


Теоретические предпосылки к обоснованию параметров смесителя белково-минерально-витаминных добавок

© 2022. Е. В. Авакимянц 

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для повышения эффективности смешивания белково-минерально-витаминных добавок для КРС возможно применить подход, при котором достигается перевод материала в псевдооживленное состояние. Исследование направлено на определение теоретических зависимостей скоростных и энергетических характеристик формирования псевдооживленного слоя от физико-механических свойств смешиваемого материала и конструктивно-кинематических параметров смесителя и выполнялось в 2021 г. Для уточнения характеристик процесса смешивания добавок в режиме псевдооживления вводится коэффициент структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы. Получены уравнения, характеризующие скорость перемещения частиц и затраты энергии на обеспечение движения частиц в псевдооживленном слое под воздействием лопастной мешалки. Для изучения влияния порозности слоя и угла наклона лопасти смесителя на скоростные характеристики движения частиц смеси построено графическое решение уравнения потерь скорости частиц при значении скорости на краю лопасти 5 м/с. Установлено, что изменение порозности слоя оказывает значительное влияние на скорость частиц смеси. Наибольшие потери составляют более 4,5 м/с и наблюдаются при наименьшем значении порозности – 0,14 и наибольшем угле наклона лопасти – 75°. Наименьшие потери составляют менее 0,5 м/с и соответствуют наибольшей порозности – 0,34 и наименьшему углу наклона лопасти – 15°. Таким образом, в рассматриваемых координатах наблюдается снижение скорости частицы на 10-90 %.

Ключевые слова: смешивание, лопастной смеситель, псевдооживленное состояние, кормовая добавка, кормосмесь, физико-механические характеристики

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (№ FGUN-2022-0010).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Авакимянц Е. В. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров смесителя белково-минерально-витаминных добавок. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(3):411-416.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.411-416>

Поступила: 18.03.2022

Принята к публикации: 25.04.2022

Опубликована онлайн: 23.06.2022

Theoretical background to substantiation of the parameters of mixer for protein, mineral and vitamin additives

© 2022. Evgeny V. Avakimiyants 

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation

One way to improve the mixing efficiency of protein-mineral-vitamin additives for cattle diets is to fluidize the material. The aim of the study is to define theoretical dependences between the speed and energy characteristics of the formation of a fluidized bed on the physical and mechanical properties of mixing substances and on structural and kinematic parameters of the mixer. The research was carried out in 2021. A coefficient of structural and mechanical resistance of the disperse many-component system was introduced to clarify the characteristics of additives mixing in the fluidization mode. The obtained equations described the particle velocity and the energy consumption for the particle flow in a fluidized bed influenced by a blade mixer. Next step was to reveal the effect of the layer porosity and the mixer blade angle on the particle velocity in the mixture. The velocity loss equation was solved as a graph for the value of 5 m/s at the blade edge. The variation in the layer porosity had a significant effect on considered parameter. The greatest velocity loss exceeded 4.5 m/s observed at the smallest porosity of 0.14 and the biggest blade angle of 75°. The smallest loss was below 0.5 m/s at the largest porosity of 0.34 and the smallest blade angle of 15°. Thus, the decrease in the particle velocity by 10 to 90 % was observed in the considered coordinates.

Keywords: mixing, blade mixer, fluidized state, feed additive, feed mix, physical and mechanical properties

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0010).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interest: the author declared no conflict of interest.

For citations: Avakimiyants E. V. Theoretical background to substantiation of the parameters of mixer for protein, mineral and vitamin additives. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):411-416. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.411-416>

Received: 18.03.2022

Accepted for publication: 25.04.2022

Published online: 23.06.2022

Использование белково-минерально-витаминных добавок (БМВД) в рационах крупного рогатого скота является одним из важнейших условий формирования здорового и высокопродуктивного поголовья [1]. Большой спектр производимых добавок позволяет специалистам составлять оптимальные рационы по питательности, макро- микроэлементам и витаминам в зависимости от условий содержания, продуктивности и прочих факторов [2, 3]. БМВД представляют собой мелкодисперсные порошкообразные материалы со схожими физико-механическими свойствами [4, 5]. Для их смешивания применяются центробежные смесители с вертикальным валом и лопастной радиальной мешалкой¹. В ряде исследований разработаны конструкции таких смесителей с помощью метода, основанного на равенстве моментов, создаваемых вращающимися лопастями мешалки и возникающих сопротивлений стенок корпуса аппарата [6, 7]. При этом процесс смешивания характеризуется высокими удельными энергозатратами.

Для повышения эффективности и качества смешивания БМВД возможно применить подход, при котором достигается состояние псевдооживления материала^{2,3} [8]. Псевдооживление материала быстро вращающейся лопастной мешалкой проходит в несколько этапов и связано с увеличением высоты слоя материала, уменьшением его плотности и интенсификацией движения частиц смеси. Следствием этого является снижение времени смешивания и энергозатрат на преодоление сопротивления материала.

Цель исследования – определение теоретических зависимостей скоростных и энергетических характеристик для обеспечения формирования псевдооживленного слоя частиц

в зависимости от физико-механических свойств смешиваемого материала и конструктивно-кинематических параметров смесителя БМВД.

Научная новизна заключается в получении зависимостей, характеризующих параметры движения частиц в псевдооживленном слое под воздействием лопастной мешалки с учетом структурно-механических характеристик дисперсной многокомпонентной системы.

Материал и методы. Теоретические исследования по определению скорости и энергии движения частиц БМВД при взаимодействии с лопастью мешалки выполнены с помощью известных положений теоремы об изменении количества движения⁴. Теоретические исследования по определению массы частиц и порозности слоя БМВД выполнены с привлечением известных положений теории упаковки дискретных сред⁵. В качестве исходных данных использовались результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств БМВД, полученные ранее [4, 5, 9]. Обработка данных выполнена с помощью пакетов MS Excel и STATGRAPHICS. Исследования и обработку данных проводили в 2022 г.

Результаты и их обсуждение. Для определения степени изменения количества движения частиц в результате соударения необходимо определить начальную скорость частиц. Скорость частиц является одним из определяющих факторов. Доказано, что материал переходит в псевдооживленное состояние при достижении окружной скорости $u_0 = 5...8$ м/с⁶. При этом объем материала увеличивается на 10-15 %, циркуляция материала становится очень интенсивной, на его поверхности образуются крупные волны.

¹Федоренко И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учебное пособие. М.: Форум, 2007. 176 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003323730>

²Макаров Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007350286>

³Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Пер. с польск. Под ред. канд. техн. наук И. А. Щупляка. Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1975. 384 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007003652>

⁴Лейбович М. В. Теория удара в задачах и примерах: учеб. пособие [науч. ред. Е. Л. Маркова]. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 236 с.

⁵Белов В. В., Образцов И. В., Иванов В. К. Коноплев Е. Н. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 102 с.

⁶Макаров Ю. И. Указ. соч.

Рассмотрим изменение скорости частицы с помощью теоремы об изменении количества движения, которая в векторной форме имеет вид:

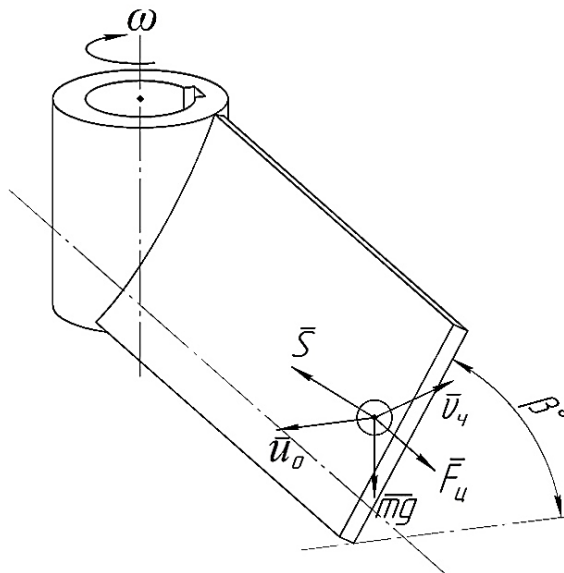
$$\vec{S} = m \cdot \Delta \vec{v}, \quad (1)$$

где m – масса материальной точки, кг.

Принимая во внимание положения теории упаковки дискретных сред, запишем условия верхней границы коэффициента заполнения трехмерного пространства при гексагональной решетчатой упаковке [10]:

$$k_3 = \frac{\pi}{\sqrt{18}}. \quad (2)$$

Для определения размеров частиц применяются различные методы дисперсионного анализа. Для материалов с размером частиц > 50 мкм применяется метод ситового анализа



В общем случае движение частицы материала в радиальном направлении происходит за счет центробежной силы инерции:

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

r – расстояние до оси вращения, м.

Окружная скорость на краю лопасти мешалки определяется:

$$u_0 = \frac{\pi \cdot L_{л} \cdot n}{30}, \quad (5)$$

где $L_{л}$ – длина лопасти, м;

n – частота вращения, мин⁻¹;

В работе [8] величина скорости движения частицы в радиальном направлении при схождении с поверхности лопасти определяется:

$$u_ч = \frac{n \cdot (a + L_{л})}{2 \cdot f_0}, \quad (6)$$

где a – расстояние от оси вращения до лопасти, м;

f_0 – коэффициент внешнего трения.

с последующим построением интегральных и дифференциальных характеристик сыпучего материала, что позволяет определить средний диаметр частиц $D_{ср}$ и соотношение долей частиц с различными размерами зерен [4, 9]. В дальнейшем будем рассматривать частицу как сферу, определяемую $D_{ср}$.

С учетом выражения (2) определим массу отдельной частицы по формуле:

$$m_ч = \frac{D_{ср}^3 \cdot \rho_н \cdot k_3}{6}, \quad (3)$$

где $\rho_н$ – насыпная плотность материала, кг/м³.

На рисунке 1 показана расчетная схема векторов сил и скоростей при воздействии мешалки на частицу смеси с указанием угла наклона лопасти.

Рис. 1. Расчетная схема векторов сил и скоростей / Fig. 1. Calculation scheme of force vectors and speeds

На скорость движения частиц по поверхности лопасти также влияет коэффициент внутреннего трения, гранулометрические характеристики частиц и характеристики дисперсной системы.

Для уточнения кинематических и энергетических характеристик процесса смешивания БМВД в режиме псевдооживления предлагается ввести коэффициент структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы:

$$C_s = f(f_0; f; \varepsilon_i), \quad (7)$$

где f – коэффициент внутреннего трения;

ε_i – порозность слоя многокомпонентной смеси.

Порозность слоя представляет собой отношение объема пор – дисперсной среды к общему объему материала. Порозность характеризует степень уплотнения материала в процессе смешивания и степень межчастичного взаимодействия, что предопределяет энергозатраты. В зависимости от плотности

упаковки порозность слоя можно определить по формуле⁷:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6 \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot \sqrt{1 + 2 \cos \gamma}} \quad (8)$$

где γ – угол между линиями, соединяющими центры сферических частиц.

Принимается, что угол между линиями, соединяющими центры сферических частиц, изменяется от 60° при гексагональной упаковке до 90° , когда центры сфер расположены в вершинах куба. Существующая формула применима лишь для систем, в которых дисперсная фаза представляет собой равные по размеру сферы.

Большинство БМВД, используемых в рационах КРС, имеют средний размер частиц $D_{cp} = 0,5-2$ мм и сложную несферическую форму, что негативно влияет на энергоёмкость смешивания [4, 11]. При этом смеси БМВД имеют неоднородный гранулометрический состав, хотя и обладают схожими физико-механическими свойствами [9]. Истинная порозность может значительно отличаться, ввиду того что в процессе уплотнения более мелкие частицы будут занимать пространство между крупными. Для определения порозности многокомпонентных смесей вводится коэффициент неоднородности гранулометрического состава⁸:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (9)$$

где d_{10} и d_{60} – диаметры частиц, которых содержится в смеси менее 10 и 60 % соответственно.

С учетом коэффициента неоднородности гранулометрического состава порозность слоя многокомпонентной смеси примет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon}{C_u}. \quad (10)$$

Коэффициент структурно-механического сопротивления многокомпонентной дисперсной системы примет вид:

$$C_s = \frac{\varepsilon_i}{f_0 \cdot f}. \quad (11)$$

Преобразовав выражения (6) и (11), определим скорость схода частицы с лопасти с учетом коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы и окружной скорости на краю лопасти:

$$v_{ч} = \frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_{л}) \cdot \varepsilon_i \cdot \cos \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f}, \quad (12)$$

где β_L – угол наклона лопасти мешалки, град.

Полученное уравнение характеризует величину скорости перемещения частиц в толще псевдооживленного слоя под воздействием лопастной мешалки. Тогда потери скорости частиц, обусловленные структурно-механическим сопротивлением дисперсной системы, определяются:

$$\Delta v_{ч} = \left(\frac{\pi \cdot (a + L_{л}) \cdot n}{30} \right) - \left(\frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_{л}) \cdot \varepsilon_i \cdot \cos \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right) \quad (13)$$

Потери скорости характеризуют собой потерю частицей сообщенной ей кинетической энергии, возникающей за счет взаимодействия с лопастью. Таким образом, для перевода из состояния покоя в движение со скоростью $v_{ч}$ частицы материала массой $m_{ч}$ затрачивается энергия, равная:

$$E_{ч} = \frac{D_{cp}^3 \cdot \rho_n \cdot k_3}{12 \cdot C_s} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_{л}) \cdot \varepsilon_i \cdot \cos \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2 \quad (14)$$

Полученное уравнение характеризует затраты энергии на обеспечение движения частиц смеси для формирования условий псевдооживления с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и конструктивно-кинематических параметров смесителя БМВД.

С целью изучения влияния порозности слоя БМВД и угла наклона лопасти смесителя на скоростные характеристики движения частиц смеси построено графическое решение уравнения (13) при значении скорости на краю лопасти $u_0 = 5$ м/с, соответствующем скорости начала псевдооживления (рис. 2).

Анализируя график, можно сказать, что изменение порозности слоя оказывает значительное влияние на скорость частиц смеси. Наибольшие потери составляют более 4,5 м/с и наблюдаются при наименьшем значении порозности – 0,14 и наибольшем угле наклона лопасти – 75° . Наименьшие потери составляют менее 0,5 м/с, соответствуют наибольшей порозности – 0,34 и наименьшему углу наклона лопасти – 15° . Таким образом, в рассматриваемых координатах наблюдается снижение скорости частицы на 10-90 %. Высвобождаемая при этом энергия, затрачивается непроизводительно на сообщение частице остаточных деформаций и ее нагрев.

⁷Стренк Ф. Указ. соч.

⁸Фонарёва П. А. Геотехнические свойства гранулометрического состава грунтов: учебно-методическое пособие: М.: МАДИ, 2017. 56 с.

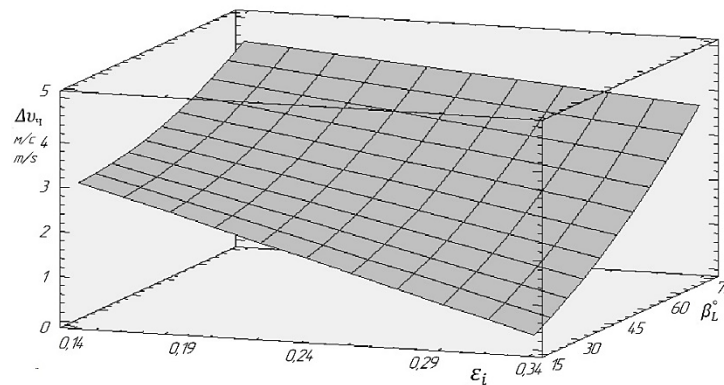


Рис. 2. Зависимость потерь скорости частицы от порозности слоя и угла наклона лопасти / Fig. 2. Dependence between the particle velocity loss and the layer porosity and blade angle

Увеличение потерь скорости при снижении порозности связано с уплотнением слоя и ростом коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы. Это также подтверждается тем, что в начальные этапы смешивания, сопровождаемые уплотнением смеси, наблюдается значительный рост удельной мощности, но в последующие этапы, при увеличении окружной скорости, удельная мощность снижаются⁹. При увеличении угла наклона лопастей также наблюдается рост потерь скорости, что связано с увеличением сил сопротивления материала. Это соотносится с данными, полученными в работе [12]. Увеличение угла наклона лопасти отрицательно сказывается на формировании псевдооживленного слоя, тогда как уменьшение угла позволяет

частицам материала перемещаться свободнее, в связи с чем улучшается циркуляция материала и повышается однородность смеси [8].

Выводы. Получены теоретические зависимости скоростных и энергетических характеристик движения частиц БМВД под воздействием лопастной мешалки с учетом коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы в зависимости от порозности слоя и угла наклона лопасти. Наибольшие потери скорости частиц наблюдаются при наименьшем значении порозности – 0,14 и наибольшем угле наклона лопасти – 75°. Наименьшие потери соответствуют наибольшей порозности – 0,34 и наименьшему углу наклона лопасти – 15°. В целом наблюдается снижение скорости частицы на 10-90 %.

Список литературы

1. Westphalen M. F., Carvalho Pedro H. V., Joonpyo Oh., Hristov A. N., Staniar W. B., Felix T. L. Effects of feeding rumen-protected *Capsicum* oleoresin on growth performance, health status, and total tract digestibility of growing beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*. 2021;271:114778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114778>
2. Stefańska B., Sroka J., Katzer F., Goliński P., Nowak W. The effect of probiotics, phytochemicals and their combination as feed additives in the diet of dairy calves on performance, rumen fermentation and blood metabolites during the preweaning period. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;272:114738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114738>
3. Humer E., Petri R. M., Aschenbach J. R., Bradford B. J., Penner G. B., Tafaj M., Südekum K. H., Zebeli Q. Invited review: Practical feeding management recommendations to mitigate the risk of subacute ruminal acidosis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(2):872-888. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13191>
4. Avakimiyants E. V., Gordeev V. V. Study of physical and mechanical properties of feed additives for cattle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723:032085. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032085>
5. Авакимянц Е. В., Гордеев В. В. Физико-механические свойства кормовых добавок для КРС. *АгроЭкоИнженерия*. 2020;(3(104)):100-108. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44354815>
6. Коновалов В. В., Чупшев А. В., Терюшков В. П., Шабурова Г. В. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012;(1(17)):135-139. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17941622>
7. Чупшев А. В., Коновалов В. В., Терюшков В. П., Шабурова Г. В. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2012;(3(89)):88-91. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17653158>
8. Бражник Ю. В., Несмеянов Н. П., Горшков П. С. Лопастной смеситель для сухих строительных смесей с высокоскоростным режимом работы: монография. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. 131 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35396810>

⁹Макаров Ю. И. Указ. соч.

9. Avakimyants E. V., Gordeev V. V. Physical and mechanical properties of mixtures of feed additives for cattle. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;979:012082. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/979/1/012082/pdf>
10. Burtseva L., Salas B. V., Werner F., Petranovskii V. Packing of monosized spheres in a cylindrical container: models and approaches. Revista Mexicana de Fisica. 2015;61:20-27. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v61n1/v61n1a5.pdf>
11. Angga P. H., Jieqing G., Zongyan Z., Aibing Y. Numerical studies of mixing of ellipsoidal particles in a bladed mixer. Powder Technology. 2022; 398:117065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117065>
12. Chandratilleke G. R., Yu A. B., Stewart R. L., Bridgwater J. Effects of blade rake angle and gap on particle mixing in a cylindrical mixer. Powder Technology. 2009;193(3):303-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.007>

References

1. Westphalen M. F., Carvalho Pedro H. V., Joonpyo Oh., Hristov A. N., Staniar W. B., Felix T. L. Effects of feed-ing rumen-protected *Capsicum* oleoresin on growth performance, health status, and total tract digestibility of growing beef cattle. Animal Feed Science and Technology. 2021;271:114778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2020.114778>
2. Stefańska B., Sroka J., Katzer F., Goliński P., Nowak W. The effect of probiotics, phytobiotics and their combination as feed additives in the diet of dairy calves on performance, rumen fermentation and blood metabolites during the preweaning period. Animal Feed Science and Technology. 2020;272:114738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2020.114738>
3. Humer E., Petri R. M., Aschenbach J. R., Bradford B. J., Penner G. B., Tafaj M., Südekum K. H., Zebeli Q. Invited review: Practical feeding management recommendations to mitigate the risk of subacute ruminal acidosis in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 2018;101(2):872-888. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13191>
4. Avakimyants E. V., Gordeev V. V. Study of physical and mechanical properties of feed additives for cattle. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;723:032085. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032085>
5. Avakimyants E. V., Gordeev V. V. Physical and mechanical properties of feed additives for cattle. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2020;(3(104)):100-108. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44354815>
6. Konovalov V. V., Chupshev A. V., Teryushkov V. P., Shaburova G. V. Analytical definition of parameters the blade amalgamators for the turbulent hashing of dry mixes. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2012;(1(17)):135-139. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17941622>
7. Chupshev A. V., Konovalov V. V., Teryushkov V. P., Shaburova G. V. Analytical determination of the parameters of paddle mixers for turbulent mixing of dry mixtures. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2012;(3(89)):88-91. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17653158>
8. Brazhnik Yu. V., Nesmeyanov N. P., Gorshkov P. S. Paddle mixer for dry building mixes with high-speed operation: monograph. Belgorod: *Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet im. V. G. Shukhova*, 2018. 131 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35396810>
9. Avakimyants E. V., Gordeev V. V. Physical and mechanical properties of mixtures of feed additives for cattle. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;979:012082. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/979/1/012082/pdf>
10. Burtseva L., Salas B. V., Werner F., Petranovskii V. Packing of monosized spheres in a cylindrical container: models and approaches. Revista Mexicana de Fisica. 2015;61:20-27. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v61n1/v61n1a5.pdf>
11. Angga P. H., Jieqing G., Zongyan Z., Aibing Y. Numerical studies of mixing of ellipsoidal particles in a bladed mixer. Powder Technology. 2022; 398:117065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117065>
12. Chandratilleke G. R., Yu A. B., Stewart R. L., Bridgwater J. Effects of blade rake angle and gap on particle mixing in a cylindrical mixer. Powder Technology. 2009;193(3):303-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.007>

Сведения об авторе

✉ **Авакимянц Евгений Вячеславович**, аспирант, младший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196625, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7290-6299>, e-mail: avakimyants@gmail.com

Information about the author

✉ **Evgeny V. Avakimyants**, post-graduate student, junior researcher, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Fil'trovskoye Shosse, p.o. Tiarlevo, Saint Petersburg, the Russian Federation, 196625, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7290-6299>, e-mail: avakimyants@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author