

Электромагнитные дозаторы: проблемы и перспективы

С.Б. Кавригин

Электромагнитные дозаторы (ЭМД) – это новый класс приборов, который появится в ближайшее время. Появление ЭМД, как самостоятельного класса, обусловлено двумя причинами. Во-первых, совершенствование электромагнитных расходомеров позволило реализовать в одном приборе высокую точность (0,25 – 0,5% отн. погрешности) при вполне удовлетворительных динамических характеристиках (время установления 0,1 – 0,5 сек.). Во-вторых, существуют чисто технические трудности при совмещении функций расходомера и дозатора и, в то же время, сохранении всего объёма сервисных возможностей обоих приборов.

Представляется, что ЭМД могут найти применение в следующих случаях:

- непрерывное пропорциональное дозирование: водоподготовка, реагентное хозяйство объектов тепло- и электроэнергетики, водоканалы;
- фасовочные автоматы жидких продуктов в пищевой, фармацевтической и химической промышленности;
- порционное дозирование при приготовлении смесей в стройиндустрии, пищевой, химической и других отраслях.

Пищевая промышленность предъявляет достаточно жёсткие требования к дозаторам жидких продуктов. Вот некоторые из них:

- высокая точность (погрешность не более 1% от объёма дозы);
- широкий диапазон объёмов доз (от 0,05л до 10л);
- время налива от 1 сек.;
- необходимость стерилизации, в том числе острым паром;
- конструктивное оформление, исключающее труднодоступные места.

При фасовке жидких продуктов традиционно применяются объёмные (например, поршневые) или массовые дозаторы. В отличие от них, ЭМД не требует технического обслуживания, не создаёт в системе застойные зоны (что существенно усложняет стерилизацию), позволяет легко перенастраивать автомат на любые дозы, и относительно дешев. Однако при проектировании фасовочного автомата необходимо учитывать особенности ЭМД: зависимость точности измерения от профиля пропускаемого потока, а значит, и от вязкости жидкости, и ограничения минимального объёма дозы, связанные с динамическими характеристиками ЭМД [3].

Попробуем проанализировать возможную гидравлическую схему автомата для малых и средних предприятий пищевой промышленности с объёмом переработки от 3 до 15 тонн.

Порожня таря поступает на фасовку по конвейеру. Подготовка и подача тары, как правило, занимает 3 – 5 сек. Время налива 1л (типичный объём) – 8 – 10 сек, то есть время цикла не более 15 сек. Таким образом, автомат должен

обеспечивать одновременный налив по 6 – 8 раздаточным линиям, при этом максимальная сменная производительность будет составлять 15 – 16 тонн.

Гидравлическая схема автомата достаточно проста: продукт поступает (нагнетается) в расходную ёмкость (РЕ) по трубопроводу. Уровень продукта в РЕ контролируется уровнемером или двухканальным сигнализатором уровня. Разбор осуществляется через 6 – 8 раздаточных линий, врезанных в нижнюю часть РЕ. Каждая линия содержит ЭМД, дроссельное устройство (например, шаровой кран с приводом) для задания расхода и отсечной клапан.

Оценим основные конструктивные характеристики автомата: минимальный объём РЕ, длину прямолинейного участка перед ЭМД, максимальный расход вязкой жидкости для заданного D_v и приемлемой высоты столба жидкости в РЕ. По экономическим соображениям высота РЕ не должна превышать 0,5 – 0,6 м. По ряду причин, о которых будет упомянуто ниже, для достижения наибольшей точности дозирования изменение расхода при пропуске дозы не должно превышать 3 – 5%, поэтому при высоте столба $H = 0,5$ м изменение высоты $\Delta H \leq 0,05$ м. Автомат рассчитан на одновременный налив $n = 8$ доз по 1,5 л, поэтому минимальный объём РЕ:

$$V = n \cdot V_g \cdot \frac{H}{\Delta H} = 8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{0,05} = 0,12 \text{ м}^3,$$

Определим максимальный (теоретический) расход невязкой жидкости. Воспользуемся уравнением Бернулли:

$$H + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{константа}.$$

Преобразуем для двух сечений схемы: зеркала продукта в РЕ и сечения в отсечном клапане:

$$H_{PE} + \frac{P_{PE}}{\gamma} + \frac{V_{PE}^2}{2g} = H_{кл} + \frac{P_{кл}}{\gamma} + \frac{V_{кл}^2}{2g},$$

здесь: $H_{PE} = H$, $H_{кл} = 0$, $P_{PE} = P_{кл} = P_0$ - атмосферное давление, $V_{PE} \approx 0$, то есть динамический напор жидкости в РЕ пренебрежимо мал. Тогда:

$$V = (2gH)^{0,5} \quad \text{и} \quad Q_m = \frac{\pi \cdot D_y^2 (2gH)^{0,5}}{4},$$

где: V – скорость истечения невязкой жидкости при коэффициенте расхода $\mu = 1$; Q_m - расход. Для $D_y 15$ получим $Q_m = 33$ л/мин.

Для оценки реального расхода жидкостей с ненулевой вязкостью необходимо определить коэффициент расхода μ , так как

$$Q = \mu \cdot Q_m.$$

Известно, что μ зависит от величины относительного дефицита скорости, коэффициента сужения струи, формы отверстия, профиля сопряжения стенки РЕ и раздаточной линии. Для простоты воспользуемся формулами Альтшуля [1], которые обеспечивают достаточную для практики точность:

$$Q = \left(0,592 + \frac{0,27}{\text{Re}^{0,17}} \right) \cdot Q_m \quad (1)$$

в диапазоне $300 < \text{Re} < 10^4$, и

$$Q = \left(0,592 + \frac{5,5}{\text{Re}^{0,5}} \right) \cdot Q_m \quad (2)$$

в диапазоне $\text{Re} > 10^4$. Очевидно, что в данном случае числа Рейнольдса определяются вязкостью продукта:

$$\text{Re} = \frac{(2gH)^{0,5}}{\nu} \cdot D_y.$$

Для маловязких продуктов (молоко, соки) вязкость $\nu \approx (1,2 - 3,1) \cdot 10^{-6}$ м²/сек, поэтому:

$$1,5 \cdot 10^4 < \text{Re} < 4 \cdot 10^4.$$

Для вязких продуктов (йогурт, сок с мякотью) $\nu \approx (0,8 - 2,0) \cdot 10^{-4}$ м²/сек, поэтому:

$$200 < Re < 600.$$

Подставляя в (1) и (2), получим расходы при полностью открытой регулирующей задвижке. В зависимости от вида продукта эти расходы будут от 18 -20 л/мин. В режиме дозирования расходы будут задаваться регулирующей задвижкой. Величина оптимального расхода зависит от конструктивных особенностей конкретного автомата: производительности, времени цикла, времени подготовки, подачи и съёма тары. Типичные расходы на существующем оборудовании лежат в диапазоне от 1,5 до 7,5 л/мин (фасовка по 1 л). При расчёте режимов фасовки необходимо учитывать следующее обстоятельство: измерительный сигнал электромагнитного датчика зависит, в общем случае, от профиля потока, поэтому погрешность ЭМД при определённых условиях может существенно увеличиваться. Изменение профиля в условиях развитого ламинарного или турбулентного потоков легко учитывается при калибровке системы при вводе в эксплуатацию. Суть калибровки поясним ниже. Однако при работе в зоне перемежающейся турбулентности погрешность измерения меняет свой характер и становится случайной. В литературе приводятся различные границы неустойчивой зоны:

$$10^3 < Re < 2 \cdot 10^4.$$

При разработке и испытаниях широкодиапазонных расходомеров специалистами ЗАО «Взлёт» получены достаточно достоверные данные, что в диапазоне

$$10^3 < Re < 4 \cdot 10^3$$

случайная погрешность возрастает на 0,7 - 1,0%. Таким образом, можно определить зону нежелательных расходов:

$$0,8 D_y < Q/\nu < 3 D_y, \quad (3)$$

где: Q – расход в м³/сек, D_y - в мм, ν – кинематическая вязкость в м²/сек.

Например, при фасовке цельного молока при 20°С через D_y 15 мм нежелательны расходы от 1,25 л/мин до 4,5 л/мин.

Оценим длину прямолинейных участков, необходимых для стабилизации профиля скоростей потока. Известно, что при истечении вязкой жидкости (в нашем случае – из РЕ в раздаточную линию) профиль скоростей стабилизируется на некотором расстоянии от входа. Длина участка

стабилизации зависит от многих факторов: профиля входа, характера потока, числа Re , а следовательно, от вязкости жидкости, от шероховатости стенок трубы и т.д. При определённых условиях длина участка может превышать $80 D_y$. Понятно, что учесть все факторы затруднительно, однако с достаточной точностью длину участка стабилизации описывает следующее выражение:

$$\frac{L}{D_y} = \frac{0,52}{\lambda} \quad (4)$$

- для развитого турбулентного потока и

$$\frac{L}{D_y} = \frac{2,56}{\lambda} \quad (5)$$

- для развитого ламинарного потока. Здесь λ – коэффициент Дарси при равномерном движении жидкости. Коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения) для труб промышленного изготовления с естественной шероховатостью можно определить по выражению:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{D_y} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

где: Δ – эквивалентная шероховатость.

Для стальных бесшовных труб при тщательном изготовлении (стыки и швы отсутствуют) значения эквивалентной шероховатости находятся в диапазоне $0,015 - 0,04$. Наиболее вероятное значение $0,025$ [2].

Подставляя коэффициент Дарси для диапазонов

$$4 \cdot 10^3 < Re < 10^4 \quad \text{и} \quad Re < 200,$$

где числа Re определяются для маловязких и вязких продуктов с учетом выражения (3), получим длину участка стабилизации $(12 - 15)D_y$ для маловязких и $8 D_y$ для вязких продуктов.

Таким образом, фасовочный автомат средней производительности должен иметь расходную ёмкость объёмом не менее $0,12 \text{ м}^3$ с высотой столба не менее $0,5 \text{ м}$ (например, $1200 \times 200 \times 500 \text{ мм}$), $6 - 8$ раздаточных линий $D_y 15 \text{ мм}$. Длина прямолинейных участков перед ЭМД должна быть не менее $220 - 250 \text{ мм}$.

В рабочем режиме ЭМД должен формировать сигнал «СТОП» на закрытие отсечного клапана по достижении заданной дозы. Характерной

особенностью применяемых клапанов является достаточно высокая стабильность времени срабатывания как на открывание, так и на закрывание. Это объясняется тем, что раздаточные линии низконапорные, расходы невелики, поэтому усилие на исполнительном элементе клапана постоянно. Однако само по себе время срабатывания достаточно велико и может достигать сотен миллисекунд. Клапан открывается при отсутствии расхода, а закрывается на номинальном расходе, поэтому времена срабатывания не компенсируют друг друга, как это происходит, например, на «перекидке» проливных стендов. Таким образом, сигнал «СТОП» необходимо формировать с некоторым упреждением, величина которого зависит от текущего расхода.

Если V_g – объём заданной дозы, а V_n – фактически набранный объём, то:

$$V_n = V_g + \Delta V.$$

Объём ΔV набирается за время Δt , т.е. за интервал времени от подачи сигнала «СТОП» до момента уменьшения расхода до величины установленной отсечки (или до нуля). Если доза набирается на стабильном расходе Q_n , то сигнал «СТОП» необходимо формировать в тот момент, когда

$$V_n = V_g - Q_n \Delta t \quad (6)$$

В общем случае:

$$V = \int Q(t) dt,$$

поэтому (6) будет давать некоторую погрешность. $Q(t)$ – достаточно гладкая функция, поэтому dQ/dt при $\Delta t \ll t$ (t – время набора дозы) – постоянная величина, тогда погрешность будет иметь вид:

$$\delta = \frac{Q_{CT} \Delta t}{2(V_{CT} + \Delta V)},$$

где: Q_{CT} и V_{CT} – расход и объём, при которых формируется сигнал «СТОП». Алгоритм несколько усложняется:

$$V_{CT} = V_i \quad \text{при котором}$$

$$V_i + Q_i \Delta t = V_g.$$

Детальный анализ показывает, что если $\Delta t : 0,1t_n$, а изменение расхода ΔQ не превышает 3%, то дополнительная погрешность по дозе менее 0,3%.

Величина Δt – индивидуальная для данного клапана, поэтому при вводе в эксплуатацию необходима калибровка линии. ЭМД в режиме калибровки определяет Δt :

$$\Delta t = \left(1 - \frac{Vg}{Vh}\right) \cdot tH,$$

что следует из выражения (6). Полученное значение запоминается и используется при дозировании. Единственное условие – это стабильность расхода при калибровке, поэтому последовательно калибруется каждая линия.

В настоящее время ЭМД , в котором реализованы алгоритмы, описанные в данной работе и в [3], проходит испытания на стенде ЗАО «Взлёт».

Литература:

1. Рабинович Е.З. Гидравлика, М., 1963.
2. Штеренлихт Д.В. Гидравлика, т.1, М., 1991.
3. Кавригин С.Б. Электромагнитные дозаторы// Мир измерений и учёта, Материалы симпозиума, май 2004.

Сведения об авторах:

Кавригин Сергей Борисович - главный эксперт по электромагнитным приборам, ЗАО «Взлёт».