

УДК 628.023

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-33-41

# Разработка метода весового непрерывного дозирования сыпучих материалов и анализ его реализации

**В. Мансур, В.Ф. Першин**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

## New Strategy of Bulk Materials Continue Feeding

**V. Mansur, V.F. Pershin**

Tambov State Technical University

Весовое непрерывное дозирование сыпучих материалов — одна из ключевых операций многих технологических процессов. Анализ способов и устройств непрерывного весового дозирования, применяемых ведущими мировыми компаниями-производителями дозаторов, выявил, что основной причиной снижения точности дозирования являются динамические воздействия на датчик веса. Эти воздействия обусловлены движением материала в процессе измерения веса. Наименьшие динамические воздействия на датчик веса наблюдаются при использовании двухстадийного способа дозирования. Суть этого способа заключается в том, что на первой стадии формируются отдельные порции с фиксированным весом, которые через равные промежутки времени подаются в вибрирующий лоток, и преобразуются в непрерывный поток на второй стадии. Значения веса порции и промежутка времени выбирают из условия равенства заданной производительности дозатора отношению веса отдельной порции к промежутку времени между подачей порций в устройство для их преобразования в непрерывный поток. Динамические воздействия на датчик веса уменьшены, но полностью не исключены, так как вес отдельной порции определяется во время движения материала. Для повышения точности дозирования предложена новая стратегия реализации двухстадийного способа дозирования, основанная на том, что постоянство частного от деления можно обеспечить не только при постоянстве делимого и делителя, но и при переменных значениях этих величин. Проведено экспериментальное сравнение предлагаемого и известного способов дозирования, подтвердившее преимущества новой стратегии дозирования перед традиционной.

**Ключевые слова:** сыпучие материалы, непрерывное весовое дозирование, точность дозирования

Weight continuous feeding of bulk materials is one of the key operations of many technological processes. As a result of the analysis of the method and devices for continuous weight feeding, which are used by the world's leading manufacturers of feeders, it has been established that the main reason for reducing the feeding accuracy is dynamic effects on the weight sensor. These effects are due to the movement of the material during the weight measurement. The smallest dynamic impacts on the load cell are observed when using a two-stage feeding technology. The essence of this technology lies in the fact that at the first stage separate portions with a fixed weight  $\Delta P$  are formed, which are fed into a vibrating tray at regular intervals  $\Delta T$  and at the second stage are converted into a continuous flow. The numerical values of the weight of the portion and the time interval are selected from the condition of equality of the given productivity of the dispenser  $Q$  to the ratio  $\Delta P/\Delta T$ . Dynamic influences on the sensor are reduced, but not completely eliminated, since the weight

of an individual portion is determined during the movement of the material. The purpose of the work is to improve the accuracy of feeding. Proceeding from this, a new strategy for the implementation of a two-stage feeding technology is proposed, based on the fact that the constancy of the quotient from division can be ensured not only with the constancy of the dividend and divisor, but also with variable values of these quantities. An experimental comparison of the proposed feeding method with the prototype was carried out, confirming the advantages of the new feeding strategy.

**Keywords:** bulk materials, continuous weight feeding, feeding accuracy

Непрерывное весовое дозирование сыпучих материалов (СМ) является ключевой операцией многих технологических процессов. Одной из основных характеристик дозатора СМ служит точность дозирования, которая зависит от отклонения массы непрерывного потока СМ, высыпающегося из дозатора, в единицу времени, от заданного значения.

Метрологические характеристики дозатора определяют путем отбора не менее трех контрольных проб (далее пробы), в том числе при наибольшем и наименьшем пределах производительности, с применением устройства для их отбора. Продолжительность отбора каждой пробы составляет  $(6,00 \pm 0,25)$  мин. Действительное время отбора проб определяют секундомером с погрешностью не более  $1/5$  пределов допускаемой погрешности дозатора.

Для дозаторов специального назначения допускаются отклонения от действующих стандартов в сторону более жестких условий определения погрешностей дозирования. Например, в фармацевтической промышленности, где достаточно часто масса отдельных компонентов в таблетке составляет сотые и даже тысячные доли грамма.

Аналогичная ситуация складывается и в других отраслях промышленности, где в последнее десятилетие активно применяют наноразмерные модификаторы при создании новых конструкционных и функциональных материалов. Для указанных случаев повышение точности дозирования является актуальной задачей.

Анализ серийно выпускаемых весовых дозаторов СМ [1–4] показывает, что весовую производительность контролируют двумя основными способами.

Первый способ непрерывного весового дозирования СМ [5] заключается в фиксации силового воздействия движущегося потока материала на датчик веса (ДВ). Основной причиной погрешностей являются динамические воздействия движущейся ленты и СМ на ДВ.

Кроме того, материал на ленте распределен

неравномерно, что сложно учесть при расчете производительности.

Рассмотрим указанные недостатки на конкретном примере. Ленточный весовой дозатор (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: бункера 1, шибера 2, весоизмерительного ролика 3, ДВ 4, ленточного транспортера 5, опорных роликов 6 и процессора 7.

ДВ установлен между двумя опорными роликами. Давление ленты транспортера на ДВ зависит от ее натяжения, которое со временем неконтролируемо уменьшается. При тарировании ДВ на ленту устанавливают эталонную гирию и измеряют значения давления на ДВ при трех ее положениях.

Если эталонная гирия расположена над опорными роликами, то показания ДВ равны показаниям без нее, т. е. фиксируется только воздействие на ДВ, вызванное натяжением ленты. Когда эталонная гирия расположена над ДВ, контроллер фиксирует максимальное воздействие, которое соответствует ее массе. Промежуточные положения эталонной гири на ленте в пределах весоизмерительного участка, т. е. между двумя опорными роликами, вычисляют из прямоугольного треугольника.

В итоге рассчитывают вес всего СМ на участке между опорными роликами, а по этому значению и линейной скорости ленты — массовую производительность дозатора. В случае неравномерного распределения СМ на ленте, т. е. при наличии максимальных и минимальных

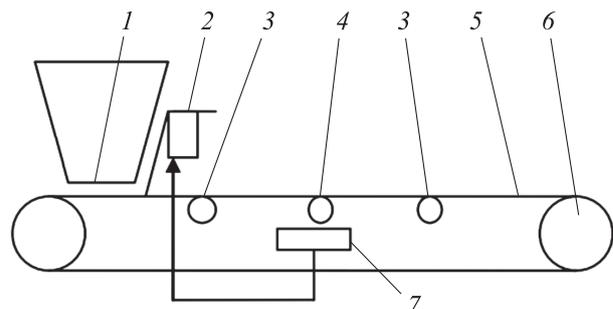


Рис. 1. Схема ленточного весового дозатора

значений, расчетное значение будет изменяться в зависимости от распределения последних на несоизмерительном участке.

Разработано много программ, которые позволяют частично компенсировать некоторые из составляющих динамических воздействий, но это не исключает первопричин погрешностей [6, 7].

*Второй способ непрерывного весового дозирования СМ* называют способом Loss-in-Weight [8–10]. Основным узлом устройства для реализации этого способа является бункер с питателем, установленный на несоизмерительной платформе. Блок управления (контроллер) регулярно фиксирует вес бункера и вычисляет вес материала, находящегося в нем.

Производительность дозатора рассчитывают исходя из разницы веса за определенный промежуток времени. Как и в предыдущем случае, основной причиной снижения точности дозирования являются динамические воздействия на ДВ (несоизмерительную платформу).

В работе [9] приведены результаты экспериментального определения точности непрерывного весового дозирования пятнадцати фармацевтических порошков с разными физико-механическими свойствами. По полученным результатам установлено, что при заданной производительности 0,55 кг/ч (0,153 г/с) реальная производительность изменяется в диапазоне 0,5...0,6 кг/ч (0,139...0,167 г/с). Таким образом, погрешность дозирования составляет  $\pm 9\%$ , т. е. точность весового дозирования соизмерима с таковой при объемном дозировании.

Фирмы, которые производят весовые дозаторы, реализующие способ Loss-in-Weight, заявляют об очень высокой точности дозирования (около 0,25...0,50 %) за счет корректировки производительности весового питателя.

Однако результаты проведенных исследований (которые будут приведены далее) показали, что максимальные отклонения объемной производительности от заданных значений, наблюдаются при изменении производительности весового питателя. Таким образом, корректировка его производительности может не только снизить, но и значительно увеличить погрешность весового дозирования.

*Другим способом организации непрерывного потока СМ с фиксированным массовым расходом* является его двухстадийное дозирование [11]. Согласно этому способу, на первой стадии формируются отдельные порции СМ, которые

на второй стадии преобразуются в непрерывный поток.

Производительность дозирования определяется выражением

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

где  $\Delta P$  — вес отдельной порции, г;  $\Delta T$  — промежуток времени между подачей порций СМ в устройство для их преобразования в непрерывный поток, с.

Разработано несколько конструкций для преобразования отдельных порций СМ в непрерывный поток: вращающаяся труба [12], прямоугольный лоток, совершающий вертикальные колебания [13] и цилиндрический лоток, выполняющий круговые колебания [14]. Каждая из этих конструкций имеет свои достоинства и недостатки. Выбор конструкции зависит от поставленных задач проектирования и физико-механических свойств дозируемого СМ.

Много работ посвящено совершенствованию способов и конструкций для микродозирования порошков [15–17], моделированию процесса дозирования [18], определению физико-механических характеристик СМ [19] и контролю за процессом дозирования [20, 21].

Результаты экспериментальных исследований показали, что, несмотря на существенное снижение динамических воздействий на ДВ при использовании двухстадийного способа дозирования СМ, полностью устранить эти воздействия не удалось [22, 23].

Цель работы — повысить точность непрерывного весового дозирования путем полного исключения динамических воздействий на ДВ при определении массовой производительности дозатора и выполнить экспериментальное сравнение точности непрерывного весового дозирования для предлагаемого и известного [24] способов.

**Новая стратегия двухстадийного дозирования СМ.** Как уже отмечалось, при двухстадийном дозировании СМ производительность дозатора определяется выражением (1), причем в процессе дозирования значения параметров  $\Delta P$  и  $\Delta T$  стремятся сохранить постоянными. Причина неточности дозирования заключается в определении значения  $\Delta P$ , так как СМ находится в движении. Обеспечить постоянную производительность  $Q$  можно не только при постоянных значениях  $\Delta P$  и  $\Delta T$ , но и когда обе величины изменяются.

В соответствии с новой стратегией дозирования объемным способом формируют порцию СМ, и когда материал находится в состоянии покоя, определяют ее вес. Параметр  $\Delta T$  вычисляют по формуле (1), т. е. из условия равенства производительности дозатора заданному значению.

Принципиальное отличие предлагаемого способа от известного [24] заключается в полном устранении воздействия динамических нагрузок на ДВ. Современные контроллеры позволяют определять  $\Delta T$  с высокой точностью и подавать команду на подачу очередной порции СМ в узел преобразования отдельных порций в непрерывный поток.

Результаты ранее проведенных исследований показали, что при постоянных значениях параметров  $\Delta P$  и  $\Delta T$  с помощью вибрирующего наклонного лотка можно преобразовать отдельные порции СМ в достаточно равномерный поток [22]. При использовании новой стратегии вес порций СМ изменяется, поэтому необходимо экспериментально определить, как это повлияет на точность дозирования.

**Объекты и методы исследования.** Экспериментальное сравнение предлагаемого и известного [24] способов проводили для материалов, использованных в статье [25], с помощью устройства, описанного в работе [24]. Устройство для двухстадийного непрерывного весового дозирования СМ приведено на рис. 2.

*Устройство работает следующим образом.* В блок управления 4 вводят заданную производительность дозатора  $Q$ , г/с, и вес отдельной порции СМ  $\Delta P$ , г. В блоке управления происходит расчет промежутка времени  $\Delta T$ , с. Этот блок фиксирует вес бункера 7 с СМ, приводов и шнеков и подает команду на включение привода вращения 5 основного шнека 8.

Блок управления, определив вес СМ в бункерах и обработав сигнал, поступающий с весовой платформы 2, вычисляет вес материала, загруженного из основного бункера  $P_{\text{осн}}$  в лоток 13, как разницу между исходным весом и его текущим значением между подачей отдельных порций СМ в лоток.

Когда вес СМ, поступившего в лоток, достигает значения  $\Delta P - \delta P_{\text{осн}}$  ( $\delta$  — погрешность дозирования), блок управления выключает привод 5 и включает привод 6 дополнительного шнека 9. Отклонение веса порции от среднего значения  $\delta P_{\text{осн}}$  определяется экспериментально

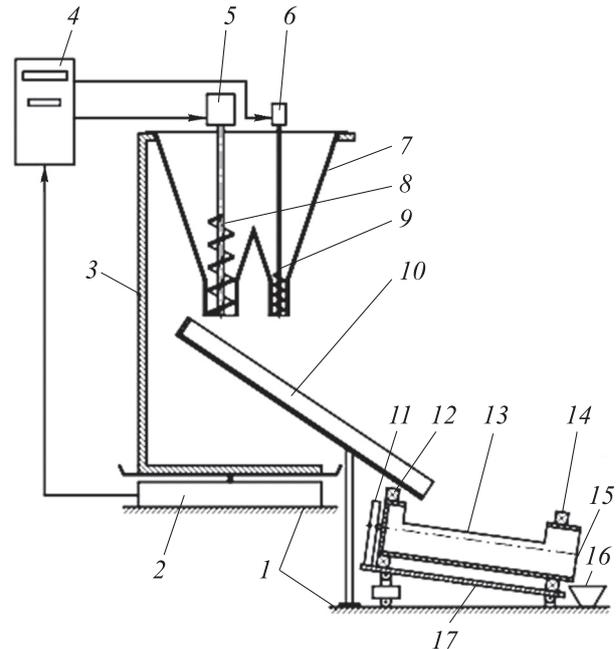


Рис. 2. Схема устройства для двухстадийного непрерывного весового дозирования СМ: 1 — основание; 2 и 3 — весовая и подвижная платформа; 4 — блок управления; 5 и 6 — привод вращения основного и дополнительного шнека; 7 — бункер; 8 и 9 — основной и дополнительный шнек; 10 и 16 — узел загрузки и выгрузки; 11 — вибратор; 12 и 14 — передняя и задняя опора; 13 — лоток; 15 — шарнир; 17 — подвижная платформа

для конкретного СМ, производительности основного питателя  $Q_{\text{осн}}$  и веса отдельной порции  $\Delta P$ . Если  $\delta P_{\text{осн}}$  не определено, то его принимают равным  $0,1\Delta P$ .

В качестве дозируемых СМ использовали следующие материалы:

- «Таунит» — углеродные нановолокна с конической ориентацией слоев (внешний диаметр 30...60 нм, насыпная плотность 0,4...0,6 г/см<sup>3</sup>);
- «Таунит-М» — коаксиальные углеродные нанотрубки (диаметр 8...15 нм, насыпная плотность 0,03...0,05 г/см<sup>3</sup>);
- «Таунит-МД» — длинные коаксиальные углеродные нанотрубки (диаметр 30...60 нм, насыпная плотность 0,03...0,05 г/см<sup>3</sup>).

Для производства углеродных нанотрубок применяли три катализатора:

- NiMg (размер частиц 80...140 мкм, насыпная плотность 0,356 г/см<sup>3</sup>);
- CoMoMgAl (размер частиц 50...80 мкм, насыпная плотность 0,062 г/см<sup>3</sup>);
- CoMoMgAlFe (размер частиц 50...140 мкм, насыпная плотность 0,048 г/см<sup>3</sup>).

Погрешность дозирования экспериментально находили при производительности до-

затора 0,1...1,0 г/с. Точность определения веса отдельной порции СМ (точность весовой платформы) составляла 0,001 г. В качестве блока управления использовали персональный компьютер. В процессе экспериментов фиксировали вес каждой порции, а при применении новой стратегии дозирования — еще и промежутки времени  $\Delta T$ .

*Эксперименты с использованием известного способа проводили следующим образом.* Отдельные порции СМ фиксированного веса подавали в вибрирующий лоток через равные промежутки времени  $\Delta T = 30$  с или  $\Delta T = 60$  с. Из непрерывного потока СМ на выходе из лотка каждые 30 с отбирали пробы для определения погрешностей дозирования. Эти пробы взвешивали с точностью до 0,0001 г и проводили статистическую обработку полученных результатов.

По результатам взвешивания проб СМ, отобранных из непрерывного потока в течение 30 с, рассчитывали их вес со временем отбора  $t = 60, 90, 120, 180$  с. Такой подход к обработке полученных результатов позволил проанализировать влияние времени выборки на погрешность непрерывной подачи СМ и сократить временные затраты на исследования.

*Эксперименты с использованием новой стратегии дозирования проводили следующим образом.* В блок управления вводили значения заданной производительности дозатора  $Q$ , г/с, и ориентировочное значение  $\Delta P$ . Последнее рассчитывали из условия  $\Delta T = 30$  с или  $\Delta T = 60$  с, чтобы максимально корректно сравнить по-

грешности, возникающие при использовании предлагаемого и известного [24] способов дозирования.

При реализации новой стратегии дозирования в устройстве, показанном на рис. 2, использовали только основной шнек. После формирования очередной порции и выключения привода основного шнека информация с весовой платформы поступала в блок управления, и проводился расчет промежутка времени, через который следует включать привод основного шнека и подавать очередную порцию СМ в лоток. Пробы из непрерывного потока СМ на выходе из лотка, взвешивание и обработку полученных результатов осуществляли по той же методике, что и при использовании известного способа [24].

**Результаты и обсуждение.** Характерные результаты экспериментов по определению погрешности непрерывного дозирования на примере коаксиальных углеродных нанотрубок «Таунит-М» приведены на рис. 3. Видно, что при использовании новой стратегии дозирования СМ погрешность в 5 раз меньше, чем при применении известного способа [24].

Анализ результатов по определению веса отдельной порции СМ известным способом [24] показал, что максимальные погрешности (около 0,5 %) наблюдались при минимальной производительности дозатора (0,1 г/с).

Как видно из рис. 3, а, при применении известного способа с увеличением времени отбо-

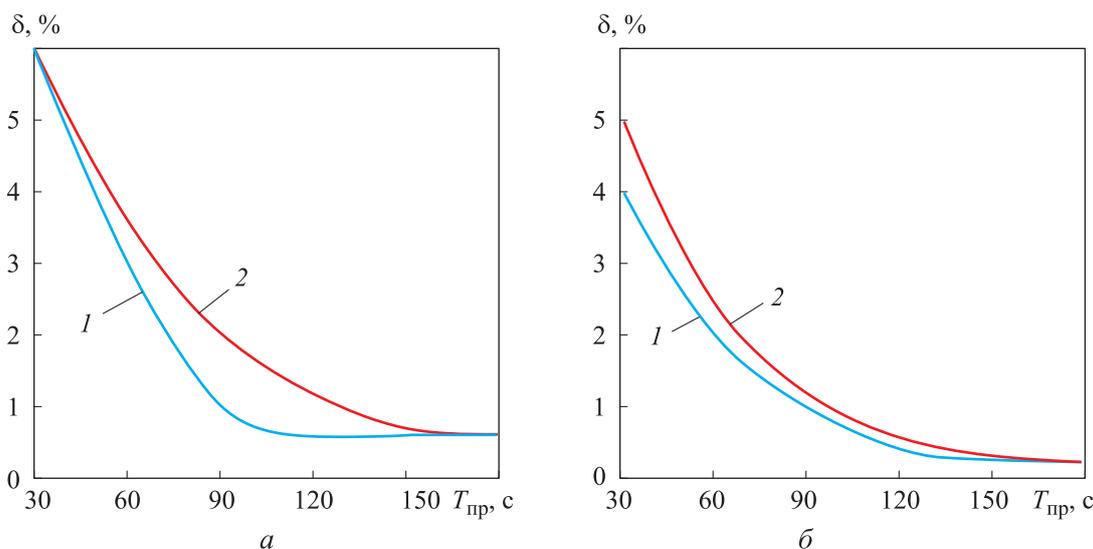


Рис. 3. Зависимости погрешности дозирования  $\delta$  коаксиальных углеродных нанотрубок «Таунит-М» от времени отбора проб  $T_{пр}$  при  $\Delta T = 30$  (1) и 60 с (2), полученные с помощью известного (а) и предлагаемого способа (б)

ра проб погрешность дозирования уменьшается, асимптотически стремясь к точности веса отдельных порций СМ (0,5 %). Для  $\Delta T = 30$  с минимальная погрешность достигается при отборе пробы в течение 120 с (см. рис. 3, а, кривая 1), для  $\Delta T = 60$  с — при отборе пробы за 150 с (кривая 2). Аналогичная закономерность наблюдается и при использовании предлагаемого способа (рис. 3, б).

Анализ результатов определения веса отдельной порции СМ с помощью предлагаемого способа дозирования СМ показал, что максимальные отклонения веса порции от среднего значения наблюдались при минимальной производительности дозатора (0,1 г/с) и составляли  $\pm 0,25$  %.

По результатам расчета погрешностей при непрерывном дозировании путем определения значений  $\Delta T$  из условия постоянства производительности установлено, что с помощью предлагаемого способа можно не только компенсировать отклонения веса отдельных порций, но и значительно повысить точность дозирования по сравнению с получаемой при использовании известного способа.

Для дальнейшего повышения точности непрерывного весового дозирования с применением двухстадийного способа необходимо провести экспериментальные исследования по определению влияния отклонений веса отдельных порций СМ на точность их непрерывного дозирования.

## Выводы

1. При взвешивании отдельных порций СМ после их формирования объемным способом с последующим расчетом промежутка времени, по истечении которого необходимо подавать следующую порцию СМ в устройство для ее преобразования в непрерывный поток, реализация непрерывного весового двухстадийного дозирования СМ существенно повышает точность процесса.

2. Точность непрерывного дозирования СМ растет с увеличением времени отбора проб для анализа, а также при уменьшении промежутка времени между подачей отдельных порций в устройство для их преобразования в непрерывный поток.

## Литература

- [1] Системы дозирования. *k-tron.ru: веб-сайт*. URL: <http://k-tron.ru/sistemyi-dozirovaniya-2/> (дата обращения: 19.05.2022).
- [2] QuantStudio absolute Q digital PCR system. *thermoscientific.com: веб-сайт*. URL: [www.thermoscientific.com/bulk-handling](http://www.thermoscientific.com/bulk-handling) (дата обращения: 19.05.2022).
- [3] COMPETENCE IN FEEDING AND DOSING. *easyfairsassets.com: веб-сайт*. URL: [https://easyfairsassets.com/sites/245/2021/08/678\\_UK\\_Gericke\\_Brochure\\_Feeding-1.pdf](https://easyfairsassets.com/sites/245/2021/08/678_UK_Gericke_Brochure_Feeding-1.pdf) (дата обращения: 05.01.2023).
- [4] Low capacity weighbelt feeder. *thermo-ramsey.com: веб-сайт*. URL: <http://thermo-ramsey.com/index.php/wareshow/ramsey/1/en/64020,86533/86533.html> (дата обращения: 19.05.2022).
- [5] Živanić D., Gajić A., Zelić A. et al. Flat belt feeder regulation possibilities. *Flexible Technologies* – MMA. Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2018, pp. 351–354.
- [6] Aleksandrović S., Jović M. Analysis of belt weigher accuracy limiting factors. *Int. J. Coal Prep. Util.*, 2011, vol. 31, no. 5, pp. 223–241, doi: <https://doi.org/10.1080/19392699.2011.552896>
- [7] Zhao Y., Collins E.G. Fuzzy PI control design for an industrial weigh belt feeder. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2003, vol. 11, no. 3, pp. 311–319, doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2003.812686>
- [8] Dosing og Prosessveing. *scaleit.no: веб-сайт*. URL: <https://www.scaleit.no/dosing-tank-silo/> (дата обращения 05.01.2023).
- [9] Bostijn N., Dhondt J., Ryckaert A. et al. A multivariate approach to predict the volumetric and gravimetric feeding behavior of a low feed rate feeder based on raw material properties. *Int. J. Pharm.*, 2019, vol. 557, pp. 342–353, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.12.066>
- [10] Yadav I.K., Holman J., Meehan E. et al. Influence of material properties and equipment configuration on loss-in-weight feeder performance for drug product continuous manufacture. *Powder Technol.*, 2019, vol. 348, pp. 126–137, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.071>

- [11] Першин В.Ф., Барышникова С.В. *Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов*. Патент РФ 2138783. Заявл. 04.06.1998, опублик. 27.09.1999.
- [12] Pershin V., Barishnikova S., Sviridov M. Influence of the feeder's capacity and accuracy on the mixture quality. Use of two-stage feeding for preparing bulk solids mixture. *Proc. 1<sup>st</sup> Europ. Cong. on Chemical Engineering*, 1997, vol. 2, pp. 997–999.
- [13] Першин В.Ф., Барышникова С.В., Каляпин Д.К. и др. *Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов устройство для его осуществления*. Патент РФ 2251083. Заявл. 07.04.2003, опублик. 27.04.2005.
- [14] Першина С.В., Ди Джиннаро А.И., Однолько В.Г. и др. *Устройство для непрерывного двухстадийного дозирования углеродных материалов*. Патент РФ 113353. Заявл. 24.06.2011, опублик. 10.02.2012.
- [15] Besenhard M.O., Fathollahi S., Siegmann E. et al. Micro-feeding and dosing of powders via a small-scale powder pump. *Int. J. Pharm.*, 2017, vol. 519, no. 1–2, pp. 314–322, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.12.029>
- [16] Qi L., Zeng X., Zhou J. et al. Stable micro-feeding of fine powders using a capillary with ultrasonic vibration. *Powder Technol.*, 2011, vol. 214, no. 2, pp. 237–242, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.08.015>
- [17] Bi M., Sun C.C., Alvarez F. et al. The manufacture of low-dose oral solid dosage form to support early clinical studies using an automated micro-filing system. *AAPS Pharm. Sci. Tech.*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 88–95, doi: <https://doi.org/10.1208/s12249-010-9549-y>
- [18] Gao X., Zhou Z., Xu Y. et al. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system. *Powder Technol.*, 2020, vol. 367, pp. 643–658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.021>
- [19] Lu H., Cao J., Jin Y. et al. Study on the feeding characteristics of pulverized coal for entrained-flow gasification. *Powder Technol.*, 2019, vol. 357, pp. 164–170, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.064>
- [20] Matsusaka S., Kobayakawa M., Hosoh Y. et al. A micro-feeding of fine powders using vibration shear flow. *J. Soc. Powder Technol.*, 2012, vol. 49, no. 9, pp. 658–652, doi: <https://doi.org/10.4164/sptj.49.658>
- [21] Madarász L., Kóte A., Gyürkés M. et al. Videometric mass flow control: A new method for real-time measurement and feedback control of powder micro-feeding based on image analysis. *Int. J. Pharm.*, 2020, vol. 580, art. 119223, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119223>
- [22] Alsayyad T., Pershin V., Pasko A. et al. Improving the accuracy of two-stage weight feeding technology of bulk solids. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1899, no. 1, art. 060011, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5009882>
- [23] Al-Sayyad T., Pershin V., Vorobiev A. et al. Two-step feeding technology for graphene oxide manufacturing. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2041, no. 1, art. 020001, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5079332>
- [24] Першин В.Ф., Алсайяд Т.Х.К., Ткачев А.Г. и др. *Способ непрерывного весового дозирования сыпучего материала и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2691786. Заявл. 31.10.2018, опублик. 18.06.2019.
- [25] Першин В.Ф., Воробьев А.М., Нечаев В.М. и др. Двухстадийное непрерывное дозирование при производстве и использовании углеродных наноматериалов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2018, № 6, с. 12–14.

## References

- [1] Sistemy dozirovaniya [Metering systems]. *k-tron.ru: website*. URL: <http://k-tron.ru/sistemyi-dozirovaniya-2/> (accessed: 19.05.2022). (In Russ.).
- [2] QuantStudio absolute Q digital PCR system. *thermoscientific.com: website*. URL: [www.thermoscientific.com/bulk-handling](http://www.thermoscientific.com/bulk-handling) (accessed: 19.05.2022).
- [3] COMPETENCE IN FEEDING AND DOSING. *easyfairsassets.com: website*. URL: [https://easyfairsassets.com/sites/245/2021/08/678\\_UK\\_Gericke\\_Brochure\\_Feeding-1.pdf](https://easyfairsassets.com/sites/245/2021/08/678_UK_Gericke_Brochure_Feeding-1.pdf) (дата обращения: 05.01.2023).

- [4] Low capacity weighbelt feeder. *thermo-ramsey.com: website*. URL: <http://thermo-ramsey.com/index.php/wareshow/ramsey/1/en/64020,86533/86533.html> (accessed: 19.05.2022).
- [5] Živanić D., Gajić A., Zelić A. et al. *Flat belt feeder regulation possibilities. Flexible Technologies* – MMA. Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2018, pp. 351–354.
- [6] Aleksandrović S., Jović M. Analysis of belt weigher accuracy limiting factors. *Int. J. Coal Prep. Util.*, 2011, vol. 31, no. 5, pp. 223–241, doi: <https://doi.org/10.1080/19392699.2011.552896>
- [7] Zhao Y., Collins E.G. Fuzzy PI control design for an industrial weigh belt feeder. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2003, vol. 11, no. 3, pp. 311–319, doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2003.812686>
- [8] Doserung og Prosessveeing. *scaleit.no: website*. URL: <https://www.scaleit.no/doserung-tank-silo/> (дата обращения 05.01.2023).
- [9] Bostijn N., Dhondt J., Ryckaert A. et al. A multivariate approach to predict the volumetric and gravimetric feeding behavior of a low feed rate feeder based on raw material properties. *Int. J. Pharm.*, 2019, vol. 557, pp. 342–353, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.12.066>
- [10] Yadav I.K., Holman J., Meehan E. et al. Influence of material properties and equipment configuration on loss-in-weight feeder performance for drug product continuous manufacture. *Powder Technol.*, 2019, vol. 348, pp. 126–137, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.071>
- [11] Pershin V.F., Baryshnikova S.V. *Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchikh materialov* [Bulk material continuous dosing method]. Patent RU 2138783. Appl. 04.06.1998, publ. 27.09.1999. (In Russ.).
- [12] Pershin V., Barishnikova S., Sviridov M. Influence of the feeder's capacity and accuracy on the mixture quality. Use of two-stage feeding for preparing bulk solids mixture. *Proc. 1<sup>st</sup> Europ. Cong. on Chemical Engineering*, 1997, vol. 2, pp. 997–999.
- [13] Pershin V.F., Baryshnikova S.V., Kalyapin D.K. et al. *Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchikh materialov ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method and device for continuous batching of loose materials]. Patent RU 2251083. Appl. 07.04.2003, publ. 27.04.2005. (In Russ.).
- [14] Pershina S.V., Di Dzhinnaro A.I., Odnolko V.G. et al. *Ustroystvo dlya nepreryvnogo dvukhstadiynogo dozirovaniya uglerodnykh materialov* [Device for continuous two-stage batching of carbon materials]. Patent RU 113353. Appl. 24.06.2011, publ. 10.02.2012. (In Russ.).
- [15] Besenhard M.O., Fathollahi S., Siegmann E. et al. Micro-feeding and dosing of powders via a small-scale powder pump. *Int. J. Pharm.*, 2017, vol. 519, no. 1–2, pp. 314–322, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.12.029>
- [16] Qi L., Zeng X., Zhou J. et al. Stable micro-feeding of fine powders using a capillary with ultrasonic vibration. *Powder Technol.*, 2011, vol. 214, no. 2, pp. 237–242, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.08.015>
- [17] Bi M., Sun C.C., Alvarez F. et al. The manufacture of low-dose oral solid dosage form to support early clinical studies using an automated micro-filing system. *AAPS Pharm. Sci. Tech.*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 88–95, doi: <https://doi.org/10.1208/s12249-010-9549-y>
- [18] Gao X., Zhou Z., Xu Y. et al. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system. *Powder Technol.*, 2020, vol. 367, pp. 643–658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.021>
- [19] Lu H., Cao J., Jin Y. et al. Study on the feeding characteristics of pulverized coal for entrained-flow gasification. *Powder Technol.*, 2019, vol. 357, pp. 164–170, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.064>
- [20] Matsusaka S., Kobayakawa M., Hosoh Y. et al. A micro-feeding of fine powders using vibration shear flow. *J. Soc. Powder Technol.*, 2012, vol. 49, no. 9, pp. 658–652, doi: <https://doi.org/10.4164/sptj.49.658>
- [21] Madarász L., Kóte A., Gyürkés M. et al. Videometric mass flow control: A new method for real-time measurement and feedback control of powder micro-feeding based on image analysis. *Int. J. Pharm.*, 2020, vol. 580, art. 119223, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119223>

- [22] Alsayyad T., Pershin V., Pasko A. et al. Improving the accuracy of two-stage weight feeding technology of bulk solids. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1899, no. 1, art. 060011, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5009882>
- [23] Al-Sayyad T., Pershin V., Vorobiev A. et al. Two-step feeding technology for graphene oxide manufacturing. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2041, no. 1, art. 020001, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5079332>
- [24] Pershin V.F., Alsayyad T.Kh.K., Tkachev A.G. et al. *Sposob nepreryvnogo vesovogo dozirovaniya sypuchego materiala i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for continuous bulk weighing of bulk material and device for its implementation]. Patent RU 2691786. Appl. 31.10.2018, publ. 18.06.2019. (In Russ.).
- [25] Pershin V.F., Vorobyev A.M., Nechaev V.M. et al. Two-stage continuous feeding in the production and use of carbon nanomaterials. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2018, no. 6, pp. 12–14. (In Russ.). (Eng. version: *Chem. Petrol. Eng.*, 2018, vol. 54, no. 5-6, pp. 386–391, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0491-2>)

Статья поступила в редакцию 03.07.2022

## Информация об авторах

**МАНСУР Васем** — аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: [wasemmansour5@gmail.com](mailto:wasemmansour5@gmail.com)).

**ПЕРШИН Владимир Федорович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: [pershin.home@mail.ru](mailto:pershin.home@mail.ru)).

## Information about the authors

**MANSUR Vasem** — Postgraduate, Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: [wasemmansour5@gmail.com](mailto:wasemmansour5@gmail.com)).

**PERSHIN Vladimir Fedorovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: [pershin.home@mail.ru](mailto:pershin.home@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мансур В., Першин В.Ф. Разработка метода весового непрерывного дозирования сыпучих материалов и анализ его реализации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 1, с. 33–41, doi: [10.18698/0536-1044-2023-1-33-41](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-33-41)

### Please cite this article in English as:

Mansur V., Pershin V.F. New Strategy of Bulk Materials Continue Feeding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 33–41, doi: [10.18698/0536-1044-2023-1-33-41](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-33-41)