

УДК 66-936.42

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ»

канд. техн. наук *Е.В. САФРОНОВА*; канд. техн. наук, доц. *А.В. СПИРИДОНОВ*;
канд. техн. наук *А.В. МИТИНОВ*
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются струйные аппараты, принцип работы которых основан на том, что жидкость, движущаяся с большой скоростью, эжектирует газ. Этот способ реализуется при исключительной простоте и надежности конструкции в отсутствие подвижных элементов, требующих дополнительных затрат энергии. Показаны конструктивные особенности сопел круглого и прямоугольного сечений, приведена методика их расчета. Выполнены исследования для сравнения эффективности сопел различной конфигурации.

Ключевые слова: струйные аппараты, сопло, коэффициент эжекции, эффективность массопередачи, методика расчета.

Струйные аппараты получают достаточно широкое применение во многих отраслях промышленности. Принцип их работы основан на том, что одна движущаяся с большой скоростью жидкость эжектирует другую жидкость. Этот способ реализуется при исключительной простоте и надежности конструкции в отсутствие подвижных элементов, требующих дополнительных затрат энергии.

Основной характеристикой эффективности процесса является объемный коэффициент эжекции:

$$K_э = \frac{Q_г}{Q_ж}, \quad (1)$$

где $Q_г$ – расход эжектируемого газа, м/с; $Q_ж$ – расход жидкости, м/с.

Известно, что эффективность процессов аэрации характеризуется высокими значениями коэффициента эжекции ($K_э$). Анализ литературных источников [1] показал, что максимальный $K_э$ равен 3 при работе с соплами круглого сечения.

Экспериментальная часть. Исследовалось влияние конструктивных особенностей сопел и их форм на коэффициент эжекции [2]. Выявлено, что при большом отношении периметра сопла к его площади возможно увеличить значение коэффициента эжекции за счет применения плоскощелевых сопел или цилиндрических сопел малого диаметра.

Для обоснования такого перехода выполним ряд математических преобразований.

Из определения коэффициента эжекции

$$K_э = \frac{Q_г}{Q_ж} = \frac{W_г \cdot F_г}{W_ж \cdot F_с}, \quad (2)$$

где $W_г$ – скорость газа, м/с; $W_ж$ – скорость жидкости, м/с; $F_г$ – площадь сечения кольца вовлекаемого газа, м²; $F_с$ – площадь сечение сопла, м².

Принимая скорость газа равной скорости истечения жидкости из сопла, выражение (2) преобразуется в следующий вид:

$$K_э = \frac{F_г}{F_с}. \quad (3)$$

Для цилиндрического сопла (сечение сопла и сечение захваченного струей газа)

$$F_с = 0,785 \cdot d_с^2, \quad (4)$$

$$F_г = 0,785 \cdot [(d_с + 2\delta)^2 - d_с^2], \quad (5)$$

$$\frac{F_г}{F_с} = \frac{(d_с + 2\delta)^2 - d_с^2}{d_с^2} = \left(\frac{d_с + 2\delta}{d_с} \right)^2 - 1, \quad (6)$$

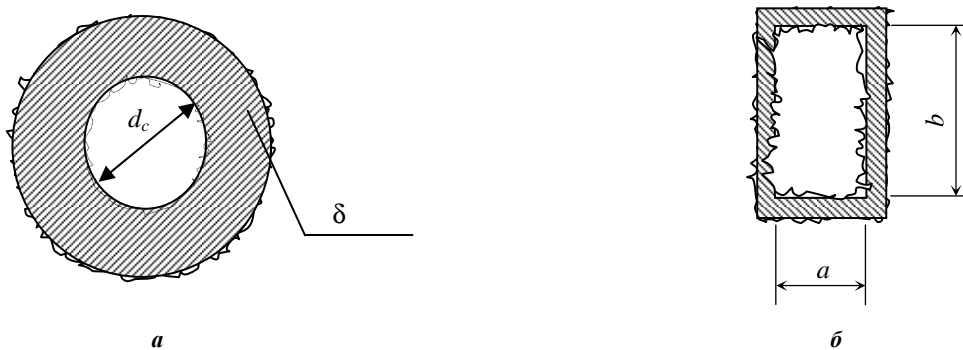
$$K_э = \left(1 + \frac{2\delta}{d_с} \right)^2 - 1. \quad (7)$$

Для плоского сопла

$$K_3 = \frac{(b+2\cdot\delta)\cdot(a+2\cdot\delta) - a\cdot b}{a\cdot b} = \left(\frac{b+2\cdot\delta}{b}\right) \cdot \left(\frac{a+2\cdot\delta}{a}\right) - 1, \tag{8}$$

$$K_3 = \left(1 + \frac{2\cdot\delta}{b}\right) \cdot \left(1 + \frac{2\cdot\delta}{a}\right) - 1. \tag{9}$$

Принцип эжекции струями разного сечения показан на рисунках 1, а, б.



d_c – диаметр сопла; δ – толщина вовлеченного в поток жидкости газа;
 b – длина сопла; a – ширина сопла

Рисунок 1 – Иллюстрация принципа захвата газа струей жидкости из сопла круглого сечения (а), из сопла плоского сечения (б)

Для упрощения процедуры сравнения сопел необходимо сделать некоторые допущения:

- $b/a = 10$ (для эффективной эжекции);
- сечение круглого сопла равно сечению плоского сопла;
- толщина прилипшего слоя газа в обоих случаях составляет: δ_1 – для цилиндрического сопла, δ_2 – для плоского сопла.

Выполняя математические преобразования, получим

$$\frac{K_{э.пл.}}{K_{э.цил.}} = \frac{\left(1 + \frac{2\cdot\delta_2}{b}\right) \cdot \left(1 + \frac{2\cdot\delta_2}{a}\right) - 1}{\left(1 + \frac{2\cdot\delta_1}{d_c}\right)^2 - 1}. \tag{10}$$

В диапазоне изменения d_c от 2 до 20 мм принимаем, что толщина прилипшего слоя газа больше при работе с плоским соплом, что позволило получить коэффициент эжекции для плоского сопла в несколько раз больший, чем для цилиндрического, а это делает его более эффективным по сравнению с цилиндрическим (рис. 2).

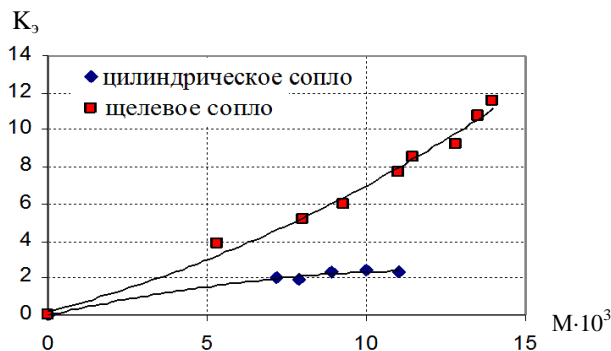


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эжекции от критерия Маха для цилиндрического сопла диаметром 5 мм и плоскощелевого сопла с шириной щели 5 мм

Как видно из рисунка 2, плоскощелевые сопла действительно имеют большие значения коэффициента эжекции в сравнении с цилиндрическими.

Расчет струйного массообменного аппарата отличается от расчета какого-либо другого массообменного аппарата только закономерностями формирования поверхности контакта взаимодействующих фаз и правильной ее оценкой. То есть для расчета процессов переноса в струйном аппарате необходимо пользоваться основным уравнением массопередачи. Для данного процесса это уравнение имеет вид [2; 3]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta, \quad (11)$$

где Q – количество переданного вещества, $\text{м}^3/\text{с}$; K – коэффициент массопередачи, отнесенный к единице поверхности, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; F – поверхность контакта фаз, м^2 ; Δ – движущая сила процесса массопередачи (может быть выражена в единицах концентрации или в единицах давления).

В каждой конкретной технологической задаче известна величина Q (количество вещества, которое должно быть передано в результате массообмена). Движущая сила процесса определяется конкретными физико-химическими данными по равновесному и рабочему состоянию системы. Причем движущая сила процесса может быть выражена либо как разность равновесной и рабочей концентраций, либо как разность равновесного и рабочего парциальных давлений системы.

Коэффициент массопередачи для газообразной фазы определяется по формуле:

$$1/K = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}. \quad (12)$$

Так, в случае испарения воды с использованием струйных аэракторов основное сопротивление сосредоточено в газовой фазе (что подтверждается и экспериментально), поэтому коэффициент массопередачи принимается равным коэффициенту массоотдачи в газовой фазе (β_y), практически не зависящему от состояния равновесия (величины m) и коэффициента массоотдачи в жидкой фазе (β_x).

Основным и характерным вопросом для струйного аппарата является определение поверхности контакта фаз F , а также её связь с условиями эжектирования и конструкцией эжектора.

Методика выявления подобной зависимости заключается в следующем.

Уравнение для поверхности контакта фаз запишем как [4]:

$$F = \frac{Q_{жс} \cdot f(M)}{W_{пуз}}. \quad (13)$$

Выполняя ряд преобразований, получим выражение для определения поверхности контакта фаз:

$$F = \frac{f(M) \cdot Q_{жс}}{W_{пуз}} = \frac{f(M) \cdot f_c \cdot w_{жс} \cdot W_{зв} / W_{зв}}{W_{пуз}} = \frac{f(M) \cdot f_c \cdot M \cdot W_{зв}}{W_{пуз}} = \frac{Q}{K \cdot \Delta}, \quad (14)$$

где f_c – сечение сопла, м^2 ; M – число Маха; $W_{пуз}$ – скорость подъема газового пузыря, $\text{м}/\text{с}$; $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла, $\text{м}/\text{с}$; $W_{зв}$ – скорость звука в данной среде, $\text{м}/\text{с}$; K – коэффициент массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; Δ – движущая сила процесса переноса.

Выражаем из этого уравнения сечение сопла

$$f_c = \frac{W_{пуз} \cdot Q}{f(M) \cdot M \cdot W_{зв} \cdot K \cdot \Delta}. \quad (15)$$

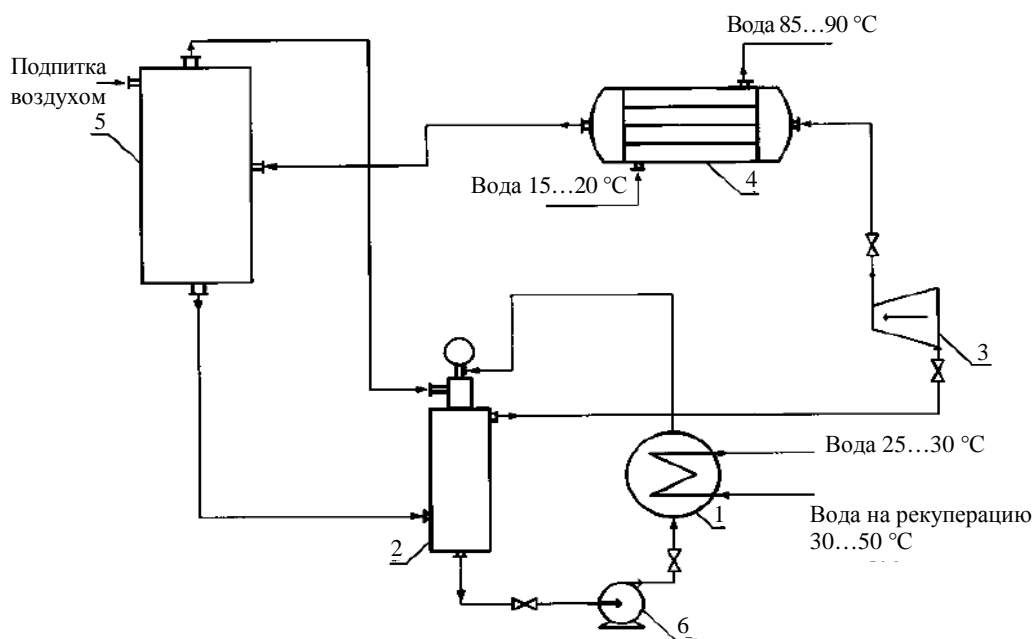
В дальнейшем, задавая числом Маха, обеспечивающим режим развитой турбулентности и максимальный коэффициент эжекции, находим следующие параметры технологического процесса: сечение сопла f_c и расход эжектирующей жидкости $Q_{жс}$:

$$M = \frac{w_{жс}}{W_{зв}} = \frac{Q_{жс}}{f_c \cdot W_{зв}}. \quad (16)$$

Расход жидкости, подаваемой на сопло струйного аэратора, находим по формуле:

$$Q_{жс} = \frac{W_{н\text{ыз}} \cdot Q}{f(M) \cdot K \cdot \Delta} \quad (17)$$

Зная количество вещества, участвующего в массообменном процессе, коэффициент массопередачи и движущую силу процесса, а также задаваясь значениями числа Маха и K_3 , находим расход циркулирующей через аппарат жидкости, обеспечивающей необходимые значения M и K_3 . Далее определяем сечение сопла f_c . Очевидно, что K_3 при заданном оптимальном числе Маха будет зависеть от конструкции и размеров сопла. Зная две эти величины, подбирается насос для циркуляции жидкости и конструктивные размеры аэратора. Струйный аппарат в схеме с тепловым насосом [5; 6] показан на рисунке 3.



1 – теплообменник-рекуператор; 2 – струйный аппарат;
3 – ротационно-пластинчатый вакуум-насос; 4 – конденсатор;
5 – сепаратор; 6 – циркуляционный насос

Рисунок 3 – Струйный аппарат в схеме с тепловым насосом

Если при проектировании струйного аппарата необходимо определить только размеры эжекционного сопла, методика расчета заключается в следующем.

При ведении технологического процесса обычно известна допустимая величина перепада давления, создаваемого на сопле. Данной величине перепада давления соответствует определенная скорость истечения жидкости, подаваемой на сопло, которая определяется из выражения

$$w_{жс} = \xi \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot g / \rho_{жс}}, \quad (18)$$

где $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла при определенном перепаде давления, м/с; ξ – коэффициент расхода сопла (берется на основе расчета из опытных данных); ΔP – перепад давления сопла, кгс/см²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости при рабочих условиях, кг/м³.

Далее становится возможным определить сечение необходимого плоского сопла

$$f_c = \frac{Q_{жс}}{w_{жс}}, \quad (19)$$

где f_c – сечение сопла, м²; $Q_{жс}$ – расход эжектирующей жидкости, м³/с; $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла, м/с.

Заключение. Струйные аппараты используются как нагнетатели, смесители и аэраторы. В качестве последних струйных аппаратов могут эффективно применяться для создания аэрированных систем при инжектировании воздуха или газа в среду, которую необходимо ими насытить (например, для обеспечения протекания биохимических реакций). Этот способ аэрации является весьма привлекательным для использования в таких процессах, как перенос тепла и массы во многих технологиях (в системах с тепловыми насосами). Отсутствие подвижных элементов, контактных устройств, часто забивающихся и увеличивающих гидравлическое сопротивление аппаратов, делает их применение предпочтительным и менее затратным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, С.Я. Струйные аппараты / С.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Сафронова, Е.В. Моделирование процессов переноса при струйном аэрировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Е.В. Сафронова; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2001. – 110 с.
3. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов: в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
4. Сафронова, Е.В. Массоперенос при струйном аэрировании / Е.В. Сафронова, Г.Н. Абаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 6. – С. 3–7.
5. Пискун, И.М. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом смесь паров воды и воздуха / И.М. Пискун, Г.Н. Абаев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 77–81.
6. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом смесь паров воды и воздуха: пат. 16833 Респ. Беларусь, МПК: F25B 30/02, F24D 11/02 / Г.Н. Абаев, И.М. Пискун; заявитель Г.Н. Абаев, И.М. Пискун, ОАО Технолит. – № ф20101400; заявл. 11.12.12; опубл. 28.02.2013 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2013. – С. 11.

Поступила 14.10.2015

DESIGN AND CALCULATION OF EFFECTIVE JET DEVICES SYSTEM “LIQUID – GAS”

E. SAFRONOVA, A. SPIRIDONOV, A. MITINOV

Jet devices, the principle of which is based on the fact that the fluid moving at high speed, ejects gas are considered. This method is implemented with the extreme simplicity and reliability of design in the absence of moving parts, requiring extra energy. Nozzle constructive design features of round and rectangular sections are shown, the method of their calculation is given. The comparison of the efficiency of nozzles of various configurations is done.

Keywords: *jet devices, nozzle constructive design features, ejection coefficient, efficiency of mass transfer, calculation method.*