

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Т. Х. К. Алсайяд¹, В. Ф. Першин², А. А. Баранов²

Кафедры: «Техническая механика и детали машин» (1), «Техника и технологии производства нанопродуктов» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; pershin.home@mail.ru

Ключевые слова: весовое дозирование; производительность питателя; точность дозирования; углеродные наноматериалы; шнековый питатель.

Аннотация: Предложен способ формирования отдельных порций сыпучего материала с использованием основного и дополнительного шнековых питателей. Экспериментально получены зависимости массовой производительности шнекового питателя от скорости вращения шнека. Определены максимальные отклонения веса отдельной порции от заданного значения при разных производительностях дополнительного питателя. Исследован процесс двухстадийного непрерывного весового дозирования и определена точность дозирования при разных весах отдельных порций и производительностях дозатора. Даны рекомендации по выбору основных параметров процесса в зависимости от заданных условий.

Введение

Анализ способов и устройств для непрерывного весового дозирования сыпучих материалов показывает, что основной причиной снижения точности дозирования являются динамические воздействия на весоизмерительное устройство [1]. Предложенная ранее технология двухстадийного дозирования позволяет минимизировать эти воздействия. Суть данной технологии заключается в том, что на первой стадии формируются отдельные порции равного веса ΔP , а на второй – эти порции преобразуются в непрерывный поток. Производительность дозатора Q определяется следующим соотношением

$$Q = \Delta P / \Delta T, \quad (1)$$

где ΔT – промежутки времени, через которые отдельные порции подаются в преобразователь.

Ранее предполагалось, что для формирования отдельных порций весом ΔP будет использоваться серийно выпускаемый порционный дозатор. При производстве и промышленном использовании углеродных наноматериалов серии «Таунит», в ряде случаев, необходимо обеспечить равномерную подачу материала (мелкодисперсный катализатор или углеродные нанотрубки) с производительностью менее $0,5 \text{ гс}^{-1}$. Анализ точности дозирования порционных весовых дозаторов ведущих мировых фирм [2 – 5] показал, что погрешности дозирования, при формировании порций весом менее 10 г, более 1 %, кроме того, цены на них на порядок выше цен на электронные весы с точностью 0,0001 г. Таким образом, исполь-

зую данные веса теоретически, можно формировать порцию весом 5 г с погрешностью 0,002 %. Цель данной работы заключается в разработке и экспериментальной проверке способа формирования порций весом 10 г и меньше с помощью электронных весов и использовании данных порций при реализации двухстадийной технологии весового непрерывного дозирования [6].

Методика проведения экспериментов и материалы

Экспериментальные исследования осуществляли на лабораторной установке, схема которой представлена на рис.1. На основании 1 установлена подвижная плита 2, с помощью шарнира 3. Цилиндрический лоток 4 установлен на подвижной плите 2 с помощью передней 5 и задней 6 опор. Вибратор 7 сообщает лотку 4 крутильные колебания. Порции материала поступают в лоток 4 из узла загрузки 8, а непрерывный поток выгружается через узел выгрузки 9. Бункер 10 с помощью кронштейна 11 установлен на весах 12. Подача материала из бункера 10 в узел загрузки 8 осуществляется основным шнеком 13, который приводится во вращение приводом 14. Весы 12 и привод 14 подключены к узлу управления 15. Догрузка сыпучего материала в узел загрузки 8 осуществляется дополнительным шнеком 16, который приводится во вращение приводом 17, подключенным к узлу управления 15. В качестве узла управления использовали персональный компьютер. Весы ED224S-RCE обеспечивали точность взвешивания 0,0001 г. Следует отметить, что устройство для преобразования отдельных порций сыпучего материала в непрерывный поток выполнено согласно патенту на полезную модель, разработанную ранее [7].

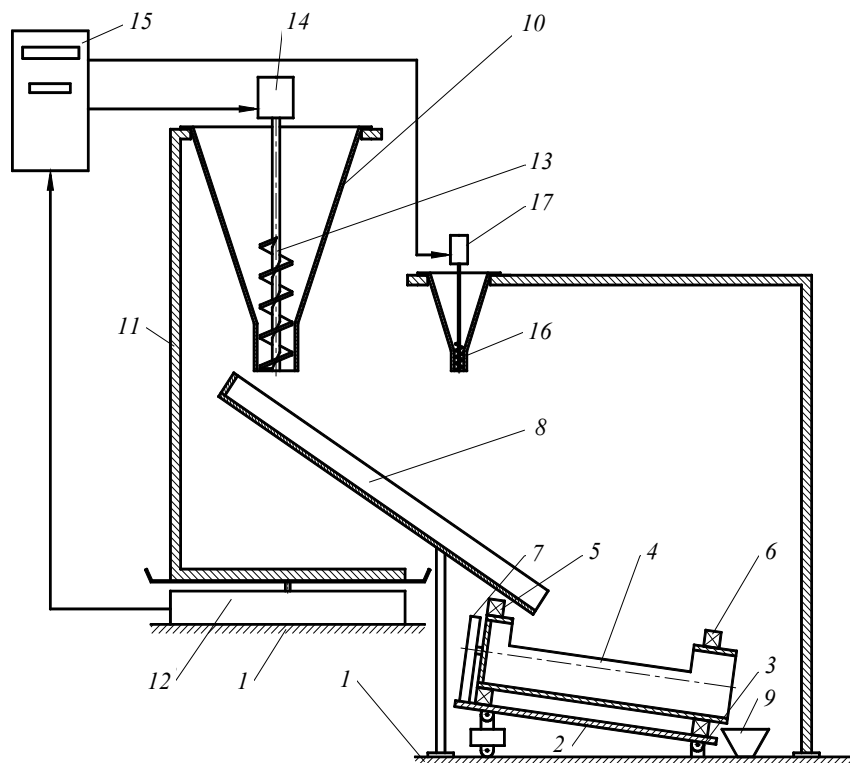


Рис. 1. Схема лабораторной установки для реализации двухстадийной технологии дозирования сыпучих материалов

В качестве дозируемых материалов использовались углеродные наноматериалы «Таунит», «Таунит-М», «Таунит-МД» и соответствующие катализаторы: «Таунит» – углеродные нановолокна с конической ориентацией слоев, внешний диаметр 30...60 нм, насыпная плотность 0,4...0,6 г/см³; «Таунит-М» – коаксиальные углеродные нанотрубки, диаметр 8...15 нм, насыпная плотность 0,03...0,05 г/см³; «Таунит-МД» – длинные коаксиальные углеродные нанотрубки, диаметр 30...60 нм, насыпная плотность 0,03...0,05 г/см³; катализатор для производства «Таунита» (NiMg) размер частиц 80...140 мкм, насыпная плотность 0,356 г/см³; «Таунита-М» (CoMoMgAl) размер частиц 50...80 мкм, насыпная плотность 0,062 г/см³; «Таунита-МД» (CoMoMgAlFe) размер частиц 50...140 мкм, насыпная плотность 0,048 г/см³.

Выбор материалов обоснован тем, что они производятся в промышленных масштабах в ОАО «Нанотехцентр» (г. Тамбов) и необходимо совершенствовать аппаратное оформление их производства. Результаты лабораторных исследований подтверждают перспективность использования углеродных наноматериалов серии «Таунит» при создании новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками [7] и переход к промышленному производству этих материалов требует создания оборудования, в том числе и дозаторов, с учетом требований к производительности и точности дозирования, а также специфических свойств наноматериалов.

В процессе экспериментов изменялись следующие параметры: заданная производительность дозатора Q в пределах 0,05...0,5 г·с⁻¹; ΔP – 1,5...15 г; ΔT – 10...60 с; угол наклона лотка к горизонту – 1...5°; частота крутильных колебаний лотка – 10...50 с⁻¹; амплитуда крутильных колебаний – 5...40°; время отбора пробы из непрерывного потока на выходе из лотка $\Delta T_{\text{проб}}$ – 30...360 с; производительность шнекового питателя – 0,005...0,5 г·с⁻¹.

Экспериментальные исследования состояли из двух основных частей. В первой части экспериментов определяли точность порционного дозирования с использованием двух шнековых питателей и электронных весов, подключенных к персональному компьютеру. В качестве приводов шнековых питателей использовали электродвигатели постоянного тока, что позволяло изменять в достаточно широких пределах скорости вращения шнеков, а следовательно и производительности дозаторов. Производительность основного питателя изменялась от 0,3 до 3 г·с⁻¹, а дополнительного от 0,001 до 0,01 г·с⁻¹. Предварительно были определены зависимости производительностей шнековых питателей от подаваемого напряжения. Каждая порция материала формировалась в два этапа. На первом этапе основным питателем формировалась порция весом $\Delta P(i)$

$$\Delta P - \delta_{\text{осн}} < \Delta P(i) \leq \Delta P + \delta_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{осн}}$, $\delta_{\text{доп}}$ – отклонения массовой производительности соответственно основного и дополнительного питателей.

Во второй части экспериментов определялась точность непрерывного весового дозирования. Отдельные порции материала, через равные промежутки времени ΔT подавались в узел загрузки и попадали в цилиндрический лоток, совершающий крутильные колебания. На выходе из непрерывного потока отбирались пробы. Для сокращения времени проведения эксперимента, при сохранении объема полученной информации, каждая проба отбиралась в течение промежутка времени $\Delta T_{\text{проб}} = 30$ с. При обработке результатов экспериментов суммировали вес нескольких последовательно отобранных проб и фактически получили результаты определения веса проб, отобранных за промежутки времени: 30, 60, 120, 240, 360 с.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов по определению массовой производительности от скорости вращения шнека, представлены в табл. 1.

**Результаты экспериментов по определению
массовой производительности питателя**

Параметры		Таунит	Таунит-М	Таунит-МД	NiMg	CoMoMgAl	CoMoMgAlFe
n , об/мин	ω , c^{-1}						
20	2,09	0,2105 3,5	0,0211 4	0,0195 4	0,1901 3,5	0,0327 4	0,0253 4
40	4,18	0,4097 3	0,0436 3,5	0,0404 3,5	0,3705 3	0,0642 3,5	0,0491 3,5
60	6,27	0,6178 2,5	0,0653 3	0,0567 3	0,5830 2,5	0,0961 3	0,0741 3
80	8,36	0,8617 2	0,0828 2	0,0797 2	0,7730 2	0,129 2	0,0998 2
100	10,45	1,0351 2	0,1032 2,5	0,0994 2	0,9321 2	0,1665 2	0,1285 2
120	12,59	1,2925 2	0,1292 2	0,1143 2,5	1,1223 2	0,1926 2	0,1492 2
140	14,63	1,5080 2	0,1441 2,5	0,1398 2,5	1,3215 2	0,2254 2	0,1798 2
160	16,72	1,6474 2,5	0,1651 3	0,1517 3	1,4828 2,5	0,2538 3	0,1975 3
180	18,81	1,8441 3	0,1835 3,5	0,1694 3,5	1,6585 3	0,2842 3,5	0,2199 3,5
200	20,9	2,0381 3,5	0,2027 4	0,1874 4	1,8225 3,5	0,3148 4	0,2433 4

Примечание: верхнее число – весовая производительность Q , $г \cdot c^{-1}$; нижнее – максимальное отклонение (\pm) от Q , %.

Производительность Q шнековых питателей обычно рассчитывают по следующей зависимости

$$Q=0,785(D^2 - d^2)(t - b)\phi k\rho\omega/2\pi, \quad (3)$$

где D и d – диаметры соответственно наружных витков и вала шнека, м; t и b – шаг и толщина витка соответственно, м; ϕ – коэффициент заполнения межвиткового пространства (0,3...0,8); k – коэффициент проскальзывания дозируемого материала в межвитковом пространстве (0,3...1); ρ – насыпная плотность дозируемого материала, $гм^3$; ω – угловая скорость вращения шнека, c^{-1} .

На рисунке 2 представлены характерные зависимости массовой производительности от скорости вращения шнека. Анализ результатов (см. табл.1 и рис. 2) позволяет сделать следующие выводы:

– в диапазоне изменения скоростей вращения шнека 20...140 об/мин (2,09...14,63 c^{-1}) экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными значениями для всех исследуемых материалов;

– при скоростях вращения больше 140 об/мин (14,63 c^{-1}) реальные производительности питателя меньше расчетных значений;

– в диапазоне скоростей вращения шнека 60...140 об/мин, отклонения производительности от средних значений не превышает 2,5 %, при меньших или больших значениях отклонения увеличиваются до 3,5 – 4 %.

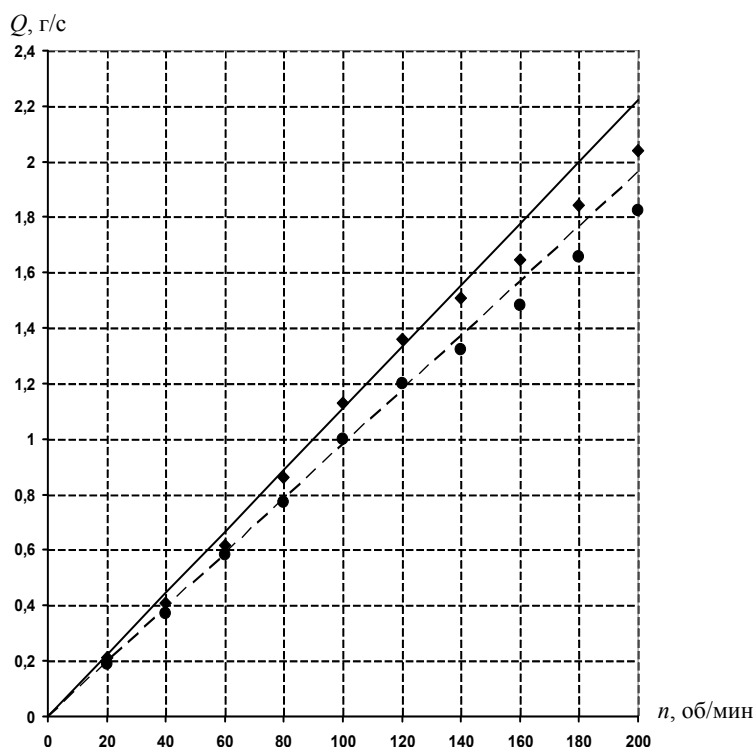


Рис. 2. Зависимость массовой производительности шнекового питателя от скорости вращения шнека:
 ◆—Таунит; ●— катализатор NiMg; — расчет (Таунит); --- расчет (катализатор)

Полученные результаты хорошо согласуются с данными других исследователей. Так, например, в работе [8] экспериментально установили, что при диаметре шнека 80 мм, в диапазоне изменения угловых скоростей $4,2 \dots 12,6 \text{ с}^{-1}$, зависимость весовой производительности от угловой скорости вращения шнека является линейной.

Исходя из требуемого веса порции, питатели настраивались на производительности, обеспечивающие формирование отдельной порции за промежуток времени меньший, чем выбранное значение ΔT .

Проведем расчет максимальной погрешности порционного дозирования, при минимальной заданной производительности дозатора $Q = 0,05 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Вес порции $\Delta P = 1,5 \text{ г}$, $\Delta T = 30 \text{ с}$, производительность основного питателя $Q_{\text{осн}} = 0,3 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$, максимальные отклонения $\delta_{\text{осн}} = 0,0075 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$, производительность дополнительного питателя $Q_{\text{доп}} = 0,001 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$, максимальные отклонения $\delta_{\text{доп}} = 0,001 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Таким образом, первая часть порции формировалась за 5 с и ее вес, даже при максимальных отклонениях основного питателя, был не меньше, чем 1,485 г, а вторая часть порции формировалась за 15 с весом $0,015 \pm 0,001 \text{ г}$. Суммарное время формирования отдельной порции материала составляет 18 с, и, как показали результаты дальнейших исследований, оставшихся 12 с достаточно для взвешивания основной части порции и расчета времени работы дополнительного питателя, для окончательного формирования порции. Максимальная погрешность в весе отдельной порции равна 0,067 %. Это теоретический результат, но он основан на реальных значениях производительностей и погрешностей основного и дополнительного питателей.

На рисунке 3, а, представлены характерные результаты экспериментального определения отклонений веса отдельных порций от заданных значений при разных значениях ΔP .

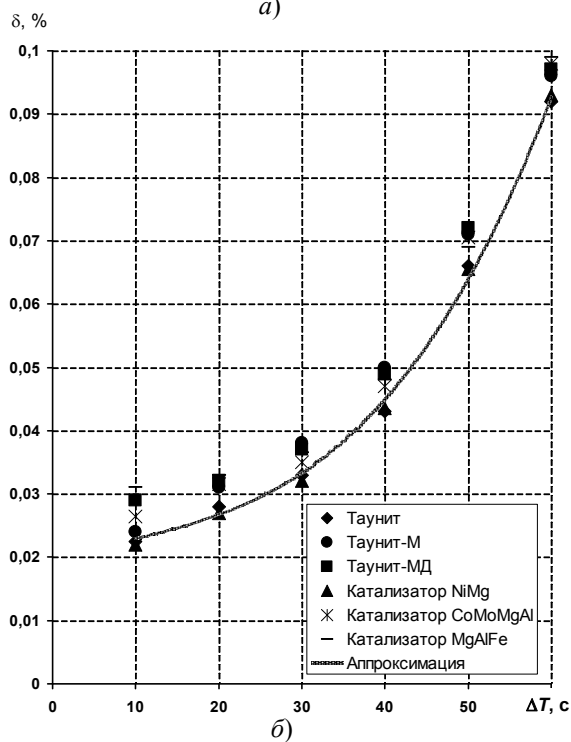
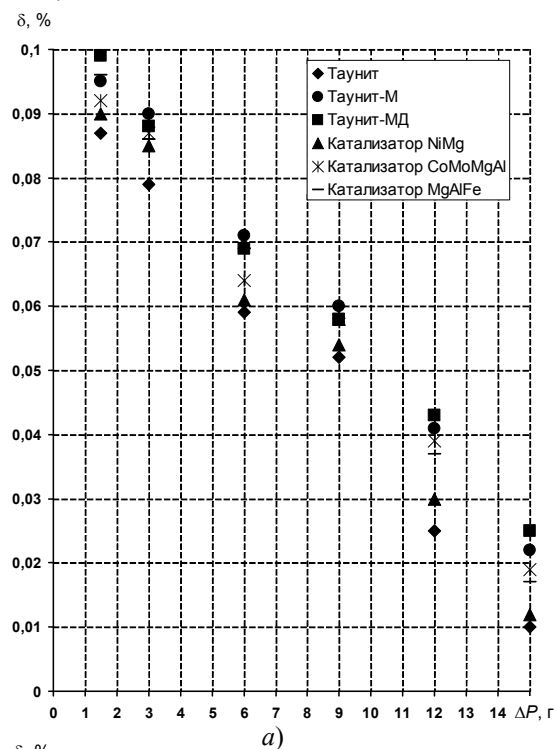


Рис. 3. Зависимость отклонений веса порции (а) и массовой производительности дозатора (б) от заданных значений

Как видно из представленных экспериментальных данных, отклонения от заданных значений ΔP уменьшаются с увеличением численных значений ΔP . Логично предположить, что при дальнейшем увеличении веса порции отклонения от заданных значений будут асимптотически приближаться к нулю. Наибольшие отклонения наблюдаются для наноматериалов «Таунит-М» и «Таунит-МД», а также у катализаторов для получения данных материалов. По всей видимости это связано с тем, что данные материалы имеют очень низкую насыпную плотность ($0,03 \dots 0,062 \text{ г/см}^3$) и ее значения сильно зависят от внешних воздействий (удары, вибрация и т.д.). Тем не менее, даже для этих материалов максимальные отклонения не превышают 0,1 % по весу. Это можно объяснить тем, что первая часть каждой порции формируется по весу, то есть в данном случае, насыпная плотность не влияет на точность порционного дозирования. Установлено, что нет необходимости организовать контроль веса второй части порции, достаточно рассчитать, какой промежуток времени должен работать дополнительный питатель. Таким образом, существенно упрощена процедура формирования отдельных порций сыпучего материала с заданным весом ΔP . Кроме этого, предложенный способ формирования отдельных порций сыпучего материала может быть реализован при использовании любых электронных весов, которые имеют стандартный интерфейс с компьютером, что значительно снижает стоимость дозатора.

При определении точности непрерывного двухстадийного дозирования, для каждого материала и заданной производительности, предварительно экспериментально находили угол наклона лотка к горизонту, при котором неравномерность потока на выходе из дозатора была минимальной. На рисунке 3, б, представлены результаты экспериментального определения точности непрерывного весового двухстадийного дозирования. Заданная производительность $Q = 0,25 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$, время отбора проб из непрерывного потока на выходе из вибрирующего лотка $\Delta T_{\text{ПРОБ}} = 60 \text{ с}$.

Как видно из графика, относительные отклонения массовой производительности от заданных значений, увеличиваются с увеличением промежутков времени ΔT через которые отдельные порции подаются в вибрирующий лоток. Естественно, что при увеличении ΔT пропорционально увеличивается вес порции ΔP , поскольку должно выполняться равенство (1). Если ΔT становится больше, чем время отбора проб $\Delta T_{\text{ПРОБ}}$, то наблюдается резкое увеличение отклонений, поскольку нет четкого контроля веса материала, поступающего в лоток за время $\Delta T_{\text{ПРОБ}}$. Если за время $\Delta T_{\text{ПРОБ}}$ в вибрирующий лоток подается более двух порций, то отклонения производительности не превышают 0,03 %. Следует отметить, что использование весов с точностью 0,001 г практически не ухудшило точность непрерывного весового дозирования сыпучих материалов. Таким образом, предлагаемая технология непрерывного дозирования обеспечивает высокую точность при производительностях менее $0,5 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$ при использовании доступного и недорогого оборудования.

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

- в диапазоне скоростей вращения шнека 60...140 об/мин отклонения производительности от средних значений не превышает 2,5 %;
- формирование отдельных порций в два этапа, с контролем веса материала на первом этапе с помощью электронных весов, позволяет обеспечить точность порционного дозирования не хуже 0,1 %;
- если время отбора проб, при определении точности непрерывного дозирования, в два раза превышает отрезки времени, через которые отдельные порции подаются в устройства для их преобразования в непрерывный поток, то отклонения реальной производительности от заданных значений не превышают 0,1 %.

Таким образом, при реализации технологии двухстадийного дозирования сыпучих материалов, по изложенной выше методике, рекомендуется использовать шнековые питатели со скоростью вращения шнеков в диапазоне 60...140 об/мин и соблюдать условие $\Delta T \leq \Delta T_{\text{ПРОБ}}/2$.

Список литературы

1. Алсайяд, Т. Х. Весовое непрерывное дозирование сыпучих материалов: современное состояние и перспективы [Электронный ресурс] / Т. Х. Алсайяд // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 7. – С. 12 – 17. – Режим доступа : <https://top-technologies.ru/pdf/2017/7/36721.pdf> (дата обращения: 23.07.2018).
2. Brabender-technologie [Электронный ресурс] // Gravimetric Feeders. – Режим доступа : <http://www.brabender-technologie.com/en/products/gravimetric-feeders/> (дата обращения: 15.01.2018).
3. A Feeding System for Continuous and Batch Feeding of Bulk Materials [Электронный ресурс] // MULTIDOS® L Weighfeeder. – Режим доступа : <https://www.schenckprocess.com/en/products/weighfeeder-multidos-l> (дата обращения: 13.04.2018).
4. Feeding Technology [Электронный ресурс] // Coperion. – Режим доступа : <https://www.coperion.com/en/know-how/technology/feeding-technology/> (дата обращения: 15.01.2018).
5. Дозатор точной дозировки ХД [Электронный ресурс] // Тензотехсервис. – Режим доступа : <http://ts-kazan.ru/equipment/detail.php?ID=734> (дата обращения: 15.01.2018).
6. Пат. 2138783 Российская федерация, С1 МПК G01F 11/00 (1995.1). Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 98110695/28; заявл. 04.06.1998 ; опубл. 27.09.1999.
7. Пат. на полезную модель 113353 Российская Федерация, U1 МПК G01F11/00 (2006.01), B82B 3/00 (2006.1). Устройство для непрерывного двухстадийного дозирования углеродных материалов / С. В. Першина, А. И. Ди Дженнаро, В. Г. Однолюк, А. А. Осипов, В. Ф. Першин, П. М. Явник ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2011126102/28 ; заявл. 24.06.2011, опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.
8. Калугин, Д. С. Эффективность подкормки пропашных культур с использованием геликоидного туковывсевающего аппарата / Д. С. Калугин // Вестник АПК Ставрополье. – 2016. – № 1 (21). – С. 11 – 12.

Improvement of Continuous Weighing Dosage in Manufacture and Use of Carbon Nanomaterials

T. Kh. K. Alsaia¹, V. F. Pershin², A. A. Baranov²

*Departments of Theoretical Mechanics and Machine Parts (1),
Methods and Technologies of Nanoproduction (2),
TSTU, Tambov, Russia; pershin.home@mail.ru*

Keywords: accuracy of dosing; auger feeder; carbon nanomaterials; feeder capacity; weight dosing.

Abstract: A method for forming individual batches of bulk material using primary and additional screw feeders is proposed. The dependences of the mass

productivity of the screw feeder on the screw rotation speed are experimentally obtained. The maximum deviations of the weight of an individual portion from a given value at different capacities of an additional feeder are determined. The process of two-stage continuous weighing is studied, and the accuracy of dosing is determined for different weights of individual batches and dispenser's capacities. Recommendations on selecting the main process parameters depending on the given conditions are given.

References

1. <https://top-technologies.ru/pdf/2017/7/36721.pdf> (accessed 23 July 2018).
2. <http://www.brabender-technologie.com/en/products/gravimetric-feeders/> (accessed 15 January 2018).
3. <https://www.schenckprocess.com/en/products/weighfeeder-multidos-l> (accessed 13 April 2018).
4. <https://www.coperion.com/en/know-how/technology/feeding-technology/> (accessed 15 January 2018).
5. <http://tts-kazan.ru/equipment/detail.php?ID=734> (accessed 15 January 2018).
6. Pershin V.F., Baryshnikova S.V. *Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchikh materialov* [Method for continuous dosing of bulk materials], Russian Federation, 1999, Pat. 2138783. (In Russ.).
7. Pershina S.V., Di Dzhennaro A.I., Odnol'ko V.G., Osipov A.A., Pershin V.F., Yavnik P.M. *Ustroystvo dlya nepreryvnogo dvukhstadiynogo dozirovaniya uglerodnykh materialov* [Device for continuous two-stage dosing of carbon materials], Russian Federation, 2012, Pat. na poleznuyu model' 113353. (In Russ.).
8. Kalugin D.S. [Efficiency of top dressing of row crop with the use of a helicoid traction apparatus], *Vestnik APK Stavropol'ye* [Bulletin of the agrarian and industrial complex of Stavropol], 2016, no. 1 (21), pp. 11-12. (In Russ., abstract in Eng.).

Verbesserung der kontinuierlichen Gewichtsdosierung bei der Herstellung und Verwendung von Kohlenstoffnanomaterialien

Zusammenfassung: Es ist das Verfahren zur Bildung einzelner Portionen des Schüttmaterials unter Verwendung von primären und zusätzlichen Schneckenbeschickern vorgeschlagen. Experimentell sind die Angaben der Abhängigkeit der Massenleistung des Schneckenbeschickers von der Drehzahl der Förderschnecke erhalten. Es ist die maximale Gewichtsabweichung einer einzelnen Portion von einem bestimmten Wert bei verschiedenen Leistungen des zusätzlichen Beschickers bestimmt. Der Prozess der zweistufigen kontinuierlichen Gewichtsdosierung ist untersucht und die Genauigkeit der Dosierung bei verschiedenen Gewichten einzelner Portionen und Arbeitsleistung des Dosiergeräts ist bestimmt. Die Empfehlungen für die Auswahl der grundlegenden Parameter des Prozesses sind in Abhängigkeit von den gegebenen Bedingungen gegeben.

Perfectionnement du dosage continue de poids lors de la production et de l'utilisation de nanomatériaux de carbone

Résumé: Est proposée la méthode pour former des portions individuelles des matériaux en vrac à l'aide de la vis principale et supplémentaire. Expérimentalement sont obtenus les dépendances de la performance de la masse de la vitesse de la rotation

de la vis. Sont définis les écarts de poids maximum d'une portion par rapport à la valeur donnée. Est étudié le processus de dosage continu en deux étapes; est déterminée la précision du dosage pour de différentes pondérations des portions individuelles et performances du dosage. Sont données les recommandons pour choisir les paramètres de base du processus en fonction des conditions données.

Авторы: *Алсайяд Таха Хусейн Карам* – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Баранов Андрей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
