

Оптимизация режимов пневматического управления расходом сыпучих материалов

А. А. Пешехонов¹, Д. Г. Митрошин²,

И. В. Рудакова³

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)

¹alanpeshekhonov@mail.ru, ²mitroshindg@yandex.ru,

³riv-lilu@yandex.ru

А. В. Черникова

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого

a-v-chernikova@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются инновационные методы и средства оптимизации управления расходом сыпучих материалов. Приводятся результаты экспериментальных исследований и моделирования непрерывных и дискретных автоматических систем регулирования расхода твёрдой фазы в двухфазном потоке «газ – сыпучий материал». Предложена методика априорного синтеза структуры и параметров исполнительных устройств.

Ключевые слова: сыпучие материалы; пневматическое управление; дискретные дозаторы; оптимальные рабочие характеристики; многокритериальная оптимизация

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость контроля переменного расхода сыпучих материалов (СМ) характерна для технологических процессов химической, пищевой, фармацевтической и металлургической отраслей промышленности, в производстве строительных материалов. При этом часто возникает задача учёта интегрального количества СМ. Если переменная подача СМ в технологические аппараты выполняет функцию управляющего воздействия, то здесь появляется необходимость управления его расходом. В качестве систем, позволяющих объединять функции измерения расхода, учёта количества и управления расходом СМ используются дозаторы. Далее дозатор будем рассматривать как систему, предназначенную для отмеривания и выдачи заданного количества материала с погрешностью, не превышающей определённой величины [1]. Структурно дозатор представляет собой замкнутую систему регулирования с обратной связью по количеству материала и состоит, как минимум из двух элементов – исполнительного устройства (ИУ) и устройства управления. Различают объёмный [2] и весовой (массовый) [3] методы дозирования, при этом выдача материала и в том, и в другом случае может вестись в непрерывной [4, 5] или в дискретной [1, 6] форме. Изменяя задание дозаторам непрерывного действия, можно обеспечить непрерывное управление расходом. В режиме дискретного дозирования расходом можно управлять, изменяя частоту и/или, длительность выдачи доз. Последний способ применяется реже. Информацию о текущем расходе материала

получают непосредственно по величине задания дозатору. О количестве материала, проходящего через систему дозирования, судят по интегралу от расхода по времени.

Требования, предъявляемые к автоматическим дозаторам, определяются условиями конкретного производства, однако среди них можно выделить наиболее общие. К ним относятся: обеспечение заданного диапазона расхода, минимальная погрешность по количеству (расходу) дозируемого материала; надёжность функционирования; безынерционное прекращение подачи; возможность повторного включения под нагрузкой; выполнение условий экологической и технической безопасности; обеспечение комфортных условий для производственного персонала. Эффективность применения систем дозирования зависит также от их энергоёмкости и капитальных затрат. Важным условием надёжного функционирования автоматических дозаторов СМ является способ создания перемещающего усилия. По этому признаку оборудование можно разделить на гравитационное, механическое и пневматическое. К первой группе относятся устройства свободного истечения и устройства с аэрацией и/или вибрационным воздействием на материал с целью снижения трения между частицами. При этом движению частиц способствует только сила тяжести. По данным [7] непрерывное дозирование при гравитационном истечении практически не эффективно. Для управления расходом в качестве исполнительных устройств (ИУ) традиционно применяются механические автоматические питатели и дозаторы, принцип действия которых основан на весовом или, реже, на объёмном отмеривании количества материала. Техническая реализация механических методов и систем непрерывного дозирования и управления расходом СМ [4, 5, 8], практически не изменявшаяся в течение предшествующих десятилетий, во многом не отвечает современным требованиям по показателям точности, надёжности, быстродействия, экологической и технической безопасности. Причинами этого является неполная герметичность и главное – наличие значительного числа кинематических пар, функционирующих в условиях запыленности и засорения мелкими фракциями СМ. К недостаткам механических

систем управления расходом СМ следует отнести их высокие металлоёмкость и стоимость.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве перспективной альтернативы механическим ИУ для СМ разработаны пневматические системы, преимуществами которых является полная герметичность и принципиальное отсутствие подвижных элементов, находящихся в контакте с СМ. Принцип действия предлагаемых дозаторов, базируется на пневматическом транспортировании частиц твёрдой фазы в потоке газа, т. е. движущая сила создаётся за счёт перепада давления на слое частиц [9]. За основу выбрано нестеснённое перемещение СМ с объёмной концентрацией твёрдых частиц $\sigma_v < 0,05$ по короткому вертикальному трубопроводу. Преимуществом вертикального перемещения двухфазной смеси в таких условиях является возможность мгновенного прекращения подачи и её возобновления без дополнительных изменений режима. Минимальная концентрация твёрдых частиц в потоке, позволяет обеспечить достаточно широкий диапазон регулирования расхода. Феноменологическое уравнение для определения объёмного расхода твёрдой фазы в двухфазном потоке [10] можно записать как

$$Q_M = u_M \cdot S_{TP} \cdot \sigma_v$$

где u_M – средняя скорость частиц твёрдой фазы; S_{TP} – площадь сечения выпускного трубопровода; σ_v – объёмная концентрация твёрдой фазы. С учётом наличия разности между скоростью несущего газа v_B и скоростью частиц $\Delta v = v_B - u_M$, относительно расхода несущего газа Q_B расчетное выражение для расхода СМ имеет вид:

$$Q_M = [Q_B - S_{TP} \cdot \Delta v(Q_B)] \cdot \sigma_v(Q_B)$$

По этому выражению можно определить статическую зависимость расхода СМ от расхода несущего газа, что служит основанием для реализации систем с пневматическим управлением расходом и дозирования. Аналитические зависимости разности скоростей Δv и объёмной концентрации твёрдой фазы от расхода газа в двухфазном потоке в общем случае неизвестны, поскольку определяются конкретными параметрами частиц СМ, газа и трубопровода [11], поэтому в последующих расчетах использованы статические характеристики ИУ питателей и дозаторов, полученные в результате экспериментов.

Базовым элементом таких автоматических пневматических питателей и дозаторов является вертикальный пневматический питатель (ВПП) непрерывного действия (рис. 1). Питатель представляет собой ёмкость 1, к которой подключены загрузочный 2 и выпускной 3 трубопроводы, а также воздухопровод 4, соединённый с воздушным агрегатом 5. К камере, в области входа в выпускной трубопровод, подключён датчик давления 6, выход которого подключён к регулятору (РС) 7, определяющим производительность воздушного агрегата. СМ самотёком, или под действием дополнительного давления, поступает по загрузочному трубопроводу 2 в ёмкость 1, где

смешивается с газом, например, с воздухом, поступающим по воздухопроводу 3. Под действием перепада давления $\Delta P = P_K + P_{вн} - P_{вн}$ между давлением в камере P_K и внешним давлением $P_{вн}$ на выходе из выпускного трубопровода смесь материала с воздухом вытесняется по выпускному трубопроводу в технологический аппарат или ёмкость.

Расход твёрдой фазы при этом определяется текущей величиной давления в камере, что позволяет регулировать количество выдаваемого материала, изменяя задание регулятору 7, выходной сигнал которого определяет производительность воздушного агрегата 5 [12]. Изменять давление в камере можно также, подключив выход регулятора 7 к дроссельному клапану 8, с помощью которого часть подаваемого в смесительную камеру воздуха сбрасывается в атмосферу. Если давление в смесительной камере меньше давления, удерживающего материал в загрузочном трубопроводе, заполнение камеры происходит непрерывно по мере её опорожнения. В противном случае материал удерживается в загрузочном трубопроводе до полного опорожнения камеры. После этого давление в смесительной камере падает, срабатывает реле-регулятор давления PS, поз.7, подача воздуха прекращается, и камера заполняется вновь. Таким образом, ВПП выполняет функции дискретного объёмного дозатора СМ с фиксированной скоростью выдачи дозы (ДФС) [13]. Смесительная камера 1 в этом случае служит мерной ёмкостью. Управление средним во времени расходом материала $Q_{ср}$, поступающего в технологический объект, осуществляется в соответствии с уравнением частотно-импульсной модуляции последовательности доз постоянного объёма $Q_{ср} = V_o f(\mu)$ где $V_o = \text{const}$ – объём дозы; $f(\mu)$ – закон частотно-импульсной модуляции непрерывного управляющего сигнала μ . Аналогично осуществляется управление расходом СМ и при подаче при помощи дискретного вакуумного дозатора (ДВД) объёмного действия (рис. 2). При откачивании воздуха из мерной ёмкости 1, последняя, под действием внешнего давления заполняется материалом по загрузочному трубопроводу 2.

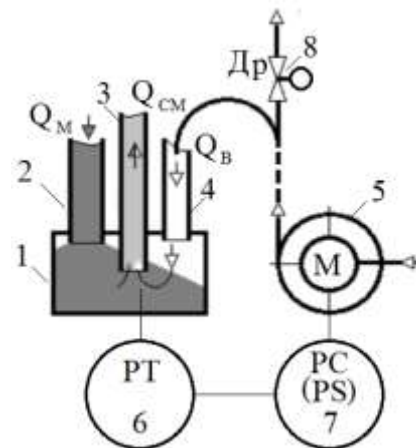


Рис. 1. Принципиальная схема напорного ИУ непрерывного/дискретного действия

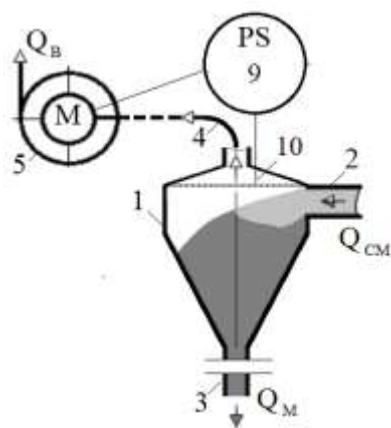


Рис. 2. Принципиальная схема дискретного вакуумного дозатора

При достижении слоем материала фильтра 10 снизу, разрежение в воздуховоде 4 над фильтром возрастает, что служит сигналом для срабатывания реле-регулятора 9, выходной сигнал которого прерывает работу откачивающего из камеры воздух агрегата 5. Выдача дозы осуществляется через выпускной трубопровод 3 под действием силы тяжести или при подаче дополнительного давления в камеру [14].

Независимо от применяемой схемы пневматического управления подачей СМ, при практической реализации возникает задача определения оптимального режима работы дозатора в соответствии с достижением заданных требований по эффективности и качеству функционирования. Из приведённого ранее перечня в данной работе выделяются четыре основополагающих показателя: максимальное быстродействие (максимальная производительность), высокая надёжность, минимальная погрешность отмеривания дозы СМ и минимум энергетических затрат. При необходимости этот перечень может быть расширен. При этом устанавливаются ограничения по реально достижимым физическим значениям скорости движения двухфазной смеси, расходу несущего воздуха и давления в ёмкости. Чтобы обеспечить работу ИУ в оптимальном режиме с учетом нескольких разноплановых критериев, после запуска рабочего прототипа экспериментально снимаются зависимости расходов воздуха и твердой фазы от давления (для напорного ИУ) или от перепада давления между атмосферным давлением и разрежением, создаваемым на входном коллекторе воздуходувного агрегата (для вакуумного ИУ). Далее решается задача выбора оптимального значения рабочего давления. В качестве примера решения задачи многокритериальной оптимизации на рис. 3 приводятся опорные характеристики ДВД, которые приведены к одному масштабу через относительные отклонения частных критериев от их минимальных значений $f_k(\Delta P) \in [0,1]$, $k \in [1, 4]$.

- $f_1(\Delta P)$ – расходная характеристика – зависимость массового расхода твёрдой фазы F_m от величины действующего перепада давления ΔP при переносе

двухфазной смеси. Экспериментально установлено и подтверждено теоретически, что эта характеристика существенно нелинейна, и имеет максимум: $f_1(\Delta P) \rightarrow \max$.

- $f_2(\Delta P)$ – относительные затраты воздуха на перемещение СМ в двухфазном потоке при изменении давления в рабочем диапазоне. Характеристика имеет экстремум $f_2(\Delta P) \rightarrow \min$. Вид характеристик определяется процессами, происходящими в вертикальном потоке двухфазной смеси «газ – твёрдые частицы»: при увеличении расхода, после достижения газом-носителем скорости витания транспортируемых частиц, начинается их ускоренное перемещение, которое замедляется по мере возрастания внутреннего сопротивления и сопротивления трения частиц о стенки выпускного ствола из-за увеличения их истинной объёмной концентрации. При этом величина концентрации зависит не только от скорости, но и от расхода воздуха. При достаточно большой величине сопротивления двухфазному потоку увеличение скорости воздуха приводит не к увеличению, но к возрастающему уменьшению расхода твёрдой фазы.
- $f_3(\Delta P)$ – монотонно возрастающее соотношение между ΔP и величиной давления P_k , определяющего надёжное срабатывание датчиков окончания набора дозы.
- $f_4(\Delta P)$ – зависимость между ΔP и относительной погрешностью δW по величине дозы, определённой весовым методом: $f_2(\Delta P) \rightarrow \min$.

Предварительно все критерии приводятся к виду $f_k \rightarrow \max$. Чтобы учесть важность каждого частного критерия по отношению к общему выводу, использовано их ранжирование с весовыми коэффициентами S_k , представляющими собой экспертные оценки.

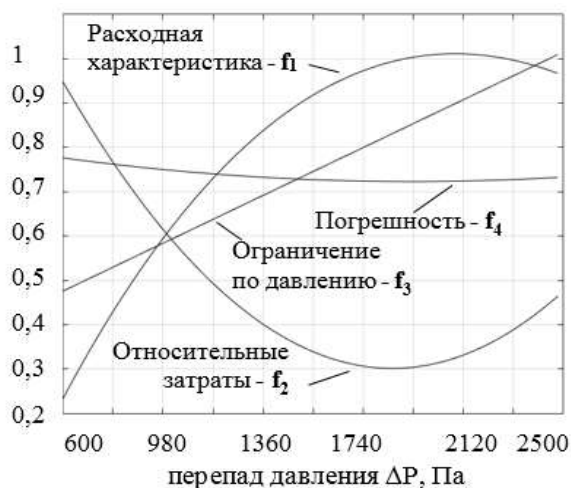


Рис. 3. Нормализованные критериальные характеристики пневматических ИУ

Физическое ограничение перепада давления снизу P_{\min} связано с созданием условий развития в системе «газ – твёрдые частицы» скорости воздуха превышающей скорость витания частицы. Ограничение сверху по ΔP определено резким повышением гидравлического сопротивления. Сформированная в общем виде задача многокритериальной оптимизации для синтеза режима работы ДВД с учетом физических ограничений имеет вид:

$$f_k(\Delta P) = \sum_{i=0}^n a_{i+1} \Delta P^{n-i} \rightarrow \max;$$

$$\sum_{k=1}^4 C_k = 1; P_{\min} \leq \Delta P \leq \max f_2(\Delta P).$$

Используемые методы многокритериальной оптимизации выбраны с учетом достижения требуемой точности определения оптимального значения и с возможностью формирования алгоритмической части метода в составе прикладного программного обеспечения. ДВД. Так как априорный расчет оптимального режима на стадии проектирования невозможен из-за отсутствия полной математической модели системы перемещения СМ в потоке газа, то настройка будет производиться после первых пуско-наладочных работ и целесообразно реализовать методику расчета в составе программного обеспечения устройства управления дозатора.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета комплексных целевых функций u_j приведены на рис. 4. Для определения компромиссного оптимума по ΔP использованы: многокритериальная оптимизация на основе макс-минной свёртки (u_1 – целевая функция, обобщающая частные функционалы), метод сравнения с идеальной альтернативой на основе аппарата нечёткой логики (u_2 – целевая функция на базе расстояния Хемминга) [15] и метод справедливого компромисса с использованием множества Парето (u_{31} и u_{32} – относительное снижение и повышение качества решения при переходе от одного решения к другому) [16].

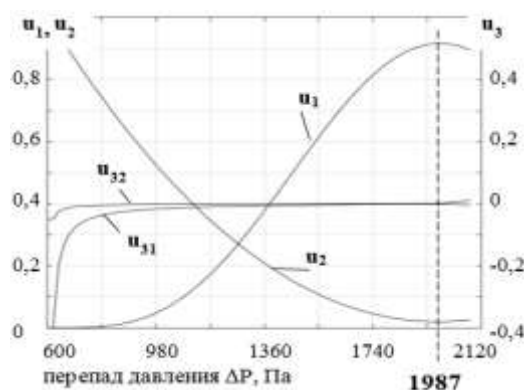


Рис. 4. Результаты расчёта оптимального значения давления

Первый критерий при классической реализации дает достаточно грубое приближение, поэтому в рамках данной работы использована алгебраическая интерпретация операции пересечения. Использование в качестве базовой функции расстояния Хемминга обусловлено простотой

расширения метода и способа ввода весовых коэффициентов. Из совокупности методов оптимизации, базирующихся на множестве Парето, предпочтение отдано методу компромисса, так как он работает с относительными изменениями частных критериев и не требует специальной предварительной нормализации. Предварительное нормирование частных критериев в диапазоне $[0,1]$ позволяет отождествить их значения с функциями принадлежности для первого и второго критериев. В первых двух случаях нормированные значения частных критериев рассматриваются как аналог функции принадлежности к лингвистическому понятию «оптимальное значение аргумента». Ограничение по критерию $f_2(\Delta P)$ уменьшает область определения оптимального ΔP . Точки оптимума для первого и второго методов (рис. 4, кривые u_1 и u_2) совпали на значении $\Delta P_{\text{опт}} = 1987$ Па. Результат, полученный с помощью метода компромисса u_3 , отличается незначительно: $\Delta P_{\text{опт}} = 1968$ Па. Данное расхождение при практическом применении может быть отнесено к условию попадания в 5% зону регулирования. С учетом минимальной сложности программной реализации, для практического применения целесообразно использование метода u_1 или u_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гуревич А.Л. Автоматическое дозирование жидких сред / А.Л. Гуревич, М.В. Соколов. Л.: Химия, 1987.
- [2] Катыльков А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Катыльков, В.А. Любартвич. Л.: Химия: Ленингр. отд., 1990. 240 с.
- [3] Першина С.В. Весовое дозирование зернистых материалов / С.В. Першина, А.В. Катыльков, В.Г. Однолюбо, В.Ф. Першин. М.: Машиностроение, 2009. 260 с.
- [4] Видинеев Ю.Д. Автоматическое непрерывное дозирование сыпучих материалов / Ю.Д. Видинеев. 2-е изд. М.: Энергия, 1974. 120 с.
- [5] Синицын Б.Н. Дозаторы непрерывного действия – средства автоматизации процессов дозирования. Обзорная информация / Б.Н. Синицын, А.С. Ерохин. М., 1982.
- [6] Шушпанников А.Б. Моделирование процесса порционного дозирования / А.Б. Шушпанников, Б.А. Федосенков // Техника и технология пищевых производств. 2010. № 2 (17).
- [7] Рогинский Г.А. Дозирование сыпучих материалов / Г.А. Рогинский. М.: Химия, 1978. 176 с.
- [8] Орлов С.П. Дозирующие устройства / С.П. Орлов. М.: Машиностроение, 1966. 146 с.
- [9] Peshekhonov A.A. Pneumatic actuator for bulk material flow control and its diagnostics/ A.A. Peshekhonov, V.V. Kurkina, R.V. Zaytsev, N.V. Vorobiev // Automation and Remote Control. Pleiades Publishing, LTD.: May 2014, Volume 75, Issue 5, pp 953-958.
- [10] Разумов И.М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности / И.М. Разумов. М.: Химия, 1979. 248 с.
- [11] Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.
- [12] Пат. РФ № 2554327 / А.А. Пешехонов. Способ управления непрерывным расходом сыпучего материала и устройство для его осуществления; Оpubл. 27.06.15 Бюл. № 18.
- [13] Пат. РФ № 2503932 / А.А. Пешехонов, Р.В. Зайцев. Способ объемного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления; Оpubл. 10.01.14 Бюл. № 1.
- [14] Пат. РФ № 2620905 / А.А. Пешехонов, И.В. Рудакова. Способ автоматического дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления; Оpubл. 30.05.17 Бюл. № 16.
- [15] Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений / И.Г. Черноруцкий. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
- [16] Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход / В.Д. Ногин. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 176 с.