

Эжекционные дозаторы для жидких реагентов

Проблема обработки жидкостей химическими реагентами, в частности ингибиторами коррозии и солеотложения, актуальна во многих отраслях промышленности — в химической, нефтяной и нефтехимической, в энергетике, водоснабжении. Как правило, необходимые химические реагенты используются в жидком виде. Задача состоит в том, чтобы обеспечить подачу жидкого реагента в обрабатываемую жидкость таким образом, чтобы при изменении ее расхода поддерживалась постоянная пропорция дозирования

$$K = q''/q' \quad (1)$$

где q'' — расход жидкого реагента; q' — расход обрабатываемой жидкости.

Для достижения этой цели применяются дозаторы, автоматически поддерживающие заданную пропорцию дозирования. Действие дозаторов инжекционного типа основано на использовании насоса с регулируемой подачей жидкого реагента. Для управления работой такого насоса используется система автоматического управления, которая включает датчик расхода обрабатываемой жидкости, микропроцессорный регулятор и исполнительный механизм. Устройства этого типа обеспечивают достаточно высокую точность дозирования, однако конструктивно они сложны, для них требуются внешний источник энергии, высококвалифицированная наладка и техническое обслуживание. Поэтому такие устройства применяются преимущественно в химических цехах электростанций и нефтеперерабатывающих предприятий.

В нефтедобывающей отрасли промышленности и малой энергетике, где условия эксплуатации приближаются к полевым, нашли применение дозаторы эжекционного типа, действие которых основано на движении обрабатываемой жидкости через канал переменного сечения — эжектор. При этом в наиболее узком сечении канала возникает разрежение и жидкий реагент всасывается в эжектор. Распространенные конструкции такого типа не позволяют поддерживать постоянную пропорцию дозирования при изменении расхода обрабатываемой жидкости. Кроме того, при снижении ее расхода возможно так называемое «опрокидывание эжектора», когда избыточное давление в узком сечении канала эжектора приводит к истечению обрабатываемой жидкости в окружающую среду.

Рассмотрим конструкции эжекционных дозаторов [1], обеспечивающих автоматическое поддержание заданной пропорции дозирования при изменении расхода обрабатываемой жидкости в широких пределах. Общий принцип их действия заключается в следующем. В трубопровод, по которому движется обрабатываемая жидкость, врезан дроссель. Параллельно к трубопроводу подключен резервуар для жидкого реагента с дросселем. При движении жидкости через первый дроссель возникает перепад давлений Δp , функционально связанный с расходом q' : $\Delta p' = f'(q')$. Под действием $\Delta p'$ жидкий реагент из резервуара истекает в поток обрабатываемой среды через второй дроссель, при этом перепад давлений на дросселе функционально связан с расходом q'' : $\Delta p'' = f''(q'')$. В установившемся режиме работы $\Delta p' = \Delta p''$. Если выбрать f' и f'' таким образом, чтобы в широком интервале значений q' суперпозиция $f' \circ f''^{-1}$ удовлетворяла тождеству $f' \circ f''^{-1} \equiv K = \text{const}$, то $q'' = Kq'$, и условие (1) выполнено.

Описанный принцип практически реализуется в конструкции дозатора «Иж-25» [2] (рис. 1, а).

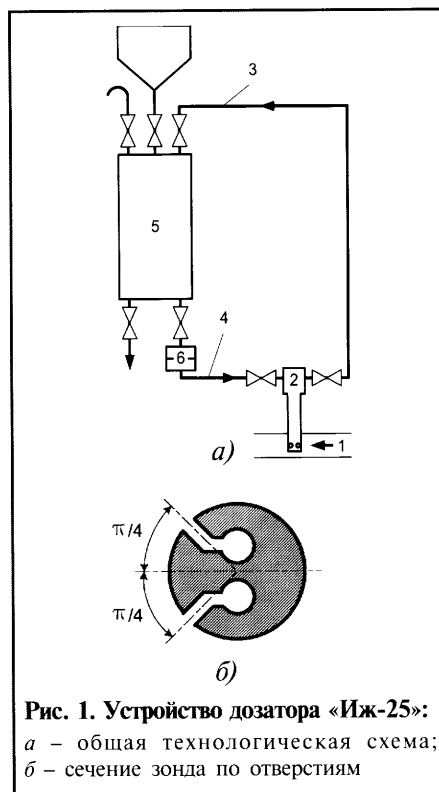


Рис. 1. Устройство дозатора «Иж-25»:

а — общая технологическая схема; б — сечение зонда по отверстиям

Обрабатываемая жидкость движется по трубопроводу 1 со скоростью $w = q'/\pi r'^2$, (2)

где r' — радиус трубопровода.

В трубопровод врезан цилиндрический зонд 2, установленный с возможностью поворота относительно своей оси. На его цилиндрической поверхности имеются два отверстия, соединенные гибкими трубопроводами 3 и 4 с резервуаром для жидкого реагента 5 и калиброванным жиклером 6. Отверстия расположены под углами $\pi/4$ к плоскости симметрии зонда (рис. 1, б). При обтекании зонда потоком обрабатываемой жидкости со скоростью w в каждой точке его поверхности возникает избыточное давление p , которое связано с угловым положением этой точки θ формулой

$$p(\theta) = \frac{\rho' w^2}{2} [2 \cos(2\theta) - 1],$$

где ρ' — плотность обрабатываемой жидкости.

Если направление потока обрабатываемой жидкости находится в плоскости симметрии зонда, то давление в обоих отверстиях одинаково и перепад давлений между отверстиями равен нулю. При повороте зонда на угол α между отверстиями возникает перепад давлений

$$\Delta p'(\alpha) = \rho' w^2 [\cos(2\alpha - \frac{\pi}{2}) - \cos(2\alpha + \frac{\pi}{2})] = 2 \rho' w^2 \sin 2\alpha. \quad (3)$$

Под действием перепада давлений $\Delta p'(\alpha)$ жидкий реагент истекает из резервуара 5 через жиклер 6, трубопровод 4 и зонд 2 в поток обрабатываемой жидкости, а на его место в резервуар 5 через зонд и трубопровод 3 поступает обрабатываемая жидкость. Расход жидкого реагента

$$q'' = \sqrt{\frac{2\pi^2 (r'')^4 \Delta p''}{\rho''}}, \quad (4)$$

где r'' — радиус жиклера; $\Delta p''$ — перепад давлений на жиклере; ρ'' — плотность жидкого реагента.

Приравняв $\Delta p' = \Delta p''$ и подставляя выражения (2) и (3) в формулу (4), получим $q'' = K_{\text{Иж-25}} q'$, где

$$K_{\text{Иж-25}}(\alpha) = 2 \left(\frac{r''}{r'} \right)^2 \sqrt{\frac{\rho'}{\rho''} \sin 2\alpha}. \quad (5)$$

Таким образом, дозатор «Иж-25» автоматически поддерживает расход жидкого реагента q'' пропорциональным расходу обрабатываемой жидкости q' , причем пропорция дозирования плавно регулируется углом поворота зонда 2, а максимальное ее значение задается отношением радиуса жиклера b к радиусу трубопровода 1. По истечении промежутка времени $T = V_{рез} / K_{Иж-25} q'$ (где $V_{рез}$ — объем резервуара 5) необходимо загрузить в резервуар новую порцию реагента. Следовательно, дозатор «Иж-25» позволяет решить задачу реагентной обработки жидких сред при изменении расхода обрабатываемой жидкости в широких пределах и обеспечить плавную регулировку пропорции дозирования жидких реагентов.

Дозатор «Иж-25», выпускаемый АНО «Региональный технопарк «Удмуртия» (рис. 2), не содержит насосов, электроприводов, датчиков и электронных регуляторов, вследствие чего не требует внешних источников питания, отличается простотой наладки и эксплуатации, а также высокой надежностью.

Следует отметить, что в ряде практических случаев нет необходимости в постоянной подаче точного количества жидкого реагента в поток обрабатываемой жидкости. Тогда можно упростить конструкцию дозатора, исключив поворотный узел отбора и гибкие соединительные трубопроводы. Так, в конструкции дозатора «Импульс-2» (рис. 3, а) имеется трубопровод 1 обрабатываемой жидкости, в котором расположено сужающее устройство 2. Трубопровод и сужающее устройство соединены патрубками 3 и 4 с резервуаром для жидкого реагента 5. В одном из патрубков установлен ограничительный жиклер б. При движении обрабатываемой жидкости по трубопроводу 1 в сужающем устройстве 2 возникает перепад давлений

$$\Delta p' = \frac{\rho' q'^2}{2\pi^2} \left[\frac{1}{(r_2')^4} - \frac{1}{(r_1')^4} \right], \quad (6)$$

где r_1' — радиус трубопровода; r_2' — радиус сужающего устройства.

Под действием этого перепада давления жидкий реагент истекает из резервуара 5 через патрубок 4 и ограничительный жиклер б, а на его место через патрубок 3 поступает обрабатываемая жидкость. Приравнявая $\Delta p' = \Delta p''$ и подставляя выражение (6) в формулу (4), получим $q'' = K q'$, где

$$K_{Имп-2} = (r_1'')^2 \sqrt{\frac{\rho'}{\rho''} \left[\frac{1}{(r_2')^4} - \frac{1}{(r_1')^4} \right]}. \quad (7)$$

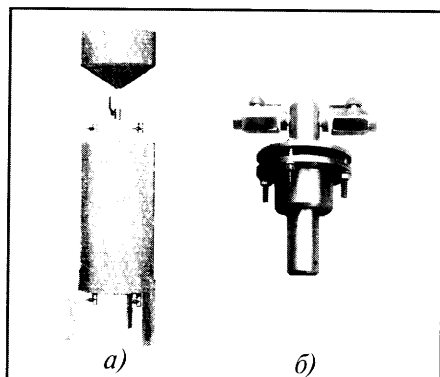


Рис. 2. Дозатор «Иж-25»:

а — резервуар для жидкого реагента; б — зонд

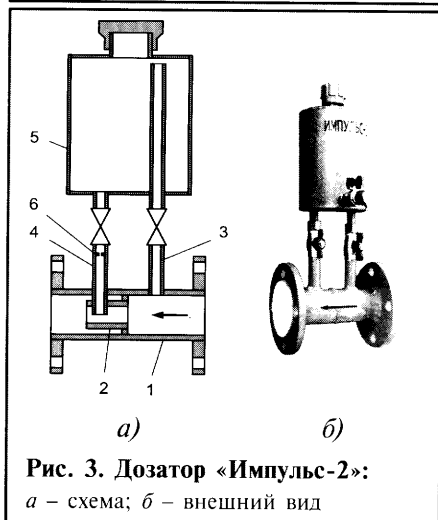


Рис. 3. Дозатор «Импульс-2»:

а — схема; б — внешний вид

Соответствующим выбором значений r_1' , r_2' и r_1'' можно получить заданную величину $K_{Имп-2}$. Таким образом, величина $K_{Имп-2}$ задается при изготовлении дозирующего устройства. Дозаторы «Импульс-2», выпускаемые АНО «Региональный технопарк «Удмуртия» (рис. 3, б), имеют значение $K_{Имп-2} = (7,5 \pm 2,5) \cdot 10^{-5}$, что соответствует подаче $75 \pm 25 \text{ см}^3$ жидкого реагента на 1 м^3 обрабатываемой жидкости. Эта пропорция дозирования поддерживается постоянной в интервале времени $T_0 = V_{рез} / K_{Имп-2} q'$, в течение которого жидкий реагент из резервуара поступает в обрабатываемую среду. Изменяя интервал времени T между загрузками жидкого реагента в резервуар (т.е. варьируя частоту загрузок $\omega = 2\pi/T$), можно плавно изменять среднюю пропорцию дозирования

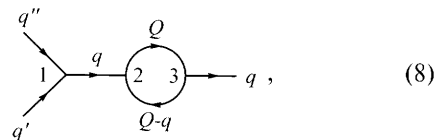
$$\langle K \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{q''}{q'} dt = \frac{T_0}{T} K_{Имп-2} = \frac{\omega T_0}{2\pi} K_{Имп-2}.$$

При этом величина q'' не остается постоянной в интервале времени от 0 до T , вследствие чего содержание жидкого реагента в системе претер-

певает возмущения. Представляет интерес характер зависимости величины этих возмущений от параметров технологической системы и в каком случае допустимо регулирование пропорции дозирования жидкого реагента методом частотно-импульсной модуляции.

Предположим, что система работает в установленном режиме, вследствие чего в каждой точке системы среднее содержание жидкого реагента $\langle u \rangle$ постоянно. Тогда мгновенное значение содержания жидкого реагента в каждой точке системы u может быть представлено в виде $u = \langle u \rangle + u$, где u — возмущение. Переход к исследованию возмущений дает возможность описывать их распространение в системе при помощи функций Грина, что существенно упрощает решение задачи.

В качестве примера рассмотрим циркуляционную систему охлаждения с подачей теплоносителя Q , работающую на одного потребителя. Потребитель имеет утечку теплоносителя q и соответственно система имеет подпитку q ($q \ll Q$), которую производят теплоносителем в количестве q' , обработанным жидким реагентом в количестве q'' . Величина q'' претерпевает возмущения. Рассматриваемую систему можно представить следующей диаграммой:



где 1, 2, 3 — узловые точки (рядом с соединяющими их стрелками указаны расходы соответствующих сред).

Для i -й узловой точки диаграммы справедливо общее уравнение

$$\sum_{j_0} q_{j_0 i}^* + \sum_j q_{ji} G_{ji} u_j = \sum_j q_{ij} u_j + \sum_{j_0} q_{ij_0} u_{j_0}, \quad (9)$$

где $q_{j_0 i}^*$ — входящие потоки, содержащие жидкий реагент; q_{ij_0} — исходящие потоки; u_j — возмущение в i -й вершине; G_{ji} — функции Грина, описывающие распространение возмущений между узловыми точками.

Уравнение (9) можно представить в виде

$$\sum_{j_0} \hat{q}_{j_0 i} + \sum_j \hat{q}_{ji} \hat{G}_{ji} \hat{u}_j = \sum_j \hat{q}_{ij} \hat{u}_j + \sum_{j_0} \hat{q}_{ij_0} \hat{u}_{j_0},$$

где $\hat{u}_i = \int_0^\infty u_i e^{-i\omega t} dt$; $\hat{q}'' = \int_0^\infty q'' e^{-i\omega t} dt$; $\hat{G}_{ij} = \int_0^\infty G_{ij} e^{-i\omega t} dt$ — частотные представления соответствующих функций.

Диаграмма (8) соответствует системе уравнений

$$\begin{aligned} \hat{u}_1 q &= \hat{q}''; \\ \hat{u}_2 Q &= \hat{u}_1 \hat{G}_{12} q + \hat{u}_3 \hat{G}_{32} (Q - q); \\ \hat{u}_3 Q &= \hat{u}_2 \hat{G}_{23} Q, \end{aligned} \quad (10)$$

разрешая которую относительно u_3 и учитывая, что $q \ll Q$, получим

$$\hat{u}_3 \approx \hat{q}'' \frac{\hat{G}_{12} \hat{G}_{23}}{Q(1 - \hat{G}_{32} \hat{G}_{23})}.$$

Если функция q'' — периодическая с периодом T , то для среднеквадратичной величины возмущения u_3 справедлива формула

$$\begin{aligned} \sqrt{\langle u_3^2 \rangle} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_3^2 dt} = \sqrt{2 \sum_{k=1}^{\infty} |\hat{u}_3^k|^2} = \\ &= \sqrt{2 \sum_{k=1}^{\infty} \left| (\hat{q}'')^k \frac{\hat{G}_{12}^k \hat{G}_{23}^k}{Q(1 - \hat{G}_{32}^k \hat{G}_{23}^k)} \right|^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\hat{u}_3^k = \hat{u}_3(k\omega)$; $(\hat{q}'')^k = \hat{q}''(k\omega)$; $\hat{G}_{ij}^k = \hat{G}_{ij}(k\omega)$.

В предельном (наименее благоприятном) случае частотно-импульсной модуляции, полагая $q'' \rightarrow q'' \delta(t)$, где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака [3], в пределе получим $\lim_{q'' \rightarrow q'' \delta(t)} (\hat{q}'')^k \rightarrow \langle q'' \rangle$. Тогда уравнение (12) принимает вид

$$\sqrt{\langle u_3^2 \rangle} = \frac{\langle q'' \rangle}{Q} \sqrt{2 \sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{\hat{G}_{12}^k \hat{G}_{23}^k}{1 - \hat{G}_{32}^k \hat{G}_{23}^k} \right|^2} = \sqrt{2} \frac{\langle q'' \rangle}{Q} \Sigma, \quad (13)$$

$$\text{где } \Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{\hat{G}_{12}^k \hat{G}_{23}^k}{1 - \hat{G}_{32}^k \hat{G}_{23}^k} \right|^2}.$$

Согласно работе [4]

$$\begin{aligned} \hat{G}_{ij}^k &= \left(1 - \frac{T_{ij} k \omega i}{2} \right) e^{-T_{ij} k \omega i / 2} - \\ &- \left(T_{ij}^2 \frac{k^2 \omega^2}{4} \right) E \left(T_{ij} \frac{k \omega i}{2} \right), \end{aligned}$$

где E — интегральная показательная функция [5]; T_{ij} — постоянные времени, которые показывают, во сколько раз время перемещения теплоносителя по соответствующему участку системы меньше T .

На практике в большинстве случаев $T_{12} \ll T_{23} \approx T_{32}$, поэтому примем, что $T_{12} \rightarrow 0$, $T_{23} = T_{32} = \tilde{T}$. Отсюда следует, что

$$\tilde{T} \sim \frac{V_{\text{сист}} / 2Q}{V_{\text{рез}} / \langle q'' \rangle} \ll 1,$$

где $V_{\text{сист}}$ — объем циркуляционной части системы охлаждения.

Вычисления показывают, что в этом случае $\Sigma \approx (\sqrt{96\tilde{T}})^{-1}$. Тогда выражение (13) принимает вид $\sqrt{\langle u_3^2 \rangle} \approx (\sqrt{2}/\sqrt{96}) (\langle q'' \rangle / Q) \tilde{T}^{-1} \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) V_{\text{рез}} / V_{\text{сист}}$. Если считать стабильность работы системы удовлетворительной при

$\sqrt{\langle u_3^2 \rangle} \approx 10^{-5}$, то условие стабильной работы системы при наиболее неблагоприятном режиме импульсного дозирования имеет вид

$$V_{\text{сист}} / V_{\text{рез}} \geq \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) \cdot 10^5 \approx 3 \cdot 10^4.$$

Таким образом, в системах описанного типа при $V_{\text{сист}} / V_{\text{рез}} \geq 3 \cdot 10^4$ целесообразно применять дозаторы «Импульс-2», а при $V_{\text{сист}} / V_{\text{рез}} < 3 \cdot 10^4$ — дозаторы «Иж-25».

В гидравлической системе любой сложности выбор дозатора и режима дозирования для обработки жидкости жидким реагентом осуществляется аналогично.

Список литературы

1. Чаусов Ф. Ф., Раевская Г.А. Комплексный водно-химический режим теплоэнергетических систем низких параметров. Практическое руководство / Под ред. С.М. Решетникова и М.А. Плетнева. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. 2002. 246 с.
2. Свидетельство на полезную модель № 22714 РФ, МПК 6 G 05 D 11/03, E 21 B 37/06.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Квантовая механика. М.: Наука, 1989. Т. 3. 767 с.
4. Чаусов Ф.Ф., Раевская Г.А., Плетнев М.А., Германов Ю.Н. Об условиях стабильности водно-химического режима гидравлических сетей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 2. С. 34–37.
5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.