

УДК 621.527

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАСЧЕТ ЭЖЕКЦИОННОГО ПНЕВМОЗАТВОРА

**Е.К. СПИРИДОНОВ, Е.А. ГРИШИНА, А.В. ПОДЗЕРКО**

(Южно-Уральский государственный университет)

Представлена расчетная модель и даны основные характеристики эжекторного пневмозатвора. Разработан метод выбора пневмозатвора с минимальным энергопотреблением.

**Ключевые слова:** пневмозатвор, газодинамика, струйные течения, эжекторные аппараты, характеристики, расчет параметров.

**Введение.** На многих предприятиях остро стоит экологическая проблема токсичных выбросов продуктов реакций в окружающую среду. Одним из способов решения проблемы может являться использование пневматических запирающих устройств (пневмозатворов), обладающих высокой надежностью и производительностью.

**Основная часть.** На рис.1 приведена схема типового реактора с боковой загрузкой твердого сыпучего вещества. Избыточное давление, возникающее в реакторе в процессе работы, способствует появлению вредных выбросов в окружающую среду через канал загрузки. Установка пневмозатвора на узле загрузки позволит предотвратить вынос вредных газов в помещение цеха [1].

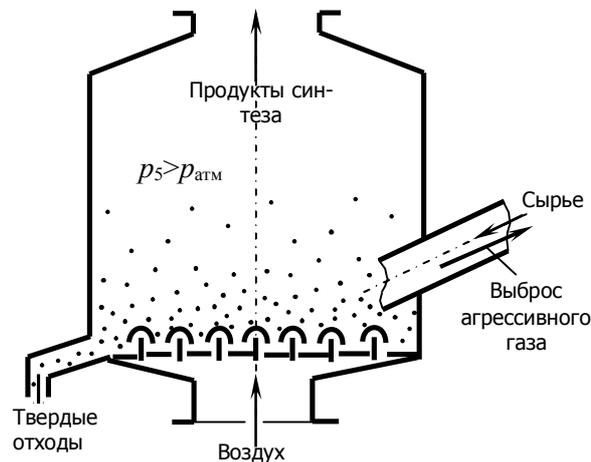


Рис. 1. Печь с противодавлением

В данной статье представлены расчетная модель и основные характеристики эжекторного пневмозатвора. В качестве исходной была принята схема газового струйного аппарата с центральным сверхзвуковым соплом (рис.2). Основным параметрам потока (абсолютные давление  $p$  и температура  $T$ , плотность  $\rho$ , средняя скорость потока  $V$ , площадь  $A$ ) присваиваются индексы, соответствующие номеру сечения на рис.2.

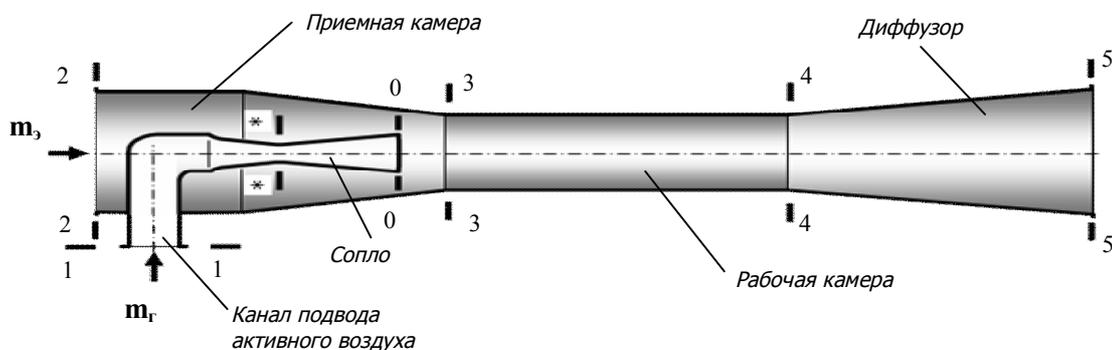


Рис.2. Расчетная схема эжекторного пневмозатвора

В зависимости от противодействия в реакторе  $p_5$  возможны различные режимы работы пневмозатвора [1]. В качестве расчетного был принят режим, при котором противодействие со стороны рабочей камеры достигает предельного значения ( $p_5 = p_{np}$ ), эжектирование газа со стороны патрубка загрузки прекращается, и поступление сырья в реактор осуществляется под действием силы тяжести. На этом режиме перепад давлений, развиваемый аппаратом, достигает максимального значения. Преобразуя типовую характеристику газового инжектора [2] в соответствии с указанными условиями, получаем:

$$\frac{p_5 - p_2}{p_2} = \frac{\Delta p_{52}}{p_2} = k\Pi_*\Omega_* \frac{p_1}{p_2} \left[ \varphi_0\varphi_3\lambda_0 - \varepsilon_* \left( \frac{1}{\varphi_4} - 0,5 \right) \Omega_* \frac{v_5}{v_1} \right]. \quad (1)$$

В этом выражении относительная площадь горловины сопла  $\Omega_* = A^*/A_3$  – основной геометрический параметр эжекционного пневмозатвора;  $\varphi_0$ ,  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  – коэффициенты скорости сопла, рабочей камеры и диффузора (при гидравлически совершенном исполнении элементов проточной части  $\varphi_0=0,95$ ;  $\varphi_3=0,875$ ;  $\varphi_4=0,81$ );  $\Pi_*$ ,  $\varepsilon_*$  – критические значения газодинамических функций давления и плотности;  $k$  – постоянная адиабаты. Для воздуха  $\Pi_* = 0,528$ ;  $\varepsilon_*=0,634$ ,  $k=1,4$ .

Удельный массовый расход активного воздуха в расчете на единицу площади смесительной камеры в соответствии с уравнением неразрывности [2] имеет вид:

$$\frac{m_1}{A_3} = \frac{k\Pi_*}{V_*} \Omega_* p_1, \quad (2)$$

где критическая скорость газового потока:

$$V_* = \sqrt{\frac{2kRT_1}{k+1}}. \quad (3)$$

Подставляя в уравнения (1) и (2) числовые значения коэффициентов скорости  $\varphi$ , постоянной адиабаты  $k$ , газодинамических функций  $\varepsilon_*$  и  $\Pi_*$ , принимая во внимание уравнение состояния совершенного газа и формулу (3), получаем после преобразования систему уравнений:

$$0,615 \Omega_* \lambda_0 \frac{p_1}{p_2} - 0,344 \Omega_*^2 \frac{p_1^2}{p_2 p_5} \frac{T_5}{T_1} - \frac{p_5 - p_2}{p_2} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{m_1}{A_3} = 0,04 \frac{\Omega_* p_1}{\sqrt{T_1}}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) являются аналитическим выражением характеристики эжекторного пневмозатвора, устанавливающим зависимость относительной площади горловины сопла  $\Omega_*$  и удельного расхода воздуха  $m_1/A_3$  от абсолютных давления в приемной камере пневмозатвора  $p_2$ , противодействия  $p_5$  и температуры активного воздуха  $T_1$ .

Некоторые результаты расчетов по уравнениям (4) и (5) представлены на рис.3 в виде графиков зависимости массового расхода активного воздуха  $m_1$  от температуры перед соплом  $T_1$  при различных площадях горловины сопла  $A^*$  и давлениях питания  $p_1$ . При этом в качестве расчетных были приняты следующие условия работы пневмозатвора: диаметр смесительной камеры (загрузочной трубы)  $D_3 = 300$  мм; максимальное абсолютное давление на выходе аппарата  $p_5=115$  кПа; абсолютное давление в приемной камере  $p_2=100$  кПа.

Из графиков видно, что с увеличением температуры воздуха перед соплом  $T_1$  существенно снижаются массовые расходы эжектора  $m_1$  и, следовательно, повышается экономичность пневмозатвора. Таким образом, целесообразно использовать энергию тепла, выделяющегося в реакторе. Это позволяет конструктивная схема аппарата, приведенная на рис. 4 [3]. Особенностью данной конструкции является подвод активного газа со стороны реактора через кольцевой зазор между

корпусом и камерой смешения с одновременным подогревом. Кроме того, кольцевой подвод активного газа снижает износ проточной части аппарата твердой фракцией эжектируемой смеси.

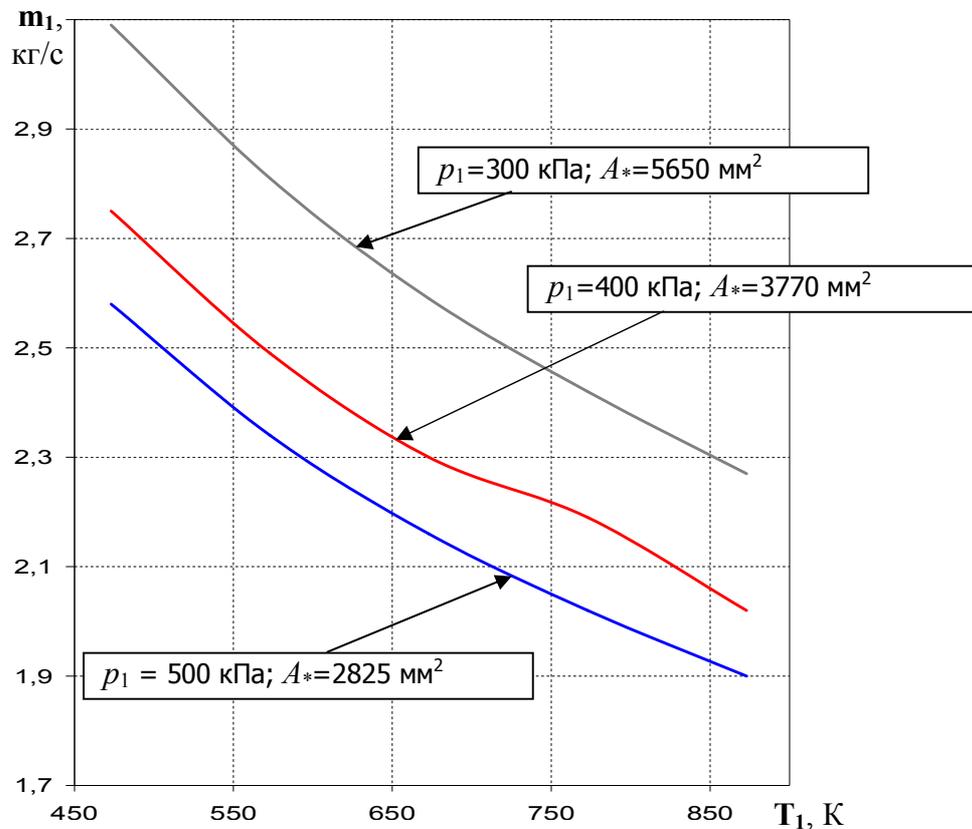


Рис.3. Зависимость массового расхода активного воздуха от температуры

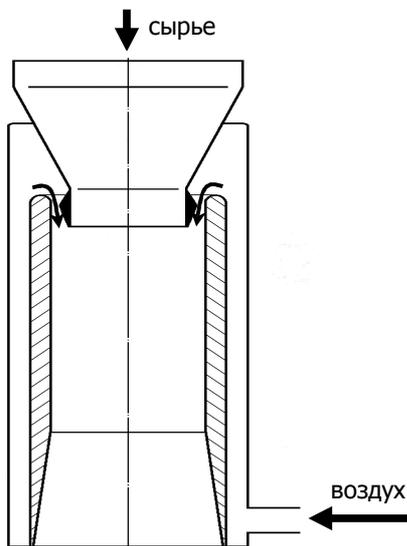


Рис.4. Эжекционный пневмозатвор с кольцевым соплом (пат. № 90547)

Исследование удобнее проводить, используя безразмерные характеристики, а к размерным параметрам переходить на этапе профилирования проточной части аппарата.

Для получения безразмерной характеристики введем следующие параметры:  $\varepsilon_{12}=p_1/p_2$  – степень падения давления на сопловом устройстве;  $\varepsilon_{52}=p_5/p_2$  – степень повышения давления пассивного потока;  $\Psi_T=T_5/T_1$  – соотношение температур.

После подстановки в уравнение (4) получаем:

$$0,615\Omega_*\lambda_0\varepsilon_{12} - 0,344\Omega_*^2 \frac{\varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{52}} \Psi_T - \varepsilon_{52} + 1 = 0. \quad (6)$$

Результаты расчета относительной площади сопла  $\Omega_*$  для воздуха ( $k=1,4$ ;  $R=287$  Дж/кг·К) при одинаковых температурах активного газа и смеси в реакторе ( $\Psi_T = 1$ ), различных значениях степени падения давления на сопловом устройстве  $\varepsilon_{12}$  и степени повышения давления пассивного потока  $\varepsilon_{52}$  показаны в виде семейства кривых на рис.5.

Влияние соотношения температур смеси в реакторе и активного газа на зависимость относительной площади сопла  $\Omega_*$  от степени падения давления  $\varepsilon_{12}$  при различных значениях  $\varepsilon_{52}$  пока-

зано на рис.6. При этом в каждой группе графиков (при одинаковом  $\varepsilon_{52}$ ) нижняя линия соответствует значению  $\Psi_T=1$ , средняя линия –  $\Psi_T=2$ , а верхняя –  $\Psi_T=3$ .

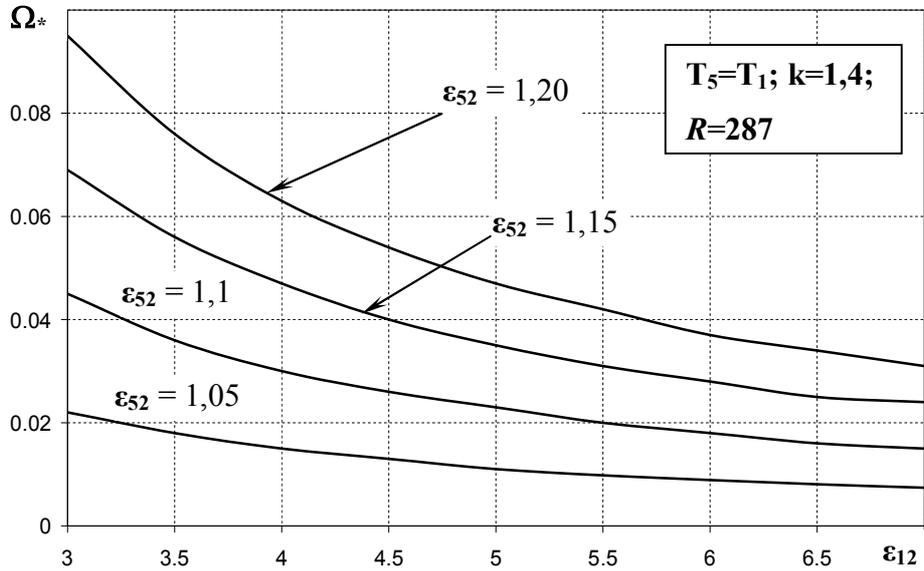


Рис. 5. Влияние противодействия на безразмерную характеристику пневмозатвора

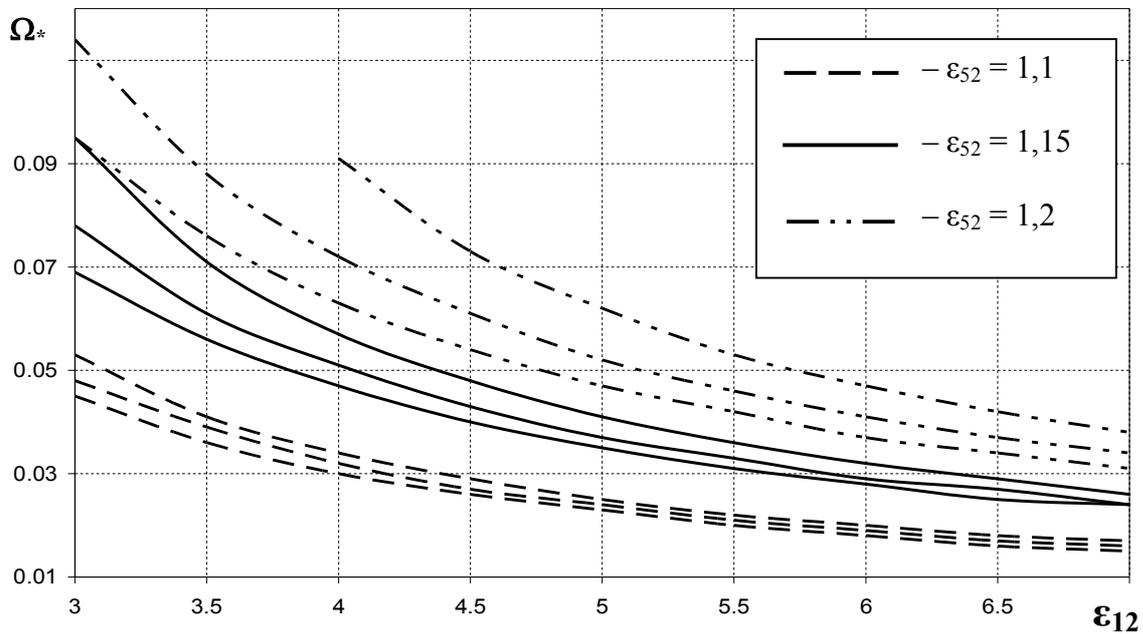


Рис.6. Влияние относительной температуры активного воздуха на характеристику пневмозатвора при нескольких  $\varepsilon_{52}$

Из графиков на рис.6 видно, что при постоянном падении давления на сопловом устройстве  $\varepsilon_{12}$  повышение температуры  $T_5$  в реакторе вызывает увеличение площади проходного сечения горловины сверхзвукового сопла  $A_*$ , что можно объяснить большим потребным расходом активного воздуха.

Вместе с тем при постоянных размерах элементов проточной части (площади горловины сопла  $A_*$  и площади смесительной камеры  $A_3$ ) увеличение температуры в реакторе  $T_5$  требует повышения давления питания  $p_1$ .

Вышеприведенные зависимости могут служить основой для расчета ключевых геометрических показателей струйного пневмозатвора. Используя параметры воздуха в линии питания  $p_1$ ,  $T_1$  и газа в реакторе  $p_5$ ,  $T_5$  в качестве исходных, на основании уравнений (4)–(6) и графиков на рис.5 и 6 можно аналитическим или графическим путем рассчитать относительную площадь сопла. Приняв в первом приближении диаметр смесительной камеры  $D_3$  равным диаметру патрубка загрузки, можно рассчитать площадь критического сечения сверхзвукового сопла. Далее определяются величина массового расхода активного газа  $m_1$ , а также площадь выходного сечения сверхзвукового сопла  $A_0$  (с использованием газодинамических функций). Осевые размеры основных элементов пневмозатвора (сопла, камеры смешения, диффузора) определяются по традиционным методикам для газовых эжекторов [2, 4, 5].

В качестве примера рассмотрим исходные параметры, соответствующие условиям работы типового химического реактора: диаметр загрузочной трубы, равный диаметру смесительной камеры,  $D_3=300$  мм, максимальное абсолютное давление в реакторе  $p_5=115$  кПа, барометрическое давление в помещении цеха  $p_2=100$  кПа.

Результаты расчета массового расхода активного воздуха  $m_1$  и площади горловины сопла  $A_*$  при нескольких давлениях питания  $p_1$  и температуре  $T_1=673$  К активного воздуха перед соплом пневмозатвора представлены в таблице.

Результаты расчета массового расхода воздуха перед соплом пневмозатвора

Давление питания $p_1$ , кПа	Площадь критического сечения сопла $A_*$ , мм <sup>2</sup>	Массовый расход воздуха $m_1$ , кг/с
300	5650	2,59
400	3770	2,30
500	2825	2,16

Из таблицы видно, что с увеличением температуры воздуха перед соплом  $T_1$  существенно снижаются потребные массовые расходы воздуха  $m_1$  и, следовательно, повышается экономичность пневмозатвора. Таким образом, очевидна целесообразность утилизации тепла, выделяющегося в печи при сгорании сырья.

**Выводы.** Предложена оригинальная конструктивная схема пневмозатвора – устройства, предотвращающего выбросы агрессивных газов из реакторов в окружающую среду. Рассчитаны и проанализированы характеристики пневмозатвора эжекционного типа, устанавливающие зависимость основных размеров устройства от режимных параметров.

### Библиографический список

1. Гришина Е.А. Рабочий процесс и конструкции эжекционного пневмозатвора / Е.А. Гришина, Е.К. Спиридонов, А.В. Подзерко // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. – 2009. – С.41-46.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Пат. 90547 RU, МПК F27B 15/08. Эжекционный пневмозатвор устройства для загрузки сыпучих материалов / Е.К. Спиридонов, Е.А. Гришина, А.В. Подзерко. – №2009136364/22; заявл. 30.09.2009; опубл. 10.01.2010. Бюл. №1. – 2 с.

4. Успенский В.А. Струйные вакуумные насосы / В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.

5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: в 2 ч. Ч.1. Учеб. руководство для втузов / Г.Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука: Гл. ред. физ-мат. лит., 1991. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 11.11.10.

## **References**

1. Grishina E.A. Rabochii process i konstrukcii eiekcionnogo pnevmozatvora / E.A. Grishina, E.K. Spiridonov, A.V. Podzerko // Dinamika mashin i rabochih processov: sb. dokl. vseros. nauch.-tehn. konf. – 2009. – S.41-46. – In Russian.

2. Sokolov E.Ya. Struinye apparaty / E.Ya. Sokolov, N.M. Zinger. – 3-e izd., pererab. – M.: Energoatomizdat, 1989. – 352 s. – In Russian.

3. Pat. 90547 RU, MPK F27B 15/08. Eiekcionnyi pnevmozatvor ustroistva dlya zagruzki sypuchih materialov / E.K. Spiridonov, E.A. Grishina, A.V. Podzerko. – №2009136364/22; zayavl. 30.09.2009; opubl. 10.01.2010. Byul. №1. – 2 s. – In Russian.

4. Uspenskii V.A. Struinye vakuumnnye nasosy / V.A. Uspenskii, Yu.M. Kuznecov. – M.: Mashinostroenie, 1973. – 144 s. – In Russian.

5. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika: v 2 ch. Ch.1. Ucheb. rukovodstvo dlya vtuzov / G.N. Abramovich. – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Nauka: Gl. red. fiz-mat. lit., 1991. – 600 s. – In Russian.

**E.K. SPIRIDONOV, E.A. GRISHINA, A.V. PODZERKO**

## **EJECTION PRESSURE LOCK CHARACTERISTICS AND CALCULATION**

*A design model and general properties of the ejection pressure lock are offered. A selection method of the pressure lock with the lowest power consumption is developed.*

**Key words:** *pressure lock, gas dynamics, jet flows, ejection devices, characteristics, parameter calculation.*