

**ПРИГОТОВЛЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ,  
СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ**

**С. В. Першина<sup>1</sup>, В. М. Нечаев<sup>2</sup>, А. А. Осипов<sup>3</sup>, В. Ф. Першин<sup>1</sup>**

*Кафедры: «Техническая механика и детали машин»;  
pershin.home@mail.ru (1);*

*«Технологические процессы, аппараты  
и техносферная безопасность» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
НОЦ ТамбГТУ – ИПХФ РАН в области нанотехнологий  
и новых материалов (3)*

**Ключевые слова:** дозирование; коэффициент неоднородности; многокомпонентная смесь; смешивание; точность дозирования; углеродные наноматериалы.

**Аннотация:** Приведены результаты приготовления многокомпонентной смеси, содержащей углеродные наноматериалы, и анализ особенностей двухстадийной технологии дозирования сыпучих материалов. По каждому компоненту отдельные порции сыпучего материала формируются весовым порционным дозатором и преобразуются в непрерывный поток на наклонном вибрирующем лотке. Процесс смешивания реализуется под действием вибрации на транспортере, лента которого разделена на ячейки. Мгновенная производительность по каждому компоненту изменяется по синусоидальному закону с периодами, одинаковыми для всех компонентов. Работа дозаторов синхронизирована, поэтому количества смеси в ячейках транспортера разные, но их соотношения постоянны. Экспериментальную проверку предлагаемого способа приготовления многокомпонентных смесей проводили на ленточном транспортере. Погрешность порционного дозирования для песка и цемента не превышала 0,01 %, а для углеродных наноматериалов – 1 %.

---

**Введение**

Последние десятилетия активно проводятся исследования по получению и применению в промышленности углеродных наноматериалов. Тамбовским государственным техническим университетом совместно с ОАО «Завод “Комсомолец” имени Н. С. Артемова» организовано промышленное производство углеродных наноматериалов Таунит, Таунит-М, Таунит-МД [1]. Получены положительные результаты по улучшению эксплуатационных характеристик ряда композиций за счет их модификации углеродными наноматериалами, в том числе повышение прочности бетона [2, 3]. Качество приготовления многокомпонентных смесей из неоднородных ингредиентов, количество которых в их составе может быть

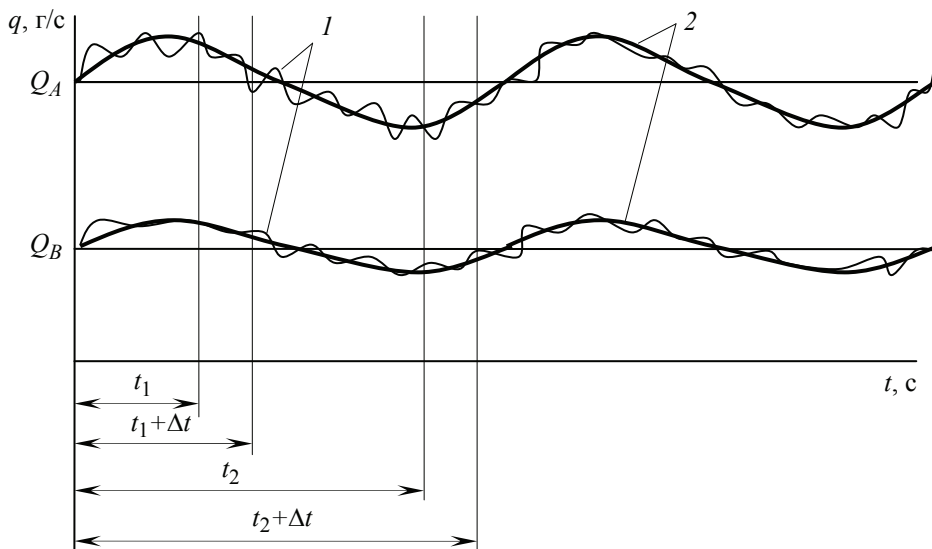
от долей до десятков процентов, во многом определяет стабильность качества готового продукта. Решение проблемы получения высококачественных многокомпонентных смесей особенно актуально для производства смесей, содержащих порошки с наноразмерными частицами, отличающимися по размерам от остальных ингредиентов смеси на несколько порядков, что является причиной интенсивной сегрегации и недопустимого падения качества смеси. Результаты исследований показывают, что точность дозирования компонентов существенно влияет на качество смеси и, в конечном итоге, качество готового продукта [4, 5].

### Экспериментальные исследования процесса

Экспериментально доказано, что повысить точность непрерывного поддержания массовых соотношений смешиваемых компонентов можно, используя двухстадийную технологию дозирования [6], когда отдельные порции сыпучего материала, сформированные весовыми порционными дозаторами, преобразуются в непрерывные потоки и соединяются в заданных соотношениях в ячейках смесителя. Данная технология имеет некоторые особенности. Непрерывный поток на выходе из дозатора имеет синусоидальное изменение мгновенной производительности. На рисунке 1 показаны характерные изменения производительности при двухстадийном дозировании для песка  $Q_A$  и цемента  $Q_B$ , аналогичные изменения мгновенной производительности наблюдаются при дозировании углеродных наноматериалов.

Отклонения производительности от заданных значений, определенные по ГОСТ 8.469–2002, не превышают 0,01 %, то есть практически равны отклонениям при порционном весовом дозировании. Такая высокая точность достигается за счет того, что взвешивание отдельных порций осуществляется в статическом состоянии и отсутствуют динамические воздействия на весоизмерительное устройство.

В работе [4] проанализированы условия, позволяющие повысить точность поддержания массовых соотношений смешиваемых компонентов.



**Рис. 1. Графики определения пропорционального дозирования компонентов:**  
 1 – значения производительностей дозаторов по компонентам  $A$  и  $B$ , с учетом высокочастотных отклонений;  
 2 – усредненные значения производительностей дозаторов по компонентам  $A$  и  $B$

При идеальном дозировании по каждому из компонентов должно выполняться следующее условие, например, для трехкомпонентной смеси:

$$\frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_1(t)dt}{t_1+\Delta t} = \frac{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_1(t)dt}{t_2+\Delta t} = \dots = \frac{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_1(t)dt}{t_k+\Delta t} = \frac{Q_A}{Q_B} = \text{const}; \quad (1)$$

$$\frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_2(t)dt}{t_1+\Delta t} = \frac{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_2(t)dt}{t_2+\Delta t} = \dots = \frac{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_2(t)dt}{t_k+\Delta t} = \frac{Q_A}{Q_C} = \text{const}, \quad (2)$$

где  $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$  – производительности по компонентам;  $Q_A, Q_B, Q_C$  – заданные производительности по компонентам  $A, B$  и  $C$ .

Также обязательным для получения многокомпонентной смеси высокого качества является создание условий, при которых осевые скорости в смесителе для всех компонентов одинаковы. Для приготовления многокомпонентных смесей, склонных к сегрегации, разработана установка непрерывного действия [7], схема которой показана на рис. 2.

Установка содержит порционные дозаторы 1, 2, 3 и цилиндрические лотки 4, 5, 6, совершающие круговые колебания относительно продольных осей [8]. Ленточный транспортер 7 установлен на основании 8. Лента транспортера разделена перегородками 9 на ячейки. Для перемешивания компонентов в ячейках под лентой транспортера установлен вибратор 10, соединенный с генератором 11. Под лентой транспортера установлен датчик фиксации положения 12 перегородок 9, который подает управляющий сигнал на блок управления 13.

Процесс приготовления трехкомпонентной смеси реализуется следующим образом. Отдельные порции компонентов  $A, B$  и  $C$ , сформированные порционными дозаторами 1, 2 и 3 через равные промежутки времени  $\Delta t$  подаются в цилиндрические лотки 4, 5 и 6, в которых за счет круговых колебаний данные порции преобразуются в непрерывные потоки и после падения из лотков, попадают в ячейки транспортера. Ячейки во время прохождения над вибратором 10 совер-

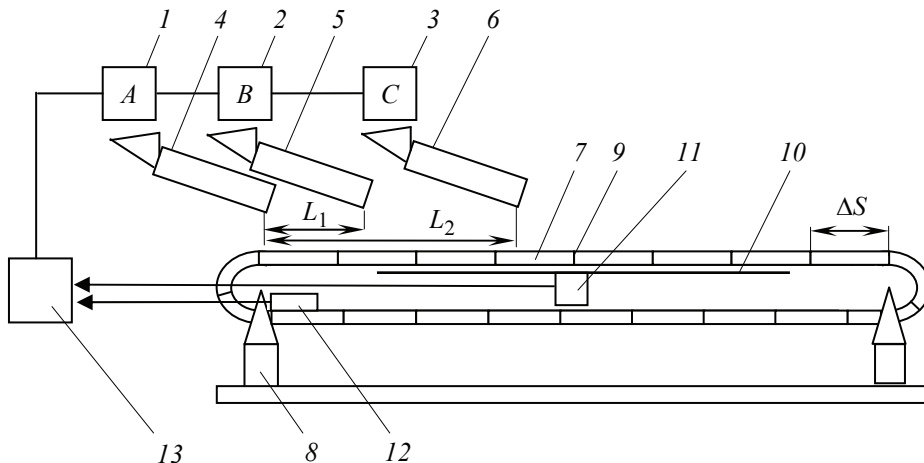


Рис. 2. Схема установки для приготовления трехкомпонентной смеси

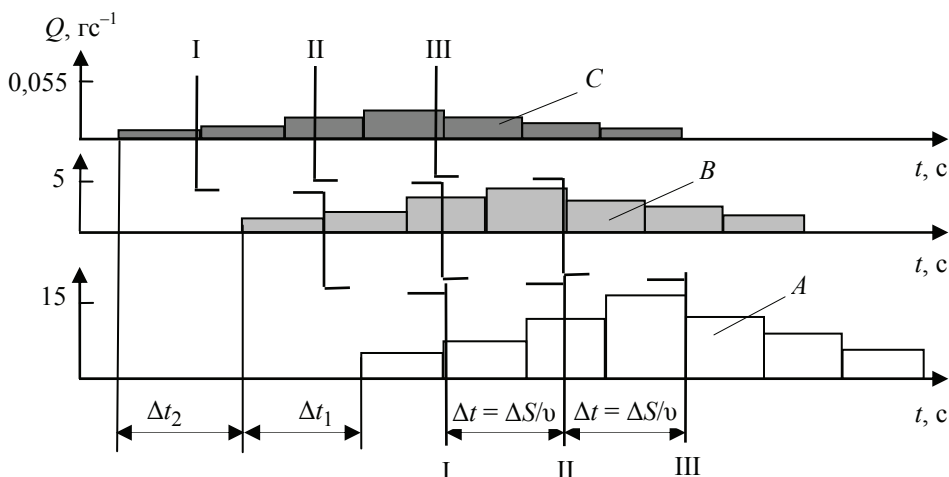
шают вертикальные колебания. Интенсивность процесса смешивания можно регулировать амплитудой и частотой колебаний, которые задаются блоком управления 13, а продолжительность процесса – длиной вибратора 10.

При сегрегации частицы, отличающиеся размерами и/или плотностями, под внешним воздействием целенаправленно перемещаются в определенные области рабочего объема смесителя [9]. Чем меньше время смешивания и объем, в котором частицы могут перемещаться, тем меньше сегрегация. В предлагаемой конструкции смесителя обеспечивается выполнение этих условий. В пределах одной секции возможны различные варианты реализации вибрационного смешения. В секции сначала загружаются крупные или более легкие частицы, а затем мелкие или более тяжелые, то есть загрузка компонентов осуществляется в порядке возрастания склонности к сегрегации. Кроме этого, время смешивания по компонентам регулируется путем изменения расстояний  $L_1$  и  $L_2$  (см. рис. 2). При излишне длительном пребывании в секции, мелкие или тяжелые частицы концентрируются в нижней части секции («тонут»), а крупные или легкие – ближе к открытой поверхности («всплывают»).

Экспериментальную проверку предлагаемого способа приготовления многокомпонентных смесей проводили на ленточном транспортере с длиной ленты 1100 мм и шириной 110 мм. Скорость движения ленты изменялась от 0,1 до 0,3 мс<sup>-1</sup>. Погрешность порционного дозирования для песка и цемента не превышала 0,01 %, а для углеродных наноматериалов – 1 %. Объем смеси в отдельной ячейке изменялся от 80 до 200 см<sup>3</sup>. Из каждой ячейки отбирали от 5 до 10 проб объемом 5...6 см<sup>3</sup> каждая. Использовали как модельные смеси (речной песок двух фракций и порошок меди), так и реальные (песок+цемент+углеродный наноматериал: Таунит; Таунит-М; Таунит-МД). Концентрация по углеродному наноматериалу изменялась от 0,01 до 1 % по массе смеси. Модельные смеси использовали потому, что их разделить на компоненты можно грохочением на ситах, а процентное содержание каждого компонента в пробе рассчитать после взвешивания. Качество реальных смесей определяли по цвету [10].

На рисунке 3 показаны гистограммы изменения мгновенных производительностей по компонентам  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Линиями I–I, II–II, III–III показаны границы двух соседних секций. Как видно из рис. 3 объемы и массы компонентов в первой и второй секциях разные, но соотношения по компонентам  $A$ ,  $B$  и  $C$  сохраняются равными заданным значениям.



**Рис. 3. Гистограммы изменения мгновенных производительностей дозаторов компонентов:**

$A$  – песок;  $B$  – цемент;  $C$  – Таунит

На рисунке 4 показаны характерные кривые изменения коэффициентов неоднородности смеси из компонентов  $A$  и  $B$  (песок и цемент, кривая 1) и композиции  $A$  и  $B$  с компонентом  $C$  (песок/цемент + Таунит, кривая 2).

Очевидно, что минимальный коэффициент неоднородности  $V_{AB}$  при смешивании под действием вибрации для компонентов  $A$  и  $B$  достигается за промежуток времени  $\Delta t_{AB}$ , который больше промежутка времени, за которое достигается минимальное значение  $V_{ABC}$ . Расстояние  $L_2$  определяют из соотношения

$$L_2 = v(\Delta t_{AB} - \Delta t_{ABC}) - L_1,$$

где  $v$  – скорость ленты транспортера,  $\text{мс}^{-1}$ .

Значение  $L_1$  выбирается из конструктивных соображений.

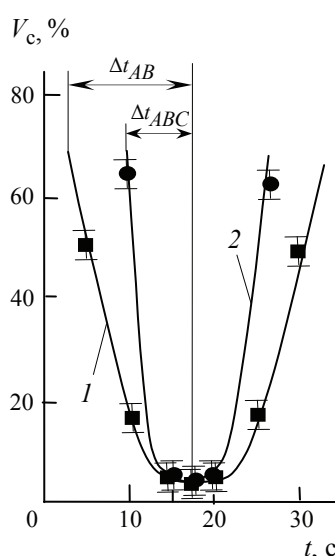
Для сравнения аналогичные смеси готовили с использованием барабанного смесителя периодического действия с регулируемой загрузкой компонентов [11]. Анализ полученных результатов показал, что и при использовании аналога коэффициент неоднородности смеси – 5 %, а при использовании описанного выше способа, коэффициенты неоднородности по компонентам не превышали 2 %.

Таким образом, предлагаемая технология приготовления многокомпонентных смесей с очень малым содержанием одного из компонентов позволяет значительно повысить качество смеси и практически полностью исключить сегрегацию компонентов.

*Статья подготовлена в рамках выполнения работ по договору с Минобрнауки РФ от 14.08.2014 г. № 02.G25.31.0123.*

#### Список литературы

1. Углеродные наноматериалы серии «Таунит»: производство, функционализация, применение / А. Г. Ткачев [и др.] // Нанотехника. – 2014. – № 1(37). – С. 32 – 44.
2. Модификация матрицы строительного композита функционализированными углеродными нанотрубками [Электронный ресурс] / А. И. Кондаков [и др.] // Нанотехнологии в строительстве : науч. интернет-журн. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 31 – 44. – Режим доступа : [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild-4-2014/31-44.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-4-2014/31-44.pdf) (дата обращения: 24.11.2015).
3. Панина, Т. И. Влияние полифункционального наномодификатора на морозостойкость мелкозернистого бетона / Т. И. Панина, А. Г. Ткачев, З. А. Михалева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 349 – 355.
4. Осипов, А. А. Разработка, исследование и расчет вибрационной установки для приготовления многокомпонентных смесей : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Осипов Алексей Александрович. – Тамбов, 2004. – 218 с.



**Рис. 4. Изменения коэффициентов неоднородности смесей  $V_c$ :**  
 1 –  $A+B$ ; 2 –  $A+B+C$ .  
 (экспериментальные данные)

5. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова ; ГОУ ВПО «Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина». – Иваново : [б. и.], 2008. – 116 с.

6. Весовое дозирование зернистых материалов : монография / С. В. Першина [и др.]. – М. : Машиностроение, 2009. – 260 с.

7. Пат. 2242273 Российская Федерация, МКП<sup>7</sup> В01F 3/18. Способ приготовления многокомпонентных смесей и установка для его реализации / Першин В. Ф., Барышникова С. В., Каляпин Д. К., Осипов А. А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003113033/15 ; заявл. 05.05.03 ; опубл. 20.12.04, Бюл. № 35. – 3 с.

8. Пат. на полезную модель 113353 Российская Федерация, МПК G01F 11/00. Устройство для непрерывного двухстадийного дозирования углеродных наноматериалов / Першина С. В., Ди Дженнаро А. И., Однолько В. Г., Осипов А. А., Першин В. Ф., Явник П. М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2011126102/28 ; заявл. 24.06.11 ; опубл. 10.02.12, Бюл. № 4. – 2 с.

9. Williams, J. C. The Segregation of Particulate Materials. A Review / J. C. Williams // Powder Technology. – 1976. – Vol. 15. – P. 245 – 251.

10. Пат. 2487340 Российская Федерация, С1, МПК G01N 21/85. Способ определения качества смешивания сыпучих материалов / О. В. Дёмин, Д. О. Смолин, Першин В. Ф., В. Г. Однолько ; патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2012102664/28 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 6 с.

11. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа: монография / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с.

---

## Preparation of Multi-Component Mixtures Containing Carbon Nanomaterials

S. V. Pershina<sup>1</sup>, V. M. Nechaev<sup>2</sup>, A. A. Osipov<sup>3</sup>, V. F. Pershin<sup>1</sup>

*Department of Mechanical Engineering and Machine Parts;*

*pershin.home@mail.ru (1);*

*Department of Technological Processes, Devices  
and Technosphere Safety (2), TSTU;*

*Research Center TSTU – IPCP RAS for nanotechnologies  
and new materials (3)*

**Keywords:** accuracy of feeding; carbon nanomaterials; heterogeneity coefficient; feeding; mixing; multi-component mixture.

**Abstract:** The paper describes the results of preparing a multi-component mixture containing carbon nanomaterials and the analysis of a two-stage technology of bulk materials dosing. For each component, the individual portions of bulk material were formed by the batchmeter and converted into a continuous flow on an inclined vibrating tray. The mixing process was implemented under the action of vibration on a conveyor belt divided into cells. Instant performance for each component changes by sinusoidal law with the same periods for all components. The work of batchmeters is synchronized, so the amounts of the mixture in the cells of the conveyor are different, but their ratios are constant. Experimental verification of the proposed method of preparation of multi-component mixtures was conducted on a conveyor belt. The error of batch dosing for sand and cement did not exceed 0.01 %, and for carbon nanomaterials it was 1 %.

## References

1. Tkachev A.G., Artemov V.N., Melezhhik A.V., Memetov N.R., D'yachkova T.P., Pas'ko A.A., Rukhov A.V., Blinov S.V. Aladinskii, A.A., Slepov D.S. *Nanotekhnika*, 2014, no. 1(37), pp. 32-44.
2. Kondakov A.I., Mikhaleva Z.A., Tkachev A.G., Popov A.I., Gorski S.Yu. *Nanotechnologies In Construction*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 31-44, available at: [http://nanobuild.ru/en\\_EN/nanobuild-4-2014-pages-31-44/](http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2014-pages-31-44/) (accessed 24 November 2015).
3. Panina T.I., Tkachev A.G., Mikhaleva Z.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 349-355.
4. Osipov A.A. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2004, 218 p.
5. Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sy-puchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* (The blending of bulk materials: modeling, optimization, calculation), Ivanovo, 2008, 116 p.
6. Pershina S.V., Katalymov A.V., Odnol'ko V.G., Pershin V.F. *Vesovoe dozirovaniye zernistykh materialov* (Weighing dosing of granular materials), Moscow: Mashinostroenie, 2009, 260 p.
7. Pershin V.F., Baryshnikova S.V., Kalyapin D.K., Osipov A.A., Tambov State Technical University, *Sposob prigotovleniya mnogokomponentnykh smesei i ustanovka dlya ego realizatsii* (Method of preparation of multicomponent mixtures and installation for its realization), Russian Federation, 2004, Pat. 2242273.
8. Pershina S.V., Di Dzhennaro A.I., Odnol'ko V.G., Osipov A.A., Pershin V.F., Yavnik P.M., Tambov State Technical University, *Ustroistvo dlya nepreryvnogo dvukhstadiinogo dozirovaniya uglerodnykh nanomaterialov* (Apparatus for continuous two-stage dosing of carbon nanomaterials), Russian Federation, 2012, Utility patent 113353.
9. Williams J.C. *Powder Tegnology*, 1976, vol. 15, pp. 245-251.
10. Demin O.V., Smolin D.O., Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Tambov State Technical University, *Sposob opredeleniya kachestva smeshivaniya sy-puchikh materialov* (A method for determining the quality of mixing bulk materials), Russian Federation, 2013, Pat. 2487340.
11. Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sy-puchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* (Processing machines for bulk materials drum), Moscow: Mashinostroenie, 2009, 220 p.

---

## Vorbereitung der die Kohlenstoffnanomaterialien enthaltenden Mehrelementenmischungen

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Vorbereitung der Mehrelementenmischung, die die Kohlenstoffnanomaterialien enthält, und die Analyse der Besonderheiten der Zweistadiumstechnologie des Dosierens der Schüttstoffe angeführt. Nach jeder Komponente werden die abgesonderten Portionen des Schüttstoffes mit dem Waageportionsdosator formiert und werden in den ununterbrochenen Strom auf dem schiefen vibrierenden Behälter umgewandelt. Der Prozess der Vermischung wird unter dem Einfluß von der Vibration auf dem Transporter realisiert, dessen Band auf die Zellen geteilt ist. Die augenblickliche Produktivität nach jeder Komponente ändert sich nach dem sinusförmigen Gesetz mit den Perioden identisch für alle Komponenten. Die Arbeit der Dosatoren ist synchronisiert, deshalb sind die Mengen der Mischung in den Zellen des Transporters verschieden, aber ihre Verhältnisse sind ständig. Die experimentale Prüfung der angebotenen Weise der Vorbereitung der Mehrelementenmischungen wurde auf dem Bandtransporter. Der Fehler des Portionsdosierens wurde für den Sand und den Zement 0,01 %, und für die Kohlenstoffnanomaterialien – 1% nicht übergestiegen.

## Préparation des mélanges multicomposants contenant des nanomatériaux de carbone

**Résumé:** Sont présentés les résultats de la préparation des mélanges multicomposants contenant des nanomatériaux de carbone l'analyse des particularités de la technologie de dosage de matières en vrac. Le processus de mélange est réalisé sous l'effet des vibrations sur le convoyeur dont la bande est divisée en cellules. La productivité instantanée de chaque composant est mesurée par la loi de sinusoïde avec des périodes identiques pour tous les composants. Le travail de l'unité de dosage est synchronisé, donc la quantité du mélange dans les cellules de convoyeur différents, mais leurs relations sont permanentes.

---

**Авторы:** *Першина Снежана Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин»; *Нечаев Василий Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Осипов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент НОЦ ТамбГТУ – ИПХФ РАН в области нанотехнологий и новых материалов; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---