

Тип статьи: научная
УДК 631.363
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-15-25

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАСТНОГО ПОГРУЗЧИКА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

Максим Евгеньевич Выгузов¹, Сергей Михайлович Ведищев²,
Владимир Юрьевич Зайцев³, Владимир Викторович Коновалов⁴

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

¹ maks_vyguzov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-3111>

² serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

^{3,4} Пензенский государственный технологический университет,
г. Пенза, Российская Федерация

³ vluzai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>

⁴ konovalov-penza@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>

Автор ответственный за переписку: Максим Евгеньевич Выгузов, maks_vyguzov@mail.ru
Corresponding author: Maxim Vyguzov, maks_vyguzov@mail.ru

Реферат. Целью исследований является обоснование критической частоты вращения рабочего органа на основе силового анализа и моделирования движения частиц сыпучего продукта в горизонтальном погрузчике с радиальными лопастями, расположенном в циркуляционном смесителе. Методика исследований предусматривала обоснование максимальной частоты вращения рабочего органа погрузчика на основе анализа действующих на частицы сил в процессе их перемещения лопастями погрузчика и попадания в лоток в процессе полета. На основе полученных выражений осуществлялось моделирование значений показателей для проведения анализа и обоснования рациональных величин. Реализация численного анализа полученных выражений на основе силового анализ и моделирования процесса математическим пакетом Mathcad позволила выявить критические значения частоты вращения рабочего органа лопастного погрузчика исходя из условия возможности схода материала с лопасти и условия возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток. В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения лопастного погрузчика наружным диаметром лопастей 0,24 м и внутренним - 0,17 м, не должна превышать 77 мин⁻¹. Наибольшая частота вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка с наружного конца лопасти – 43 мин⁻¹, а с внутреннего – 73 мин⁻¹. В процессе изготовления циркуляционного смесителя с лопастным погрузчиком с радиальными лопастями для проведения экспериментальных исследований следует обеспечить возможность изменения частоты вращения до 43 мин⁻¹. Для проверки теоретических положений в поисковых опытах требуется предусмотреть возможность изменения частоты вращения вала лопастного погрузчика до 70 мин⁻¹.

Ключевые слова: циркуляционный смеситель, силовой анализ, горизонтальный лопастной погрузчик с радиальными лопастями, критическая частота вращения, численное моделирование.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE ROTATION FREQUENCY OF THE BLADE LOADER IN THE CIRCULATION MIXER

Maxim Vyguzov¹, Sergey Vedishchev², Vladimir Zaitsev³, Vladimir Kononov⁴

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

¹ maks_vyguzov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-3111>

² serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

^{2,3} Penza State Technological University, Penza, Russian Federation

³ vluzai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>

⁴konovalov-penza@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>

Abstract. The purpose of the research is to substantiate the critical rotation speed of the working body based on force analysis and modeling of the movement of particles of a bulk product in a horizontal loader with radial blades located in a circulation mixer. The research methodology involved substantiating the maximum rotation speed of the loader working body based on an analysis of the forces acting on particles as they move by the loader blades and fall into the tray during flight. Based on the obtained expressions, the values of the indicators were modeled to analyze and substantiate rational values. The implementation of a numerical analysis of the obtained expressions based on force analysis and process modeling with the Mathcad mathematical package made it possible to identify the critical values of the rotation speed of the working body of a paddle loader based on the condition for the possibility of material coming off the blade and the condition for the possibility of particles flying from the blade into the receiving tray. Due to the need for material to flow off the blades and the rotation speed reduction factor of 0.9, the rotation speed of a blade loader with an outer diameter of blades of 0.24 m and an inner diameter of 0.17 m should not exceed 77 min⁻¹. The highest rotation speed of the working body shaft at which particles of material will enter the receiving tray area from the outer end of the blade is 43 min⁻¹, and from the inner end - 73 min⁻¹. In the process of manufacturing a circulating mixer with a radial blade loader for experimental studies, it should be possible to change the rotation speed up to 43 min⁻¹. To test theoretical principles in exploratory experiments, it is necessary to provide for the possibility of changing the rotation speed of the blade loader shaft to 70 min⁻¹.

Keywords: circulating mixer, force analysis, horizontal radial blade loader, critical speed, numerical simulation.

Для цитирования: Выгузов М.Е., Ведищев С.М., Зайцев В.Ю., Коновалов В.В. Теоритическое обоснование частоты вращения лопастного погрузчика в циркуляционном смесителе // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 15-25. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-15-25>.

For citation: Vyguzov M., Vedishchev S., Zaitsev V., Konovalov V. Theoretical justification of the rotation frequency of the blade loader in the circulation mixer. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 15-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-15-25>.

Введение. Производство животноводческой продукции требует обеспечения животных качественными кормами, что требует применения смесителя для приготовления комбикормов. Для приготовления смесей сухих концентрированных кормов используются различные типы смесителей [1-4]: гравитационные [5,6], с пневматическим [7] и механическим действием: вибрационные [8-10], шнеково-ленточные [11-13], лопастные [14-16], с комбинированным рабочим органом [17-19], с вертикальной [14,15] и горизонтальной [12,19] осью вращения рабочего органа, быстроходные [14,15] и тихоходные [11-13], по принципу действия как непрерывного [5,10,19], так и периодического действия [12,13]. В настоящее время наибольшее распространения получили смесители периодического действия, порции компонентов, закладываемые в которые взвешиваются на весах. [20-23]. В ряде случаев кроме смешивания, конструкция смесителя позволяет осуществлять дозирование, измельчение компонентов и т.п. [17,24,25]. Для обоснования конструктивных параметров широко применяются теоретические исследования и моделирование движения материала в рабочих органах [26,27].

В случае применения циркуляционного смесителя [28] для перегрузки материала с одного рабочего органа на другой предлагается использовать лопастной погрузчик материала между рабочими органами внутри смесителя.

Целью исследований является обоснование критической частоты вращения рабочего органа на основе силового анализа и моделирования движения частиц сыпучего продукта в горизонтальном погрузчике с радиальными лопастями, расположенном в циркуляционном смесителе.

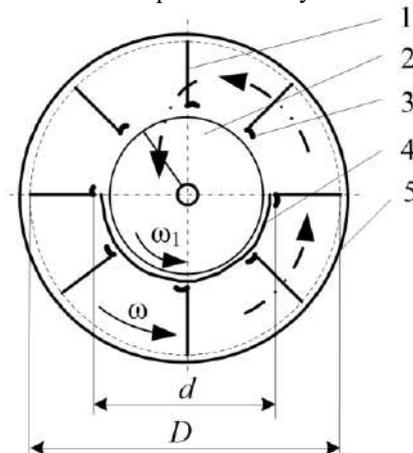
Материал и методы. Методика исследований предусматривала обоснование максимальной частоты вращения рабочего органа погрузчика на основе анализа действующих на частицы сил в процессе их перемещения лопастями погрузчика и попадания в лоток в процессе полета. На

основе полученных выражений осуществлялось моделирование значений показателей для проведения анализа и обоснования рациональных величин.

Для реализации цели сформулированы задачи: 1) на основе силового анализа получить выражения, описывающие действующие ускорения на частицу, условия схода частиц с лопасти, полета частиц в лоток; 2) численный анализ значений показателей на основе моделирования процесса математическим пакетом Mathcad; 3) обоснование критических значений частоты вращения рабочего органа.

Результаты и их обсуждение. Для согласованной работы подающего и отводящего шнеков и расположенного между ними лопастного подъемника, требуется теоретическое рассмотрение работы лопастного подъемника и обоснование критических значений его частоты вращения. Следует учитывать ряд условий: возможность схода материала с лопасти и наличие возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток.

Изначально материал перемещается ленточным рабочим органом циркуляционного смесителя (на рисунке 1 не показан) шнекового типа вдоль внутренних стенок наружного кожуха 5. При поступлении материала смеси в полость между радиальными лопастями 1 и ограниченную снаружи кожухом 5, а изнутри сетчатой поверхностью вала 3 ленточного рабочего органа (соответствует внутреннему радиусу краев лопастей 1), корм радиальными лопастями 1 погрузчика поднимается, а затем ссыпается по поднятым лопастям через сквозные отверстия поверхности вала 3 на неподвижный лоток 4. При вращении винта отгрузочного шнека 2 материал из лотка 4 сталкивается вдоль оси вращения внутрь вращающегося кожуха 3 отгрузочного шнека 2, одновременно являющегося валом ленточного рабочего органа. Форма и размеры отверстий поверхности вала 3 выбираются таким образом, чтобы не препятствовать сходу материала с лопасти свободному проходу ссыпаемого материала к лотку.

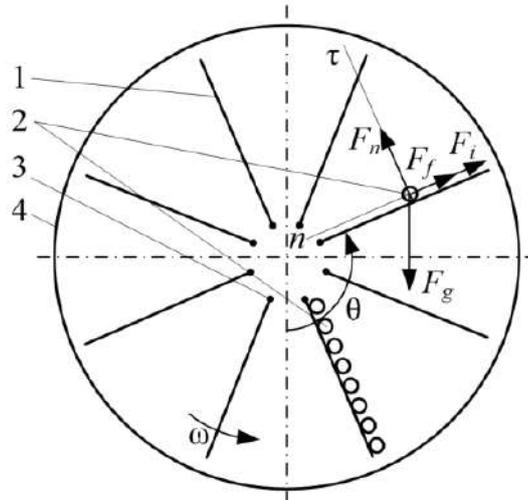


1 – лопасти погрузчика; 2 – отгрузочный шнек; 3 – вал ленточного рабочего органа (он же кожух отгрузочного шнека, в зоне радиальных лопастей имеющий сквозные продольные прорезы между лопастями, а в промежутках прорезей к данному валу крепятся лопасти); 4 – приемный лоток;

5 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 1 - Схема поперечного сечения горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями

Рассмотрим частицу материала, лежащую на лопасти, проведем оси подвижной системы координат $Mtлн$ и изобразим, действующие на нее силы при вращении лопастей погрузчика (рисунок 2). На частицу материала действуют следующие силы: сила тяжести $F_g = m \cdot g$, где g – ускорение свободного падения; нормальная реакция лопасти F_n ; сила трения $F_f = f \cdot F_n$, где f – коэффициент трения между материалом и лопастью; центробежная сила инерции $F_i = m \cdot \omega^2 \cdot R$, где m – масса частицы, R – расстояние частицы от оси вращения вала ленточного рабочего органа, ω – угловая скорость вала ленточного рабочего органа.



1 – лопасти погрузчика; 2 – частица материала; 3 – вал ленточного рабочего органа (кожух отгрузочного шнека); 4 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 2 - Расчетная схема горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями

На основе схемы сил, составим уравнения кинестатики в проекциях на оси подвижной системы координат $M\tau n$:

$$\sum n_i = 0, -F_g \cdot \cos(\theta) - F_f - F_i = 0, \quad (1)$$

$$\sum \tau_i = 0, F_n - F_g \cdot \sin(\theta) = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (2):

$$F_n = F_g \cdot \sin(\theta) = m \cdot g \cdot \sin(\theta). \quad (3)$$

Таким образом, уравнение (1) с учетом выражения (3) и выражений $F_i = m \cdot \omega^2 \cdot R$, $F_g = m \cdot g$, $F_f = f \cdot F_n$ примет вид:

$$-m \cdot g \cdot \cos(\theta) - f \cdot m \cdot g \cdot \sin(\theta) - m \cdot R \cdot \omega^2 = 0. \quad (4)$$

При значительной величине центробежных сил, они будут уравновешивать силу тяжести, и тем самым не произойдет сход материала по лопасти в сторону приемного лотка.

Из уравнения (4) определим значения частот вращения вала ленточного рабочего органа, при которых сход материала с лопасти невозможен при положении лопасти в верхнем вертикальном положении (угол $\theta = 180^\circ$):

$$-m \cdot g - m \cdot R \cdot \omega^2 = 0. \quad (5)$$

Откуда:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad \text{или} \quad n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (6)$$

Из уравнения (6) найдем значение частоты вращения вала ленточного рабочего органа, для различных вариантов расположения частиц материала на лопасти ($R = 0,085 \dots 0,12$ м). Значения частот вращения вала ленточного рабочего органа, при которых сход материала с лопасти невозможен по результатам численного моделирования приведены на рисунке 3. С уменьшением радиуса расположения частиц, критическая частота вращения возрастает.

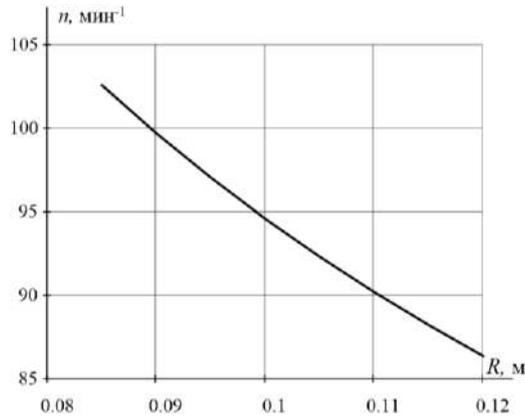


Рисунок 3 - Значения частот вращения вала, при которых сход материала с лопасти невозможен, для различного положения частиц на лопасти

Теперь из уравнения (4) найдем критический угол подъема частицы материала, при превышении которого начинается движение частицы по лопасти вниз:

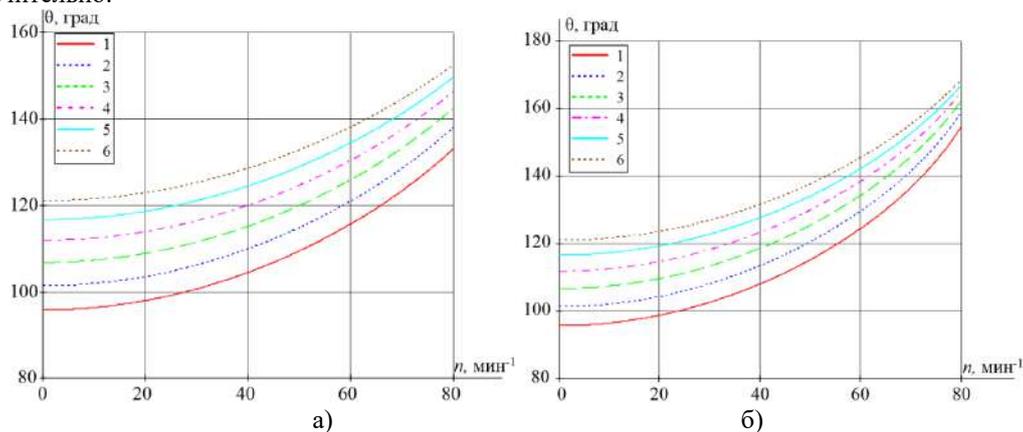
$$\theta = 2 \arctg \left(\frac{\sqrt{f^2 \cdot g^2 - R^2 \cdot \omega^4 + g^2} + f \cdot g}{g - R \cdot \omega^2} \right). \quad (7)$$

Значения критического угла подъема частицы материала в зависимости от частоты вращения вала рабочего органа и коэффициента трения по результатам численного моделирования приведены на рисунке 4. Увеличение трения способствует большему поднятию материала. Увеличение радиуса также способствует росту угла поднятия из-за роста центробежных сил, прижимающих материал к лопасти.

Из уравнения (4) выразим зависимость критической частоты вращения вала рабочего органа в зависимости от критического угла подъема частицы на лопасти, коэффициента трения и положения частицы на лопасти:

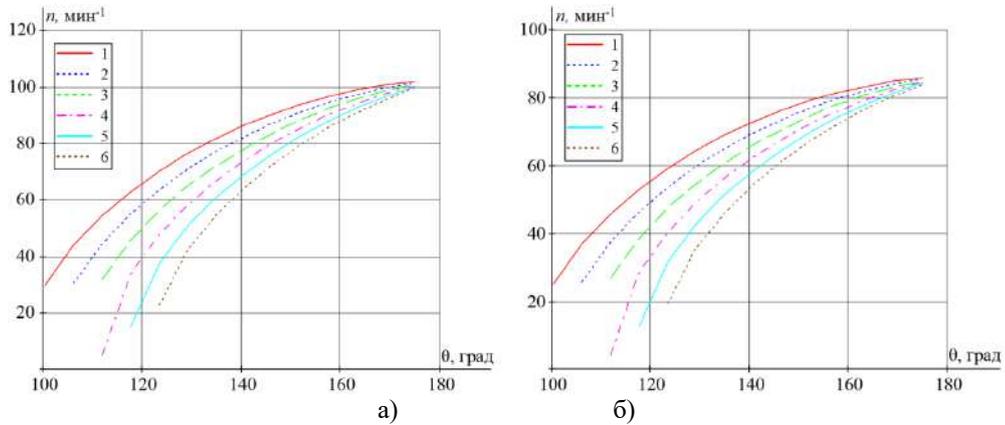
$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{-g \cdot \cos \theta - f \cdot g \cdot \sin \theta}{R}}. \quad (8)$$

Значения критической частоты вращения вала рабочего органа в зависимости от угла подъема частицы материала для различных значений коэффициента трения приведены на рисунке 5. С ростом радиуса снижается критическое значение частоты вращения. Влияние трения незначительно.



а – частица на лопасти удалена от центра вращения на 85 мм; б – частица на лопасти удалена от центра вращения на 120 мм: 1 – коэффициент трения $f=0,1$; 2 – коэффициент трения $=0,2$; 3 – коэффициент трения $f=0,3$; 4 – коэффициент трения $f=0,4$; 5 – коэффициент трения $f=0,5$; 6 – коэффициент трения $f=0,6$

Рисунок 4 - Значения критического угла подъема частицы материала



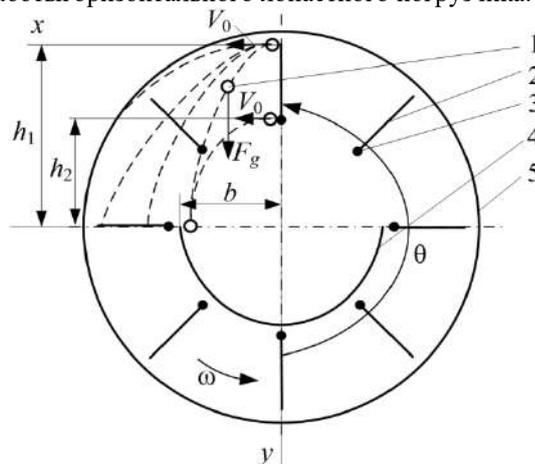
а – частица на лопасти удалена от центра вращения на 85 мм; б – частица на лопасти удалена от центра вращения на 120 мм: 1 – коэффициент трения $f=0,1$; 2 – коэффициент трения $f=0,2$; 3 – коэффициент трения $f=0,3$; 4 – коэффициент трения $f=0,4$; 5 – коэффициент трения $f=0,5$; 6 – коэффициент трения $f=0,6$

Рисунок 5 - Значения критического угла подъема частицы материала

Анализ полученных данных позволяет определить критическую частоту вращения лопастного погрузчика, при которой прекращается разгрузка лопастей от материала с учетом радиуса расположения частиц на лопасти и коэффициента трения материала по лопасти. Так при частотах вращения лопастного погрузчика более 86 мин^{-1} наблюдается фиксация материала на лопастях и тем самым прекращается циркуляция материала в смесителе (невозможна разгрузка лопастей от материала, а соответственно и поступление новых порций материала между лопастями, т.е. происходит заклинивание материалом подающего шнека).

В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения лопастного погрузчика не должна превышать 77 мин^{-1} .

Кроме того, при работе транспортера возможен вариант, когда частицы материала сходят с лопасти при положении лопасти в верхнем вертикальном положении (угол $\theta=180^\circ$). При этом, в зависимости от частоты вращения вала рабочего органа погрузчика, одни частицы материала могут биться о наружный кожух лопастного ротора (после чего падают вниз), другие перелетать зону приемного лотка (рисунок 6). В данном случае (при отсутствии попадания частиц в лоток) снижается эффективность работы горизонтального лопастного погрузчика.



1 – частица материала в произвольном положении на траектории падения; 2 – лопасти погрузчика; 3 – вал ленточного рабочего органа; 4 – приемный лоток; 5 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 6 - Расчетная схема к определению траектории падения частицы

Для обеспечения рациональной работы горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями необходимо обеспечить попадание частиц в зону приемного лотка (зона ограничена шириной b на рисунке 6). Для этого рассмотрим первый крайний случай, когда частица отделяется от лопасти в крайнем верхнем положении со скоростью V_0 . Учитывая, что при наличии начальной скорости частицы в направлении оси вращения рабочего органа вероятность попадания в приемный лот увеличивается, при выполнении расчетов исходим из худшего варианта – отсутствие начальной скорости вдоль радиальной лопасти. Проведем координатные оси x, y , изобразим частицу и действующие на нее силы в произвольном положении (рисунок 6) и, пренебрегая силой сопротивления воздуха составим дифференциальные уравнения движения частицы в проекция на эти оси:

$$m \frac{dV_x}{dt} = 0; m \frac{dV_y}{dt} = F_g = mg \text{ или } \frac{dV_x}{dt} = 0; \frac{dV_y}{dt} = g.$$

Разделим переменные и проинтегрируем их по времени:

$$\begin{aligned} dV_x &= 0; dV_y = g \cdot dt, \\ V_x &= \frac{dx}{dt} = C_1; V_y = \frac{dy}{dt} = g \cdot dt + C_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Разделим переменные в (9) и еще раз проинтегрируем по времени:

$$\begin{aligned} dx &= C_1 \cdot dt; dy = g \cdot t \cdot dt + C_2 \cdot dt, \\ x &= C_1 \cdot t + C_3; y = g \cdot \frac{t^2}{2} + C_2 \cdot t + C_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 найдем, подставив начальные условия ($t_0=0, x=x_0=0, y=y_0=0, V_x=V_{x0}=V_0=\omega \cdot R, V_y=V_{y0}=0$) в уравнения (9) и (10). Откуда $C_1=V_0=\omega \cdot R, C_2=0, C_3=0, C_4=0$. Уравнения (9) и (10) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; x = V_0 \cdot t; y = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (11)$$

При $x=b=r=d/2=0,085$ мм и $y=h_1=R=D/2=0,12$ мм уравнения (11) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; b = \omega \cdot R \cdot t; h_1 = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (12)$$

Из второго уравнения (12) найдем время падения частицы в зону приемного лотка:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_1}{g}} = 0,156 \text{ с.}$$

Из первого уравнения (11) найдем необходимую наибольшую частоту вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка[^]

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot b}{\pi \cdot R \cdot t} = 43 \text{ мин}^{-1}.$$

Второй крайний вариант, это когда частицы, сходящие с внутреннего конца лопасти, также летят, как и с верхнего конца лопасти (рисунок 6). Поэтому нижние частицы тоже должны попасть в лоток. Движение частицы в данном случае так же описывается уравнениями (9) и (10).

В данном варианте начальные условия имеют вид $t_0=0, x=x_0=0, y=y_0=0, V_x=V_{x0}=V_0=\omega \cdot r, V_y=V_{y0}=0$.

Откуда $C_1=V_0=\omega \cdot r, C_2=0, C_3=0, C_4=0$ и уравнения (9) и (10) примут вид:

$$V_x = \omega \cdot r; V_y = g \cdot t; x = \omega \cdot r \cdot t; y = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (13)$$

При $x=b=r=d/2=0,085$ мм и $y=h_2=R=d/2=0,085$ мм уравнения (13) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; b = \omega \cdot r \cdot t; h_2 = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (14)$$

Откуда:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_2}{g}} = 0,132 \text{ с} \quad \text{и} \quad n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi \cdot r \cdot t} = 73 \text{ мин}^{-1}.$$

Выводы. Таким образом, произведенный силовой анализ позволил выявить выражения, позволяющие проводить численный анализ работы устройства. Реализация численного анализа полученных выражений на основе моделирования процесса математическим пакетом Mathcad позволил выявить критические значения частоты вращения рабочего органа лопастного погрузчика с радиальными лопастями исходя из условия возможности схода материала с лопасти и условия возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток. В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения

лопастного погрузчика наружным диаметром лопастей 0,24 м и внутренним - 0,17 м, не должна превышать 77 мин⁻¹. Наибольшая частота вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка с наружного конца лопасти – 43 мин⁻¹, а с внутреннего – 73 мин⁻¹. Тем самым, в процессе изготовления циркуляционного смесителя с лопастным погрузчиком с радиальными лопастями для проведения экспериментальных исследований следует обеспечить возможность изменения частоты вращения до 43 мин⁻¹. Для проверки теоретических положений в поисковых опытах требуется предусмотреть возможность изменения частоты вращения вала лопастного погрузчика до 70 мин⁻¹.

Список источников

1. Анализ существующих смесителей кормов для КРС / Мезенов А.А., Федорова Р.А. // Actualscience. 2015. Т. 1. № 5 (5). С. 61-62.
2. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов / Ляшенко В.С. // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (18). С. 56-60.
3. Классификация технических средств для приготовления и раздачи кормовых смесей на малых фермах КРС / Фролов В.Ю., Припоров И.Е., Сысоев Д.П. / Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 114. С. 510-522.
4. Смеситель кормов: горизонтальный или вертикальный? / Петроченко Н.О. // Наше сельское хозяйство. 2022. № 8 (280). С. 30-33.
5. Мальцев В.С. Улучшение показателей приготовления концентрированных кормов с разработкой и обоснованием параметров дозатора-смесителя непрерывного действия / дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.20.01. – Пенза, 2011. – 160 с.
6. Моделирование рабочего процесса барабанного смесителя и теоретическое обоснование его параметров / Димитриев Н.В., Коновалов В.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 1. С. 42-49.
7. Инжекционный смеситель твердых сыпучих материалов / Зиннатуллин Н.Х., Зиганшин Б.Г., Нафиков И.М., Лушнов М.А., Зиннатуллина Г.Н. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 3 (45). С. 68-71.
8. Вибрационные смесители сыпучих кормов / Яцунов А.Н. // Сельский механизатор. 2014. № 5. С. 24-25.
9. Устройство и теоретическое обоснование основных параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов / Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Гайнуллин Э.Н. // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 10. С. 52-54.
10. Результаты экспериментальных исследований лоткового вибрационного смесителя кормов непрерывного действия / Хозяев И.А., Гучева Н.В., Бахчевников О.Н., Алферов А.С. // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4 (52). С. 81-85.
11. Разработка и исследование смесителя-ферментатора кормов для фермерских хозяйств / Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 4 (19). С. 196-208.
12. Исследование спирального смесителя кормов / Ульянов В.М., Утолин В.В., Паршина М.В., Батирова В.А., Паршина Л.А. // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 4 (48). С. 26-35.
13. Обоснование параметров механического активатора смесителя-обогапителя / Полякова А.А., Каширин Д.Е. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 1 (33). С. 75-79.
14. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов / Матюшев В.В., Бочкарев А.Н., Семенов А.В., Чаплыгина И.А. // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (44). С. 206-214.
15. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия / Коновалов В.В., Фомина М.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 10-15.

16. Аналитическое описание показателей работы смесителя сыпучих материалов с винтовыми лопастями / Борисова М.В., Новиков В.В., Коновалов В.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 69-78.
17. Смесители-дозаторы сухих рассыпных кормов / Ведищев С.М., Завражнов А.И., Прохоров А.В., Капустин В.П., Зазуля А.Н. // Промышленность и сельское хозяйство. 2019. № 12 (17). С. 10-14.
18. Определение параметров шнеколопастного смесителя / Хольшев Н.В., Мухин В.А., Петрова С.С. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 28-37.
19. Оптимизация технологических параметров смесителя с комбинированным рабочим органом / Коновалов В.В., Терюшков В.П., Чушнев А.В., Коновалов В.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3. С. 83-87.
20. Совершенствование способов и технических средств приготовления лечебных комбикормов и рабочих премиксов / Обухов А.Д. // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1 (41). С. 59-65.
21. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров горизонтального смесителя на показатели его рабочего процесса / Савиных П.А., Турубанов Н.В. // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 42-47.
22. Экономическое и энергетическое обоснование разработки смесителя компонентов комбикормов / Савиных П.А., Турубанов Н.В., Чернятьев Н.А. // Вестник НГИЭИ. 2023. № 6 (145). С. 7-17.
23. Разработка средств для приготовления ферментированного комбикорма в фермерских хозяйствах / Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 67-78.
24. Дробилки-смесители кормов. (США). ART'SwayFirstStopforGrinderMixers // PowerFarming.- 2012.-Vol. 122, N 2.-P. 55.-Англ. шифр *Росинформагротех / Суркова Т.А. // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2012. № 4. С. 1150.
25. К вопросу эффективности приготовления и раздачи кормов на предприятиях малых форм хозяйствования / Припоров И.Е., Фролов В.Ю. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 122. С. 380-403.
26. Determining the Nature of Particle Motion on the Blades of a Horizontal Drum of a Mobile Trailer / Zaitsev, V., Konovalov, V., Konovalova, A., Fomina, M., Zaitseva, V. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 509, pp. 1209–1217 DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_123.
27. Simulation of Particle Motion in a Cylindrical Grain Separator / V. Zaitsev, V. Konovalov, V. Konovalov / In book: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture, Proceedings of XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” (pp.427-436) DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_39.
28. Смеситель сыпучих кормов / Ведищев С.М., Прохорова А.В., Хольшев Н.В., Выгузов М.Е., Ложкина Е.Б., Ноздрина А.О., Конев А.Ю., Ковалева Т.М., Неверова С.Ю. / Патент на изобретение RU 2804750 C1, 04.10.2023. Заявка № 2022129557 от 15.11.2022.

References

1. Analysis of existing feed mixers for cattle / Mezenov A.A., Fedorova R.A. // Actualscience. 2015. Vol. 1. No. 5 (5). pp. 61-62.
2. Review and analysis of bulk feed mixers / Lyashenko V.S. // Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2015. No. 2 (18). pp. 56-60.
3. Classification of technical means for the preparation and distribution of feed mixtures on small cattle farms / Frolov V. Yu., Priporov I.E., Sysoev D.P. / Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2015. No. 114. pp. 510-522.
4. Feed mixer: horizontal or vertical? / Petrochenko N.O. // Our agriculture. 2022. No. 8 (280). pp. 30-33.
5. Maltsev V.S. Improvement of the indicators of preparation of concentrated feeds with the development and justification of the parameters of the continuous mixer dispenser / dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences. 05.20.01. – Penza, 2011. – 160 p.

6. Modeling of the working process of a drum mixer and the theoretical justification of its parameters / Dimitriev N.V., Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2017. No. 1. pp. 42-49.
7. Injection mixer of solid bulk materials / Zinnatullin N.H., Ziganshin B.G., Nafikov I.M., Lushnov M.A., Zinnatullina G.N. // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2017. Vol. 12. No. 3 (45). pp. 68-71.
8. Vibrating mixers of bulk feeds / Yatsunov A.N. // *Rural mechanizer*. 2014. No. 5. pp. 24-25.
9. Device and theoretical justification of the main parameters of a vibrating mixer of bulk feed / Sergeev N.S., Nikolaev V.N., Gainullin E.N. // *Achievements of science and technology of the agroindustrial complex*. 2013. No. 10. pp. 52-54.
10. Results of experimental studies of a continuous feed tray vibrating mixer / Khozyaev I.A., Gucheva N.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. // *Technique and technologies in animal husbandry*. 2023. No. 4 (52). pp. 81-85.
11. Development and research of a feed fermenter mixer for farms / Obolensky N.V., Bulatov S.Yu., Svistunov A.I. // *Innovations in agriculture*. 2016. No. 4 (19). pp. 196-208.
12. Investigation of a spiral feed mixer / Ulyanov V.M., Utolin V.V., Parshina M.V., Batirova V.A., Parshina L.A. // *Bulletin of agrarian science of the Don*. 2019. No. 4 (48). pp. 26-35.
13. Substantiation of the parameters of the mechanical activator of the mixer-concentrator / Polyakova A.A., Kashirin D.E. // *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2017. No. 1 (33). pp. 75-79.
14. Investigation of the operating modes of a centrifugal mixer of bulk components / Matyushev V.V., Bochkarev A.N., Semenov A.V., Chaplygina I.A. // *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. 2021. No. 4 (44). pp. 206-214.
15. Analytical justification of the duration of the cycle of operation of a periodic mixer / Konovalov V.V., Fomina M.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V. // *Proceedings of the Samara State Agricultural Academy*. 2015. No. 3. pp. 10-15.
16. Analytical description of the performance indicators of a mixer of bulk materials with screw blades / Borisova M.V., Novikov V.V., Konovalov V.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2019. No. 1. pp. 69-78.
17. Mixers-dispensers of dry loose feed / Vedishchev S.M., Zavrashnov A.I., Prokhorov A.V., Kapustin V.P., Zazulya A.N. // *Industry and agriculture*. 2019. No. 12 (17). pp. 10-14.
18. Determination of the parameters of a screw-blade mixer / Kholshev N.V., Mukhin V.A., Petrova S.S. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2019. No. 1. pp. 28-37.
19. Optimization of technological parameters of a mixer with a combined working body / Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V., Konovalov V.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2014. No. 3. pp. 83-87.
20. Improvement of methods and technical means of preparation of medicinal compound feeds and working premixes / Obukhov A.D. // *Equipment and technologies in animal husbandry*. 2021. No. 1 (41). pp. 59-65.
21. Investigation of the influence of structural and technological parameters of a horizontal mixer on the indicators of its working process / Savinykh P.A., Turubanov N.V. // *Technique and technologies in animal husbandry*. 2022. No. 3 (47). pp. 42-47.
22. Economic and energy justification for the development of a mixer of compound feed components / Savinykh P.A., Turubanov N.V., Chernyatyevev N.A. // *Bulletin of NGIEI*. 2023. No. 6 (145). pp. 7-17.
23. Development of means for the preparation of fermented compound feed in farms / Obolensky N.V., Bulatov S.Yu., Svistunov A.I. // *Vestnik RESKH*. 2016. No. 1 (22). pp. 67-78.
24. Feed mixer crushers. (USA)]. ART'S way First Stop for Grinder Mixers // *Power Farming*.-2012.- Vol. 122, N 2.-P. 55.-English cipher *Rosinformagrotech / Surkova T.A. // *Engineering and technical support of the agroindustrial complex. An abstract journal*. 2012. No. 4. p. 1150.
25. On the issue of the effectiveness of the preparation and distribution of feed at small enterprises / Priporov I.E., Frolov V.Yu. // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2016. No. 122. pp. 380-403.

26. Determining the Nature of Particle Motion on the Blades of a Horizontal Drum of a Mobile Trailer / Zaitsev, V., Konovalov, V., Konovalova, A., Fomina, M., Zaitseva, V. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 509, pp. 1209-1217 DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_123.

27. Simulation of Particle Motion in a Cylindrical Grain Separator / V. Zaitsev, V. Konovalov, V. Konovalov / In book: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture, Proceedings of XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” (pp.427-436) DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_39.

28. Bulk Feed mixer / Vedishchev S.M., Prokhorov A.V., Holshev N.V., Vyguzov M.E., Lozhkina E.B., Nozdrina A.O., Konev A.Yu., Kovaleva T.M., Neverova S.Yu. / Patent for invention RU 2804750 C1, 04.10.2023. Application No. 2022129557 dated 11/15/2022.

Информация об авторах

М.Е. Выгузов – аспирант; С.М. Ведищев – доктор технических наук, профессор; В. Ю. Зайцев - кандидат технических наук, доцент; В.В. Коновалов – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

M. Vyguzov – graduate student; S. Vedishchev – Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Zaitsev - candidate of technical sciences, associate professor; V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2024