

УДК 681.532.32

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОМ
ЗЕРНИСТЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ***А.А. Пешехонов¹, И.В. Рудакова¹, А.В. Черникова², С.Н. Кузьмина³**¹«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)» (г. Санкт-Петербург)**²«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
(г. Санкт-Петербург)**³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург)*

© Пешехонов А.А., Рудакова И.В.,
Черникова А.В., Кузьмина С.Н., 2025

Аннотация. Рассмотрены автоматические системы с объемным управлением расходом сыпучих материалов. Для определенной области гранулометрического состава и плотности частиц показано преимущество пневматических питателей перед системами с механическим воздействием на сыпучие материалы. Для минимизации энергетических затрат управление расходом сыпучего материала предложено реализовать в виде импульсов с переменной скважностью, амплитуда которых обеспечивает минимальные удельные энергозатраты на расход воздуха. Энергосберегающее управление расходом зернистых сыпучих материалов является важной задачей в различных отраслях, таких как сельское хозяйство, пищевая промышленность, строительство и др. Эффективное управление расходом подобных материалов может способствовать существенному снижению затрат и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Отмечено, что ключевыми аспектами, исследование которых может быть полезно в этой области, выступают оптимизация процессов, мониторинг и анализ данных, энергоэффективные технологии, управление запасами, обучение персонала, использование альтернативных источников энергии, снижение отходов. Сделан вывод, что данные меры могут помочь не только при снижении затрат, но и при повышении устойчивости бизнеса в условиях меняющегося рынка, а также при обеспечении выполнения экологических требований.

Ключевые слова: зернистые сыпучие материалы, объемное управление расходом, импульсное управление, минимум энергетических затрат.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-34-43**ВВЕДЕНИЕ**

В ряде технологических процессов химической, металлургической, фармацевтической, пищевой отраслей промышленности, в производстве удобрений и строительных материалов используются потоки зернистых сыпучих материалов (ЗСМ). Их применяют в технологиях растворения, сушки, смешивания, при транспортировании, дозировании, в каталитических процессах и ряде других. Чтобы увеличить поверхность контакта фаз, частицы сыпучих материалов перед подачей в технологические аппараты обычно измельчают, но до определенной степени, так как энергетические затраты на измельчение и склонность к агломерации, налипанию на внутренние поверхности аппаратов веществ,

измельченных до уровня порошков, могут аннулировать эффект от увеличения площади контакта. В связи с этим большинство компонентов с твердой фазой, участвующих в различных технологических процессах, следует отнести к ЗСМ. Для транспортирования, дозирования и управления расходом ЗСМ применяют различного рода питающие системы, в составе которых практически всегда можно выделить рабочий орган (РО), непосредственно взаимодействующий с материалом, привод – исполнительный механизм (ИМ), а также устройства контроля и/или управления ими. Рабочий орган и ИМ в совокупности составляют исполнительное устройство (ИУ). Классификация ИУ для ЗСМ выполняется обычно по типу ИМ и по принципу работы РО. В настоящей работе авторами предложено классифицировать ИУ для ЗСМ по источнику силы, перемещающей массивы твердых частиц, на основе выделения ИУ с гравитационным, механическим, вибрационным, аэрационным и пневматическим типами воздействия. В этой классификации требуется пояснить следующее:

1) вибрационные питатели рассматриваются отдельно от механических, поскольку РО в них перемещается возвратно-поступательно с высокой частотой и на расстояние, которое на несколько порядков меньше, чем у механических. Кроме того, при вибрационном воздействии в ЗСМ наблюдаются специфические эффекты: изменение насыпной плотности, расслоение по крупности и прочее, что не наблюдается при использовании ИУ с другими принципами действия;

2) в аэрационных питателях (аэрожелобах, аэрокамерах) при подаче воздуха в материал снизу через аэроднище сухое трение между частицами сменяется вязким, и материал начинает «течь», но не под давлением воздуха, а под действием составляющей силы тяжести, так что аэрационные питатели следует отнести к группе гравитационных.

Традиционно применяемые механические ИУ имеют ряд недостатков, связанных с принципом перемещения материала:

1) присутствуют кинематические пары – подшипниковые узлы, тяги, шарниры, шнеки, лопастные колеса, в которых между деталями есть зазоры, достаточные для проникновения в них мелкой фракции материала, что может привести к изменению расходных характеристик, а в результате – к заклиниванию или разрушению РО;

2) механические РО не удастся сделать полностью герметичными, вследствие чего мелкая фракция ЗСМ попадает в окружающую среду, что приводит к нарушениям требований экологической безопасности;

3) в силу наличия зазоров в соединениях элементов механических РО имеет место проникновение внутрь влажного воздуха из окружающей среды, что оказывает негативное воздействие на свойства ЗСМ;

4) ИУ с вибрационными приводами имеют существенную металлоемкость, сложную конструкцию, а также высокую частоту перемещения механических элементов, что снижает надежность их функционирования.

Существенные преимущества в части надежности, экологической и технической безопасности, если сравнивать с механическими и вибрационными ИУ, дают питатели и дозаторы с пневматическим побуждением расхода ЗСМ, в которых перемещение частиц происходит под давлением сжатого воздуха. Целями настоящей работы являются исследование характеристик бесклапанных пневматических ИУ для управления расходом ЗСМ и разработка методики расчета режимов их работы, обеспечивающих минимизацию энергетических затрат.

Рассматриваемые в данной работе системы входят в линейку многофункциональных пневматических преобразователей (МФПП) [1, 2], применяемых для контроля и управления параметрами ЗСМ. К этим параметрам относятся объемный расход, количество, гранулометрический состав, плотность и влагосодержание частиц материала. В настоящее время линейка МФПП содержит более 10 вариантов исполнительных и 5 вариантов измерительных систем, различия между которыми заключаются в реализуемых способах использования входной и выходной информации, а также в специальных технических и конструктивных решениях. На пять способов осуществления функций контроля и управления в МФПП получены патенты Российской Федерации.

РО – это смесительная камера (СК) с подключенными к ней загрузочным материалопроводом (ЗМП), воздухопроводом (ВВ) для подачи или отбора воздуха, выпускным стволом (ВС) для вывода двухфазной смеси «газ – сыпучий материал»;

систему контролю и управления.

Входным параметром для системы контроля и управления служит величина давления в СК на входе в ВС ($P_{СК}$ на рис. 1). После выхода из ВС смесь разделяется на газовую и твердую фазы. Последняя с массовым расходом F_M поступает в технологический объект, а газ направляется в аспирационную систему. В качестве побудителя расхода воздуха может применяться индивидуальный воздуходувный агрегат или дросселирующий элемент в сети пневмопитания.

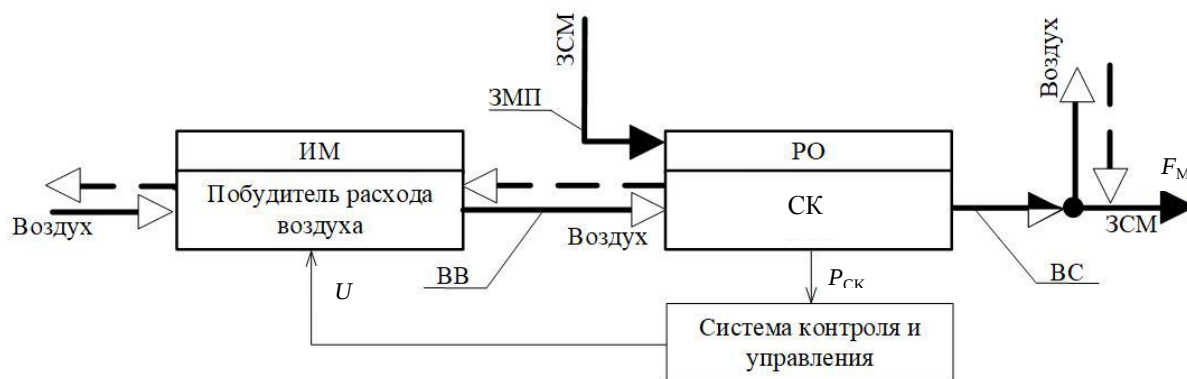


Рис. 1. Обобщенная структура МФПП: U – управление; P_{CK} – давление в смесительной камере; F_M – выходной расход материала

Давление в СК зависит от параметров переносимого материала: его количества и расхода, размера, плотности и влажности твердых частиц. Оценкой этих параметров являются результаты работы системы контроля.

К преимуществам использования локальных систем пневматического контроля и управления на основе схемы МФПП следует отнести:

1) отсутствие в РО подвижных элементов (кинематических пар), вследствие чего повышается функциональная надежность, увеличивается срок службы, а также снижаются затраты на техническое обслуживание;

2) герметичность трассы перемещения двухфазной смеси, что позволяет обеспечивать требования к экологической безопасности, а также изолировать материал от воздействия параметров окружающей среды;

3) конструкция предлагаемых МФПП позволяет разнести в пространстве ИМ и РО, благодаря чему воздухоудувный агрегат может быть установлен за пределами производственной зоны потенциально опасного объекта.

На рис. 2 представлены структурные схемы двух основных исполнительных систем линейки МФПП: напорного вертикального пневматического питателя (ВПП) непрерывного действия и вакуумно-напорного дискретного дозатора с частотно-импульсным управлением расходом. Определение характеристик этих систем является предметом исследования в настоящей работе.

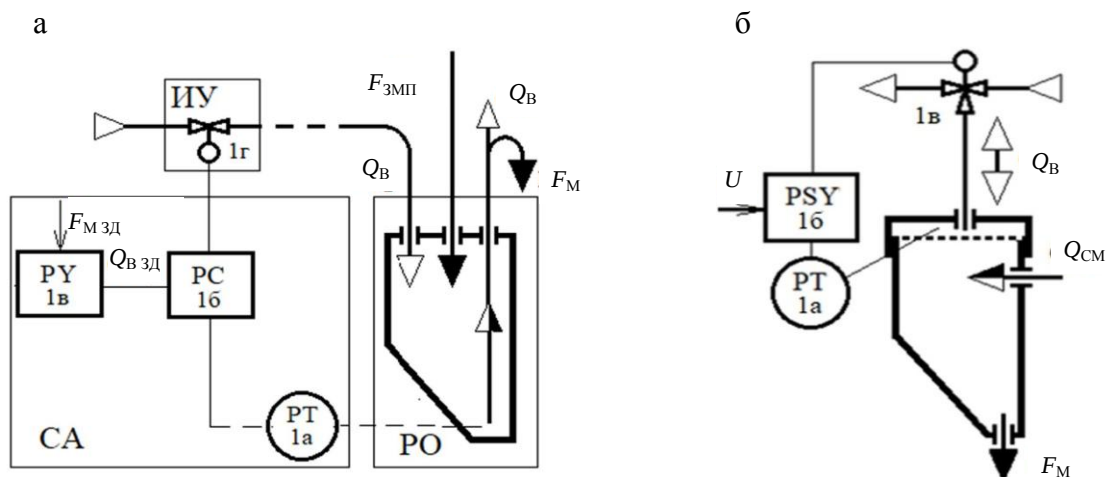


Рис. 2. Структурные схемы исполнительных систем на основе МФПП:
а – вертикальный пневматический питатель; б – вакуумно-напорный дозатор

Заполнение СК ВПП частицами 3СМ происходит непрерывным потоком $F_{3МП}$ по мере ее опорожнения вследствие уноса материала через выпускной ствол. Выходной расход материала F_M зависит от расхода поступающего в СК воздуха Q_B . Физическая реализация управления осуществляется с помощью ИУ (см. рис. 2а (поз. 1г)) на линии подачи воздуха. При постоянной величине воздуха (Q_B), подаваемого в течение различных промежутков времени, ВПП может осуществлять широтно-импульсную (ШИМ) или релейно-импульсную (РИМ) модуляцию расхода материала на выходе F_M .

При условии, что давление в СК при выдаче материала больше, чем давление столба насыщенного воздухом материала в ЗМП, заполнение СК начинается только после полного опорожнения СК. В этом случае выдача материала происходит в виде порций (доз) постоянного объема, а управление средним во времени расходом может осуществляться путем изменения частоты выдачи этих доз.

Вакуумно-напорный дозатор 3СМ загружается при подключении к СК через трехходовой кран (см. рис. 2б (поз. 1в)) линии всасывания вакуумного вентилятора. Из расходной емкости (на рис. 2б не показана) под действием внешнего (в частности, атмосферного) давления 3СМ заполняет СК вплоть до расположенной в ее верхней части решетки, задерживающей материал. При перекрытии частицами материала отверстий

решетки в камере над ней происходит скачок разрежения, фиксируемый мановакуумметрическим датчиком (см. рис. 2б, поз. 1а). Выходной сигнал этого датчика поступает в блок релейного управления (поз. 1б), в результате чего выполняется переключение трехходового крана (см. рис. 2б, поз. 1в) в положение, при котором избыточное давление с выходного коллектора вентилятора создает обратный поток воздуха через решетку в СК, активизируя ее опорожнение.

Основным недостатком систем пневматического побуждения расхода сыпучих материалов являются существенные энергетические затраты на расход воздуха. В наибольшей степени это присуще двухфазным потокам с управляемой подачей частиц твердой фазы, в которых объемная концентрация таких частиц обычно не превышает 5 % [3]. Задача снижения энергозатрат обычно решается путем конструктивных изменений, выполняемых с целью снижения аэродинамического сопротивления трассы [4]. Экспериментальные исследования характеристик базовых систем МФПП направлены на решение указанной задачи путем изменения режима подачи и формы управляющего воздействия.

Эксперименты проводились на лабораторной установке с верхним пределом диапазона расхода 400 кг/ч по твердой фазе. В качестве последней использовались гранулы органических веществ и полимеров с определяющими размерами от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м с плотностью материала $1\,000 \pm 250$ кг/м³. Цель эксперимента заключалась в определении расходной характеристики ВПП по твердой фазе. Подача воздуха осуществлялась центробежным вентилятором. Воздух подавался непосредственно в массу содержащегося в СК материала. Его расход изменялся дросселем на выходе вентилятора. Для контроля величины давления в СК применялся датчик низкого давления БД-1-И с диапазоном 0–10 кПа, расход несущего воздуха определялся по показаниям расходомера ЭМИС-МЕТА-215-025-Г с диапазоном 0,000 08–0,008 м³/с. Оба датчика имеют линейную статическую характеристику и аналоговый токовый выходной сигнал. Температура воздуха контролировалась термометром расширения ТТЖ-М исп. 1П4 с диапазоном 0–100 °С. Весовой расход материала F_M оценивался интегральным методом по весу W_M и длительности Δt выдачи дозы в соответствии с формулой $F_M = W_M / \Delta t$, кг/с. Для взвешивания дозы применялись тензометрические весы с приведенной погрешностью $5 \cdot 10^{-4}$ кг и электронный секундомер. Для анализа динамических характеристик ВПП выходные сигналы датчиков были собраны через 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь на микропроцессорный контроллер ОВЕН 160 и выведены в форме трендов на компьютер.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов подтвердили теоретические предположения о возможности использования настройки режимных параметров выдачи материала с целью сокращения удельных затрат воздуха на его перемещение.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты экспериментов с материалом следующих свойств: гранулы органического вещества, по форме близкие к сферическим; определяющий диаметр $(2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м; плотность $\rho_M = 1\,150$ кг/м³. Представлены статические зависимости параметров двухфазного потока «воздух – ЗСМ» на выходе ВПП при различных расходах несущего воздуха (рис. 3а). Функция 1 на рис. 3а построена в соответствии с регрессионным уравнением третьего порядка, аппроксимирующим расходную характеристику ВПП – зависимость массового расхода твердой фазы от

объемного расхода воздуха $F_M = f(Q_B)$. Аналогичные по характеру изменения параметров F_M и Q_B зависимости получены при исследовании двухфазного потока на загрузке вакуумно-напорного дискретного дозатора. Функция 2 на рис. 3а ($f(Q_B) = 0,1F_B / F_M$) свидетельствует о наличии минимума удельных затрат воздуха на перемещение материала при значении, равном $Q_{B \text{ опт}}$.

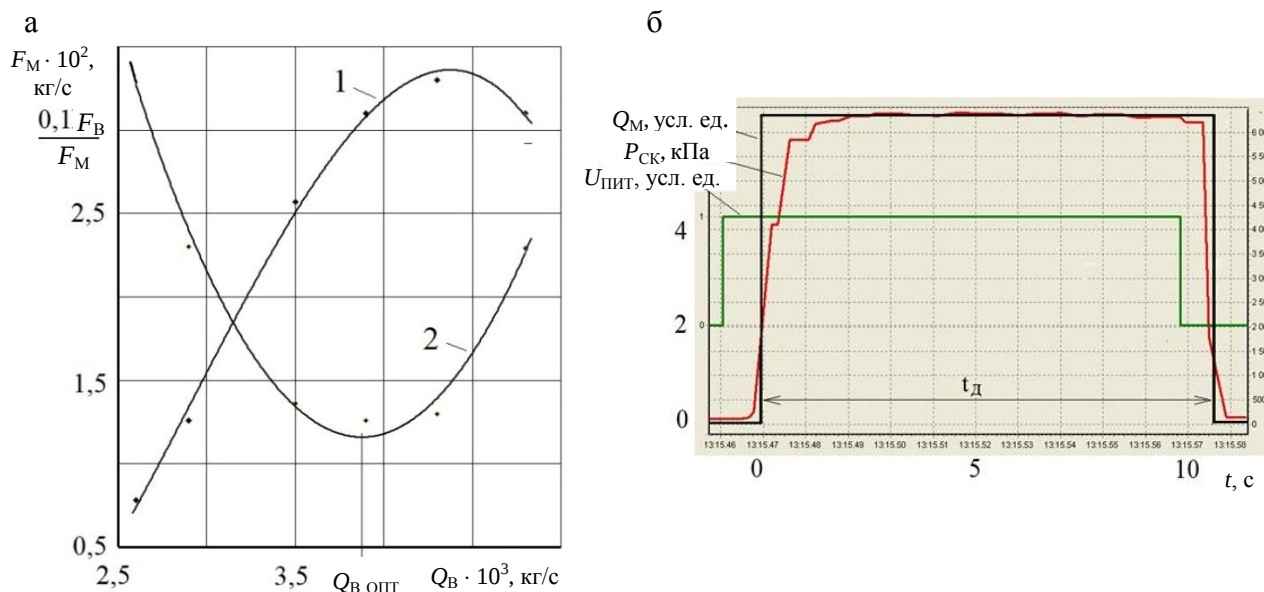


Рис. 3. Экспериментальные характеристики ВПП
в режиме непрерывного управления расходом:

а – статические; б – динамические; Q_M – объемный расход твердой фазы;
 $P_{СК}$ – давление в СК; $U_{ПИТ}$ – напряжение питания привода вентилятора

На рис. 3б представлена переходная характеристика ВПП по величине давления в СК с выходом на максимальное значение расхода материала. Из графика видно, что время нарастания давления $P_{СК}$ в СК до момента начала установившегося движения двухфазной смеси (1,5 кПа) и время переходного процесса до выхода давления на установившееся значение (единицы секунд) в совокупности минимум на порядок меньше, чем длительность выдачи материала (десятки секунд и более). Аналогичный вывод можно сделать относительно времени прекращения выдачи материала. Поскольку давление на входе в выпускной ствол коррелировано с расходом двухфазного потока через него, предлагается динамику изменения расхода твердой фазы аппроксимировать прямоугольным импульсом. С целью минимизации затрат электроэнергии на обеспечение требуемого расхода воздуха можно использовать систему импульсного управления расходом. При моделировании подача воздуха аппроксимируется последовательностью прямоугольных импульсов с широтно-импульсной (ШИМ), релейно-импульсной или частотно-импульсной (ЧИМ) модуляциями, причем мгновенная амплитуда импульса расхода $Q_{M \text{ мн}} = \text{const}$ должна соответствовать координате минимума относительных затрат воздуха (см. рис. 3а). При этом систему управления расходом ЗСМ с ШИМ можно рассматривать как дискретный питатель, а систему с ЧИМ – как частотно-импульсный

дозатор. Такой режим реализуется при условии, что в СК давление $P_{СК}$ больше, чем давление $P_{ЗМП}$ столба, насыщенного воздухом материала в ЗМП.

Управление расходом с применением ШИМ осуществляется путем изменения длительности выдачи материала t_d при постоянном периоде прерывания ($T_{и} = \text{const}$).

В режиме с ЧИМ на промежутке времени одного периода прерывания $T_{и} = \text{var}$ осуществляются набор и выдача единичной дозы. Управляющим параметром служит частота следования импульсов при постоянных величинах t_d и $Q_{ММН}$, т.е. выдача материала происходит дозами постоянного объема, который в общем случае выражается как

$$V_0 = \int_{t_1}^{t_2} Q_{ММН}(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где $t_2 - t_1 = t_d$ – длительность выдачи дозы.

При аппроксимации динамики выдачи материала прямоугольным импульсом уравнение (1) принимает вид

$$V_0 = Q_{ММН} \cdot t_d. \quad (2)$$

Если величина V_0 не задана из соображений технологии, то определение параметров импульсной последовательности в случае управления с ЧИМ требует специального рассмотрения.

Средний объемный расход материала можно определить как

$$Q_{МСР} = V_0 \cdot f = V_0 \cdot T_{и}^{-1}. \quad (3)$$

где $V_0 = \text{const}$ – объем единичной дозы; $f = \text{var}$ – частота выдачи доз, служащая параметром управления расходом; $T_{и}$ – переменный период следования импульсов.

Учитывая обратную зависимость, связывающую частоту и период следования импульсов, и используя уравнение (2), запишем выражение (3) для максимальной величины среднего расхода материала:

$$Q_{МСР}^{MAX} = \frac{Q_{ММН} \cdot t_d}{t_d + \Delta t}, \quad (4)$$

где Δt – минимальный промежуток времени между последовательными импульсами, необходимый для набора дозы в СК и срабатывания технических средств системы автоматического регулирования.

Производительность по среднему расходу в системах с ЧИМ ограничена необходимостью использовать значительную часть минимального периода выдачи доз на заполнение СК. Повысить величину максимально достижимого среднего расхода материала при сохранении минимального удельного расхода воздуха предлагается путем применения сдвоенной конструкции дозатора (например, на основе ВПП). На рис. 4а такая конструкция показана в виде схемы из двух дозаторов I и II, оборудованных аэроднищами, через которые в СК подается воздух. Материал поочередно выдается в приемный желоб III. Давление в СК I и II измеряется датчиками избыточного давления (рис. 4 (поз. 1а и 1б)). Их выходные сигналы поступают на контроллер (поз. 1в), в алгоритм работы которого заложена логическая схема управления клапанами (поз. 1г, 1д и 1е). Циклограмма работы сдвоенного дозатора в режиме максимальной производительности по расходу материала показана на рис. 4б. Промежуток времени между двумя последовательными выдачами доз сокращен до минимума, и в него входит время срабатывания технических средств автоматизации, а также определенная величина запаса по времени, исключающая возможность возникновения конфликтных ситуаций с наложением алгоритмов выдачи доз.

Таким образом, величина Δt априори известна. Поскольку величина $Q_{\text{мн}}$ определена из условия минимума энергетических затрат, решение уравнения (4) дает возможность определить длительность выдачи дозы t_d и сформировать временные параметры алгоритма управления расходом в режиме минимальных энергозатрат.

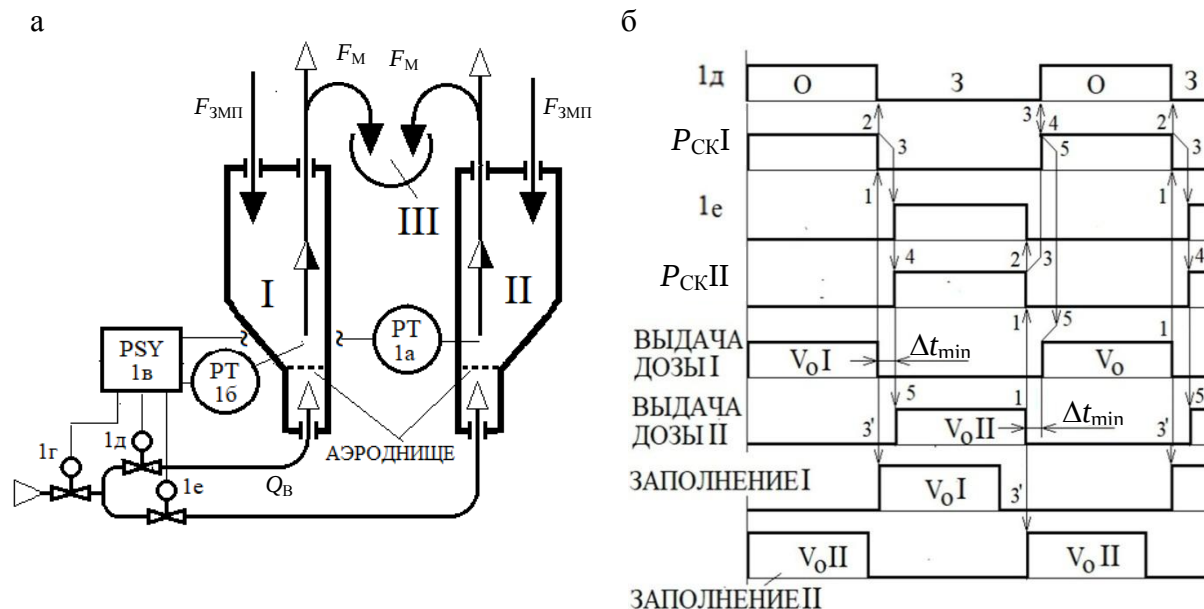


Рис. 4. Сдвоенный пневматический дозатор с ЧИМ управляющего сигнала:
а – структурная схема; б – циклограмма работы
в режиме максимальной производительности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была продемонстрирована возможность минимизации энергетических затрат при пневматической инициации движения ЗСМ, что позволило предложить для МФПП способы импульсного управления расходом сыпучих материалов в режиме минимальных удельных затрат на создание воздушного потока. Рассмотрены схемы технической реализации способа управления расходом ЗСМ и приведен способ расчета параметров импульсной последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешехонов А.А., Митрошин Д.Г., Чернуха М. Многофункциональные системы автоматической регламентации количества и расхода гранулированных материалов. *Сборник докладов Молодежной школы по проблемам управления в технических системах им. А.А. Вавилова*. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 51–53.
2. Okrepilov V.V., Peshekhonov A.A., Chernikova, A.V., Rudakova I.V. Batching Actuator Device for Granular Material: Innovative Methods and Systems // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 61. No. 11. P. 1074–1080.
3. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.

4. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Повышение энергетической эффективности пневмотранспортных систем. *Энергия инновации – 2012: Материалы отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ*: в 6 т. Иваново: ИГЭУ, 2013. Т. 1. С. 48–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕШЕХОНОВ Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации процессов химической промышленности, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26. E-mail: alanpeshekhonov@mail.ru

РУДАКОВА Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации процессов химической промышленности, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26. E-mail: arhp@spbti.ru

ЧЕРНИКОВА Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по учебной и методической работе, Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: chernikova_av@spbstu.ru

КУЗЬМИНА Светлана Николаевна – доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и систем качества, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. E-mail: kuzmina2003@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Пешехонов А.А., Рудакова И.В., Черникова А.В., Кузьмина С.Н. Энергосберегающее управление расходом зернистых сыпучих материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 34–43.

POWER SAVING GRANULAR BULK FLOW CONTROL

A.A. Peshekhonov¹, I.V. Rudakova¹, A.V. Chernikova², S.N. Kuzmina³

¹St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) (St. Petersburg)

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg)

³St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
named after V.I. Ulyanov (Lenin), (St. Petersburg)

Abstract. Automatic systems with volumetric flow control of bulk materials are considered. For a certain area of particle size distribution and density, the advantage of pneumatic feeders over systems with mechanical action on bulk materials is shown. To minimize energy consumption, it is proposed to control the flow rate of loose material in the form of pulses with variable duty cycle, the amplitude of which ensures minimum specific energy consumption by air flow rate. Energy-efficient management of granular bulk solids is an important challenge in

various industries such as agriculture, food processing, construction and others. Efficient management of the flow rate of such materials can significantly reduce the cost and environmental impact. The key aspects whose research can be useful in this area are such as: process optimization, data monitoring and analysis, energy efficient technologies, inventory management, personnel training, use of alternative energy sources, and waste reduction. These measures can help not only in reducing costs, but also in making the business more sustainable in the face of changing market and environmental requirements.

Keywords: granular bulk materials, volumetric flow control, pulse control, minimum power consumption.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PESHEKHONOV Alexey Anatolievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Chemical Industry Processes, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia. E-mail: alanpeshekhonov@mail.ru

RUDAKOVA Irina Viktorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Chemical Industry Processes, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia. E-mail: aphp@spbti.ru

CHERNIKOVA Anna Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Educational and Methodological Work, Institute of Industrial Management, Economics and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: chernikova_av@spbstu.ru

KUZMINA Svetlana Nikolaevna – Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Management and Quality Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197022, Russia. E-mail: kuzmina2003@bk.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Peshekhonov A.A., Rudakova I.V., Chernikova A.V., Kuzmina S.N. Power saving granular bulk flow control // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 33–43.