Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 130–135
Agrarian Scientific Journal. 2025;(11):130–135

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 636.085.55
https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp130-135

Влияние влажности на сыпучесть связных компонентов комбикормов

Игорь Андреевич Башмаков, Марина Евгеньевна Белышкина
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия
e-mail: igorbash@bk.ru

Аннотация. На комбикормовых заводах России перерабатывается разнообразное сырье с различными физико-механическими свойствами. Трудносыпучие материалы составляют около 50 % всего перерабатываемого сырья, что создает проблемы при производстве комбикормов. Целью исследования являлось изучение зависимости сыпучести компонентов комбикормов от их влажности на различных поверхностях. Для эксперимента использовали трудносыпучие компоненты комбикормов. Измерения проводили на установке ТМ21А, позволяющей определять угол скольжения материалов по поверхностям из различных материалов. В результате исследований установили, что при увеличении влажности угол естественного откоса возрастает: для соевого шрота и кукурузного размола на 3°, для рапсового и подсолнечного шрота на 4°, для ячменной мучки на 5°, для мясокостной муки на 7°. С ростом влажности увеличивается связность частиц, что приводит к снижению сыпучести материалов, ухудшению пересыпаемости и повышению вероятности комкования и слипания.

Ключевые слова: комбикорм, сыпучесть, связность, влажность, угол наклона

Для цитирования: Башмаков И. А., Белышкина М. Е. Влияние влажности на сыпучесть связных компонентов комбикормов // Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 130–135. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp130-135.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

The effect of humidity on the flowability of compound feed components

Igor A. Bashmakov, Marina E. Belyshkina
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
e-mail: igorbash@bk.ru

Abstract. Russian compound feed mills process a variety of raw materials with different physical and mechanical properties. Non-free flowing materials account for about 50 % of all processed raw materials, which creates problems in the production of compound feeds. The purpose of the research is to study the dependence of the flowability of feed components on their moisture content on various surfaces. For the experiment, non-free flowing feed components were used. The measurements were carried out on the TM21A installation, which makes it possible to determine the angle of sliding of materials on surfaces made of various materials. As a result of the research, it was found that with increasing humidity, the angle of natural slope increases: for soybean meal and corn meal by 3°, for rapeseed and sunflower meal by 4°, for barley flour by 5°, for meat and bone meal by 7°. With increasing humidity, the cohesion of particles increases, which leads to a decrease in the flowability of materials, deterioration of flowability and an increase in the likelihood of clumping and sticking.

Keywords: compound feed, flowability, coherence, humidity, tilt angle

For citation: Bashmakov I. A., Belyshkina M. E. The effect of humidity on the flowability of compound feed components. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(11):130–135. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp130-135.

Введение. В России комбикормовые заводы перерабатывают большое количество различных видов сырья, которые в значительной степени отличаются друг от друга физико-механическими свойствами. Заводы производят рассыпные, гранулированные и экструдированные комбикорма для различных видов животных. В качестве сырья используют зерновые культуры, бобовые, жмыхи, шроты, витаминные и минеральные добавки. При этом особую группу составляют трудносыпучие продукты [3, 6, 7, 11].

Российские и зарубежные ученые проводят исследования по транспортировке трудносыпучих компонентов комбикормов [1, 8, 17, 18]. В центре внимания этих исследований находятся проблемы слеживания, ухудшения сыпучести, разработка новых методов предотвращения сводообразования, совершенствование конструкции выгрузных устройств, создание автоматизированных систем управления и необходимость оптимизации условий транспортировки для сохранения качества продукции. Современные исследования в области транспортировки трудносыпучих компонентов комбикормов повышенной влажности характеризуются комплексным подходом и междисциплинарным взаимодействием, что позволяет создавать эффективные технологические решения для комбикормовой промышленности [10, 13, 16].

Трудносыпучие продукты занимают около 50 % от общего объема перерабатываемого на комбикормовых заводах сырья. Плохая сыпучесть создает большие трудности при выгрузке из бункеров, а также при перемещении по самотекам. Все это, в конечном итоге, сказывается на точности дозирования, качестве смешивания и влечет дополнительные затраты [5, 9, 20].

В специальной литературе рядом авторов неоднократно указывалось, что сыпучесть материалов зависит от целого комплекса факторов, в том числе крупности и выровненности частиц, их формы и характера поверхности, влажности и др. [14, 15, 19].

В связи с этим чрезвычайно важно знать, в какой степени зависит сыпучесть материалов от каждого из этих факторов, чтобы в последующем можно было бы организовать ведение технологического процесса производства комбикормов в оптимальном режиме.

Цель исследования – определение зависимости угла скольжения от влажности компонентов комбикормов на различных поверхностях.

Материалы и методы. Поскольку сыпучесть материалов в определенном плане характеризуется углом естественного откоса и углом скольжения, нами были проведены исследования по выявлению зависимости этих показателей от влажности трудносыпучих компонентов комбикормов.

Для проведения экспериментов приняли наиболее часто включаемые в рецепты комбикормов трудносыпучие компоненты с исходными параметрами, указанными в таблице [12].

Исходные физико-механические параметры испытуемых компонентов

Initial physical and mechanical parameters of the tested components

Наименование компонентов	Исходная влажность, %	Объемная (насыпная) масса, кг/м^3
Шрот соевый	11	540
Шрот подсолнечный	10	555
Шрот рапсовый	10	640
Размол кукурузный	14	605
Ячменная мучка	14	461
Мясокостная мука	10	491

Гранулометрический состав этих продуктов представлен графически в виде кумулятивных кривых (рисунок 1).

Наиболее трудоемким процессом в исследовании была подготовка образцов компонентов с определенной влажностью. Заданная влажность достигалась в одних случаях подсушиванием продуктов. При этом образец укладывали слоем толщиной 1 см на чистой стальной поверхности и выдерживали в сушильном шкафу при температуре 20 °С в течение определенного времени. Периодически материал перемешивали и каждые 12 часов определяли влажность по ГОСТ Р 54951-2012. По достижении заданной влажности образец продукта в целлофановом мешочке подвергали отлежке в течение суток. Затем проводили опыт [2, 4].

В том случае, когда образец материала нужно было увлажнить, предварительно рассчитывали необходимое для внесения в него количество влаги по формуле

$$W = \frac{G(a-b)}{100\%},$$

где G – масса образца материала, г; a – заданная величина влажности, %; b – фактическая величина влажности образца материала, %.

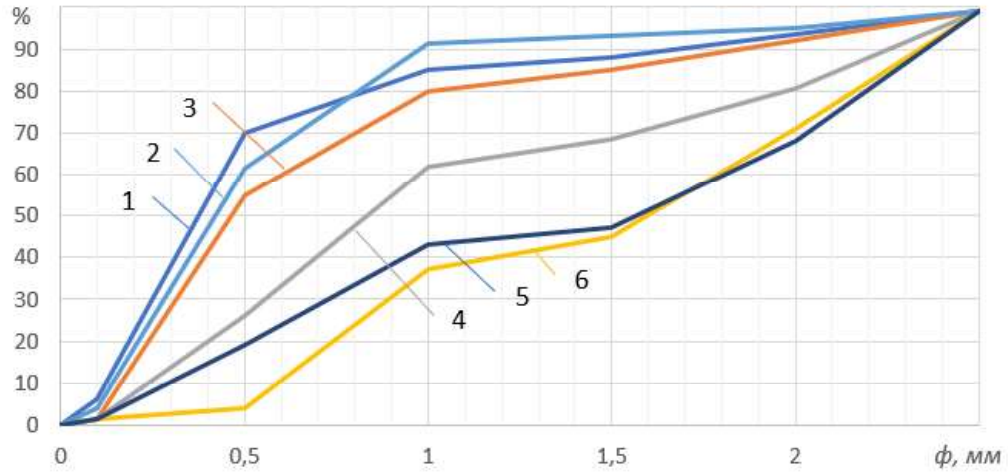

Рисунок 1 – Кумулятивные кривые гранулометрического состава трудносыпучих компонентов: 1 – ячменная мучка; 2 – размол кукурузный; 3 – мясокостная мука; 4 – шрот рапсовый; 5 – шрот подсолнечный; 6 – шрот соевый

Figure 1 – Cumulative curves of the granulometric composition of non-free flowing components: 1 – barley flour; 2 – corn milling; 3 – meat and bone meal; 4 – rapeseed meal; 5 – sunflower meal; 6 – soy meal

Продукт увлажняли с помощью пульверизатора, после чего тщательно перемешивали образец, переносили его в целлофановый мешочек и оставляли на 2 суток на отлежку.

Определение угла естественного откоса проводили методом фиксированной воронки в пятикратной повторности и по усредненным значениям строили график (рисунок 2).

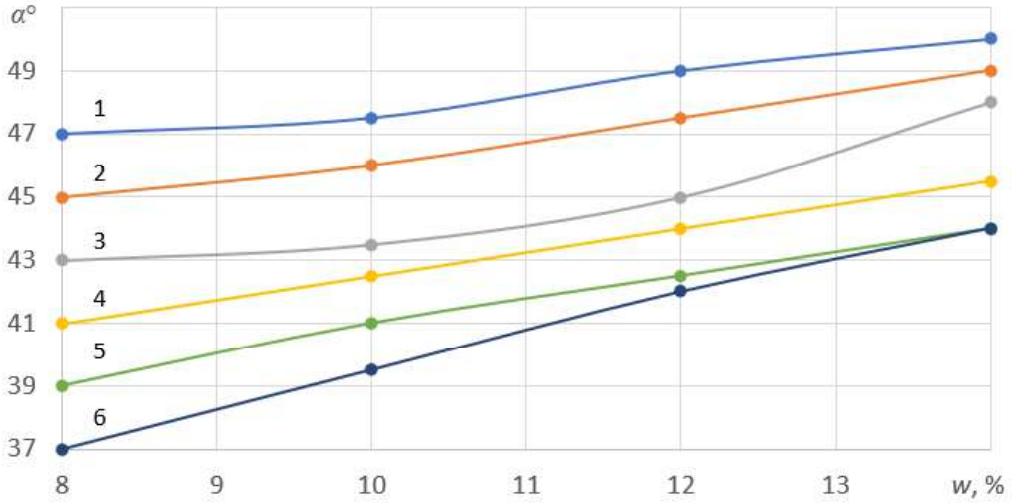

Рисунок 2 – Зависимость угла естественного откоса трудносыпучих компонентов от их влажности: 1 – шрот соевый; 2 – шрот подсолнечный; 3 – ячменная мучка; 4 – шрот рапсовый; 5 – размол кукурузный; 6 –мясокостная мука

Figure 2 – Dependence of the angle of natural slope of non-free flowing components on their moisture content: 1 – soybean meal; 2 – sunflower meal; 3 – barley flour; 4 – rapeseed meal; 5 – corn milling; 6 –meat and bone meal

Для исследования на скольжение выбрали деревянную, бетонную и стальную поверхности, поскольку они широко используются в комбикормовой промышленности для бункеров, лотков, желобов, переходных устройств между технологическими линиями, днищ силосов, завальных ям, напольных покрытий складских помещений.

Угол скольжения трудносыпучих компонентов по поверхностям различных материалов (дерево, бетон, сталь) определяли с помощью установки ТМ21А (рисунок 3). Конструкция установки представляет собой технологическую платформу с рабочей зоной длиной 1400 мм, выполненную из облегченного швеллера. Основание устройства – литой корпус, надежно зафик-

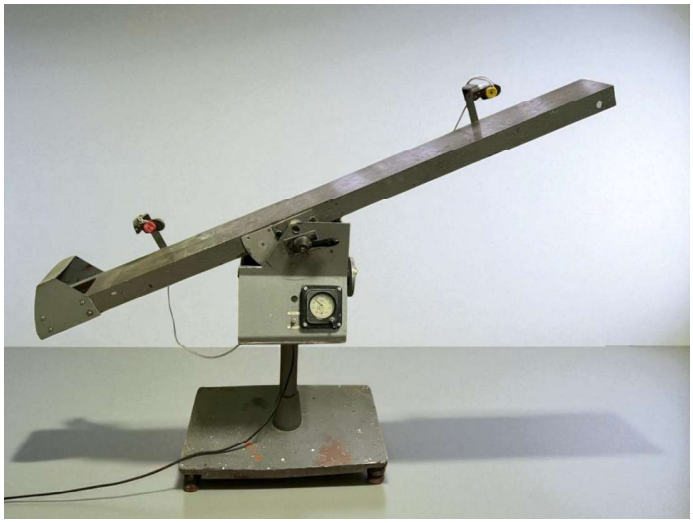

Рисунок 3 – Прибор для определения угла скольжения сыпучих материалов ТМ21А

Figure 3 – Device for determining the sliding angle of bulk materials TM21A

сированный на устойчивой платформе, оснащенной 4 регулируемыми опорами для выравнивания по высоте. Система наклона оборудована винтовым механизмом, позволяющим точно контролировать угол наклона платформы. В левой части конструкции размещен специальный уловитель, оснащенный амортизационным устройством для безопасного приема и гашения энергии падающих образцов. Диапазон установки платформы совместно с наклонной поверхностью варьирует от строго горизонтального положения (0°) до угла в 60°, что обеспечивает широкие возможности для проведения различных испытаний. На эту плоскость закрепляется испытуемая поверхность, на которую равномерным слоем укладывается 1 кг исследуемого продукта. Затем плоскость с помощью винта плавно наклоняли до тех пор, пока продукт полностью ссыпался. Угол наклона подвижной плоскости к горизонту фиксировали с помощью встроенного в прибор угломера. Опыты выполняли в пятикратной повторности. Используя графический метод статистической обработки данных, по усредненным результатам построили графики (рисунок 4).

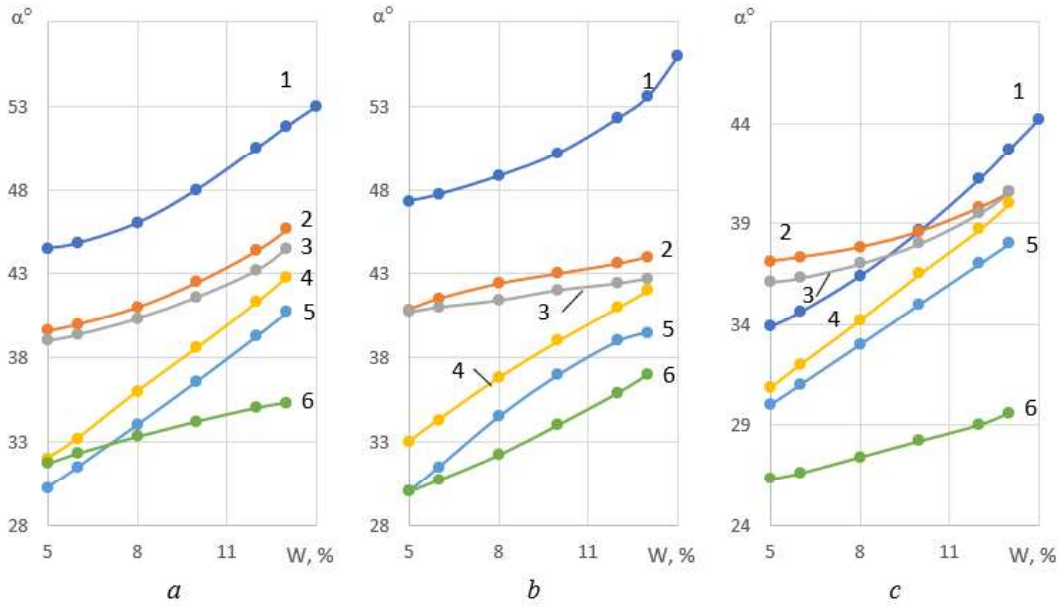

Рисунок 4 – Зависимость угла скольжения от влажности компонентов:
a – бетонная поверхность; b – деревянная поверхность (сосна остроганная); c – стальная поверхность;
1 – ячменная мучка; 2 – шрот подсолнечный; 3 – шрот соевый; 4 – шрот рапсовый;
5 – мясокостная мука; 6 – размол кукурузный

Figure 4 – Dependence of the sliding angle on the moisture content of the components:
a – concrete surface; b – wooden surface (planed pine); c – steel surface;
1 – barley flour; 2 – sunflower meal; 3 – soybean meal; 4 – rapeseed meal; 5 – meat and bone meal; 6 – corn milling

Результаты исследований. Результаты опытов показали, что изменение влажности трудносыпучих компонентов в интервале 8–14 % приводит к увеличению угла естественного откоса: соевого шрота и кукурузного размола на 3°, рапсового и подсолнечного шрота на 4°, ячменной мучки на 5° и мясокостной муки на 7°.

Изменение влажности в интервале 5–13 % приводит к увеличению угла скольжения при движении трудносыпучих материалов по бетонной поверхности на 6–12°, по деревянной и стальной поверхностям – на 4–9°. Наибольшее значение угла скольжения получили при движении ячменной мучки по деревянной поверхности (56°). Наименьшее значение получили при движении кукурузного размола по стальной поверхности (30°).

Необходимо отметить, что с увеличением влажности связность между частицами значительно возрастает. Избыточная влажность снижает сыпучесть, ухудшает пересыпаемость, увеличивает вероятность слипания и комкования.

Заключение. Анализируя результаты определения зависимости угла естественного откоса и угла скольжения от влажности трудносыпучих компонентов, можно сделать следующие выводы.

Увеличение влажности трудносыпучих компонентов вызывает повышение связности между частицами, что может затруднять перемешивание и транспортировку комбикорма. Влажные частицы легче склеиваются друг с другом, образуя комки, затрудняющие равномерное распределение корма и его потребление животными. Полученные результаты могут быть применимы в дальнейших исследованиях, а также могут учитываться при проектировании оборудования комбикормовой промышленности.

Наибольший эффект при гравитационном перемещении трудносыпучих компонентов достигается при обработке на стальной поверхности.

Современные комбикорма включают в себя различные компоненты в зависимости от назначения и рецептуры, во избежание заторов на комбикормовых предприятиях угол наклона самотеков, выполненных из стали, должен составлять не менее 65°, а угол наклона стальных выпускных конусных воронок бункеров – не менее 70°, поскольку поверхности становятся более шероховатыми из-за царапин и остатков продукции, влажность компонентов комбикормов не всегда распределяется равномерно, а также это способствует увеличению скорости выгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомягких В. А., Скудина А. А. Влияние влажности зерновых материалов на их истечение из бункера наибольшего расхода // Молодой ученый. 2015. № 14(94). С. 131–133.

2. ГОСТ Р 54951–2012 (ИСО 6496:1999). Корма для животных. Определение содержания влаги. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.

3. Дорохов А. С. Чилингарян Н. О. Состояние и перспективы развития комбикормовой промышленности в Российской Федерации // Аграрный вестник Урала. 2020. № 7(198). С. 75–84.

4. Загоруйко М. Г., Башмаков И. А., Степанов К. А. Исследование процесса сушки растительных отходов в изотермической модели // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17. № 4. С. 49–54.

5. Загоруйко М. Г. Теория расчета выпускных отверстий в бункерах для трудносыпучих материалов // Аграрный научный журнал. 2025. № 6. С. 108–115.

6. Зимняков В. М., Курочкин А. А., Зимняков А. М. Состояние, проблемы и перспективы развития производства комбикормов в России // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 1(45). С. 52–58.

7. Зимняков В. М. Производство комбикормов в России // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 1. С. 56–61.

8. Комплексное решение проблемы загрузки вагонов-хопперов трудносыпучими грузами / А. В. Варламов [и др.] // Наука и образование транспорту. 2015. № 1. С. 42–45.

9. Кононов И. И., Денисов В. В., Прусов М. В. Повышение энергоэффективности подачи компонентов комбикорма в производство // Journal of Agriculture and Environment. 2024. № 11(51).

10. Косяненко А. А. Технология дозированного выпуска трудносыпучих компонентов комбикорма из бункеров // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 4. С. 102–107.

11. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. № 4. С. 6–10.

12. Нормы технологического проектирования сельскохозяйственных предприятий по производству комбикормов. НТП-АПК 1.10.16.002-03. М., 2003. 81 с.

13. Симачкова М. С. Анализ технологических линий и оборудования для приготовления комбикормов // Вестник НГИЭИ. 2023. № 6(145) С. 18–36.

14. Технические средства для приготовления смесей зерновых компонентов комбикормов / М. Ю. Колобов [и др.] // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2021. № 2(66). С. 108–117.

15. Чупшев А. В. Обоснование перспективной операционной схемы приготовления комбикормов-концентратов в условиях животноводческих предприятий // Нива Поволжья. 2021. № 3(60). С. 135–141.

16. Экспериментальные исследования хранилища сыпучих грузов в транспортно-технологических комплексах / Г. М. Третьяков [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 5(83). С. 56–61.

17. Assirelli A., Santangelo E. An extractor for unloading the wet biomass stored in silo-bag // Industrial Crops and Products. 2018. Vol. 123. P. 128–134.

18. Effects of feed truck RPM on pellet quality, unloading speed, and feed line location on pellet quality and nutrient segregation / J. A. De Jong et al. // Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports. 2015. Vol. 1(7).

19. Fürll C., Hoffmann T. Flow properties of components for dry compound feed // Powder Technology. 2013. Vol. 235., P. 838–841.

20. Mellmann J., Hoffmann T., Fürll C. Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening // Powder Technology. 2014. Vol. 253. P. 46–52.

REFERENCES

1. Bogomyagkikh V. A., Skudina A. A. Influence of moisture content of grain materials on their outflow from the bunker of the highest consumption. *Young Scientist*. 2015;14(94):131–133. (In. Russ.).

2. GOST R 54951-2012 (ISO 6496:1999). Animal feed. Determination of moisture content. Moscow: Standartinform, 2013. 11 p. (In. Russ.).

3. Dorokhov A. S. Chilingaryan N. O. The state and prospects of the feed industry development in the Russian Federation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020;7(198):75–84. (In. Russ.).

4. Zagoruiko M. G., Bashmakov I. A., Stepanov K. A. Study of the drying process of plant waste in an isothermal model. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):49–54. (In. Russ.).

5. Zagoruiko M. G. Theory of calculating exhaust ports in bunkers for hard-to-bulk materials. *Agrarian Scientific Journal.* 2025;(6):108–115. (In. Russ.).

6. Zimnyakov V. M., Kurochkin A. A., Zimnyakov A.M. The state, problems and prospects of development of compound feed production in Russia. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;1(45):52–58. (In. Russ.).

7. Zimnyakov V. M. Production of compound feeds in Russia. *Innovative Machinery and Technology*. 2022;9(1):56–61. (In. Russ.).

8. A comprehensive solution to the problem of loading hopper wagons with difficult-to-bulk cargo / A. V. Varlamov [et al.]. S*cience and Education for Transport*. 2015;(1):42–45. (In. Russ.).

9. Kononov I. I., Denisov V. V., Prusov M. V. Improving the energy efficiency of feed components in production. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024;11(51). (In. Russ.).

10. Kosyanenko A. A. Technology of metered release of coarse feed components from bunkers. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2009;(4):102–107. (In. Russ.).

11. Lobachevsky Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic technical means for agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In. Russ.).

12. Norms of technological design of agricultural enterprises for the production of compound feeds. NTP-APK 1.10.16.002-03. Moscow, 2003. 81 p. (In. Russ.).

13. Simachkova M. S. Analysis of technological lines and equipment for the preparation of compound feeds. *Bulletin NGIEI*. 2023;6(145):18–36. (In. Russ.).

14. Technical means for the preparation of mixtures of grain components of compound feeds / M. Yu. Kolobov et al. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2021;2(66):108–117. (In. Russ.).

15. Chupshev A. V. Substantiation of a promising operational scheme for the preparation of compound feed concentrates in the conditions of livestock enterprises. *Niva Povolzh'ya.* 2021;3(60):135–141. (In. Russ.).

16. Experimental studies of bulk cargo storage in transport and technological complexes / G. M. Tretiakov, M. V. Prusov, V. V. Denisov, I. I. Kononov. *Vestnik Transporta Povolzhya*. 2020;5(83):56–61. (In. Russ.).

17. Assirelli A., Santangelo E. An extractor for unloading the wet biomass stored in silo-bag. *Industrial Crops and Products*. 2018;(123):128–134.

18. Effects of feed truck RPM on pellet quality, unloading speed, and feed line location on pellet quality and nutrient segregation / J. A. De Jong, J. M. DeRouchey, B. Haberl, H. Williams. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. 2015;1(7).

19. Fürll C., Hoffmann T. Flow properties of components for dry compound feed. *Powder Technology*. 2013;(235):838–841.

20. Mellmann J., Hoffmann T., Fürll C. Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening. *Powder Technology*. 2014;(253):46–52.

Статья поступила в редакцию 25.11.2024; одобрена после рецензирования 30.12.2024; принята к публикации 08.01.2025.
The article was submitted 25.11.2024; approved after reviewing 30.12.2024; accepted for publication 08.01.2025.