

ПРОЦЕСС СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ

Шеметова О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: пневмосмеситель, смешивание, строительные смеси, смеситель, совершенствование, сухие строительные смеси, исследования.

Аннотация. Пневматические смесители как современное оборудование для смешения сухих строительных мелкодисперсных материалов отвечают требованиям по экологическим и производственным нормам и превосходят механические смесительные агрегаты по своим техническим характеристикам и не наносят вреда здоровью сотрудников. Смешение материалов с высокоинтенсивным перемещением частиц материала по камере смешения и с другими частицами материала, позволяет получить готовую смесь с высоким процентом однородности, что позволяет увеличить качественные характеристики готового продукта и имеет немаловажное значение при изготовлении строительных материалов. В статье приведена методика расчета процесса смешивания компонентов сыпучего материала в пневмосмесителе. По результатам которой получаем соотношение определяющее изменение концентрации выделенной компоненты смеси сыпучего материала в цилиндрическом объеме камеры смешения. Результаты данной статьи могут быть использованы при проектировании пневматических смесителей для смешивания сухих строительных смесей.

THE PROCESS OF MIXING THE COMPONENTS OF POOL MATERIAL IN A PNEUMATIC MIXER

Shemetova O.M.

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: pneumatic mixer, mixing, construction mixtures, mixer, improvement, dry building mixtures, research.

Abstract. Pneumatic mixers as modern equipment for mixing dry building fine materials meet the requirements for environmental and industrial standards and surpass mechanical mixing units in their technical characteristics and do not harm the health of employees. Mixing of materials with high-intensity movement of material particles through the mixing chamber and with other particles of the material makes it possible to obtain a finished mixture with a high percentage of uniformity, which allows increasing the quality characteristics of the finished product and is of no small importance in the manufacture of building materials. The article presents a method for calculating the process of mixing the components of bulk material in a pneumatic mixer. According to the results of which we obtain a ratio that determines the change in the concentration of the selected component of the mixture of bulk material in the cylindrical volume of the mixing chamber. The results of this article can be used in the design of pneumatic mixers for mixing dry building mixes.

Введение. Важным этапом в технологическом процессе производства сухих смесей является процесс смешивания, который влияет на показатель качества готового продукта. От однородности смеси зависят многие характеристики (механические, физические и химические свойства) и внешний вид готового изделия [1-12].

Теоретические подходы

Описание процесса смешивания компонентов сыпучего материала в объеме рассматриваемой конструкции смесителя можно провести в рамках двухпараметрической диффузионной модели:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{v}_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где D_z и D_r соответственно коэффициенты продольного и радиального перемешивания; \overline{v}_z – скорость продольного движения материала; c – концентрация компонентов; z – общая высота камеры; r – радиус камеры.

В данной модели принимается, что величины D_z , D_r , $\overline{v_z}$ – являются постоянными по длине и поперечному сечению.

Рассматриваемая модель смесителя (рис. 1) характеризуется наличием установившегося (не зависящим от времени) режимом смешивания. Поэтому можно предположить, что изменения концентрации «с» в этом случае будет зависеть только от двух переменных $c(z, r)$. На основании этого факта уравнение (1) можно представить в виде:

$$D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{v_z} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0. \quad (2)$$

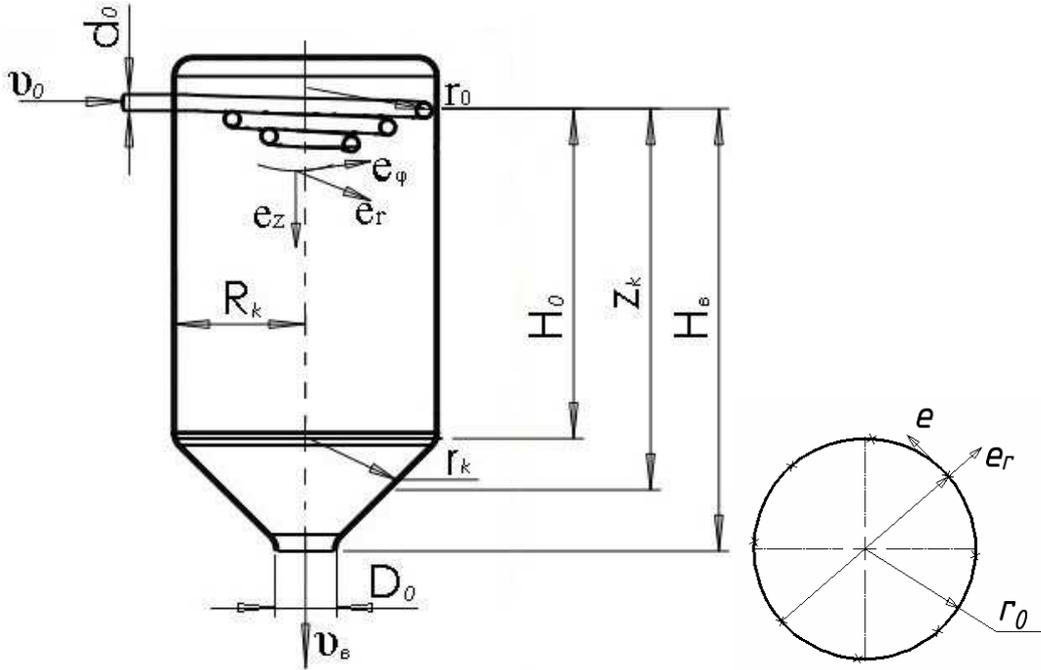


Рис. 1. Расчетная схема для задания граничных условий.

Естественно предположить, что это коэффициенты продольного и радиального перемешивания прямо пропорциональны средним значениям скоростей движения в продольном и радиальном направлениях, а также геометрическим размерам. На этом основании можно записать:

$$D_z = \overline{v_z} H_0, \quad (3)$$

$$D_r = \overline{v_r} R_k. \quad (4)$$

где H_0 – высота камеры смешения от начала спиральной трубки до конца цилиндрической части камеры; R_k – радиус цилиндрической части камеры.

Далее будем предполагать, что среднее значения скоростей движения частиц материала отличаются от среднего значения скоростей воздушного потока на бесконечно малую величину. Поэтому на основании сказанного предположения можно записать следующие соотношения:

$$\overline{v_r} = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_k} \int_0^{H_0} v_r \cdot dr \cdot dz, \quad (5)$$

$$\overline{v_z} = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_k} \int_0^{H_0} v_z \cdot dr \cdot dz, \quad (6)$$

где φ – угол поворота струи потока энергоносителя; V – объем цилиндрического корпуса смесителя равный:

$$V = \pi R_k^2 H_0. \quad (7)$$

Подстановка (1) и (6) в (4) приводит к следующему результату:

$$\overline{\vartheta}_r = \frac{A_0}{R_k^2 H_0} \int_{r_0}^{R_k} K_1(\lambda r) r dr \int_0^{H_0} \cos(\lambda z) dz, \quad (8)$$

где K_1 – представляет собой модифицированную функцию Бесселя первого порядка;

$$A_0 = \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0} \right)^2 I_0(\lambda r_0)}{\sin(\lambda H_g) K_0(\lambda r_0)}, \quad (9)$$

K_0 и I_0 – представляют собой модифицированную функция Бесселя нулевого порядка; r_0 – радиус наибольшего витка спирали; H_g – высота от первого витка спирали выходного патрубка камеры смешения; d_0 – диаметр спиральной трубки; D_0 – диаметр выходного патрубка.

Вычисление интегралов в формуле (8) для введенного обозначения $\lambda = \frac{\pi}{2H_0}$ позволяет получить следующий результат:

$$\overline{\vartheta}_r = \frac{16 \cdot A_0 \cdot Y_1 \left(\frac{R_k}{H_0}, \frac{r_0}{H_0} \right) H_0^2}{\pi^2 R_k^2}, \quad (10)$$

где введено следующее обозначение:

$$Y_1 \left(\frac{R_k}{H_0}, \frac{r_0}{H_0} \right) = \int_{\frac{\pi r_0}{2H_0}}^{\frac{\pi R_k}{2H_0}} K_1(x) \cdot x \cdot dx.$$

где x – переменная.

Соотношение (5) позволяет записать следующие выражения:

$$\overline{\vartheta}_z = \frac{2A_0\pi}{V} \int_{r_0}^{R_k} K_0(\lambda r) r dr \int_0^{H_0} \sin(\lambda z) dz \quad (11)$$

Учитывая, что

$$\int_0^{H_0} \sin(\lambda z) dz = \frac{1}{\lambda} \int_0^{H_0} \sin(\lambda z) d(\lambda z) = \frac{2H_0}{\pi}, \quad (12)$$

и согласно справочным данным:

$$\int_{r_0}^{R_k} K_0(\lambda r) r dr = \frac{1}{\lambda} \left[r_0 K_1(\lambda r_0) - R_k K_1(\lambda R_k) \right]. \quad (13)$$

Соотношение (11) с учетом (7), (13) можно привести к следующему виду:

$$\overline{\vartheta}_z = \frac{8 \cdot H_0 \cdot A_0}{\pi^2 R_k^2} \left[r_0 K_1 \left(\frac{\pi r_0}{2 \cdot H_0} \right) - R_k K_1 \left(\frac{\pi R_k}{2 \cdot H_0} \right) \right]. \quad (14)$$

Уравнение (2) с учетом (3) и (4) примет вид:

$$\overline{\vartheta}_z H_0 \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{\vartheta}_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\overline{\vartheta}_r R_k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0. \quad (15)$$

В уравнении (15) перейдем к безразмерным переменным ξ_1 и ξ_2 согласно соотношениям:

$$z = \xi_1 H_0, \quad (16)$$

$$r = \xi_2 R_k. \quad (17)$$

В безразмерных переменных уравнение (15) можно представить в следующем виде:

$$\gamma^2 \left[\frac{\partial^2 c}{\partial \xi_1^2} - \frac{\partial c}{\partial \xi_1} \right] + \frac{1}{\xi_2} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\xi_2 \frac{\partial c}{\partial \xi_2} \right) = 0, \quad (18)$$

где введено следующее обозначение:

$$\gamma^2 = \frac{\vartheta_z R_k}{\vartheta_r H_0}. \quad (19)$$

С учетом (10) и (14) формула (19) принимает следующий вид:

$$\gamma^2 = \frac{r_0 K_1 \left(\frac{\pi r_0}{2 \cdot H_0} \right) - R_k K_1 \left(\frac{\pi R_k}{2 \cdot H_0} \right)}{2 \cdot \pi \cdot H_0 \cdot Y_1 \left(\frac{R_k}{H_0}, \frac{r_0}{H_0} \right)}. \quad (20)$$

Решение уравнения (18) ищем в виде:

$$c = c_1(\xi_1) \cdot c_2(\xi_2). \quad (21)$$

Подстановка (22) в (19) дает:

$$\gamma^2 c_2(\xi_2) \left[\frac{d^2 c_1}{d \xi_1^2} - \frac{dc_1}{d \xi_1} \right] + \frac{c_1(\xi_1)}{\xi_2} \frac{d}{d \xi_2} \left(\xi_2 \frac{dc_2}{d \xi_2} \right) = 0. \quad (22)$$

На основании (22) можно получить следующее соотношение:

$$\frac{\gamma^2}{c_1(\xi)} \left[\frac{d^2 c_1}{d \xi_1^2} - \frac{dc_1}{d \xi_1} \right] = - \frac{1}{c_2(\xi_2) \xi_2} \frac{d}{d \xi_2} \left(\xi_2 \frac{dc_2}{d \xi_2} \right). \quad (23)$$

Левая часть соотношения (23) зависит только от переменных ξ_1 , а правая от ξ_2 поэтому выполнение равенства в (23) возможно только в том случае, если каждая из частей является постоянной величиной равной $\beta^2 > 0$.

Согласно сказанному соотношению (23), будет эквивалентно следующим двум дифференциальным уравнениям:

$$\gamma^2 \left[\frac{d^2 c_1}{d \xi_1^2} - \frac{dc_1}{d \xi_1} \right] = \beta^2 c_1, \quad (24)$$

$$\frac{d^2 c_2}{d \xi_2^2} + \frac{1}{\xi_2} \frac{dc_2}{d \xi_2} + \beta^2 c_2 = 0. \quad (25)$$

Решение уравнения (25), ограниченное при $\xi_2 \rightarrow 0$ согласно справочным данным, имеет вид:

$$c_2(\xi) = \text{const } \mathcal{J}_0(\beta \xi_2), \quad (26)$$

где $\mathcal{J}_0(\beta \xi_2)$ – является функцией Бесселя первого рода нулевого порядка.

Функциональная зависимость (26) при переходе согласно (17) к размерным величинам примет вид:

$$c_2(r) = \text{const } \mathcal{J}_0 \left(\beta \frac{r}{R_k} \right). \quad (27)$$

Решение (27) должно удовлетворить граничному условию:

$$\text{при } r = R_k, \quad c_2(R_k) = 0. \quad (28)$$

Применение (29) к (28) позволяет получить:

$$\text{const } \mathcal{J}_0(\beta) = 0. \quad (29)$$

График функциональной зависимости $\mathcal{J}_0(\beta)$ представлен на рисунке 2. На основании данной зависимости обращение (29) в первый ноль происходит при значении $\beta = \beta_1 = 2, 4, \dots$

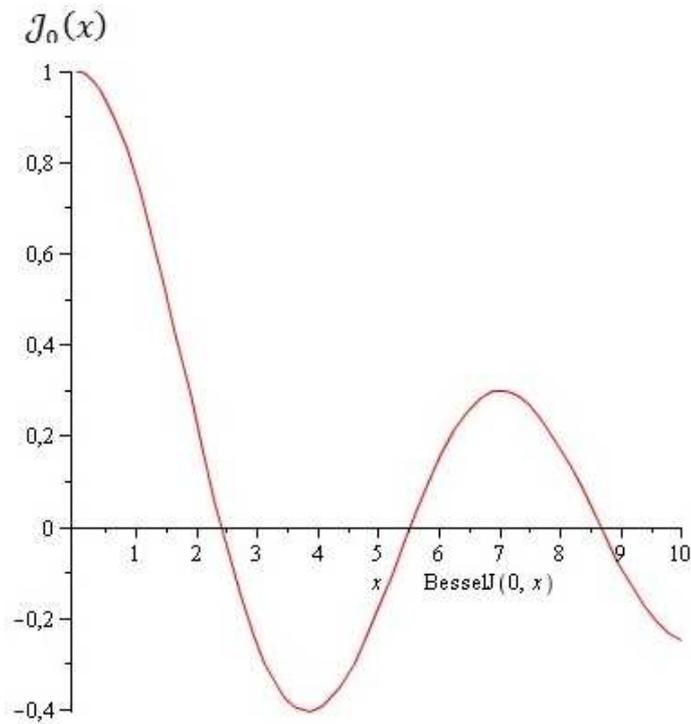


Рис. 2. График функций $J_0(x)$

На основании полученных данных решение (27), удовлетворяющее (28), можно записать в следующем виде:

$$c_2(r) = \text{const} J_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right). \quad (30)$$

Уравнение (25) представим в виде:

$$\frac{d^2 c_1}{d\xi_1^2} - \frac{dc_1}{d\xi_1} - \frac{\beta_1^2}{\gamma^2} c_1 = 0. \quad (31)$$

Для нахождения решения дифференциального уравнения (31) необходимо записать характеристическое уравнение:

$$k^2 - k - \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right) = 0. \quad (32)$$

где k – комплексный корень уравнения.

Квадратное уравнение (32) имеет два корня:

$$k_1 = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right)^2}, \quad (33)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right)^2}. \quad (34)$$

Поскольку нас интересует убывающее решение функции $c_1(\xi_1)$, которое соответствует отрицательному значению корня характеристического уравнения $k_1 < 0$. На основании сказанного решение уравнения (32) можно представить в виде:

$$c_1(\xi_1) = \text{const} \cdot e^{k_1 \xi_1}.$$

где $e^{k_1 \xi_1}$ – единичная орта.

Переходя к размерным переменным согласно (16), имеем:

$$c_1(z) = \text{const} e^{\frac{k_1 z}{H_0}}. \quad (35)$$

Подстановка (31) и (37) приводит к результату:

$$c(r, z) = \text{const} \cdot e^{\frac{k_1 z}{H_0}} \mathcal{J}_0 \left(\beta_1 \frac{r}{R_k} \right). \quad (36)$$

Для определения значения const в (36) необходимо воспользоваться следующим граничным условием:

$$c(r=0, z=0) = c_0, \quad (37)$$

где c_0 – начальное значение концентрации выделенной компоненты сухой смеси сыпучего материала.

Применение (37) к (36) дает:

$$c_0 = \text{const}. \quad (38)$$

На основании (40) находим:

$$\text{const} = c_0. \quad (39)$$

С учетом (39) формула (36) примет вид:

$$c(r, z) = c_0 \mathcal{J}_0 \left(\beta_1 \frac{r}{R_k} \right) e^{\frac{k_1 z}{H_0}}. \quad (40)$$

Таким образом, полученное соотношение (40) определяет изменение концентрации выделенной компоненты смеси сыпучего материала в цилиндрическом объеме камеры смешения (рис. 3).

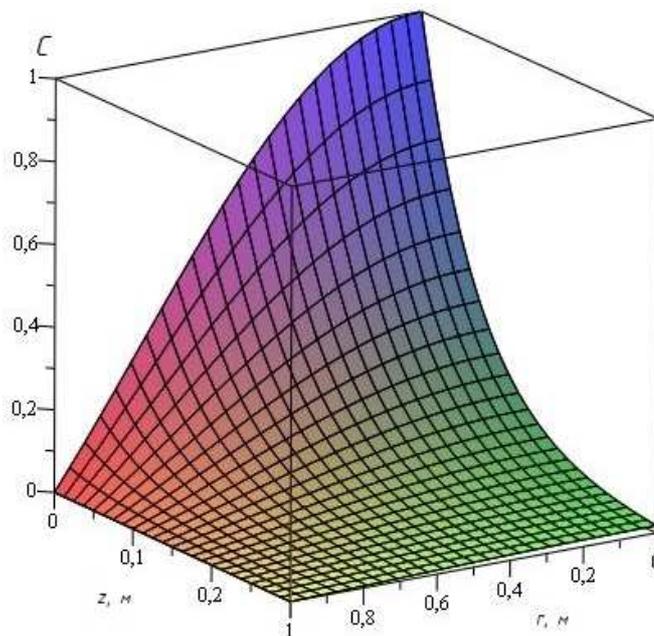


Рис. 3. График изменения концентрации

Выводы. Изменение концентрации имеет нелинейный характер и зависит от параметров камеры смешения высоты и радиуса (3). Увеличение радиуса камеры смешения от $r=0$ м до $r=0,3$ м не имеет значительного влияние на концентрацию смеси, рассматривая изменение параметра высоты камеры от $z=1$ м до $z=0$ м на графике видно значительное криволинейное изменение концентрации до 1.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы

1. Богданов, В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Основные процессы в производстве строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 551 с.
2. Шеметова О. М., Фадин Ю.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №12. – С. 145-150.
3. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. – М.: Изд. центр "Академия", 2010. – 272 с.
4. Несмеянов Н.П., П.С. Горшков. Смесители для производства ССС // Межвузовский сборник статей. Энергосберегающие строительные комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: БГТУ, 2009. – С. 176-180.
5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Shemetov E.G. Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. 2021, pp. 333-339.
6. Патент №204403 РФ. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой/ Фадин Ю.М., Воронов В.П., Шеметова О.М., Шеметов Е.Г., Лазько Е.В. – Заявка №2020136892 от 10.11.2020; опубл. 10.11.2020, Бюл. №15.
7. Шеметова О.М., Фадин Ю.М., Богданов В.С. Получение однородных мелкодисперсных смесей в пневмосмесителе // СТИН. – 2022. – №3. – С. 22-24.
8. Богданов В.С., Бражник Ю.В., Несмеянов Н.П., Горшков П.С. Пути увеличения степени однородности сухих строительных смесей с целью формирования максимального их качества // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – №4. – С. 62-64.
9. Демин О. В. Экспериментальное исследование процесса смешения сыпучих материалов в смесителях // VI научная конференция. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2001. – С. 204.
10. Чемеричко Г.И., Анциферов С.И., Пахотин Е.Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // Образование, наука, производство. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 1585-1588.
11. Томченко К.А. Дозирование в технологии производства сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. – 2009. – №5-6. – С. 48-51.
12. Chatterjee S. Regression Analysis by Example (5th Edition). 2013. 424 p.

References

1. Bogdanov V.S., Ilyin A.S., Semikopenko I.A. The main processes in production of building materials. – Belgorod: Publ. house of BSTU, 2008. – 551 p.
2. Shemetova O.M., Fadin Yu.M. Dry building mixes and mixing equipment for their production // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2020, no. 12, pp. 145-150.
3. Kondakov A.I. CAD of technological processes. – M.: Publ. centre "Academy", 2010. – 272 p.
4. Nesmeyanov N.P., P.S. Gorshkov. Mixers for the production of dry mortar // Interuniversity collection of articles. Energy-saving building complexes and equipment for the production of building materials. – Belgorod: BSTU, 2009. – P. 176-180.
5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Shemetov E.G. Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. 2021. P. 333-339.
6. Patent No. 204403 RU. Pneumatic mixer for bulk materials with a spiral energy-carrying tube / Fadin Yu.M., Voronov V.P., Shemetova O.M., Shemetov E.G., Lazko E.V. – Application No. 2020136892 from 10.11.2020; publ. 10.11.2020, Bull. No. 15.
7. Shemetova O.M., Fadin Yu.M., Bogdanov V.S. Obtaining homogeneous fine mixtures in a pneumatic mixer // STIN. 2022, no. 3, pp. 22-24.
8. Bogdanov V.S., Brazhnik Yu.V., Nesmeyanov N.P., Gorshkov P.S. Ways to increase the degree of homogeneity of dry building mixtures in order to form their maximum quality // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2013, no. 4, pp. 62-64.
9. Demin O. V. Experimental study of the process of mixing bulk materials in mixers // VI scientific conference. – Tambov: Publ. house Tambov state technical university, 2001. – P. 204.
10. Chemerichko G.I., Antsiferov S.I., Pakhotin E.G. Analysis of the modern market for equipment for the production of dry building mixes // Education, science, production. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2015. – P. 1585-1588.
11. Tomchenko K.A. Dosing in the production technology of dry building mixtures // Dry building mixtures. 2009, no. 5-6, pp. 48-51.
12. Chatterjee S. Regression Analysis by Example (5th Edition). 2013. 424 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Шеметова Ольга Михайловна – аспирантка
olga95kizilova@gmail.com

Shemetova Olga Mikhailovna – postgraduate student

Получена 18.11.2022