

АНАЛИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО СМЕШИВАНИЯ БАРАБАННЫХ УСТРОЙСТВ

Димитриев Николай Владимирович, аспирант кафедры «Механизация технологических процессов в АПК», ФГБОУ ВО Пензенская ГСХА.

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: kononov-penza@rambler.ru

Терюшков Вячеслав Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин», ФГБОУ ВО Пензенская ГСХА.

440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30.

E-mail: sha_penza@mail.ru

Чупшев Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин», ФГБОУ ВО Пензенская ГСХА.

440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30.

E-mail: sha_penza@mail.ru

Ключевые слова: смешивание, барабан, смеситель, частота, лопасти.

Цель исследования – повышение качества смешивания материала и определение конструктивно-кинематических параметров барабанного лопастного смесителя путем численных методов. Основой современного общества является использование разнообразных смесей и композиционных материалов на их основе. Приготовление исходных смесей осуществляется как непосредственно смесителями, так и в ряде случаев разнообразными устройствами, в том числе экструдерами и шнековыми прессами. Среди подобных устройств широко распространены барабанные смесители, сушилки, бетономешалки и т.п. Их особенностью является низкая энергоемкость смесеобразования, а так же способность за достаточно короткий промежуток времени достигать возможной равномерности смеси. После чего качество смеси практически не изменяется. Попытка использования имеющихся в широкой продаже бетономелок периодического действия в целях приготовления такой смеси как комбикорм, показала, что существующие их конструкции подлежат дальнейшему совершенствованию ввиду невозможности достижения зоотехнических требований при приготовлении комбикорма на основе покупных БВД и собственного фуража. Для этого требуются дополнительные теоретические изыскания. Рассмотрен процесс взаимодействия лопастного барабана с материалом, работающим в режиме периодического смешивания. Полученные аналитические выражения позволяют определить условия смешения материала по основным конструктивно-кинематическим параметрам барабанного лопастного смесителя на основе численных методов.

Основой современного общества является использование разнообразных смесей [1-3] и композиционных материалов [4-7] на их основе. Приготовление исходных смесей осуществляется как непосредственно смесителями [8-10], так и в ряде случаев разнообразными устройствами, в том числе экструдерами и шнековыми прессами [11].

Среди подобных устройств широко распространены барабанные смесители, сушилки, бетономешалки и т.п. Их особенностью является низкая энергоемкость смесеобразования, а так же способность за достаточно короткий промежуток времени достигать возможной равномерности смеси. После чего качество смеси практически не изменяется [12-15]. Попытка использования имеющихся в широкой продаже бетономелок периодического действия в целях приготовления такой смеси как комбикорм, показала, что существующие их конструкции подлежат дальнейшему совершенствованию ввиду невозможности достижения зоотехнических требований при приготовлении комбикорма на основе покупных БВД и собственного фуража [14;15]. Для этого требуются дополнительные теоретические изыскания.

Цель исследований – повышение качества смешивания материала и определение конструктивно-кинематических параметров барабанного лопастного смесителя путем численных методов.

Задачи исследований: провести анализ особенностей взаимодействия элементов конструкции и частиц материала у вращающихся барабанных устройств с крепящимися лопастями; выявить аналитические выражения, позволяющие определить условия смешения и перемешивание материала под действием сил гравитации.

Материалы и методы исследований. Рассмотрим процесс взаимодействия лопастного барабана с материалом, работающим в режиме периодического смешивания.

При вращении емкости 2 барабанного смесителя с угловой скоростью ω , лопастями 1 материал захватывается, поднимается на некоторую высоту ($m.A_n$), соответствующую центральному углу j_n , после чего начинается сход частиц материала с лопастей 2 под действием сил гравитации и образование насыпи материала 3 внутри емкости. Наибольшая степень заполнения емкости будет соответствовать поз. II насыпи 3. Смещение вершины насыпи от оси вращения как вправо, так и влево будет уменьшать степень заполнения емкости, что уменьшит объем смеси и соответственно производительность смесителя. С другой стороны, смещение вершины насыпи влево приведет к перемещению центра тяжести насыпи так же влево, а это создаст отрицательный момент, который будет препятствовать вращению барабана. По этой причине смещение вершины вправо снижает энергоемкость смесеобразования в виду совмещения направлению силы тяжести насыпи вращению барабана. Тем самым, наиболее предпочтительным является некий вариант поз. III насыпи 3.

При подъеме материала лопастями 1, часть материала, не увлекшаяся во вращения, останется слева у основания насыпи 3. Материал, вращающийся с барабаном будет прижиматься к емкости 2 диаметром D и подниматься при его вращении. Лопасты 1 способствуют удержанию материала на барабане. Достигнув некоторого угла φ_n , часть частиц материала будет отрываться от порций материала у кромки лопастей шириной S , и продолжит движение уже по законам баллистики. Достигнув некоторого угла j_k , будут отрываться уже частицы у стенки емкости 2 барабана радиусом $R = D/2$. Определив углы j_n и j_k , найдем предпочтительную зону разгрузки лопастей барабана.

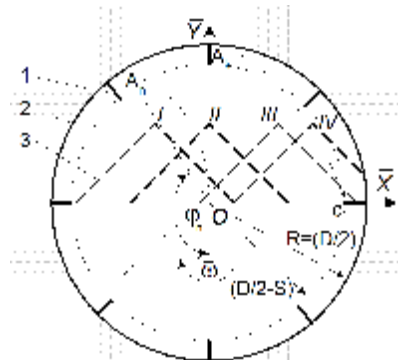


Рис. 1. Схема поперечного сечения барабана с контурами вороха материала:
1 – лопасть барабана; 2 – емкость барабана; 3 – ворох материала

Частицы, упавшие на поверхность насыпи будут частично скользить по ее поверхности вниз, а также, совместно с другими частицами насыпи, увлекутся во вращательное движение насыпи при вращении барабана по некоторой спирали. Оказавшись на расстоянии от стенки емкости менее S , частицы увлекутся во вращение барабана и на последующий новый полет под действием гравитации. Тем самым осуществляется циркуляция частиц материала в поперечной плоскости барабана, обеспечивающая их перемешивание и усреднение по данному сечению.

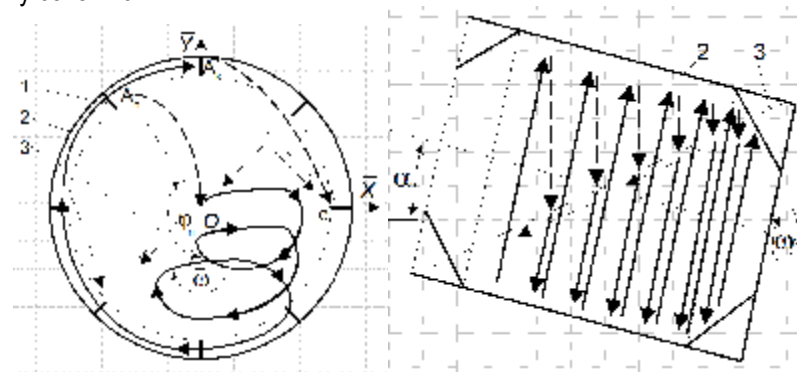


Рис. 2. Схема поперечного и продольного сечения барабана с контурами вороха материала и траекториями движения частиц:
1 – лопасть барабана; 2 – емкость барабана; 3 – ворох материала

При наклоне оси вращения барабана от горизонтали на угол α материал будет смещаться вдоль барабана к днищу емкости 2 (вправо). Тем самым образуется насыпь 3 в продольной плоскости. В результате материал у днища барабана практически не перемешивается. По мере накопления материал частично смещается под уклон насыпи (влево, к загрузочному отверстию), способствуя усреднению состава в объеме

смеси. Уменьшение угла установки барабана ($\alpha \rightarrow 0^\circ$) улучшает усреднение частиц в поперечном сечении, однако ухудшает смещение частиц вдоль барабана. Степень заполнения емкости будет мала ввиду угрозы преждевременной выгрузки материала. Рост угла установки барабана ($\alpha \rightarrow 90^\circ$) ухудшает усреднение частиц в поперечном сечении, однако повышает смещение частиц вдоль барабана до тех пор, пока у дна не образуется застойная зона. Степень заполнения емкости возможна до максимума. Для устранения указанных проблем практика выработала форму барабана, у которого по бокам размещены усеченные конуса [14; 15]. Однако, вопрос принудительного продольного смещения частиц не решен.

Результаты исследований. Задача 1. В случае вращения барабана с частотой более некоего предельного значения возможен захват материала барабаном и совместное их вращение при действии центробежных сил и тяжести (рис. 3).

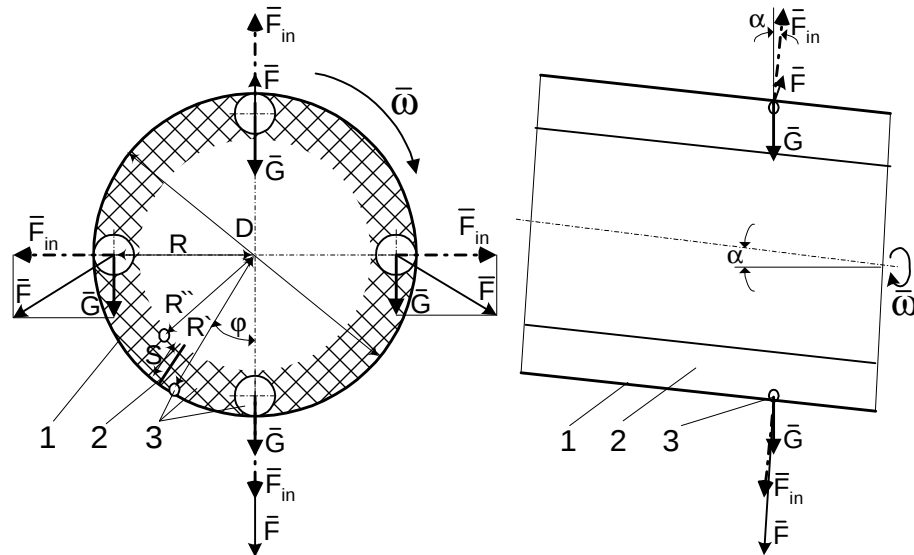


Рис. 3. Схема сил, действующих на частицы вращающегося кольца материала:
1 – вращающийся барабан; 2 – лопасть; 3 – частицы материала вращающегося кольца

Проекции ускорения, действующие на частицы запишутся, м/с^2 :

$$a_{\Gamma} = a_x = R^* \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

$$a_{\text{В}} = a_y = g + R^* \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где R^* – радиус расположения частицы относительно оси вращения барабана (наибольшее значение соответствует радиусу барабана, меньшее – радиус барабана минус ширина лопасти S), м; ω – угловая скорость вращения барабана, рад./с. ; α – угол наклона оси вращения барабана, рад. ; φ – угол расположения частицы (или лопасти) относительно нижней точки барабана, рад.

Критический угол подъема частицы, рад. :

$$\varphi^* = \arccos \frac{-g}{R^* \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}. \quad (3)$$

Критическая угловая скорость вращения барабана, рад./с. :

$$\omega^* = \sqrt{\frac{-g}{R^* \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}} = \sqrt{\frac{-g}{0,5D \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}}, \quad (4)$$

где D – внутренний диаметр барабана, м.

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

$$n^* = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{-g}{R^* \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}}. \quad (5)$$

Рабочую частоту вращения рекомендуется [1] брать с коэффициентом 0,46 от критического значения.

Чем больше радиус расположения частицы, тем меньше критическая частоты вращения. Т.е. в большем барабане, вращающемся с той же угловой скоростью, что и меньший, возникает большая центробежная сила. В результате уравновешивание сил происходит при меньшей частоте вращения. Тем самым, возможен переходный момент, когда частицы расположенные у стенок барабана прижимаются к стенкам (рис. 1), а частицы расположенные у вершины лопаток будут сыпаться, участвуя в процессе смешивания:

– частицы у емкости вращаются с барабаном:

$$n' < \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{-g}{0,5D \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}}, \quad (6)$$

– частицы на лопасти сыпаются, участвуя в перемешивании:

$$n' \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{-g}{(0,5D - S) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}}. \quad (7)$$

Критический угол наклона оси вращения барабана, рад.:

$$\alpha^* = \arccos \frac{-g}{0,5D \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

Задача 2. На основе баллистики из равенства времени полета частиц у проекций по осям X и Y, и с учетом их разности равной нулю, числовым моделированием можно определить угол схода частиц (отрыва от монолита материала у лопасти или емкости) при известных параметрах, рад.:

$$\frac{\omega \cdot R^* \cdot \sin \varphi + \sqrt{(\omega \cdot R^* \cdot \sin \varphi)^2 - 2g(R^* \cdot \cos \varphi + c_y)}}{g \cdot \cos \varphi} - \frac{R^* \cdot \sin \varphi + c_x}{\omega \cdot R^* \cdot \cos \varphi} = 0. \quad (9)$$

При этом C_x и C_y – координаты конечных точек полета частиц относительно оси вращения, м.

Угол φ_k (рад.) достижения т.С определится (как частный случай):

$$\varphi_k = -2 \cdot \arctg \left[\frac{2 \cdot \omega^2 \cdot R^* + g \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \omega^2 \cdot R^* - g \cdot \cos \varphi} \right]. \quad (10)$$

Задача 3. В случае расположения частиц материала на поверхности радиальной лопасти барабана на частицы дополнительно действуют силы трения частиц материала о лопасть F_{TP} . При этом радиальная лопасть может быть установлена как вдоль оси вращения, так и повернута на некий угол β . Используя подвижную систему координат, направим оси координат (рис. 4): ось X – вдоль лопасти и вдоль оси вращения барабана; ось Y – нормаль к лопасти; ось Z – поперек оси вращения барабана и вдоль лопасти.

Для определения силы трения необходимо найти нормальную проекцию равнодействующей силы тяжести и центробежной силы (рис. 5). Центробежная сила действует вдоль лопасти. Тогда нормальная проекция действующих сил определится, Н:

$$N = G \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (11)$$

Отсюда сила трения, Н:

$$F_{TP} = N \cdot f = [G \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta)] \cdot f. \quad (12)$$

Сила трения направлена навстречу скорости движения. Для этого найдем проекции действующих сил на плоскость лопасти. Проекцией центробежной силы на лопасть является сама центробежная сила – F_c .

Проекция силы тяжести определится: $G \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi$. При этом проекция на ось X составляет: $G_x = G \cdot \sin \alpha$. Проекция на ось Z составляет: $G_z = G \cdot \sin \varphi$.

Равнодействующая проекций сил на лопасть F может быть определена как сумма векторов:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{G}_z + \vec{G}_x + \vec{F}_{TP}. \quad (13)$$

Соответственно, проекции на лопасть сил тяжести и центробежной на оси составят:

$$\vec{F}_z = \vec{F}_c + \vec{G}_z; \vec{F}_x = \vec{G}_x.$$

Угол проекции на горизонтальную плоскость силы тяжести относительно радиуса (угол γ), расположенного вдоль лопасти через частицу материала

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\vec{F}_x}{\vec{F}_z} = \frac{(G \cdot \sin \alpha)}{(F_c + G \cdot \cos \varphi)} = \frac{(g \cdot \sin \alpha)}{(R \cdot \omega^2 + g \cdot \cos \varphi)}. \quad (14)$$

Проекции действующих сил на оси X и Z:

$$\vec{F}_x = \vec{G}_x + \vec{F}_{TPx}, \\ \vec{F}_z = \vec{F}_c + \vec{G}_z + \vec{F}_{TPz}.$$

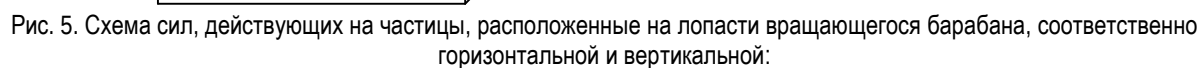
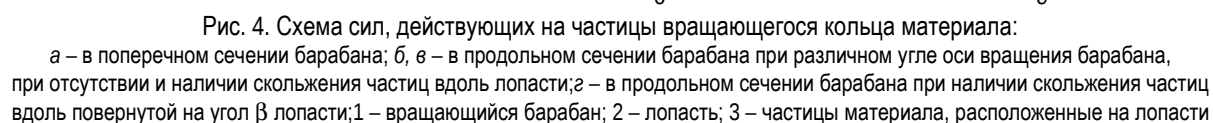
Проекции действующих ускорений по осям:

$$\alpha_x = g \cdot \sin \alpha - [g \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta)] \cdot f \cdot \sin \gamma; \\ \alpha_z = R^* \cdot \omega^2 + g \cdot \cos(-g \cdot f \cdot \sin \varphi \cdot \cos[(\alpha + \beta)] \cdot \cos \gamma). \quad (15)$$

Угол наклона лопасти, при котором возможно движение материала вдоль оси вращения барабана определится из выражения

откуда

(16)



1 – лопасть; 2 – вращающийся барабан; 3 – частицы материала, расположенные на лопасти

Проекция на лопасть действующих на частицу ускорений (вдоль лопасти):

$$a_p \Pi = \sqrt{(a_p x^2 + a_p z^2)} = \{ [g \cdot [\sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos [(\alpha + \beta) \cdot f \cdot [\sin \gamma]]]]^2 +$$

(17)

В том случае, если соотношение величин нормальной проекции действующих сил и проекция действующих сил в плоскости на лопасть находятся в пределах конуса трения, движение частиц по поверхности лопасти происходить не будет вследствие самоторможения. Если же величина проекций сил вдоль лопасти превысит допустимое соотношение, то возможно движение частиц вдоль лопасти, т.е. для движения частицы должно выполняться соотношение:

$$\operatorname{tg} \delta > f, \quad (18)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – соотношение нормальной проекции сил к проекции сил вдоль лопасти; f – коэффициент трения, материала по стали, либо внутреннего материала, по потребности конкретного случая.

Тангенс данного угла:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{F}{N} = \frac{m \cdot a_{\Pi}}{m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta)} \cdot$$

$$\frac{(+[R^* \cdot \omega^2 + g \cdot [\cos(-f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha + \beta))]]^2)^{\frac{1}{2}}}{\cdot \cos(\alpha + \beta)} \quad (19)$$

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 смещению материала вдоль оси барабана и, тем самым, усреднению концентрации частиц в объеме материала, т.е. смешению.

В случае поочередного расположения лопастей (в шахматном порядке), обеспечивающих осевое смещение частиц по лопасти при подъеме как вправо, так и влево, кроме улучшения перемешивания можно добиться подгуживание вправо вороха у верхней кромки загрузного отверстия (т.е. вниз), обеспечивая увеличение степени заполнения барабана и снижая несанкционированный выброс частиц массы корма через выгрузное отверстие.

При отсутствии эффекта самоторможения проекция ускорения вдоль лопасти по оси Z направленная к оси вращения способствует сходу материала с лопасти. Т.е. при повороте лопасти сходящий материал вновь сыпается сверху на ворох материала, обеспечивая перемешивание частиц.

Угол начала схода вороха материала с лопасти φ_n (рад.) определится из условия:

$$\frac{(+[R^* \cdot \omega^2 + g \cdot [\cos(-f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha + \beta))]]^2)^{\frac{1}{2}}}{\cdot \cos(\alpha + \beta)} = f \quad (20)$$

Отсюда угол схода должен соответствовать условию:

$$\left\{ [g \cdot [\sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot f \cdot \sin \gamma]]^2 + [R^* \cdot \omega^2 + g \cdot [\cos(-f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha + \beta))]]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \geq g \cdot \sin \varphi \cdot f \cdot \cos(\alpha + \beta)$$

Или угол схода соответствует условию:

$$\left\{ [g \cdot [\sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot f \cdot \sin \gamma]]^2 + [R^* \cdot \omega^2 + g \cdot [\cos(-f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha + \beta))]]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - g \cdot \sin \varphi \cdot f \cdot \cos(\alpha + \beta) = (\geq 0). \quad (21)$$

Учитывая, что ввиду сложности вышерасположенного уравнения угол начала схода j_n выразить не представляется возможным, поэтому его значения определяются численными методами. При положительном значении χ возможен сход материала с лопасти, так как отсутствует эффект самоторможения.

Заключение. Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют определить условия смешения материала по основным конструктивно-кинематическим параметрам барабанного лопастного смесителя на основе численных методов.

Библиографический список

1. Лещинский, Л. В. Основы теории и расчета бетоносмесительных установок. – Хабаровск : Изд-во Хабаровского ГТУ, 1998. – 112 с.
2. Бормотов, А. Н. Математическое моделирование структуры композитов в виде рациональных функций по краевым точкам области планирования / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, С. В. Тюрденева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – №12 (16). – С. 272-280.
3. Бормотов, А. Н. Многокритериальный синтез сверхтяжелого композита / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин // Вестник Брянского ГТУ. – 2009. – № 4. – С. 29-36.

4. Бормотов, А. Н. Метод построения многофакторных нелинейных моделей на примере математического моделирования композитов специального назначения / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – №12 (16). – С. 264-271.
5. 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.
6. Чупшев, А. В. Влияние диаметра лопастей и их числа на неравномерность смеси и энергоемкость смешивания / А. В. Чупшев, В. В. Коновалов, В. П. Терюшков // Вестник ФГОУ ВПО Московский ГАУ им. В. П. Горячкина. – 2008. – № 2. – С. 132-133.
7. 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.
8. 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.
9. Новиков, В. В. Определение объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера / В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова [и др.] // Вестник Алтайского ГАУ. – 2011. – №1 (75). – С. 91-94.
10. Першин, В. Ф. Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана // Порошковая металлургия. – 1986. – №10. – С. 1.
11. Петрова, С. С. Повышение качества смешивания кормов с обоснованием конструктивно-режимных параметров барабанного смесителя : автореф. ... дис. канд. техн. наук / Петрова Светлана Станиславовна. – Пенза, 2004. – 16 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.