

Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов

А.Г. Белов, аспирант, В.А. Шахов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ; С.А. Соловьёв, чл.-кор. РАН, д.т.н., профессор, Аппарат Президиума РАН; В.И. Миркистанов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ; С.В. Золотарёв, д.т.н., профессор, РГАУ-ТСХА им. К.А. Тимирязева

В различных отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве, результативность производственной деятельности во многом зависит от качества проведения технологических операций. Одной из наиболее сложных с технической точки зрения задач является реализация операции равномерного внесения компонентов смеси, вводимых в небольших количествах и имеющих высокую кормовую и биологическую ценность.

В роторных быстроходных смесителях создаётся движение смешиваемых компонентов и окружающего воздуха с большими скоростями. В общем случае это трёхмерное движение. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что преобладание того или иного вида движения частиц в смесителе зависит от типов и расположения рабочих органов [1 – 3].

Во внутреннем пространстве роторно-вибрационного смесителя рабочие органы передают частицам веществ кинетическую энергию, необходимую для преодоления силы тяжести и трения, что приводит к псевдооживленному состоянию смеси [4 – 7]. Благодаря этому каждая частица приобретает высокую подвижность, а их совместное движение оказывается подобным движению жидкости.

Для облегчения и упрощения математических выражений следует записать баланс энергии в единицу времени (баланс мощностей) [8 – 10].

Материал, методы и результаты исследования.

При работе смесителя только часть энергии тратится на полезную работу. По данным исследователей, степень смешивания зависит от мощности, которая пошла на смешивание. Величину мощности, затрачиваемой непосредственно на процессы смешивания, определим из баланса мощностей [11, 12].

Для облегчения и упрощения математических выражений запишем баланс энергии в единицу времени (баланс мощностей). Уравнение баланса мощности сил имеет вид:

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{cm} + N_{cm} + N_{nz}, \quad (1)$$

где N_1 – мощность, передаваемая горизонтальной частью рабочего органа якорной мешалки непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг;

N_2 – мощность, передаваемая вертикальной частью рабочего органа якорной мешалки непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг;

N_3 – мощность, передаваемая пропеллерной мешалкой непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг;

N_{cm} – мощность, выделяемая перемешиваемым материалом при трении о стенку рабочей камеры смесителя, Вт/кг;

N_{cm} – мощность, затрачиваемая на процесс смешивания, Вт/кг;

N_{nz} – мощность, затрачиваемая при трении о лопасти гребёнки, Вт/кг

Рассмотрим движение продуктов смеси в роторно-вибрационном смесителе. Представим, что вследствие псевдооживленного состояния вещества рабочее пространство смесителя равномерно заполнено перемешиваемым материалом.

Определим мощность, передаваемую горизонтальной частью рабочего органа якорной мешалки непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг:

$$N_1 = z_{n1} \xi_n h_{n1} \frac{\rho \omega_0^3 r_c^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (\bar{r}_{n1}^{10} - \bar{r}_{вн}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (\bar{r}_{n1}^9 - \bar{r}_{вн}^9)}{9} + \frac{\psi_2^2 (\bar{r}_{n1}^8 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} \right), \quad (2)$$

где z_{n1} – количество лопастей якорной мешалки, шт;
 ξ_n – коэффициент гидравлического сопротивления движению лопасти в перемешиваемом материале;

h_{n1} – высота горизонтальной части лопасти рабочего органа якорной мешалки, м;

ρ – плотность перемешиваемого материала, кг/м³;

ω_0 – угловая скорость ротора смесителя, с⁻¹;

r_c – внутренний радиус рабочей камеры смешивания, м;

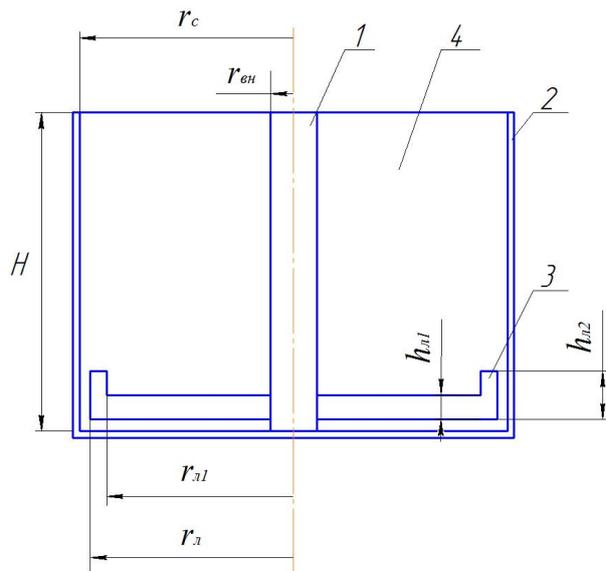


Рис. 1 – Структура рабочего пространства для якорной мешалки смесителя:

1 – вал ротора; 2 – корпус смесителя; 3 – якорная мешалка; 4 – внутреннее пространство смесителя

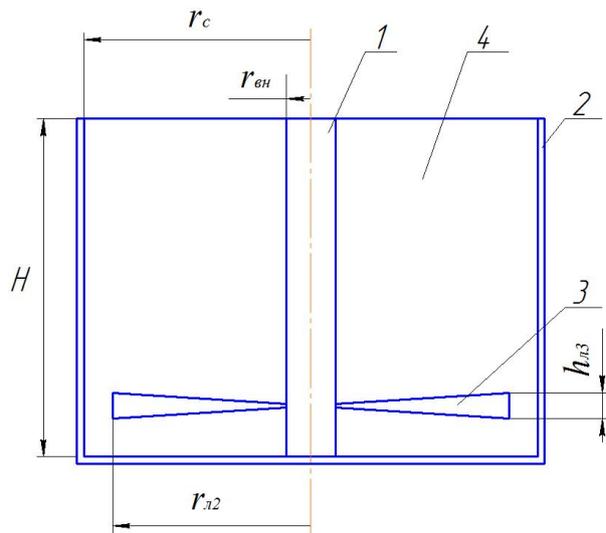


Рис. 2 – Структура рабочего пространства для пропеллерной мешалки смесителя:

1 – вал ротора; 2 – корпус смесителя; 3 – пропеллерная мешалка; 4 – внутреннее пространство смесителя

\bar{r}_{n1} – приведённый радиус горизонтальной части лопасти якорной мешалки, м;

$\bar{r}_{вн}$ – приведённый радиус вала мешалки, м

Аналогично определим мощность, передаваемую вертикальной частью рабочего органа якорной мешалки непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг:

$$N_2 = z_{n1} \xi_n h_{n2} \frac{\rho \omega_0^3 r_c^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (\bar{r}_n^{10} - \bar{r}_{n1}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (\bar{r}_n^9 - \bar{r}_{n1}^9)}{9} + \frac{\psi_2^2 (\bar{r}_n^8 - \bar{r}_{n1}^8)}{8} \right), \quad (3)$$

где h_{n2} – высота вертикальной части лопасти рабочего органа якорной мешалки, м;

$\bar{r}_л$ – приведённый радиус лопасти рабочего органа якорной мешалки, м.

Структура рабочего пространства для якорной мешалки смесителя представлена на рисунке 1.

Определим мощность, передаваемую пропеллерной мешалкой непосредственно перемешиваемому материалу, Вт/кг (рис. 2):

$$N_3 = z_{л2} \xi_{л3} h_{л3} \cos \alpha \frac{\rho \omega_0^3 r_c^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (\bar{r}_{л2}^{10} - \bar{r}_{вн}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (\bar{r}_{л2}^9 - \bar{r}_{вн}^9)}{9} + \frac{\psi_2^2 (\bar{r}_{л2}^8 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} \right), \quad (4)$$

где $z_{л2}$ – количество лопастей пропеллерной мешалки, шт.;

$h_{л3}$ – высота лопасти рабочего органа пропеллерной мешалки, м;

$\cos \alpha$ – угол наклона лопасти пропеллерной мешалки, град.;

$\bar{r}_{л2}$ – приведённый радиус лопасти пропеллерной мешалки, м.

Определим момент закручивания на лопастях гребёнки смесителя в перемешиваемом материале:

$$N_{лг} = z_{лг} \xi_{лг} h_{лг} \cos b \frac{\rho \omega_0^3 r_c^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (\bar{r}_{лг2}^{10} - \bar{r}_{лг1}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (\bar{r}_{лг2}^9 - \bar{r}_{лг1}^9)}{9} + \frac{\psi_2^2 (\bar{r}_{лг2}^8 - \bar{r}_{лг1}^8)}{8} \right), \quad (5)$$

где $z_{лг}$ – количество лопастей гребёнки, шт.;

$h_{лг}$ – высота лопасти гребёнки, м;

$\cos b$ – угол наклона лопасти гребёнки, град.;

$\bar{r}_{лг1}$ – приведённый радиус начала лопасти гребёнки, м;

$\bar{r}_{лг2}$ – приведённый радиус конца лопасти гребёнки, м

Мощность сил трения $N_{ст}$ о стенку рабочей камеры можно определить выражением:

$$N_{ст} = M_{ст} \frac{v_c}{r_c}, \quad (6)$$

где $M_{ст}$ – момент сил сопротивления боковой стенки, Н·м;

v_c – скорость перемешиваемого продукта у стенки смесителя, м/с;

r_c – внутренний радиус рабочей камеры смешивания, м.

Окончательно выражение мощности сил трения о стенку рабочей камеры примет вид:

$$N_{ст} = 2\tau_c \sqrt{\frac{\pi H P_{из} r_{из}}{\xi_c \rho}}, \quad (7)$$

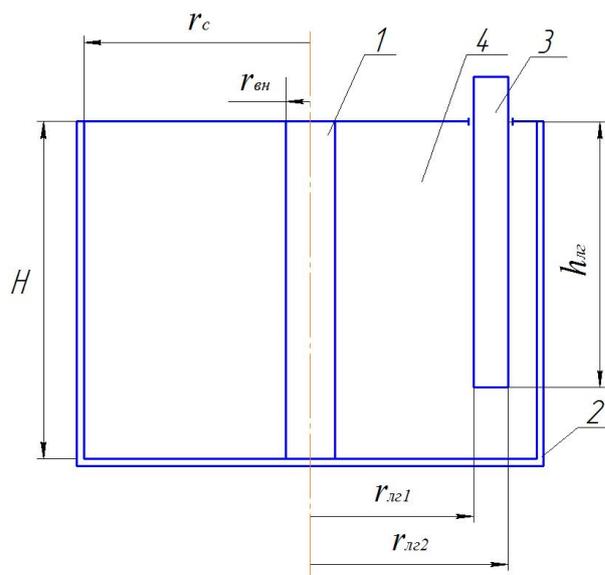


Рис. 3 – Схема взаимодействия лопасти гребёнки с перемешиваемым материалом:

1 – вал ротора; 2 – корпус смесителя; 3 – лопасть гребёнки; 4 – внутреннее пространство смесителя

где τ_c – напряжение сдвига на внутренней боковой поверхности корпуса смесителя;

H – осевая протяжённость рабочей зоны смесителя, м;

$P_{из}$ – измеряемая сила закручивания подвижной насадки в результате движения продукта вдоль боковой стенки смесителя, Н;

$r_{из}$ – расстояние от центра смесителя до подвижной насадки, измеряющей силу закручивания в результате движения продукта вдоль боковой стенки смесителя, м;

ξ_c – коэффициент гидравлического сопротивления корпуса смесителя вращению перемешиваемому материалу.

Схема взаимодействия лопасти гребёнки смесителя с перемешиваемым материалом представлена на рис. 3.

Определение пяти слагаемых уравнения (1) позволяет вычислить шестое слагаемое – величину мощности, затрачиваемую непосредственно на процесс смешивания компонентов комбикормов $N_{см}$:

$$N_{см} = N_{ст} + N_{лг} - N_1 - N_2 - N_3. \quad (8)$$

Вывод. Разработанная математическая модель позволяет определять расчётным путём количество энергии, затрачиваемое на преобразование структуры материала в процессе его смешивания. Дальнейшие исследования будут посвящены идентификации и верификации математической модели.

Литература

1. Белов А. Г., Попов В. П., Зинюхин Г. Б. Применение нанотехнологии в производстве комбикормов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. всерос. науч.-методич. конф. (с междунар. участ.). Оренбург, 2018. С. 2085 – 2087.

2. Шахов В.А. Исследование технологии производства комбикормов с наночастицами / В.А. Шахов, А.Г. Белов, А.П. Козловцев [и др.] // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК: матер. междунар. науч.-практич. конф. Оренбург, 2018. С. 68–71.
3. Пат. на изобретение № 2685674. Роторно-вибрационный смеситель / А.Г. Белов, В.П. Попов, В.А. Шахов. Опубл. 22.04. 2019 г. Бюл. № 4.
4. Рыбалкина М.М. Нанотехнологии для всех // Nanotechnology News Network, 2005. 444 с.
5. Шахов В.А., Мартынова Д.В., Попов В.П. Разработка математической модели экструзии зернового белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на шнековом пресс-экструдере // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (63). С. 64–67.
6. Шахов В.А. Кинематические и динамические аспекты взаимодействия ингредиентных частиц с функциональными элементами рабочей камеры измельчителя зернового материала / В.А. Шахов, Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 87–89.
7. Мартынова Д.В. Идентификация математической модели процесса экструзии зернового сырья на шнековом пресс-экструдере / Д.В. Мартынова, В.П. Попов, Г.А. Сидоренко [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68). С. 96–99.
8. Попов В.П. Теоретическое обоснование энерго- и ресурсосберегающей конструкции шнекового пресс-экструдера для производства высококачественных кормовых продуктов / В.П. Попов, Д.В. Мартынова, С.В. Антимонов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68). С. 107–109.
9. Чкалова М.В. Определение количественных параметров воздушно-продуктового слоя в рабочей камере измельчителя / М.В. Чкалова, В.А. Шахов, Е.М. Бурлуцкий [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 12. Т. 31. С. 57–61.
10. Пушко В.А. Современные инновационные подходы приготовления микродобавок в специализированной установке / В.А. Пушко, В.А. Шахов, С.В. Лебедев [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2018. № 4. Т. 32. С. 65–68.
11. Шахов В.А., Чкалова М.В., Павлидис В.Д. Совершенствование техники и технологии приготовления кормосмеси с использованием ультрадисперсных материалов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: матер. междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 110-летию со дня рождения академика М.Е. Мацелуро. Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2018. С. 192–196.
12. Пат. на изобретение № 2686635. Линия производства экструдированных кормов / А.Г. Белов, В.П. Попов, В.А. Шахов. Опубл. 29.04. 2019 г. Бюл. № 4.