

РАСЧЕТ ИНЖЕКТОРНЫХ ДОЗАТОРОВ

И. ФОДОР

Кафедра химического машиноведения Будапештского Технического Университета
Поступило: 23 ноября 1977 г.
Представлено: доц. А. Верба

Введение

В пневматических транспортирующих системах, работающих под давлением, подача твердых, мелкозернистых или пылеобразных веществ в транспортный трубопровод совершается, чаще всего камерным дозатором или инжекционным дозатором.

Камерный дозатор представляет собой механизм, применяемый уже давно, и известный во всех странах, и выпускаемый заводами серийно. При транспортировании абразивных или корродирующих материалов вращающиеся детали легко разрушаются (выходят их строя) и в таких случаях уместно обсудить возможность применения инжекционного дозатора.

Инжекционный дозатор представляет собой струйный насос, у которого первичной рабочей средой является, чаще всего, воздух, вторичной же рабочей средой — смесь воздуха и мелкозернистого или пылеобразного твердого вещества. Первичный воздух обеспечивается вентилятором, воздуходувкой или компрессором. Сопло первичного воздуха в зависимости от величины нагнетания-давления представляет собой конфузную систему или систему Лаваля.

Инжекционный дозатор не содержит движущихся деталей; это простой механизм, сравнительно дешево производимый из износостойких и коррозионно устойчивых конструкционных материалов. Против их применения можно поднять вопрос его низкого коэффициента полезного действия. В большинстве случаев — это механизм индивидуального проектирования, его установка и поддержание рабочего режима требуют большого опыта. Применяемая пропорция смеси сравнительно низка.

Настоящий доклад имеет целью изложить несколько методов расчета инжекционных дозаторов.

1. Работа инжекционного дозатора

На рисунке 1,а представлена пневматическая транспортирующая система, работающая под давлением с помощью инжекционного дозатора. Воздушная струя, опускающая выход первичного сопла с большой скоростью,

в месте подачи создает всасывание, а потом в смесительной камере ускоряет смесь вторичного объема воздуха и подаваемого твердого вещества. В случае правильно рассчитанного инжекторного дозатора в конце диффузора скорость твердого вещества соответствует скорости движения вещества, необходимой для равномерного транспортирования вещества в пневматическом трубопроводе.

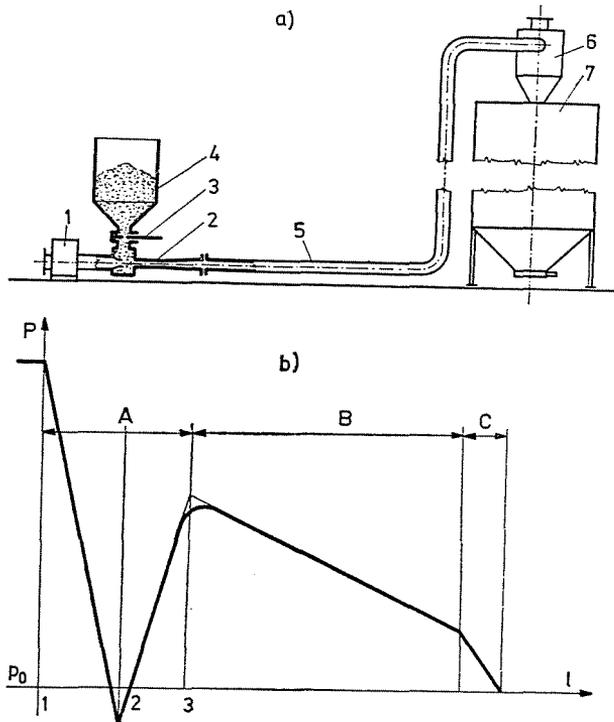


Рис. 1. а) Пневматическое транспортирующее оборудование, работающее под давлением инжекторным дозатором. 1 — машина подающая воздух (вентилятор, воздухоудвка, компрессор), 2 — инжекторный дозатор, 3 — затверный и регулирующий орган, 4 — бак, 5 — транспортирующая труба, 6 — циклон, 7 — бункер; б) Давления в транспортирующем оборудовании в функции длины

A — инжекторный дозатор, B — транспортирующая труба, C — циклон

воде. Смесь твердого вещества и воздуха через транспортирующий трубопровод поступает в циклон. В циклоне твердое вещество отделяется от струи воздуха и падает в бункер-хранитель, а воздух уходит через выходной патрубок циклона. В случае пылеобразного материала, конечно, встраивается и пылефильтр.

Рис. 1,б показывает создающееся в системе соотношение давлений для случая, когда в инжекторном дозаторе в его зоне подачи твердого вещества имеет место низкое всасывание. Согласно рисунку после инжектора для обеспечения транспортирования имеется в распоряжении примерно половина

первичной величины давления. Это кажется недостаточным, однако это является практически достаточным максимумом при применении сопла относительно большого диаметра и низком весовом отношении дозирования.

Если требуется повышение весового отношения подаваемого вещества, то следует уменьшить диаметр сопла. В таком случае из первичного давления можно получить все убывающую его долю и для обеспечения задач транспортирования приходится применять воздухонапорную машину, подающую воздух более высокого давления.

При транспортировании пыльных материалов, содержащих и тонкую фракцию, в точке подачи целесообразно применение небольшого всасывания. В таком случае инжектором всасывается вместе с твердым веществом и воздух ($V_2 > 0$), причем, конечно, пропускная способность понижается, но

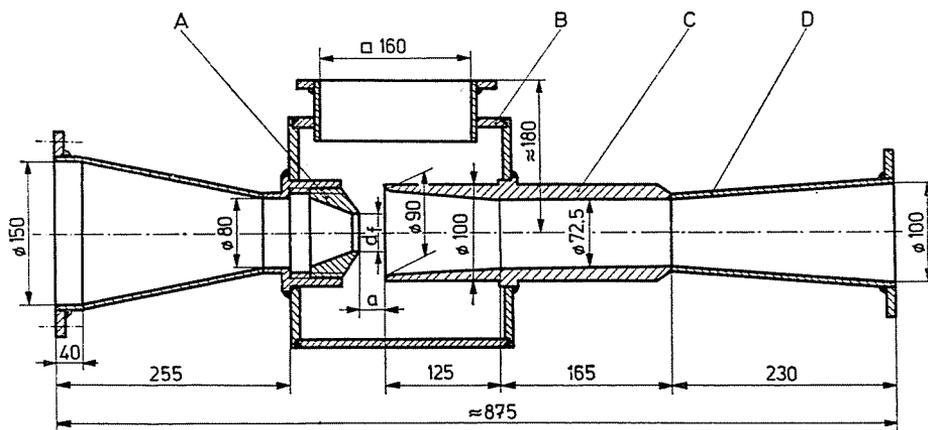


Рис. 2. Инжекторный дозатор для транспортирующей трубы диаметром 100 мм. А — сопло, В — камера инжектора, С — смесительная камера, Д — диффузор

нет пылевыделения. Затворным органом, встроенным между бункером-хранителем и инжектором, можно наладить состояние $p_2 \approx p_0$, а если твердое вещество более грубозернисто и не выделяет пыли, можно наладить и более низкую выдувку, итак мощность транспортирования может быть в незначительной мере повышена.

На рис. 2 видна конструктивная разработка инжекторного дозатора. Этот инжекторный дозатор нашел применение для выполнения лабораторных измерений [5].

2. Метод расчета Бурке (1)

Применяется обозначения, видные на рис. 3. Предполагается, что $p_1 = p_{ат}$, т. е. в зоне подачи давление равно атмосферному давлению и вторичного воздуха нет. При выводе уравнения введены следующие параметры:

$$\varepsilon = \frac{D_1}{D_2} \quad \delta = \frac{D_2}{D_3} \quad \varphi = \frac{D_3}{D_1} \quad \psi = \frac{D_3}{D_0}$$

При выводе уравнений используются теорема непрерывности, уравнения Бернулли и теорема импульса. При записывании теоремы импульса импульсом твердого вещества пренебрегают. Делается допущение, что воздух до величины давления, равной 8000 мм вод. ст. является несжимаемым.

Согласно выводам избыточное давление перед соплом:

$$\Delta p_G = \frac{\bar{\rho}}{2} w_3^2 \cdot \varphi^4 = \frac{\bar{\rho}}{2} w_3^2 \frac{1}{\delta^4 \cdot \varepsilon^4} \quad (2-1)$$

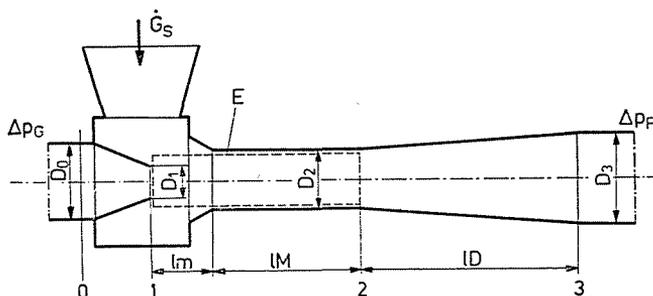


Рис. 3. Обозначения Бурке для проектирования инженерного дозатора. Е — контрольная поверхность

Избыточное давление, преобладающее в начале транспортирующей трубы

$$\Delta p_F = \frac{\bar{\rho}}{2} w_3^2 \cdot \varphi^4 \cdot \varepsilon^2 (2 - \varepsilon^2) = \frac{\bar{\rho}}{2} w_3^2 \cdot \frac{1}{\delta^4} \frac{2 - \varepsilon^2}{\varepsilon^2} \quad (2-2)$$

В уравнениях $\bar{\rho}$ — плотность воздуха,
 w_3 — скорость движения воздуха в сечении 3.

Коэффициент полезного действия инженерного дозатора определяется как отношение между избыточным давлением Δp_F , господствующим в начале транспортирующей трубы и избыточным давлением Δp_G перед соплом

$$\eta_{st} = \frac{\Delta p_F}{\Delta p_G} = \varepsilon^2 (2 - \varepsilon^2) \quad (2-3)$$

Отношение, ε между диаметром сопла и диаметром смесительной камеры может быть выражено из предыдущего уравнения

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta p_F}{\Delta p_G}}} \quad (2-4)$$

Даются предложения и на счет оформления остальных размеров инжекторного дозатора.

Длину диффузора рекомендуется рассчитать по формуле

$$l_D = D_3 \frac{1 - \delta}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

где α — половина угла конусности диффузора. Ее значение может быть взято в пределах $3-5^\circ$, а для отношения между диаметром смесительной камеры и диаметром транспортирующей трубы целесообразно принятие $\delta \geq 0,6$.

Относительно расстояния между выходным поперечным сечением сопла и началом цилиндрического участка смесительной камеры предлагается выражение

$$l_m = D_2 \frac{1 - \varepsilon}{2 \operatorname{tg} \gamma}$$

где γ — угол расширения свободной струи.

На счет длины (l_M) смесительной камеры рекомендации не даются. Диаметр транспортирующей трубы D_3 можно вычислить, если известны требуемая пропускная способность (мощность транспортирования), применяемая минимальная скорость движения воздуха и осуществляемая пропорция смеси.

$$D_3 = \sqrt{\frac{4}{3,6\pi} \frac{\dot{G}_s}{\rho_L \cdot w_3 \mu}} \quad (M) \quad (2-5)$$

Уравнение является размерным, где обозначения имеют следующие значения:

- \dot{G}_s — пропускная способность (трансп. мощность) т/час
- ρ_L — плотность транспортирующего воздуха кг/м³
- w_3 — скорость транспортирующего воздуха м/с
- μ — пропорция смеси

Ход вычисления методом Бурке может быть следующим: Задаются значения \dot{G}_s , w_3 и μ , вычисляется D_3 принятием $\delta = 0,6$ получается D_2 , из w_3 и D_3 можно получить количество транспортирующего воздуха. Допускается, что вторичного количества воздуха нет, через сопло диаметром D_1 вытекает то же количество воздуха, итак на основании непрерывности можно

- ρ_f — плотность воздуха,
 c_3 — средняя скорость воздуха в поперечном сечении 3,
 c — скорость движения твердого вещества в транспортирующей трубе.

Коэффициент полевого действия инженерного дозатора

$$\eta_{st} = \frac{\Delta p_F}{\Delta p_G} = \varepsilon^2 \left(2 - \varepsilon^2 - 2\mu \frac{c}{v_3} \delta^2 \varepsilon^2 \right) \quad (3-3)$$

Вебером оно не выводится, но из этого уравнения можно его выразить

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1 \pm \sqrt{1 - \eta_{st} \left(1 + 2\mu \frac{c}{v_3} \delta^2 \right)}}{1 + 2\mu \frac{c}{v_3} \delta^2}} \quad (3-4)$$

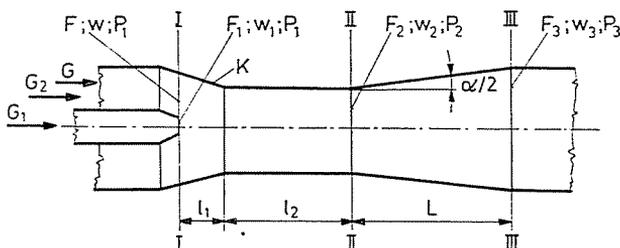


Рис. 5. Обозначения Успенского для проектирования инжекторного дозатора.

Касательно геометрических размеров инжектора даются те же предложения, как Бурке.

Для ускорения вычислений сообщаются номограммы, вычисленные по формулам, данные, касающиеся ускорения вещества, заимствованы из статьи Вейднера и предлагается определение длины смесительной камеры из длины пути ускорения.

4. Метод расчета Успенского (3)

Метод расчета был им разработан для пылеотсасывающих инжекторов, значит, предлагаемая им пропорция смеси вообще низка. Часть обозначений показана на рис. 5. Контрольная поверхность принята между плоскостями I и II и записывается теорема импульса.

Из его выводов частная от разности давления, создаваемой инжектором и динамического давления первичной струи, будет:

$$\frac{h_x}{h_1} = \frac{2}{m} - \frac{(2 - \varphi)(1 + q + q\beta) \left(\frac{\gamma_1}{\gamma'_1} + \frac{\gamma_1}{\gamma'_2} q + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta \right) - 2q^2 n(1 + \beta) \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{\gamma_1}{\gamma} \beta \right)}{m^2} \quad (4-1)$$

Коэффициент полезного действия инжекторного дозатора:

$$\eta = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} q + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta \right) \frac{h_x}{h_1} \quad (4-2)$$

Применяемые обозначения:

$h_x = p_3 - p_1$ — разность давлений, создаваемая инжектором,

$h_1 = \frac{\gamma_1 w_1^2}{2g}$ — динамическое давление первичной среды на выходе из сопла,

$$m = \frac{F_2}{F_1} \quad n = \frac{F_2}{F} \quad q = \frac{G_2}{G_1} \quad \beta = \frac{G}{G_2} \quad q\beta = \frac{G}{G_1}$$

w_1 — скорость первичной среды на выходе из сопла,

F_1 — выходное поперечное сечение первичного сопла,

F_2 — поперечное сечение смесительной камеры в сечении II—II

F — поперечное сечение протока вторичной среды в сечении I—I

γ_1 — удельный вес первичной среды в сечении I—I

γ'_1 — удельный вес первичной среды в сечении II—II

γ_2 — удельный вес вторичной среды в сечении I—I

γ'_2 — удельный вес вторичной среды в сечении II—II

γ — удельный вес всасываемого твердого вещества

G_1 — весовая струя первичной среды

G_2 — весовая струя вторичной среды

G — весовая струя твердого вещества

φ — коэффициент полезного действия диффузора.

Значение m , принадлежащее оптимальному коэффициенту полезного действия:

$$m = (2 + \varphi)(1 + q + q\beta) \left(\frac{\gamma_1}{\gamma'_1} + \frac{\gamma_1}{\gamma'_2} q + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta \right) - 2q n(1 + \beta) \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{\gamma_1}{\gamma} \beta \right) \quad (4-3)$$

Наиболее выгодное отношение $\frac{h_x}{h_1}$, соответствующее оптимальному значению m :

$$\frac{h_x}{h_1} = \frac{1}{m} \quad (4-4)$$

Предполагая, что $\gamma_1 = \gamma'_1 = \gamma_2 = \gamma'_2$; $q = 0, \beta = \infty$
 $q \cdot \beta = \frac{G'}{G_1}$, вышеприведенные уравнения упрощаются.

Упрощенный вид уравнения (4-1)

$$\frac{h_x}{h_1} = \frac{2}{m} - \frac{(2 - \varphi)(1 + q\beta) \left(1 + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta\right) - 2q^2 \beta^2 n \frac{\gamma_1}{\gamma}}{m^2} \quad (4-5)$$

Упрощенный вид уравнения (4-2):

$$\eta = \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta \frac{h_x}{h_1} \quad (4-6)$$

Упрощенный вид уравнения (4-3):

$$m = (2 - \varphi)(1 + q\beta) \left(1 + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta\right) - 2q^2 \beta^2 n \frac{\gamma_1}{\gamma} \quad (4-7)$$

При применении приема расчета сначала следует рассчитать пневматическую транспортирующую трубу каким-нибудь методом расчета, сообщенным в специальной литературе. В результате расчета получается первичное количество, в том числе весовая струя G_1 , пропорция смеси ($\mu = q\beta$) и величина m по уравнению (4-3) или (4-7): (в первом приближении целесообразно задаваться значениями $\varphi = 0$ и $\mu = 1$). Относительно длины диффузора Успенским предлагается то же уравнение как и Бурке.

Относительно оптимальной длины цилиндрического участка смешительной камеры ниже дается предложение:

| | |
|------------|-----------------|
| $m = 9$ | $L_2/D_2 = 5$ |
| $m = 4$ | $L_2/D_2 = 4$ |
| $m = 1,78$ | $L_2/D_2 = 3,5$ |

Длину участка L_1 для случая $m > 4$ рекомендуется принять между D_2 и $2D_2$.

5. Метод расчета Соколова и Зингера (4)

Соколов и Зингер в труде «Струйные аппараты» очень осмотрительно и единой системой обозначений сводят литературу струйных оборудований. Шестая глава их труда излагает расчет струйных оборудований, используе-

мых в области пневматического транспортирования. Ими предполагается, что в инжекторных дозаторах первичная среда — высокого давления и она через сопло Лавала поступает в смешительную камеру, итак считаются с адиабатическими изменениями состояния. Применением их метода характеристика инженерного дозатора (относительное повышение давления $\frac{\Delta p_c}{P_H}$)

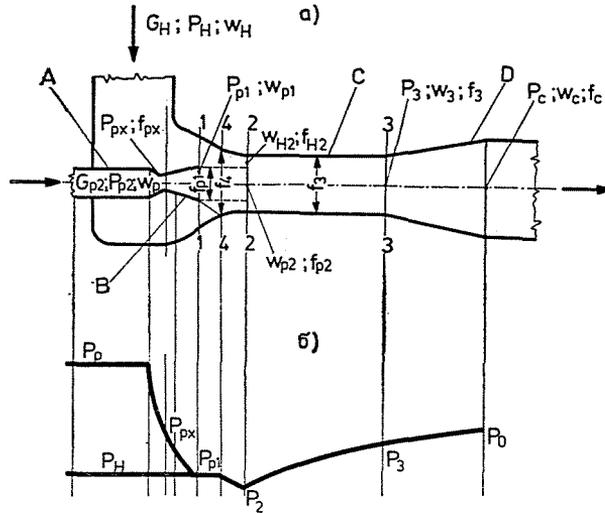


Рис. 6. а) схема инжекторного дозатора (струйного компрессора), б) название давлений А — сопло, В — корпус, С — смешительная камера, Д — диффузор

в функции коэффициента всасывания U_T твердого вещества вычисляется следующей формулой:

$$\frac{\Delta p_c}{P_H} = \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{P_p}{P_H} \left[\frac{f_{p1}}{f_{px}} \left(\Pi_{p1} - \frac{P_H}{P_p} \right) + \frac{K_1}{\varphi_3} r \lambda_{p1} + \left(\frac{K_2}{\varphi_3} - 0,5 \right) s \cdot \frac{f_{px}}{f_{H2}} \frac{v_{cr}}{v_p} U U_r - \left(\frac{1}{\varphi_3} - 0,5 \right) s \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{v_{cr}}{v_p} (1 + U)(1 + U_r) \right] \quad (5-1)$$

А коэффициент всасывания U_T твердого вещества

$$U_T = \frac{K_1^2}{K_3^2} \frac{kp}{kp - 1} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_p} \right) \frac{kp - 1}{kp} \right] \left[1 + \frac{P_H}{\Delta p_c} \right] - (1 + U_r) \quad (5-2)$$

Отношение между поперечным сечением цилиндрической смесительной камеры и самым узким поперечным сечением сопла $\frac{f_3}{f_{px}}$ тоже может быть вычислено как

$$\left(\frac{f_3}{f_{px}}\right)_{\text{opt}} = \frac{0,5 \left[\left(\frac{P_{p1} - P_H}{P_p} \right) \frac{f_{p1}}{f_{px}} - \frac{K_1}{\varphi_3} \cdot r \cdot \lambda_{p1} \right]}{\frac{\Delta p_c}{P_p}} \quad (5-3)$$

Обозначение величин, входящих в формулы;

$$\Delta p_c = p_c - p_H$$

p_c — давление в конце диффузора,

p_c — давление первичной среды перед соплом,

p_H — давление вторичной среды у входа дозатора,

$U_T = \frac{G_T}{G_p}$ — коэффициент всасывания твердого вещества,

$U = U_r + U_T$ — коэффициент полного всасывания,

$U = \frac{G_{Hr}}{G_p}$ — коэффициент всасывания газа,

f_{p1} — поперечное сечение сопла на выходе,

f_{px} — самое узкое поперечное сечение сопла, критическое сечение,

f_{H2} — поперечное сечение на входе вторичной среды в сечении 2.

$K_1 - \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 = 0,674$ — коэффициент скорости первичной среды,

$K_2 - \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 = 0,587$ — коэффициент скорости всасываемой среды,

$K_3 - 0,94$ — коэффициент диффузора,

$$\varphi_1 = 0,95 \quad \varphi_2 = 0,875 \quad \varphi_3 = 0,81 \quad \varphi_4 = 0,83$$

V_{cr} — удельный объем газа, выходящего из инжекторного дозатора,

V_p — удельный объем первичного газа,

$V_c = V_{cr} \frac{1 + U_r}{1 + U_r + U_T} + V_T \frac{U_T}{1 + U_r + U_T}$ — удельный объем смеси, выходящей из инжекторного дозатора

$V_H = V_{Hr} \frac{U_r}{U_r + U_T} + V_T \frac{V_T}{U_r + U_T}$ — удельный объем всасываемой смеси,

V_{Hr} — удельный объем всасываемого на входе газа,

k_p — адиабатический показатель степени, относящийся первичной среды для воздуха $k_p = 1,4$.

$$P_{p1} = \frac{P_H}{P_p}$$

$$S = kp \frac{2}{kp+1} \frac{kp+1}{kp-1} \text{ для воздуха } S = 0,470$$

$$r = kp \left(\frac{2}{kp+1} \right)^{\frac{kp}{kp-1}} \text{ для воздуха } r = 0,742$$

$$\lambda_{p1} = 1,7$$

G_T — весовая струя твердого вещества

G_{HG} — весовая струя вторичного газа,

G_p — весовая струя первичного газа

Предполагая, что $U_r = 0$, $U = U_T$, уравнение (5-1) упрощается

$$\frac{\Delta p_c}{P_H} = \quad (5-4)$$

$$= \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{P_p}{P_H} \left[\frac{f_{p1}}{f_{px}} \left(\Pi_{p1} - \frac{P_H}{P_p} \right) + \frac{K_1}{\varphi_3} r \lambda_{p1} - \left(\frac{1}{\varphi_3} - 0,5 \right) s \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{v_{cr}}{v_p} (1 + U_T) \right]$$

При предположении, что $U_r = 0$, уравнение (5-2) тоже упрощается:

$$U_T = \frac{K_1^2}{K_3^2} \cdot \frac{kp}{kp-1} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_p} \right)^{\frac{kp-1}{kp}} \right] \left[1 + \frac{P_H}{\Delta p_c} \right] - 1 \quad (5-5)$$

6. Новый метод расчета инжекторных дозаторов

Метод, изложенный ниже, был частью опубликован в журнале «Машина» [5], частью он находится еще в рукописи. Этот прием расчета основан на методах Бурке [1] и Вебера [2] для расчета инжекторных дозаторов и на методе расчета струйных насосов Паттантьюша [6], Литвайи [7], а также Фогеля [8].

6. 1. Толкование характеристик инжекторного дозатора

а) Обозначения:

Применим следующие обозначения:

p_{δ} кг/м² — сжатие воздуха,

p_{st} оп кг/м² — статическое давление воздуха,

p_d кг/м² — динамическое давление воздуха,

ρ кгс²/м⁴ — плотность,

| | | |
|-----------|---------------------|---|
| m | кгс ² /м | — масса, |
| \dot{m} | кгс/м | — поток массы |
| V | м ³ /с | — объемный поток, |
| c | м/с | — скорость, |
| F | м ² | — поверхность, поперечное сечение, |
| Q_a | кг/с | — количество вещества транспортируемого за единицу времени; мощность транспортирования, |
| μ | | — пропорция смеси, весовое отношение подача при пневматическом транспортировании, |
| s | | — скольжение, |
| N_b | кгм/с | — вводимая мощность |
| N_h | кгм/с | — полезная мощность, |
| η | | — коэффициент полезного действия, |
| y | | — количество давления без энергии твердого вещества, |
| y_{st} | | — статическое количество давления, |
| x | | — количественный параметр, |
| U | | — массовое отношение |

Индексы:

- 1 — первичная среда, входящая в инжектор,
- 2 — вторичная среда, входящая в инжектор,
- 3 — третичная среда выходящая из инжектора,
- 4 — вторичная среда, поступающая в смесительную камеру,
- 5 — первичная среда, выходящая из сопла,
- 6 — характеристики среды в конце смесительной камеры,
- a — указывает на характеристики твердого вещества.

б) Давления и разности давлений

Применения обозначения, перечисленные под п. а) и с учетом обозначений рисунков 7а, в, с; приняв, что воздух несжимаем и в инжекторном дозаторе имеет по полной своей длине постоянную плотность C , суммарное давление в сечениях 1, 2, 3, т. е. по порядку у входа первичной среды, у входа вторичных сред (воздуха и твердого вещества) и у входа смеси в транспортирующую трубу, подряд

$$P_{1\delta} \cdot P_{2\delta} \text{ и } P_{3\delta}.$$

Скорости c_1, c_2, c_3 , входящие в написанные зависимости, можно вычислить из объемного потока воздуха и поперечного сечения, пренебрегая объемным потоком твердого вещества, что при разжиженном потоке транспортирования может достигнуть максимально нескольких процентов. При

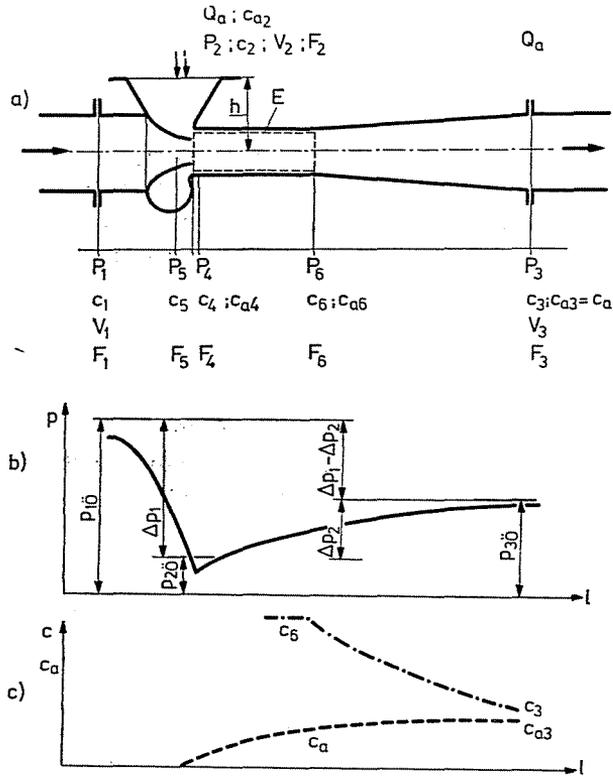


Рис. 7. а.) Обозначены инжекторного дозатора E — контрольная поверхность; в.) Образование давлений в инжекторном дозаторе и толкование разностей давлений; с.) Предполагаемое изменение скоростей воздуха и скоростей твердого вещества в смесительной камере и в диффузоре

холостом ходу инжекторного дозатора ($Q_a = 0$), когда работает в качестве инжектора воздух — воздух, т. е. при транспортировании материала, если пренебречь кинетической энергией твердого вещества, суммарные давления будут:

$$P_{1\delta} = P_1 + P_{1d} = P_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2,$$

$$P_{2\delta} = P_2 + P_{2d} = P_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2,$$

$$P_{3\delta} = P_3 + P_{3d} = P_3 + \frac{\rho}{2} c_3^2$$

По ним, разности давлений воспринимаемые в рис. 2 в

$$\Delta p_1 = p_{1\delta} - p_{2\delta} = p_1 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_2^2),$$

$$\Delta p_2 = p_{3\delta} - p_{2\delta} = p_3 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_3^2 - c_2^2),$$

$$\Delta p_1 - \Delta p_2 = p_{1\delta} - p_{3\delta} = p_1 - p_3 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_3^2)$$

в) Параметры давления

Целесообразно перейти на характеристики без единиц измерения. Согласно Литваи, можно вывести количество давления из формулы

$$y = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \quad (6-1)$$

Из предыдущих, без учета кинетической энергии твердого вещества

$$y = \frac{p_3 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_3^2 - c_2^2)}{p_1 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_2^2)} \quad (6-2)$$

При промышленных измерениях вообще нет возможности для измерений скоростей вещества, и может встречаться, что из скоростей воздуха даже c_2 неизвестна, вследствие чего рекомендуется определить количество давления, вычисляемое легко по измеренным давлениям.

Статическое количество давления:

$$y_{st} = \frac{p_3 - p_2}{p_1 - p_2}. \quad (6-3)$$

г) Параметр количества

Вторичное количество воздуха V_2 ; объемный поток твердого вещества V_a ; разделив их сумму на первичное количество воздуха (V_1), получается параметр количества x :

$$x = \frac{V_2 + V_a}{V_1} \quad (6-4)$$

Когда объемный поток твердого вещества пренебрегаемо мал,

$$x \approx \frac{V_2}{V_1}$$

д) *Пропорция массы*

Массовый поток вторичного воздуха \dot{m}_2 , твердого вещества \dot{m}_a ; разделив их сумму на массовый поток первичного воздуха \dot{m}_1 , получается пропорция массы:

$$U = \frac{\dot{m}_2 + \dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{\rho \cdot V_2 + \frac{Q_a}{g}}{\rho \cdot V_1} = \frac{\rho g V_2 + Q_a}{\rho g \cdot V_1} \quad (6-5)$$

Инжекторный дозатор установлен на передней части транспортирующего оборудования, работающего под давлением и выходное поперечное сечение инжекторного дозатора сразу является входным сечением пневматической транспортирующей трубы. Важной характеристикой пневматического транспортирования является весовая пропорция подачи или пропорция смеси (μ). Принимая и здесь, что воздух несжимаемый и его плотность равна ρ , весовая пропорция подачи за инжектором, учитывая количество воздуха, протекающее через входной участок транспортирующей трубы $V_3 = V_1 + V_2$

$$\mu = \frac{Q_a}{\rho g V_3}$$

С помощью пропорции смеси можно преобразовать выражение, полученное для пропорции масс и можно вывести параметр количества

$$U = \frac{\rho \cdot g \cdot V_2 + Q_a}{\rho \cdot g \cdot V_1} = \frac{\rho \cdot g \cdot V_2 + \mu \cdot \rho \cdot g \cdot V_3}{\rho \cdot g \cdot V_1}$$

$$U = \frac{V_2 + \mu(V_1 + V_2)}{V_1}$$

и приближенно:

$$U = x + \mu(1 + x). \quad (6-6)$$

е) *Введенная мощность*

Учитывая разность давлений, введенная мощность инжекторного дозатора равна

$$N_b = V_1(\Delta p_1 - \Delta p_2) = V_1 \left[p_1 - p_3 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_3^2) \right]$$

ж) Полезная мощность инжекторного дозатора. Полезной можно принять мощность, передаваемую вторичному воздуху V_2 и твердому телу; таким образом, значение полезной мощности на основании разности давлений Δp_2 , определенной при пренебрежении кинетической энергией твердого вещества:

$$N_h = \Delta p_2 \cdot V_2 + \frac{Q_a}{2g} (c_{a3}^2 - c_{a2}^2) = V_2 \left[p_3 - p_2 - \frac{\rho}{2} (c_3^2 - c_2^2) \right] + \frac{Q_a}{2g} (c_{a3}^2 - c_{a2}^2)$$

з) Коэффициент полезного действия инжекторного дозатора

Коэффициент полезного действия является частной от полезной и введенной мощностей

$$\begin{aligned} \eta = \frac{N_h}{N_b} &= \frac{\Delta p_2 \cdot V_2 + \frac{Q_a}{2g} (c_{a3}^2 - c_{a2}^2)}{(\Delta p_1 - \Delta p_2) V_1} = \\ &= \frac{V_2 \left[p_3 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_3^2 - c_2^2) \right] - \frac{Q_a}{2g} (c_{a3}^2 - c_{a2}^2)}{V_1 \left[p_1 - p_3 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_3^2) \right]} \end{aligned} \quad (6-7)$$

В случае, когда c_{a2} маленька и пренебрегаема

$$\eta = \frac{V_2 \left[p_3 - p_2 + \frac{\rho}{2} (c_3^2 - c_2^2) \right] + \frac{Q_a}{2g} c_{a3}^2}{V_1 \left[p_1 - p_3 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_3^2) \right]}$$

Практически $V_2 \approx 0$, итак выражение коэффициента полезного действия может быть еще упрощено

$$\eta = \frac{\frac{Q_a}{2g} c_{a3}^2}{V_1 \left[p_1 - p_3 + \frac{\rho}{2} (c_1^2 - c_3^2) \right]}$$

и) Изображение измеренных и расчетных характеристик

Характеристики, определенные в предыдущих, можно изобразить в функции параметра количества x или пропорции масс U . Рис. 8, а показы-

вает протекания кривых y и η , вычисленных при постоянной величине $\mu = \text{const}$ по измеренным характеристикам в функции параметра количества x . При измерениях чрезвычайно трудно поодержать значение μ на постоянной величине, и, кроме того x вообще имеет малое значение, поэтому рекомендуется начертить значения y и η в функции пропорции масс U .

Измеряемый участок функции $y-U$ представляет собой приблизительно прямую (рис. 8).

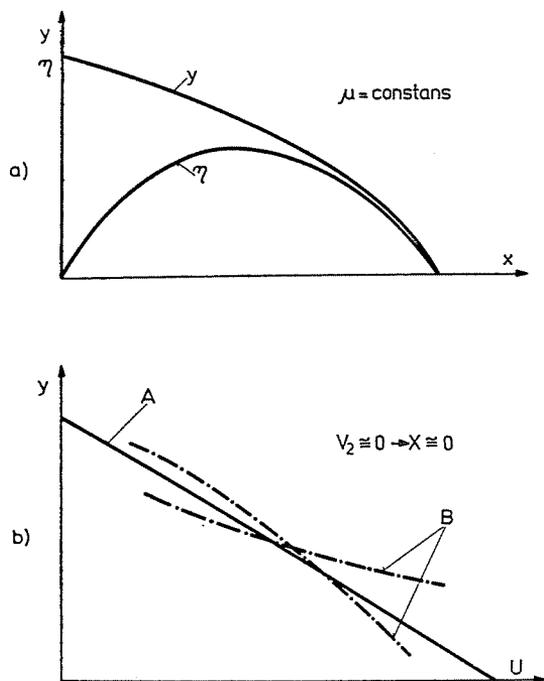


Рис. 8. а.) Изменение параметра давления (y) и коэффициента полезного действия (η) в функции параметра количества (x); в.) Изменение параметра давления (y) в функции пропорции масс (U)

A — Теория, B — действительное, измеряемое

6.2 Приближенный расчет характеристик инжекторного дозатора

При расчетном определении характеристики дозатора воспользуемся обозначениями рис. 7а, б, с и пренебрежениями, рекомендуемыми в предыдущих пунктах. Из непрерывности

$$V_1 = c_1 \cdot F_1 = c_5 \cdot F_5$$

$$V_2 = c_2 \cdot F_2 = c_4 \cdot F_4$$

$$V_3 = V_1 + V_2 = c_3 \cdot F_3 = c_6 \cdot F_6$$

Введем следующие обозначения:

$$\varphi = \frac{c_4}{c_5}$$

$$\sigma = \frac{F_5}{F_4}$$

итак, параметр количества:

$$x = \frac{V_2}{V_1} = \frac{c_4 \cdot F_4}{c_5 \cdot F_5} = \frac{\varphi}{\sigma}$$

Пусть будет величина $\varrho = \text{конст.}$

Примем, что поток совершенно свободен от потерь и напишем теорему импульса для смесительной камеры, ограниченной контрольной поверхностью (рис 7,а).

$$\begin{aligned} c_5 \cdot F_5 \cdot \varrho \cdot c_5 + c_4 \cdot F_4 \cdot \varrho \cdot c_4 + p_4(F_4 + F_5) + \frac{Q_a}{g} c_{a4} = \\ = c_6 \cdot F_6 \cdot \varrho \cdot c_6 + p_6 \cdot F_6 + \frac{Q_a}{g} c_{a5}. \end{aligned}$$

Параметр давления согласно определению

$$y = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{p_3 - p_2 + \frac{\varrho}{2}(c_3^2 - c_2^2)}{p_1 - p_2 + \frac{\varrho}{2}(c_1^2 - c_2^2)}$$

Предполагая идеальные условия и, что поток без потерь

$$p_3 + \frac{\varrho}{2} c_3^2 = p_6 + \frac{\varrho}{2} c_6^2 + \frac{\varrho_{a6}}{2} c_{a6}^2 - \frac{\varrho_{a3}}{2} c_{a3}^2,$$

$$p_1 + \frac{\varrho}{2} c_1^2 = p_5 + \frac{\varrho}{2} c_5^2,$$

$$p_2 + \frac{\varrho}{2} c_2^2 = p_4 + \frac{\varrho}{2} c_4^2 = p_5 + \frac{\varrho}{2} c_4^2$$

Подставив эти уравнения, а также значение $p_6 - p_5$, выроженное из теоремы импульса, в формулу параметра давления, и вводя обозначения

$$A = \frac{F_6}{F_3}$$

$$1 - s = \frac{c_{a3}}{c_3}$$

где s = скольжение транспортирования; предполагая, что $\frac{\rho_{a6}}{2} c_{a6}^2 = \frac{\rho_{a3}}{2} c_{a3}^2$ и после необходимых преобразований для параметра давлений получим следующее выражение:

$$y = \frac{\sigma(2 + \sigma + x\sigma^2)(1 - x\sigma) - 2\mu(1 - s)A\sigma^2(1 + x)^2}{(1 + \sigma)^2(1 - x^2\sigma^2)} \quad (6-8)$$

В случае, когда $x = 0$

$$y = \frac{\sigma(2 + \sigma) - 2\mu(1 - s)A \cdot \sigma^2}{(1 + \sigma)^2} \quad (6-9)$$

6.3 Уточненный расчет характеристики инжекторного дозатора

Нет никаких препятствий, чтобы, сохранив предыдущие определения, можно было учесть потери в потоке. Не прибегая к громоздким выводам для, параметра давления получается следующее выражение:

$$y = \frac{2\sigma + (1 - \zeta_6 - \zeta_d)\sigma^2 + x2\sigma^2(-1 - \zeta_6 - \zeta_d) +}{(1 + \zeta_K)(1 + \sigma)^2 - x^2\sigma^2(1 + \zeta_K)(1 + \sigma)^2} + \frac{x^2\sigma^2[-2\zeta_2\sigma - \sigma^2(\zeta_2 + 1) - \zeta_2 - \zeta_6 - \zeta_d] - 2\mu(1 - s)A\sigma^2(1 + x)^2}{(1 + \zeta_K)(1 + \sigma)^2 - x^2\sigma^2(1 + \zeta_K)(1 + \sigma)^2} \quad (6.10)$$

В случае, если $x = 0$

$$y = \frac{2\sigma + (1 - \zeta_6 - \zeta_d)\sigma^2 - 2\mu(1 - s)A\sigma^2}{(1 + \zeta_K)(1 + \sigma)^2} \quad (6-11)$$

При выводе вышеприведенных уравнений величина ρ была принята с значением $\rho = \text{конст.}$ Если необходимо, можно учесть изменения ρ в теореме импульса, написанной для смесительной камеры и уравнения могут быть модифицированы.

Обозначения, еще не перечисленные:

- ζ_K — коэффициент потерь конфузора (сопла),
- ζ_6 — коэффициент потерь смесительной камеры,
- ζ_d — коэффициент потерь диффузора.

7. Сопоставление перечисленных методов расчета

Бурке и Вебером допускается, что воздух несжимаемый, а потом поток происходит без потерь. Те же самые допущения действительны и для метода расчета под п. 6.2. Бурке не учитывает действия твердого вещества, итак на основании его метода расчета отношение $\varepsilon = \frac{D_1}{D_2}$ можно вычислить с сильным приближением для данного значения Δp_F . Методом Вебера уже можно вычислить и характеристику $\eta_{st} - \mu$. С помощью метода отсчета, приведенного под пп. 6.2 и 6.3, можно получить характеристики инжекторного дозатора $y - U$ или $y - \mu$, и коэффициент полезного действия, определенный в энергетическом смысле в п. 6.1. тоже может быть вычислен.

Методом Успенского сжимаемость первичной среды не должна учитываться.

Если первичная среда выходит из сопла со сверхзвуковой скоростью, одним из методов расчета сопла Лавала можно вычислить выходную скорость первичной среды и дальнейшие вычисления на основании уравнений могут быть проведены до давлений 2—3000 кг/м² с хорошим приближением.

Расчетный метод Соколова и Зингера был построен для первичной среды высокого давления с учетом потока, сопровождаемого потерями, но вводится слишком много постоянных и они делают громоздким применение сообщенных ими формул, а эвентуально неправильный их выбор понижает точность этого сложного приема.

8. Экспериментальное испытание инжекторных дозаторов

При экспериментальном испытании следует измерять количество первичного и вторичного количеств воздуха, поступающих в дозатор при входе обоих количеств воздуха, их давления, далее количество поступающего твердого вещества в начале пневматической транспортирующей трубы давление, и целесообразно испытать и характеристики пневматического транспортирования. На лабораторной установке имеется возможность измерять эти характеристики, хотя вместо измерения скорости движения твердого вещества можно довольствоваться вычислением по характеристикам пневматического транспортирования.

При измерениях на промышленных установках из-за неблагоприятных возможностей измерений придется довольствоваться измерениями количеств первичного воздуха и твердого вещества, измерениями давления первичного воздуха и давления за дозатором, так как у оборудования, работающих о практике, количество вторичного воздуха равняется почти нулю.

Результаты измерений можно найти в публикациях Успенского [3], Соколова и Зингера [4], Папаи [9], Фодора [5, 10]. Здесь мы отказываемся от приведения экспериментальных результатов, однако следует заметить что расчетные и измеренные данные не соглашаются и безусловно нужно дальнейшее совершенствование методов расчета. Измерения всегда связаны со значительным трудом и материальными затратами. Поэтому целесообразно вести расчеты инжекторного дозатора каким — либо из выше приведенных методов и обеспечить соответствующие возможности наладки заводской установки (у машины, питающей воздух обеспечить запас давления, сопло выработать подвижным и заменимым).

9. Упрощенный пример расчета

Проведем расчет пневматической транспортирующей системы методом Папаи [11].

Данные: скорость газа $v_g = c_3 = 20$ м/с
 скорость вещества $c_{a3} = 16,5$ м/с
 пропорция смеси $\mu = 3,8$
 количество воздуха $V_3 = 565$ м³/час
 диаметр транспортирующей
 трубы $d_3 = 100$ мм = 0,1 м
 пропускная способность $Q_a = 2750$ кг/час = 0,77 кг/с
 транспортируемое вещество: гранулат

Перепады давлений:

Перепад давлений на холостом ходу $\Delta p_0 = 153$ кг/м²

Добавочный горизонтальный перепад давления $\Delta p_{jv} = 52,5$ кг/м²

Добавочный вертикальный перепад давления $\Delta p_{if} = 71,5$ кг/м²

Перепад давлений в дугах $2\Delta p_{iv} = 68$ кг/м²

Перепад давлений циклона $\Delta p_c = 76,5$ кг/м²

Динамическое давление $p_{a3} = 26$ кг/м²

Полная потребность в давлении

пневматического транспортирования $p_{3\delta} \approx 450$ кг/м²

Имеющаяся в распоряжении машина для воздухообеспечения — воздуходувка типа R — 6 завода «ХОДГЕП». Из характеристики воздуходувки получается, что при всасывании количества воздуха, равного 565 м³/ч осуществляемое давление равно 2000 кг/м². Предположим, что участок трубы, соединяющей воздуходувку с инжекторным дозатором, имеет пренебрегаемое

сопротивление. Из определения параметра давления (6.1) при предположении, что $p_{2\delta} = p_0$

$$y = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{450}{2000} = 0,225$$

а) Исходим из метода Бурке. η_{st} , упоминаемый им в качестве «коэффициента полезного действия», является понятием, тождественным с параметром давления y .

Значит,

$$\eta_{st} = y = 0,225$$

$$\eta_{st} = \frac{\Delta p_F}{\Delta p_G}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta p_F}{\Delta p_G}}} = \sqrt{1 - \sqrt{1 - 0,225}} = 0,344$$

Диаметр смесительной камеры (D_2 (Бурке) d_6 (п. 6.)

$D_2 = d_6 = 72,6$ мм диаметр сопла, получается

$D_1 = D_5 = 25$ мм.

б) Из уравнения (6.9) при предположении, что $\mu = 0$, получим:

$$y = \frac{\sigma(2 + \sigma)}{(1 + \sigma)^2}$$

и из этого можно выразить σ

$$\sigma = \frac{1 - y \pm \sqrt{1 - y}}{y - 1}$$

С принятым значением $y = 0,225$

$$\sigma = \frac{1 - 0,225 \pm \sqrt{1 - 0,225}}{0,225 - 1} = 0,138$$

Согласно определению

$$\sigma = \frac{F_5}{F_4} = \frac{F_5}{F_6 - F_5}$$

Откуда можно вывести

$$d_5 = \sqrt{\frac{\sigma}{1 + \sigma}} \cdot d_6 = \sqrt{\frac{0,138}{1,138}} 72,5 = 23,2 \text{ мм}$$

Значит, для диаметра сопла получается тот же результат, чем по методу Бурке.

в) Методом Успенского из упрощенных уравнений (4—7)

$$\begin{aligned}
 m &= (2 - \varphi) (1 + q\beta) \left(1 + \frac{\gamma_1}{\gamma} q\beta \right) - 2q^2 \beta^2 n \frac{\gamma_1}{\gamma} = \\
 &= (2 - 0,8) (1 + 3,8) \left(1 - \frac{1,29}{1000} 3,8 \right) - 2 \cdot 3,8^2 \cdot 1 \cdot \frac{1,29}{1000} \\
 m &= 5,76
 \end{aligned}$$

где $\gamma_1 = \gamma_{\text{воздух}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$

$\gamma = \lambda_{\text{тверд.}} = 1000 \text{ кг/м}^3$

По вычисленному значению m диаметр сопла D_1 , соответствующий поверхности F_1 , может быть выражен и диаметр смесительной камеры D_2 , соответствующий поверхности F_2 , $D_2 = 72,5 \text{ мм}$.

$D_1 = 30,2 \text{ мм}$.

Резюме

При пневматическом транспортировании абразивных или корродирующих веществ с предпочтением применяется инжекторный дозатор. Большим его преимуществом является, что не содержит движущихся элементов конструкции, его производство просто и он надежен в эксплуатации, в систему подает лишь такое количество вещества, которое и способен транспортировать.

Недостаток инженерного дозатора состоит в том, что им можно реализовать лишь низкое весовое отношение дозирования, и его низкий коэффициент полезного действия.

Инжекторный дозатор, собственно говоря, является струйным насосом, в котором первичная среда — воздух, а вторичная среда — смесь воздуха и твердого, пылесодержащего или зернистого вещества. В зависимости от того, какое давление создается в начальном участке транспортирующего трубопровода, можно говорить об инжекторных дозаторах работающих на низкой, средней и высокой разности давлений, а согласно пространственному расположению — о дозаторах с горизонтальной и вертикальной осью. Доклад подытоживает приближенные методы, разработанные для расчета инжекторных дозаторов с горизонтальным расположением, и работающих при низкой и средней разности давлений. Излагаются методы Бурке, Вебера, Успенского, Соколова и Зингера, а также новый метод расчета, и, наконец, приводится упрощенный метод расчета.

Литература

1. ВУНКЕ, Н.: Bemessung von Strahlschleusen. Hebezeuge und Fördermittel März 1969, р. 79—83.
2. ВЕБЕР, М.: Injektor-Schleusen für Feststofftransport Maschinenmarkt, Würzburg 75 (1969) N. 95. р. 2075—2077.
3. Успенский, В. А.: Пневматический транспорт. Металлургиздат. 1952.
4. Соколов, Е. Я., Зингер Н. М.: Струйные аппараты. Госэнергоиздат. Москва—Ленинград, 1960.

5. Фодор И.: Толькование, расчет и измерения характеристики инжекторного дозатора, присоединяемого к пневматическому транспортирующему оборудованию. «Машина», февраль, 1975.
6. Паттаньюш А. Г.: Практическая гидродинамика. Гос. Изд. Учебников, Будапешт, 1959.
7. Литваи Э.: Расчет инжекторов для транспортировки газов. Инст. по повыш. квалиф. инженеров, Будапешт, 1954.
8. VOGEL: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Strahlapparaten. Maschinenbautechnik, 1956. N. 12. p. 619—637.
9. Папай Л.: Транспортирование пыли и гранулата в воздушном потоке. Транспортирование + упаковка. XVII г. июль 1972 II. 161—163.
10. Фодор И.: Пневматическое устройство для транспортировки песка с инжекторной подачей и работающее воздухом высокого давления. «Машина» XXV, ноябрь 1973 г. стр. 434—438.
11. Папай Л.: Пневматическое и флюидизационное транспортирование материалов. Инст. по повыш. квалиф. инженеров, Будапешт, 1973 г.

И. Фодор, Будапештский технический Университет Н-1521