

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННЫХ ГРОХОТАХ

Ю. Т. Селиванов¹, П. В. Монастырев²

*Кафедры: «Техническая механика и детали машин» (1); soprm@nnn.tstu.ru;
«Городское строительство и автомобильные дороги» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: барабан; классификация; моделирование; сыпучий материал.

Аннотация: Дано описание процесса смешивания, происходящего одновременно с процессом классификации, которую используют как механизм процесса, определяющий последовательность фаз для трехкомпонентной смеси. При рассмотрении механизма отделения из состава смеси мелкой и товарной фракций используют постоянные коэффициенты, определяющие интенсивность отделения частиц от смеси. В математическом описании процесса просматривается как механизм сегрегации компонентов, так и механизм разделения смеси на отдельные фракции. Представлены варианты практического использования математического описания при проектировании нового и оптимизации работы действующего оборудования.

Классификацию или разделение сыпучих материалов широко применяют в различных областях промышленности, в частности, при производстве минеральных удобрений. При этом наиболее часто используют два варианта аппаратного оформления процесса: грохочение от мелкого материала к крупному и от крупного к мелкому [1].

В промышленности грохочением осуществляется разделение материала на две или три фракции: мелкую, товарную и крупную. В зависимости от варианта аппаратного оформления процесса происходит либо одновременное отделение мелкой и товарной фракций, либо последовательное отделение вначале мелкой, затем товарной фракции.

В барабанном классификаторе одновременно осуществляют два разнонаправленных процесса: смешивание частиц разного размера и их разделение на отдельные фракции. Процесс смешивания в циркуляционных смесителях периодического действия достаточно хорошо описывают вероятностные модели на базе марковских цепей [2 – 6]. Они разработаны для случая приготовления двухкомпонентных смесей, а их результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [2]. Данным фактом обусловлен выбор подходов, которые будут использованы для описания процесса разделения смесей, включающих в себя три фракции, хотя имеются некоторые серьезные отличия, связанные с усложнением механизма сегрегации компонентов. Наиболее перспективными моделями процессов, реализуемых в барабанных грохотах, на наш взгляд, являются детерминированно-стохастические математические модели [7].

Исследования характера движения компонентов в циркуляционных классификаторах непрерывного действия показывают, что при разбиении конструкции на участки небольшой длины можно считать каждый такой участок классификатором периодического действия со временем грохочения, соответствующим времени пребывания материала на данном участке. Как следствие, рассмотрение вопроса, связанного с моделированием процесса в поперечном сечении классификатора, приобретает большое прикладное значение и для случая исследования грохотов непрерывного действия.

Для количественной характеристики склонности двухкомпонентной смеси к сегрегации используют коэффициент P_0 , который определяют при идентификации параметров математической модели [2]. Численно он равен вероятности перехода частиц ключевого компонента в элементарный объем, находящийся ближе к центру циркуляции (при нулевой концентрации в нем этого компонента), при смешивании двух компонентов, склонных к сегрегации. Вероятность P_0 – комплексная характеристика, которая определяется свойствами частиц компонентов смеси и учитывает их отличие.

Для описания процесса смешивания, происходящего одновременно с процессом разделения, используем механизм процесса смешивания [8], определяющий последовательность фаз для трехкомпонентной смеси, состоящей из основного материала, а также мелкой и товарной фракций.

Пусть коэффициенты вероятности перехода из периферийных подслоев в область центра циркуляции компонентов 1, 2, 3 располагаются согласно неравенству $P_{013} > P_{023} > P_{012}$, где цифрой 3 обозначен основной компонент, цифрами 1 и 2 компоненты мелкой и товарной фракций соответственно. Частица компонента, участвующая в процессе обмена между различными соприкасающимися подслоями, на данной фазе: 1) переходит в соседний объем вышележащего подслоя; 2) переходит в соседний объем нижележащего подслоя; 3) остается в данном подслое. Исключение составляют первый и последний подслои, для которых возможны только два варианта: для первого подслоя варианты 1 и 3; для второго – 2 и 3.

На первой фазе перехода рассматривается переход компонента 1 в подслои, лежащий ближе к центру циркуляции, с последующим вытеснением из него компонента 3. Вероятность перехода компонента 1 из подслоя i в подслои $(i+1)$ на данной фазе перехода в момент времени $T = m \Delta T$ равна $P_{13}^{(i,i+1,m)}$

$$P_{13}^{(i,i+1,m)} = P_{013} \left(1 - \left(C_1^{(i+1,m-1)} + C_2^{(i+1,m-1)} \right) \right), \quad (1)$$

где P_{013} – коэффициент вероятности перехода компонента 1 в подслои, содержащий компонент 3; $C_1^{(i+1,m-1)}$, $C_2^{(i+1,m-1)}$ – концентрации компонентов 1, 2 соответственно в подслое $(i+1)$ в момент времени $T = (m-1) \Delta T$, $m = 1, 2, \dots, k$.

Вероятность перехода компонента 1 из подслоя i в подслои $(i+1)$ зависит от вероятности P_{013} – величины постоянной для конкретной смеси, определяемой свойствами компонентов 1, 3, и концентрации участвующего в смешивании компонента 3 в подслое $(i+1)$. Тогда концентрация компонента 1 в подслое i , после первой фазы перехода, будет определяться зависимостью

$$C_1^{(i,m)} = \frac{C_1^{(i,m-1)} V^{(i)} - C_1^{(i,m-1)} P_{13}^{(i,i+1,m)} V^{(N)} + C_1^{(i-1,m-1)} P_{13}^{(i-1,i,m)} V^{(N)}}{V^{(i)}}, \quad (2)$$

где $V^{(i)}$ – объем подслоя i ; величина $C_1^{(i,m-1)}V^{(i)}$ отражает объем компонента 1, содержащегося в подслое i перед этой фазой перехода, а величина $C_1^{(i-1,m-1)}P_{13}^{(i-1,i,m)}V^{(N)}$ отражает объем компонента 1, перешедшего в подслою i на этой фазе перехода из подслоя $(i-1)$, который непосредственно контактирует с подслоем i и располагается ближе к обечайке барабана. Объем компонента 1 не участвует в обмене с подслоем $(i+1)$, поскольку на одной фазе перехода компонент может перейти лишь из одного подслоя в другой, но он уже участвовал в данной фазе перехода, переместившись из подслоя $(i-1)$ в подслою i ; величина $C_1^{(i,m-1)}P_{13}^{(i,i+1,m)}V^{(N)}$ характеризует количество компонента 1, перешедшего из подслоя с номером i в подслою $(i+1)$ на данной фазе перехода.

Расчет по представленным зависимостям следует начинать с определения вероятности перехода и концентрации компонента, участвующего на данной фазе перехода, в первом подслое. На первой фазе вероятность перехода компонента 1 из первого подслоя во второй можно определить по зависимости (1), но при $i=1$. В данном случае концентрацию компонента 1 после этой фазы перехода в первом подслое можно определить как

$$C_1^{(1,m)} = \left(C_1^{(1,m-1)}V^{(1)} - C_1^{(1,m-1)}P_{13}^{(1,2,m)}V^{(N)} \right) / V^{(1)}. \quad (3)$$

Более удаленный от центра циркуляции подслою отсутствует и, следовательно, из него на данной фазе перехода компонент 1 не переносится.

После подсчета концентрации компонента 1 в первом подслое, можно использовать зависимость (3) для всех подслоев, кроме последнего, т.к. для каждого последующего подслоя известна величина $C_1^{(i-1,m-1)}P_{13}^{(i-1,i,m)}V^{(N)}$. Например, при расчете концентрации во втором подслое, данная величина будет равняться объему компонента 1, перешедшего из первого подслоя во второй на этой фазе перехода, то есть $C_1^{(1,m-1)}P_{13}^{(1,2,m)}V^{(N)}$.

При расчете концентрации компонента 1 в последнем подслое можно использовать выражение

$$C_1^{(N,m)} = C_1^{(N,m-1)} + P_{13}^{(N-1,N,m)}C_1^{(N-1,m-1)}. \quad (4)$$

Согласно данному выражению, концентрация компонента 1 на этой фазе перехода в подслое N растет. Если концентрация компонента 3 в подслое N близка к нулю, вероятность $P_{13}^{(N-1,N,m)} \rightarrow 0$, поскольку отсутствует компонент для замещения. На данной фазе перехода компонент 1 прекращает свое проникновение в подслою N . Следовательно, начинается более сильное вытеснение компонента 3 из подслоя $(N-1)$ с последующим замещением его компонентом 1.

Ясно просматривается механизм сегрегации с последующим накоплением компонентов, более склонных к сегрегации, вокруг центра циркуляции. В математическом описании процесса грохочения в барабане самоизмельчение и агломерацию частиц можно не учитывать, так как при переработке, например, минеральных удобрений процент самоизмельчения не превышает 2–3 %. Также зафиксировано образование лишь единичных агломератов [9].

Рассмотрим вариант осуществления процесса грохочения от крупного к мелкому, когда одновременно происходит отделение частиц мелкой и товарной фракций [1].

При рассмотрении механизма отделения из состава смеси товарной фракции вероятность отделения этих частиц из смеси

$$P_{\text{от } 2}^{(i,m)} = ER_2 \left(R^{(i,m)} - R_C^{(m)} \right) / \left(R_6 - R_C^{(m)} \right), \quad (5)$$

где $P_{\text{от } 2}^{(i,m)}$ – вероятность отделения частиц товарной фракции из i -го подслоя в момент времени $T = (m-1)\Delta T$, $m = 1, 2, \dots, k$; ER_2 – постоянный коэффициент, численное значение которого определяется при идентификации параметров математической модели, соответствующей реальному процессу; $R^{(i,m)}$ – радиус i -го подслоя барабанного классификатора в момент времени $T = (m-1)\Delta T$, $m = 1, 2, \dots, k$; R_6 – радиус барабана; $R_C^{(m)}$ – радиус центра циркуляции контура, образованного частицами сыпучего материала в поперечном сечении барабанного классификатора в момент времени $T = (m-1)\Delta T$, $m = 1, 2, \dots, k$. В связи с тем, что по мере продвижения к ссыпавшему краю классификатора количество сыпучего материала убывает, радиус центра циркуляции увеличивается. При этом происходит уменьшение числа подслоев циркуляционного контура.

Из анализа зависимости (5) следует, что по мере удаления от обечайки барабана множитель

$$\left(R^{(i,m)} - R_C^{(m)} \right) / \left(R_6 - R_C^{(m)} \right)$$

уменьшается и, как следствие, уменьшается вероятность отделения частиц товарной фракции из смеси.

Одновременно происходит отделение частиц мелкой фракции. Вероятность отделения частиц мелкой фракции из смеси

$$P_{\text{от } 1}^{(i,m)} = ER_1 \left(R^{(i,m)} - R_C^{(m)} \right) / \left(R_6 - R_C^{(m)} \right), \quad (6)$$

где ER_1 – постоянный коэффициент, определяющий интенсивность отделения частиц мелкой фракции от смеси.

Количество мелкой и товарной фракций, выведенной из состава смеси на шаге m определяется зависимостями:

$$V_{\text{от } 1}^{(i,m)} = V^{(i)} C_1^{(i,m)} P_{\text{от } 1}^{(i,m)}, \quad (7)$$

$$V_{\text{от } 2}^{(i,m)} = V^{(i)} C_2^{(i,m)} P_{\text{от } 2}^{(i,m)}. \quad (8)$$

Происходит уменьшение объема подслоев в результате отделения мелкой и товарной фракций

$$V^{(i)} = V^{(i)} - \left(V_{\text{от } 1}^{(i,m)} + V_{\text{от } 2}^{(i,m)} \right). \quad (9)$$

Концентрации данных фракций могут быть определены по зависимостям:

$$C_1^{(i,m)} = \left(VK_1^{(i,m)} - V_{\text{от } 1}^{(i,m)} \right) / \left(V^{(i,m)} - V_{\text{от } 1}^{(i,m)} \right); \quad (10)$$

$$C_2^{(i,m)} = \left(VK_2^{(i,m)} - V_{\text{от } 2}^{(i,m)} \right) / \left(V^{(i,m)} - V_{\text{от } 2}^{(i,m)} \right), \quad (11)$$

где $VK_1^{(i,m)}$, $VK_2^{(i,m)}$ – объемы мелкой и товарной фракций в подслое i в момент времени $T = (m-1)\Delta T$, $m = 1, 2, \dots, k$.

При математическом представлении процесса грохочения от мелкого материала к крупному может быть использован подобный механизм отделения из состава смеси мелкой и товарной фракций. Отличительной особенностью является то, что при разбиении классификатора на две зоны в первой отделяется мелкая

фракция, во второй – товарная. Как следствие, вначале рассчитывается вероятность отделения частиц по зависимости (6), количество мелкой фракции по формуле (7), ее концентрация по выражению (10). Затем, на втором участке для определения сходных характеристик товарной фракции используют зависимости (5), (8) и (11).

Таким образом, в представленном математическом описании процесса ясно просматривается как механизм сегрегации компонентов, так и механизм разделения смеси на отдельные фракции. Изложенные модельные представления можно использовать для описания процесса и в барабанных виброгрохотах [10], где вибрация является фактором, интенсифицирующим процесс разделения смеси на фракции, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициентов ER_1 и ER_2 .

Необходимо отметить, что эффективность процесса грохочения существенно зависит от концентрации частиц мелкой и товарной фракций в составе смеси [9]. По результатам численных экспериментов с использованием представленного модельного описания можно сделать рекомендации по выбору способа грохочения: от мелкого к крупному или от крупного к мелкому.

В представленной работе приводится обоснование того, что классификация включает в себя одновременное осуществление двух разнонаправленных процессов: смешивания и разделения частиц смеси на отдельные фракции в результате их отсеивания через перфорацию барабана. При этом в результате смешивания происходит сегрегация частиц мелкой и товарной фракций. Указанные частицы смещаются в область центра циркуляции, и происходит обеднение наружных подслоев циркуляционного контура данными компонентами.

Процесс разделения частиц происходит в основном в области контакта наружных подслоев с обечайкой барабана и их обеднение частицами мелкой и товарной фракций приводит к снижению эффективности работы классификатора. В непрерывном режиме интенсивность процесса разделения уменьшается при продвижении от загрузочного края барабана к разгрузочному при одновременном росте концентрации мелкой и товарной фракций в области центра циркуляции.

Практическое использование представленного математического описания может заключаться в следующем:

– во-первых, при проектировании нового оборудования по результатам численных экспериментов, проведенных с использованием предложенных модельных представлений, могут быть рассчитаны рациональные режимные и геометрические параметры процесса. Основанием служат результаты анализа эффективности разделения смеси на отдельные фракции по длине классификатора. При использовании действующего оборудования по результатам модельных расчетов также можно повысить эффективность его работы, например, в результате целенаправленной коррекции степени заполнения смесью или изменения режимных параметров.

– во-вторых, внутри барабана могут быть установлены радиальные лопасти, которые периодически разрушают ядро сегрегации и перемещают мелкие частицы из центра циркуляции к просеивающей поверхности [10]. В результате разрушения ядра сегрегации повышается интенсивность грохочения. Результаты численных экспериментов могут позволить определить поперечное сечение классификатора, в котором эффективность отделения частиц мелкой и товарной фракций от смеси уменьшается в результате усиления негативного влияния сегрегации. Именно в данном, заранее рассчитанном, сечении классификатора должна быть установлена радиальная лопасть.

Список литературы

1. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю. И. Гусев [и др.]; под ред. Э. Э. Кольмана-Иванова. – М. : Машиностроение, 1985. – 406 с.

2. Селиванов, Ю. Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин. – М. : Машиностроение-1. – 2004. – 119 с.
3. Modeling of Particle Mixing and Segregation Processes / J. Gyenis [et al.] // Proc. of the 3rd World Congress on Particle Technology : Brighton, UK, July 7–9, 1998 / Institution of Chemical Engineers. – London, 1998. – P. 172.
4. Mihalko, Cs. A Double Stochastic Model of Mixing of Solids Particles / Cs. Mihalko, E. O. Mihalyko // Proc. of the 3rd Israel Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids : Dead Sea, Israel, May 29-June 1, 2000. – Dead Sea, Israel, 2000. – Vol. 2. – P. 8.34 – 8.39.
5. Мошанский, А. И. Некоторые вопросы теории ячеечных моделей / А. И. Мошанский // Теорет. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 6. – С. 743 – 754.
6. Першин, В. Ф. Модель процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана / В. Ф. Першин // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 3. – С. 370 – 377.
7. Першин, В. Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования / В. Ф. Першин. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1990. – 167 с.
8. Modeling of Mixing and Segregation of Particulate Solids in a Rotation Drum / V. N. Artemov [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – Т. 4, № 2-3. – С. 230 – 237.
9. Першин, В. Ф. Моделирование процесса классификации в барабанном грохоте / В. Ф. Першин // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 4. – С. 499 – 505.
10. Пат. 2353438 Российская Федерация, МПК В07В 1/18. Барабанный вибрационный грохот / Маслов С. В., Першин В. Ф., Селиванов Ю. Т., Ткачев А. Г. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2007120803/03 ; заявл. 04.06.2007 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 12. – 9 с.

Mathematical Description of the Process of Bulk Materials Classification in Drum Qualifiers

Yu. T. Selivanov¹, P. V. Monastyr²

*Departments “Technical Mechanics and Car Parts” (1); soprm@nnn.tstu.ru;
“Town Planning and Roads” (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: drum; bulk; classification; modeling.

Abstract: Deterministic-stochastic models can be used to describe the process of classification. In this regard, the process of mixing-separating can be considered similar to the periodic process, but transition to a next section along the length of the classifier must consider the change in configuration of the circulation circuit associated with a decrease in the area occupied by the material in cross-section of the drum. To describe the process of mixing, which occurs along with the process of classification, it is possible to use the process mechanism, defining the sequence of phases for a three-component mix. When describing the process of separation of fine and market-grade particles from the mix composition, one can use constant coefficients defining the intensity of separation of these particles from the mix. The proposed mathematical description of the process provides a mechanism of components segregation and a mechanism of mix separation into individual particles. The options of practical use of the mathematical description for the design of new and modernization of the existing equipment are given.

References

1. Gusev Yu.I., Karasyov I.N., Kolman-Ivanov E.E., Makarov Yu.I., Makevnin M.P., Rasskazov N.I. *Konstruirovaniye i raschet khimicheskikh proizvodstv* [Designing and calculation of chemical productions], Moscow: Mashinostroenie, 1985, 406 p. (In Russ.)
2. Selivanov U.T., Pershin V.F. *Raschet i proektirovaniye tsirkulyatsionnykh smesitelei sypuchikh materialov bez vnutrennikh peremeshivayushchikh ustroystv* [Calculation and design of circulating mixers bulks without the internal mixing devices], Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 119 p. (In Russ.)
3. Gyenis J., Ulbert Zs., Szepvolgyi J., Diaz E. Modeling of particle mixing and segregation processes, *Proc. of the 3rd World Congress on Particle Technology*, Brighton, UK, July 7-9, 1998, p. 172.
4. Mihalko Cs., Mihalyko E.O. A Double Stochastic Model of Mixing of Solids Particles, *Proc. 3rd Israel Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids*, Dead Sea, Israel, May 29 - June 1, 2000, vol. 2, pp. 8.34-8.39.
5. Moshansky A.I. [Some questions of the theory cell-like models], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1990, vol. 24, no. 6, pp. 743-754. (In Russ.)
6. Pershin V.F. [Model of process of mixture bulk in the cross section of smooth rotating drum], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1989, vol. 23, no. 3, pp. 370-377. (In Russ.)
7. Pershin V.F. *Mashiny barabannogo tipa: osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya* [Cars of drum type: bases of the theory, calculation and designing], Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1990, 167 p. (Rus)
8. Artemov V.N., Baryshnikova S.V., Pershin V.F., Selivanov Yu.T., Tkachev A.G. Modeling of mixing and segregation particulate solids in a rotation drum, *Transaction of the Tambov State Technical University*, 1998, vol. 4, no. 2-3, pp. 230-237.
9. Pershin V.F. [Modeling of process classification in a drum qualifier], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1989, vol. 23, no. 4, pp. 499-505. (In Russ.)
10. Maslov S.V., Pershin V.F., Selivanov U.T., Tkachyov A.G., Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, *Barabannyi vibratsionnyi grokhot* [Drum-type vibrating screen], Russian Federation, 2009, pat. 2353438. (In Russ., abstract in Eng.)

Mathematische Beschreibung des Prozesses der Klassifikation der Schüttstoffe in den Trommelgepoltern

Zusammenfassung: Für die Beschreibung des Prozesses der Klassifikation können die determinierten stochastischen Modelle verwendet sein. In diesem Zusammenhang kann man den Prozess der Vermischung-Verteilung ähnlich dem periodischen Prozess halten, aber der Übergang auf jeden folgenden Sektor nach der Länge des Klassierers soll die Veränderung der Konfiguration der Umlaufkontur, die mit der Verkleinerung der vom Material im querlaufenden Schnitt der Trommel besetzten Fläche verbunden ist, berücksichtigen. Für die Beschreibung des Prozesses der Vermischung, der gleichzeitig mit dem Prozess der Klassifikation geschieht, kann man den Mechanismus des die Reihenfolge der Phasen für die Dreikomponentenmischung bestimmenden Prozesses benutzen. Bei der Beschreibung des Mechanismus der Abteilung aus der Zusammensetzung der Mischung der Klein- und Warenfraktionen werden die ständigen Koeffizienten, die die Intensität der Abteilung dieser Teilchen von der Mischung bestimmen, verwendet. In der dargelegten

mathematischen Beschreibung des Prozesses wird es sowohl den Mechanismus der Segregation der Komponenten, als auch den Mechanismus der Teilung der Mischung auf die abgesonderten Fraktionen durchgesehen. Zum Schluss sind die Varianten der praktischen Nutzung der mathematischen Beschreibung bei der Projektierung der neuen Einrichtung und der Optimierung der Arbeit der Funktionseinrichtung dargelegt.

Description mathématique du processus de la classification des matériaux en vrac dans les appareils à crible de tambour

Résumé: Pour décrire le processus de la classification peuvent être utilisés les modèles déterminés stochastiques. À cet égard le processus mélange - séparation peut être considéré comme périodique mais le passage sur chaque section de la longueur du classificateur doit tenir compte de la modification de la configuration du circuit de circulation liée avec la réduction de l'espace occupé par le matériau dans une section transversale du tambour. Pour décrire le processus du mélange qui se passe simultanément avec le processus de la classification, on peut utiliser le mécanisme du processus qui définit la séquence des phases du mélange de trois composants. Lors de la description du mécanisme de la séparation de la composition du mélange de petites fractions on utilise les coefficients permanents qui déterminent l'intensité de la séparation des particules du mélange. En conclusion, sont présentées des variantes pour l'utilisation pratique de la description mathématique lors de la conception du nouvel équipement et l'optimisation de celui qui fonctionne.

Авторы: *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин»; *Монастырев Павел Владиславович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», директор института архитектуры, строительства и транспорта, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
