



УДК 621.86.067

Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов

А. А. Воробьев, А. А. Мигров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Мигров А. А. Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 97–104. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-97-104

Аннотация

Цель: Определить наиболее распространенные конструкции бункеров и выявить их основные особенности. **Методы:** В качестве инструмента исследований выбран метод теоретического анализа параметров, определяющих размеры основных элементов бункеров и статистического анализа размеров. **Результаты:** Представлены результаты статистического анализа конструктивных особенностей и геометрических параметров бункеров для сыпучих материалов. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для обоснования размеров и конструкции экспериментального бункера, на котором предполагается проверка теоретических исследований в области сводообразования.

Ключевые слова: Бункер, сыпучие материалы, сводообразование, погрузочно-разгрузочные устройства, статистический анализ.

Введение

При производстве погрузочно-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте приходится иметь дело с большим количеством сыпучих материалов. Операции по переработке и перемещению сыпучих материалов осуществляются с помощью погрузочно-разгрузочных устройств и механизмов, где в качестве основных или промежуточных звеньев применяются бункерные установки.

Опыт эксплуатации бункерных установок показывает, что они имеют серьезные недостатки. Одним из них является сводообразова-

ние. Сводообразование можно рассматривать как форму зависания материала, когда при истечении его над отверстием бункера в воронке возникают зависания, временно или постоянно препятствующие истечению по всему периметру выпускного отверстия [1].

Негативными последствиями сводообразования являются:

- остановка технологического процесса выгрузки на срок от нескольких часов до нескольких суток;
- нестабильность качества конечного продукта (например, клинкера, строительного цемента,

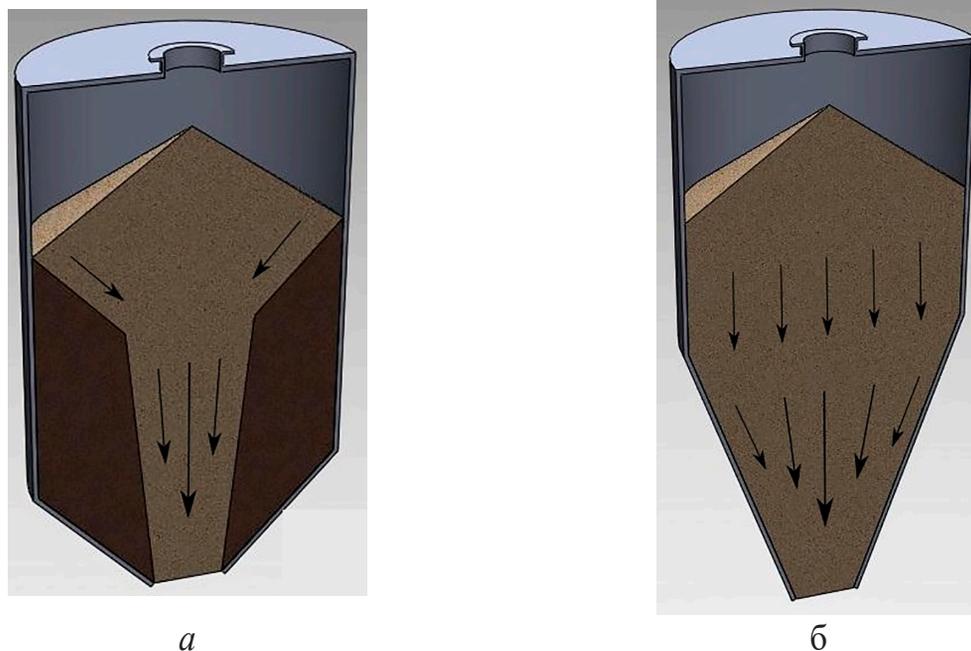


Рис. 1. Виды истечения сыпучего материала из бункера [9]:
a — нормальное истечение; *б* — гидравлическое истечение

сухих строительных смесей и т. п.) из-за сегрегации материала;

- необходимость привлечения дополнительных материальных, трудовых и энергетических ресурсов для разрушения свода материала;

- необходимость использования специальных побудителей истечения, снижающих ресурс оборудования;

- частые случаи нарушения техники безопасности при ручной шуровке сводов.

Поэтому всестороннее изучение проблемы сводообразования и разработка на его основе средств и методов борьбы с зависанием строительных материалов является актуальной задачей.

Процессы сводообразования и сводоразрушения изучались в работах [2–7] и др. Однако до сих пор некоторые вопросы, например вопрос о рациональных параметрах пневматических устройств, побуждающих истечение, до сих пор не нашли должного теоретического обоснования. Для изучения этих вопросов необходимо выполнить обоснование формы и геометрических параметров экспериментального бункера.

Классификация конструкций бункеров и теоретические зависимости, влияющие на их геометрические параметры

Форма бункеров зависит от назначения бункера, компоновки сооружения, требуемого запаса материала, физических свойств сыпучего материала, типа несущих конструкций и др. [8]. По форме бункера можно разделить на прямоугольные, круглые и корытообразные.

Прямоугольные бункеры, имеющие форму пирамиды или обелиска, называют пирамидальными или обелисковыми. У пирамидальных открытых бункеров верхнее загрузочное и нижнее разгрузочное отверстия геометрически подобны; у обелисковых бункеров этого подобия нет [7].

Форма бункера влияет на вид истечения сыпучего материала при выгрузке. Известны два вида истечения сыпучего материала из бункера: нормальное и гидравлическое.

При нормальной форме истечения (рис. 1, *a*) материал движется только в пределах зоны, рас-

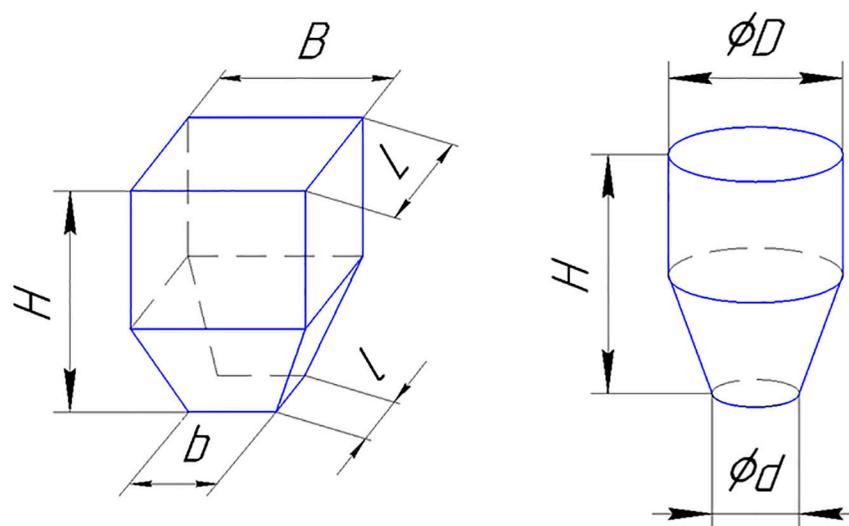


Рис. 2. Основные геометрические параметры бункеров

положенной над выпускным отверстием. У стенок за счет сил внешнего трения материала о стенки происходит постепенное торможение материала, он начинает двигаться с меньшей скоростью, здесь неизбежно возникает остановка движения.

При гидравлической форме истечения (рис. 1, б) сыпучий материал движется по всему объему одновременно, подобно движению жидкости. Бункер опорожняется полностью, вероятность образования сводов или локальных перемычек резко уменьшается.

Нормальную форму истечения рекомендуется использовать для крупнокускового не слеживающегося материала [10].

К основным геометрическим параметрам бункеров относятся (рис. 2):

- размеры сечений прямоугольных бункеров $L \times B$, где L и B — длина и ширина сечения, м;
- диаметры сечений круглых бункеров D , м;
- размер выпускного отверстия $l \times b$ для прямоугольных и диаметр d для круглых бункеров;
- высота бункера H , м;
- угол наклона стенок в вертикальной плоскости α , град.;
- толщина стенки S , мм.

Кроме того, для бункеров, форма которых отличается от перечисленных трех, могут быть и другие геометрические размеры.

Из перечисленных параметров на производительность бункерных установок влияют размеры сечений, высота бункера и угол наклона стенок. Толщина стенки имеет значение для прочностных характеристик бункера. Также на производительность влияет и такой параметр, как шероховатость стенок бункера.

Сводообразование сыпучих материалов объясняется возникновением в зоне разгрузочного отверстия такого напряженного состояния, при котором горизонтальные напряжения в слое частиц достигают наивысшего значения. Горизонтальные давления уплотняют материал, создают соответствующую вертикальную составляющую распора свода, которая становится достаточной для восприятия массы груза над отверстием [11].

На сводообразование при выгрузке сыпучего материала значительное влияние имеет размер сводообразующего отверстия.

Для определения размеров наименьшего допустимого отверстия в бункере легкосыпучих грузов Алферовым была предложена следующая формула [12]:

$$A = k' (a' + 80) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где A — размер стороны квадратного или диаметр круглого отверстия, мм;

k' — опытный коэффициент (для сортированных грузов $k' = 2,6$, для рядовых $k' = 2,4$);

a' — наибольший размер типичных кусков (до 300 мм);

φ — угол внутреннего трения.

Дженике предложил формулу для определения минимального размера B выпускного отверстия конических и прямоугольных бункеров, м [13]:

$$B = \frac{\overline{\sigma}_1 \cdot H(\alpha)}{g\rho_b} \quad (2)$$

где $\overline{\sigma}_1$ — максимальное значение напряжения, требующегося для разрушения свода, Н/м²;

$H(\alpha)$ — безразмерная функция, зависящая от угла наклона стенки бункера α . Значение функции обычно лежит в интервале от 2 до 2,3 для конических бункеров при гидравлической форме истечения и составляет половину от этого диапазона для прямоугольных бункеров [14];

g — ускорение свободного падения 9,81 м/с²;

ρ_b — плотность сыпучего материала при давлении, измеренном у выпускного отверстия бункера, кг/м³.

В работе [13] представлен ряд зависимостей угла внешнего трения по стенке бункера от угла наклона стенки в вертикальной плоскости. Графически определены границы между нормальным и гидравлическим истечением материала. Основными переменными, определяющими эти границы, являются:

– угол внешнего трения по стенке бункера, φ_w .

Это значение уменьшается с повышением давления;

– эффективный угол внутреннего трения, δ ;

– форма бункера, например конусная или клиновидная.

Результаты статистического анализа формы бункеров и соотношений их основных геометрических параметров

Задачами исследования являлось определение наиболее часто встречающейся формы бункеров и соотношений их основных геометрических параметров, а именно:

– отношение площадей сечения основной части прямоугольных бункеров к площади выпускного сечения;

– отношение диаметра основной части к диаметру выпускного сечения для конических бункеров;

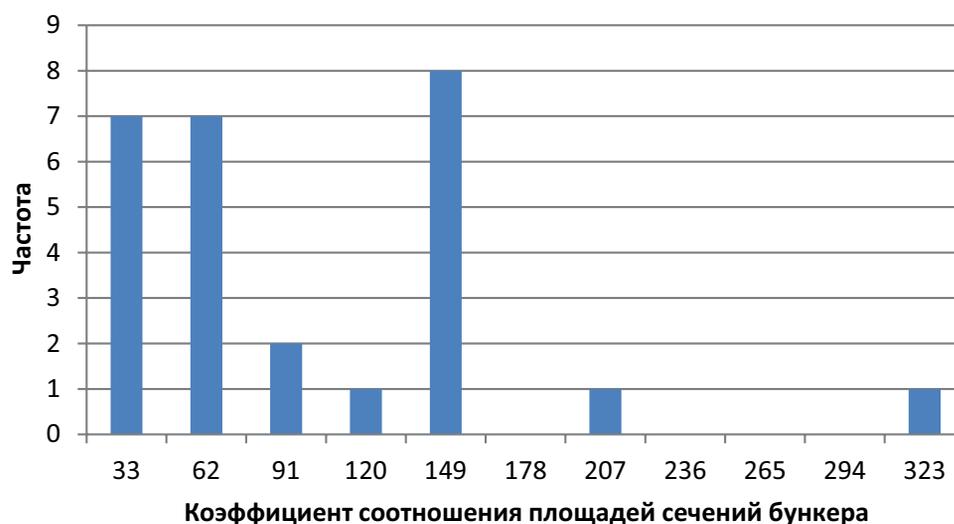
– отношение высоты к площади сечения основной части либо высоты к диаметру основной части для прямоугольных и конических бункеров соответственно.

Исходные данные для анализа были взяты из опросных листов, заполненных инженерно-техническими работниками предприятий промышленности и транспорта за период с 2014 по 2022 г. Всего было проанализировано 126 опросных листов.

Проведенный анализ показывает, что 36 % бункеров в выборке — конической формы, 62 % — прямоугольной. Из рассмотренных бункеров 2 % имеют более сложную пространственную форму.

Площадь сечения основной части 40 % прямоугольных бункеров лежит в интервале от 6 до 21 м² (часто встречаются значения 6 и 16 м²), еще 30 % — в интервале от 21 до 36 м². Значительные размеры сечений наблюдаются редко и характерны для бункеров с рудным концентратом или углем.

Площадь сечения выпускного отверстия 44 % прямоугольных бункеров лежит в интервале от 0,06 до 0,35 м². У 14 процентов бункеров площадь выпускного отверстия составляет от 0,35 до 0,65 м². У остальных прямоугольных бункеров размеры выпускного отверстия примерно равномерно распределяются от 0,65 м² до максимального значения 6,7 м².

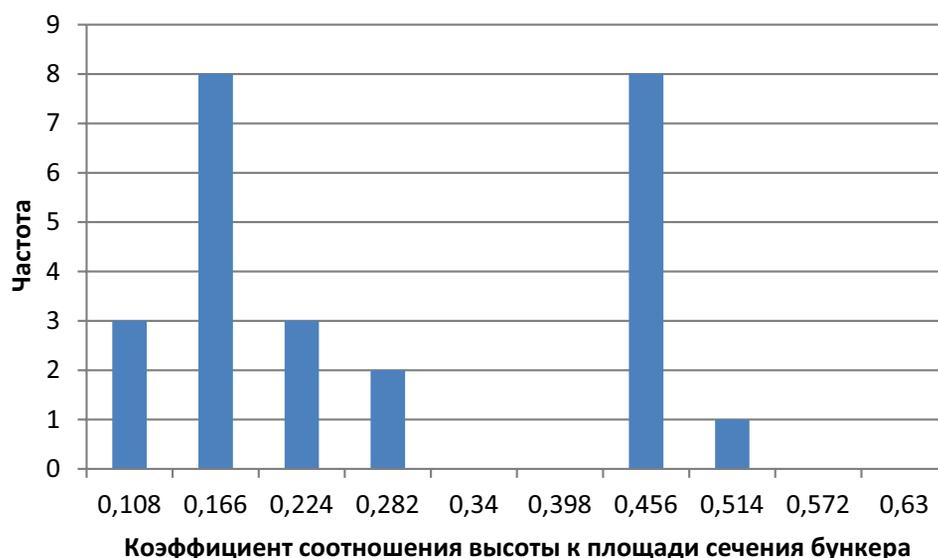
Рис. 3. Соотношение площадей $S1/S2$ Рис. 4. Соотношение площадей $D1/D2$

Анализ соотношений площадей основного и выпускного сечений прямоугольных бункеров показал (рис. 3), что у 30 % бункеров этот коэффициент лежит в интервале от 120 до 149 (типичные размеры сечений бункеров кварца и глины цементных заводов: основного сечения 4×4 м, выпускного сечения $0,35 \times 0,35$ м). По 25 % бункеров имеют соотношение площадей сечений от 4 до 33 и от 33 до 62. Бункеры со значительным соотношением площадей сечений (более 150) встречаются редко.

Для конических бункеров (рис. 4) наиболее частое соотношение диаметров сечений от 2 до 3,9 наблюдается у 42 % бункеров. Далее, по убывающей: 18 % имеют соотношение от 3,9 до 6,3, 12 % — от 6,3 до 8,7 и т. д.

Отношение высоты к площади сечения основной части, а также высоты к диаметру основной части для прямоугольных и конических бункеров показано на рис. 5 и 6 соответственно.

У 30 % прямоугольных бункеров это соотношение находится в интервале 0,108–0,166. Еще

Рис. 5. Соотношение $K/S1$ Рис. 6. Соотношение $K/D2$

у 30 % бункеров отношение высоты к площади сечения 0,398–0,456.

Примерно по 18 % конических бункеров имеют отношение высоты к диаметру сечения 0,5–0,6 и 1,3–1,4. По 12 % бункеров имеют отношение высоты к диаметру сечения в интервалах 0,4–0,5, 0,6–0,7 и 0,9–1 (рис. 6).

Заключение

Таким образом, анализ формы и основных геометрических параметров бункеров сыпучих грузов

показывает, что в практике наиболее часто встречающимся типом бункеров являются прямоугольные с площадью основного сечения до 36 м^2 и с площадью выпускного сечения до $0,65 \text{ м}^2$. У большинства прямоугольных бункеров отношение высоты к площади основного сечения не превышает 0,3.

Полученные данные могут быть использованы для обоснования размеров и конструкции экспериментального бункера, на котором предполагается проверка теоретических исследований в области сводообрушения.

Библиографический список

1. Рогинский Г. Л. Дозирование сыпучих материалов / Г. Л. Рогинский. — М.: Химия, 1978.
2. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов: учебное пособие / Л. В. Гячев; Алтайский политехнический институт им. И. И. Ползунова. — Барнаул: Алтайский политехнический институт, 1986. — 84 с.
3. Drescher A. Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties / A. Drescher, A. J. Waters, C. A. Rhoades // *Powder Technology*. — 1995 — Vol. 84. — Iss. 2. — Pp. 165–176. — URL: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)02981-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)02981-7).
4. Enstad G. On the theory of arching in mass flow hoppers / G. Enstad // *Chemical Engineering Science*. — 1975. — Vol. 30. — Iss. 10. — Pp. 1273–1283. — URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)85051-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)85051-2).
5. Nguyen T. Gravity Flow of Granular Materials in Conical Hoppers / T. Nguyen, C. Brennen, R. Sabersky // *Journal of Applied Mechanics*. — 1979. — Vol. 46.
6. Schulze D. Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow* / D. Schulze, J. Schwedes, J. W. Carson. — 2008.
7. Зенков Р. Л. Бункерные устройства / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. М.: Машиностроение, 1977.
8. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. — М.: Стройиздат, 1983.
9. Oginni O. Contribution of Particle Size and Moisture Content to Flowability of Fractionated Ground Loblolly Pine / O. Oginni, F. Oladiran, S. Adhikari, J. Fulton. — 2014. — DOI: 10.13140/RG.2.1.4752.6643.
10. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров. — М.: Стройиздат, 1978. — 29 с.
11. Шубин И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров. — Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. — 76 с.
12. Алферов К. В., Зенков Р. Л. Бункерные установки. — М.: Машгиз, 1955. — 308 с.
13. Jenike A. W. Storage and Flow of Solids / A. W. Jenike // University of Utah Engineering Experiment Station. Bulletin. — 1964. — № 123.
14. McGlinchey D. Bulk Solids Handling Equipment Selection and Operation / D. McGlinchey // Blackwell Publishing Ltd. — 2008.

Дата поступления: 01.02.2022

Решение о публикации: 24.02.2022

Контактная информация:

ВОРОБЬЁВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, профессор; 79219751198@yandex.ru,
МИГРОВ Александр Алексеевич — ст. преподаватель; amigrov@gmail.com

Analysis and Selection of Geometric Parameters of a Hopper to Study the Process of Unloading of Bulk Materials**A. A. Vorobyev, A. A. Migrov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Migrov A. A. Analysis and Selection of Geometric Parameters of a Hopper to Study the Process of Unloading of Bulk Materials // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 97–104. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-97-104

Summary

Purpose: To determine the most common structures of hoppers and identify their main features. **Methods:** Theoretical analysis of the parameters determining the dimension of the main elements of hoppers and statistical analysis of the dimension. **Results:** The results of statistical analysis of frame features and geometric parameters of hoppers for bulk materials are presented. **Practical significance:** Results can be used to substantiate the dimension and frame of an experimental hopper which on, the check is supposed of theoretical research of vault destruction.

Keywords: Hopper, bulk materials, arch formation, loading and unloading devices, statistical analysis.

References

1. Roginskiy G. L. *Dozirovanie sypuchikh materialov* [Dosing of bulk materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1978. (in Russian)
2. Gyachev L. V. *Osnovy teorii bunkerov i silosov* [Fundamentals of the theory of bunkers and silos: study guide]. *Altayskiy politekhnicheskiy institut im. I. I. Polzunova* [Altai Polytechnic Institute. I. I. Polzunova]. Barnaul: Altayskiy politekhnicheskiy institute Publ., 1986. 84 p. (in Russian)
3. Drescher A. Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties / A. Drescher, A. J. Waters, C. A. Rhoades // *Powder Technology*. 1995 Vol. 84. Iss. 2. Pp. 165–176. Available at: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)02981-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)02981-7).
4. Enstad G. On the theory of arching in mass flow hoppers / G. Enstad // *Chemical Engineering Science*. 1975. Vol. 30. Iss. 10. Pp. 1273–1283. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)85051-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)85051-2).
5. Nguyen T. Gravity Flow of Granular Materials in Conical Hoppers / T. Nguyen, S. Brennen, R. Sabersky // *Journal of Applied Mechanics*. 1979. Vol. 46.
6. Schulze D. Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow* / D. Schulze, J. Schwedes, J. W. Carson. 2008.
7. Zenkov R. L. *Bunkernye ustroystva* [Bunker devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. (in Russian)
8. *Rukovodstvo po raschetu i projektirovaniyu zhelezobetonnykh, stal'nykh i kombinirovannykh bunkerov* [Guidelines for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983. (in Russian)
9. Oginni O. Contribution of Particle Size and Moisture Content to Flowability of Fractionated Ground Loblolly Pine / O. Oginni, F. Oladiran, S. Adhikari, J. Fulton. 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.4752.6643.
10. *Rukovodstvo po opredeleniyu kharakteristik materiala zapolneniya i geometricheskikh parametrov bunkerov* [Guidelines for determining the characteristics of the filling material and the geometric parameters of the bunkers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978. 29 p. (in Russian)
11. Shubin I. N. *Tekhnologicheskie mashiny i oborudovanie. Sypuchie materialy i ikh svoystva* [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties]. Tambov: Tamb. gos. tekhn. un-t Publ., 2005. 76 p. (in Russian)
12. Alferov K. V., Zenkov R. L. *Bunkernye ustanovki* [Bunker installations]. Moscow: Mashgiz Publ., 1955. 308 p. (in Russian)
13. Jenike A. W. Storage and Flow of Solids / A. W. Jenike // University of Utah Engineering Experiment Station. Bulletin. — 1964. — № 123.
14. McGlinchey D. Bulk Solids Handling Equipment Selection and Operation / D. McGlinchey // Blackwell Publishing Ltd. 2008

Received: February 1, 2022

Accepted: February 24, 2022

Author's information:

Alexandr A. VOROBYEV — Professor;
79219751198@yandex.ru

Alexandr A. MIGROV — Senior Lecturer;
amigrov@gmail.com