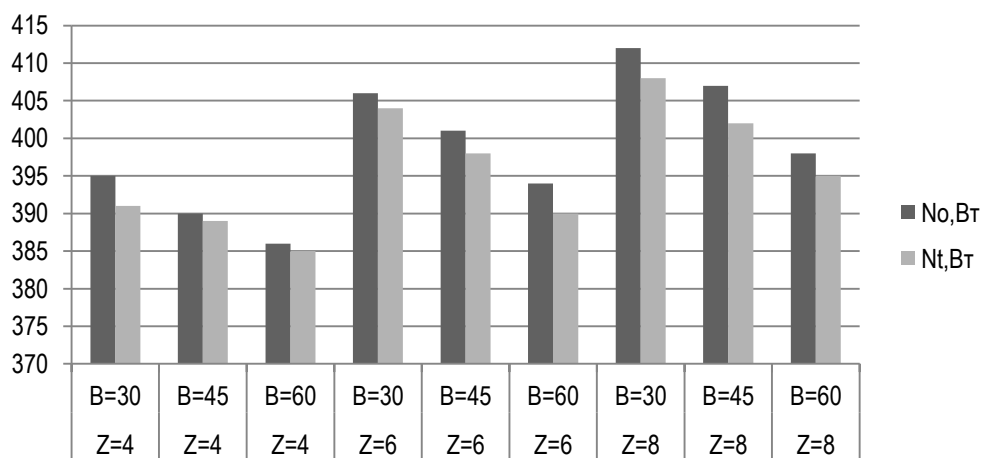


Рис. 4. Результаты сходимости расчетных значений мощности  $N_t$  (Вт) и опытных данных мощности  $N_o$  (Вт) при количестве лопастей –  $Z$  (шт.) и наклоне лопасти относительно оси вращения  $B=\beta$  (град.)

Вертикальная проекция ускорения, действующего на частицы в барабане, м/с<sup>2</sup>:

$$a_B = g + R \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha, \quad (23)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,  $\varphi$  – угол расположения частицы (или лопасти) относительно нижней точки барабана, рад.;  $R$  – радиус расположения частицы относительно оси вращения барабана (наибольшее значение соответствует радиусу барабана), м;  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана, рад./с.

При отрицательных значениях вертикальной проекции ускорения  $a_B$ , будет происходить захват частиц барабаном (совместное вращение барабана и частиц компонентов смеси), что сделает невозможным ссыпание материала по поверхности барабана, т.е. нарушится возможность смешения компонентов. Результаты моделирования вертикальной проекции ускорения конкретного смесителя представлены на рисунке 5.

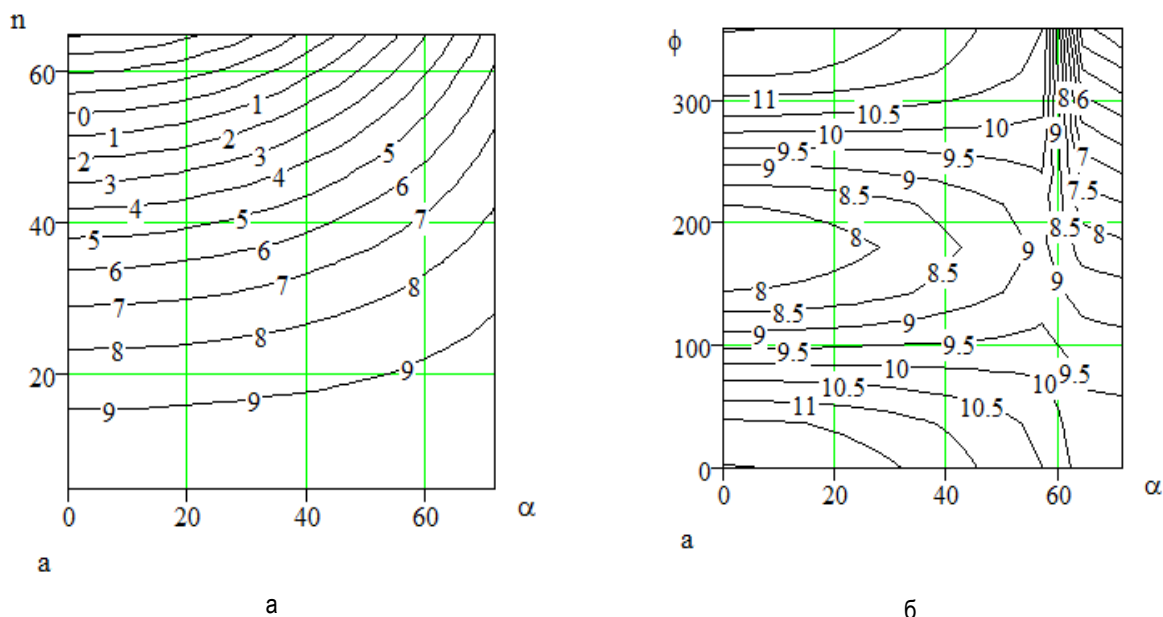


Рис. 5. Влияние конструктивных параметров на величину вертикальной проекции ускорения  $a_v$  ( $\text{m/s}^2$ ): а – угла наклона барабана  $\alpha$  (град.) и частоты вращения барабана  $n$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) при  $D=0,6$  м и  $\varphi=180^\circ$ ; б – угла наклона барабана  $\alpha$  (град.) и угла расположения частиц  $\varphi$  (град.) при  $D=0,6$  м и частоте вращения барабана  $n=26$   $\text{мин}^{-1}$

При угле  $\alpha=0^\circ$  критическое значение частоты вращения (рис. 5, а) около  $55 \text{ мин}^{-1}$ . С ростом угла  $\alpha$  критическая частота увеличивается. Рекомендуется рабочую частоту брать с коэффициентом  $0,46$  от критического значения ( $55 \cdot 0,46 \approx 25,3 \text{ мин}^{-1}$ ). При угле  $\alpha \approx 60^\circ$  (рис. 5, б) величина проекции ускорения резко изменяется, т.е. происходит осаждение материала на дно в торце барабана и прекращается смешивание. Данный анализ позволяет выбрать частоту вращения барабана и интервал изменения его угла установки.

Критическое (равное нулю) значение частоты вращения в общем виде запишется из условия равенства нулю вертикальной проекции ускорения  $a_v$ :

$$g = -R \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha. \quad (24)$$

Критический угол подъема частицы, рад.

$$\varphi = \arccos \frac{-g}{R \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}, \text{ или } \cos \varphi = \frac{-g}{R \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}. \quad (25)$$

Критическая угловая скорость вращения барабана, рад./с:

$$\omega = \frac{\sqrt{-g}}{R \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} = \frac{\sqrt{-g}}{0,5D \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}, \quad (26)$$

где  $D$  – внутренний диаметр барабана, м.

Критическая частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ :

$$n' = \frac{30}{\pi} \frac{\sqrt{-g}}{R \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}. \quad (27)$$

Выбрав подвижную систему координат, направим ось  $X$  вдоль оси вращения барабана, ось  $Z$  – радиально, а ось  $Y$  – перпендикулярно лопасти.

Определены проекции действующих ускорений на частицы, расположенные на лопасти по осям:

$$\begin{aligned} a_x &= g \cdot \sin \alpha - g \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot f \cdot \sin \gamma; \\ a_z &= R \cdot \omega^2 + g \cdot \cos \varphi - g \cdot f \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot \cos \gamma; \\ \gamma &= \arctg \frac{(g \cdot \sin \alpha)}{(R \cdot \omega^2 + g \cdot \cos \varphi)}. \end{aligned} \quad (28)$$

Проекция на лопасть действующих на частицу ускорений:

$$a_{\parallel} = \sqrt{a_x^2 + a_z^2} = \left\{ g \cdot \sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos \alpha + \beta \cdot f \cdot \sin \gamma^2 + \right. \\ \left. + R \cdot \omega^2 + g \cdot \cos \varphi \cdot 1 - f \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha + \beta) \right\}^{1/2}. \quad (29)$$

Нормальная проекция на лопасть (ось  $Y$ ) действующих на частицу сил, Н:

$$N = G \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (30)$$

Если соотношение величин нормальная проекция действующих сил и проекция действующих сил в плоскости на лопасть находятся в пределах конуса трения, то движение частиц по поверхности лопасти происходить не будет вследствие самоторможения. Т.е. для движения частицы должно выполняться соотношение:

$$\operatorname{tg} \delta > f, \quad (31)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $\operatorname{tg} \delta$  – соотношение нормальной проекции сил к проекции сил вдоль лопасти:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{F}{N} = \frac{m \cdot a_{\text{пл}}}{m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta)}. \quad (32)$$

При отсутствии эффекта самоторможения проекция ускорения вдоль лопасти по оси  $X$ , направленная вдоль оси вращения, способствует перемещению материала вдоль лопасти, обеспечивая перемещения частиц вдоль оси барабана. Это способствует смешиванию и выравнивает концентрацию отдельных компонентов смеси вдоль оси барабана. В случае наличия части лопастей, обеспечивающих осевое смещение частиц по лопасти, кроме улучшения перемешивания можно добиться подгруживания материала в нижнюю часть барабана, обеспечивая увеличение массы смеси в барабане и снижая несанкционированный выброс частиц массы корма через выгрузное отверстие.

Наличие проекции ускорения вдоль лопасти по оси  $Z$ , направленной к оси вращения барабана, способствует сходу материала с лопасти, т.е. при повороте лопасти сходящий материал ссыпается сверху на воронку материала, обеспечивая перемешивание частиц.

Отрицательные значения ускорения  $a_x$  на графике (рис. 6, а) показывают возможность перемещения частиц материала вдоль лопасти под уклон в интервале углов  $\varphi \approx 80 \dots 270^\circ$ , что улучшит равномерное распределение частиц компонентов смеси по всему ее объему. Сход материала с лопасти (рис. 6, б) возможен при отрицательных значениях ускорения  $a_z$ , т.е. при  $\varphi \approx 90 \dots 250^\circ$ .

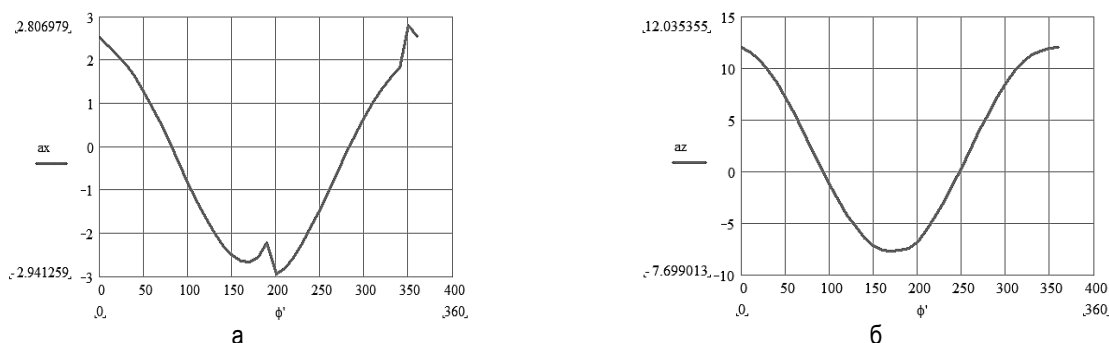


Рис. 6. График изменения расчетной величины проекций ускорения  $a_x$  и  $a_z$  ( $\text{m/s}^2$ ), действующего на частицу при текущей координате угла расположения частицы  $\varphi = \varphi'$  (град.): при  $\alpha = 15$  град и  $\beta = 60^\circ$

Угол схода  $\varphi$  должен также соответствовать условию отсутствия самоторможения:

$$\{ g \cdot \sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos \alpha + \beta \cdot f \cdot \sin \gamma^2 + R \cdot \omega^2 + g \cdot \cos \varphi - f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha + \beta \}^{1/2} - g \times \times \sin \varphi \cdot f \cdot \cos \alpha + \beta = \chi \geq 0. \quad (33)$$

В виду сложности данного выражения выразить функционально угол начала схода  $\varphi$  не представляется возможным, поэтому осуществлен компьютерный расчет и построен график (рис. 7) расчетной величины  $\chi$ . При положительном значении  $\chi$  возможен сход материала с лопасти, так как отсутствует эффект самоторможения.

Анализ графиков показывает, что в первом случае (рис. 7, а) отсутствуют отрицательные значения, т.е. эффект самоторможения отсутствует. Во втором случае (рис. 7, б) самоторможение возможно на интервале углов  $\varphi \approx 45 \dots 105^\circ$ .

Уравнения регрессии поправочных коэффициентов мощности:

$$k_{wb} = 0,735779 + 4,702393 \cdot S - 8,84565 \cdot S^2 - 0,00593 \cdot V - 0,23748 \cdot Z + 0,019673 \cdot Z^2 - 0,04434 \cdot \alpha + 0,001192 \cdot \alpha^2 + 0,018439 \cdot \beta; \quad (34)$$

$$k_{wl} = 9,160377 - 171,769 \cdot S + 539,094 \cdot S^2 - 0,01514 \cdot V + 1,625874 \cdot Z - 0,11883 \cdot Z^2 + 0,710405 \cdot \alpha - 0,01247 \cdot \alpha^2 - 0,02056 \cdot \beta, \quad (35)$$

где  $S$  – ширина лопасти, м;  $V$  – объем барабана,  $1000 \cdot \text{м}^3$ ;  $Z$  – количество лопастей, шт.;  $\alpha$  – угол наклона оси вращения, град.;  $\beta$  – угол поворота лопасти относительно оси вращения барабана, град.  
Коэффициент корреляции  $R=0,99325$ , F-тест равен  $0,961695$ .

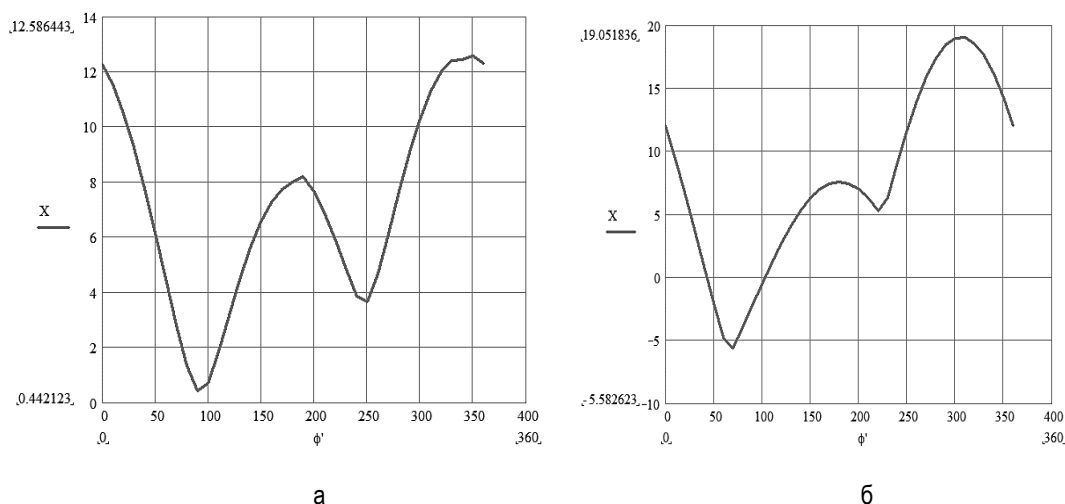


Рис. 7. График изменения расчетной величины  $x$  по выражению отсутствия самоторможения при текущей координате угла расположения частицы  $\varphi=\varphi'$  (град.):  
а – при  $\alpha=15$  град и  $\beta=60^\circ$ ; б – при  $\alpha=0^\circ$  и  $\beta=0^\circ$

Степень заполнения  $\psi$  (0,01%) емкости смесителя определяется:

$$\psi = -4,85093 + 6,178449 \cdot (\sin \alpha) \cdot 0,080854 - 4,45444 \cdot V + 12,27459 \cdot V^2 \quad (36)$$

Равномерность приготовленной смеси описывается:

$$\Theta = 0,915 \cdot 1 - e^{-0,024 \cdot Tc} \quad (37)$$

**Заключение.** Таким образом, разработанная математическая модель рабочего процесса барабанного смесителя периодического действия, реализованная в виде компьютерной программы, позволяет с надлежащей точностью как анализировать силовые факторы в процессе работы, так и определять основные показатели технологического процесса.

#### Библиографический список

1. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
2. Бормотов, А. Н. Многокритериальный синтез сверхтяжелого композита / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин // Вестник Брянского ГТУ. – 2009. – №4. – С. 29-36.
3. Бормотов, А. Н. Многокритериальный синтез сверхтяжелого композита / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, А. Ю. Кирсанов, Е. М. Бородин // Вестник Воронежского ГТУ. – 2010. – Т. 6, №7. – С. 98-104.
4. Чупшев, А. В. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей / А. В. Чупшев, В. В. Коновалов, В. П. Терюшков, Г. В. Шабурова // Вестник Алтайского ГАУ. – 2012. – №3 (89). – С. 88-91.
5. Чупшев, А. В. К обоснованию параметров быстроходного смесителя / А. В. Чупшев, В. В. Коновалов, В. П. Терюшков, С. С. Петрова // Известия Самарской ГСХА. – 2008. – №3. – С. 151-154.
6. Петрова, С. С. К вопросу определения качества смеси у барабанного смесителя / С. С. Петрова, С. А. Кшникаткин, Н. В. Дмитриев // Известия Самарской ГСХА. – 2012. – №3. – С. 67-72.
7. Коновалов, В. В. Обоснование угла установки емкости и длительности перемешивания сухих смесей барабанным смесителем / В. В. Коновалов, Н. В. Дмитриев, С. А. Кшникаткин, А. В. Чупшев // Нива Поволжья. – 2013. – №1 (26). – С. 46-50.
8. Коновалов, В. В. Моделирование качества смешивания сыпучих материалов барабанным смесителем / В. В. Коновалов, Н. В. Дмитриев, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – №9, т. 1. – С. 77-85.
9. Коновалов, В. В. Оптимизация параметров барабанного смесителя / В. В. Коновалов, Н. В. Дмитриев, А. В. Чупшев, В. П. Терюшков // Нива Поволжья. – 2013. – №4 (29). – С. 41-47.
10. Коновалов, В. В. Моделирование изменения равномерности смеси при ступенчатом смешивании / В. В. Коновалов, А. В. Чупшев, М. В. Фомина, А. С. Калиганов // Нива Поволжья. – 2013. – №3 (28). – С. 77-83.