



Научная статья

УДК 66.023.2

DOI: 10.52957/2782-1900-2025-6-2-73-78

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТРУЙНОГО АППАРАТА С ИНВЕРСИЕЙ ФАЗ

В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева

Валерий Константинович Леонтьев, канд. техн. наук, доцент; Ольга Николаевна Кораблева, канд. хим. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., д.88; korablevaon@ystu.ru

Ключевые слова:
струйный аппарат,
интенсификация
процесса, инверсия
фаз, уравнение
Эргана,
псевдооживленный
слой

Аннотация. Рассмотрены три режима работы струйного аппарата, имеющего форсунку и эжектор. Предложено рассматривать процесс жидкогазовой инжекции как процесс фильтрации газа через слой взвешенных частиц жидкости при ее опережающем движении. В этом случае процесс будет аналогичен движению газа через псевдооживленный слой. Перепад давления можно определять по известному уравнению Эргана, пригодному для широкого диапазона значений критерия Рейнольдса. На основе теоретических исследований для режима с инверсией фаз определена глубина, на которой происходит формирование газожидкостного слоя. Для струйного аппарата, который наиболее часто используется в газожидкостных эжекционных реакторах, выполнен расчет длины эжектора, на которой происходит инверсия фаз.

Для цитирования:

Леонтьев В.К., Кораблева О.Н. Исследование работы струйного аппарата с инверсией фаз // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 73-78. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/6013/view>

Введение

Струйные аппараты находят все большее применение во многих отраслях промышленности. В химической технологии такие устройства используются для проведения тепло-массообменных процессов, в качестве реакторов при протекании быстрых химических реакций. Одним из наиболее надежных и точных способов оценки эффективности газожидкостных аппаратов считается химический метод, основанный на определении эффективной поверхности контакта фаз, т.е. межфазной поверхности, действительно участвующей в массообменном процессе [1-3]. Этот метод основан на хемосорбции кислорода из воздуха, которая позволяет определить скорость проводимого процесса и «сульфитное число». Малые габариты позволяют обеспечивать металлосбережение, высокую удельную производительность без снижения времени, необходимого для завершения процесса окисления [4].



Основная часть

Смесительное устройство для системы газ-жидкость содержит корпус, инжекционную камеру, распылитель жидкости, диспергатор, смеситель, выполненный в виде вертикальной трубы различного поперечного сечения. Аппарат может работать в широком диапазоне изменения параметров рабочих сред, что позволяет регулировать гидродинамику процесса. Важным параметром, характеризующим эффективность работы эжектора, может служить коэффициент полезного действия (КПД), определяемый как отношение энергии переданной потоку газа к затраченной энергии активного потока [5-7]. Принцип работы следующий: жидкость под давлением подается в форсунку, распыляется и засасывает газ, поступающий в эжекционную камеру. Образовавшаяся газожидкостная смесь проходит через эжектор-смеситель. В эжекторе происходит контакт жидкости и газа при развитой поверхности распыленной жидкости [8]. В зависимости от режима работы эжектора, его геометрических параметров и перепада давления на форсунке, в эжекторе может образовываться газожидкостный двухфазный поток с различным соотношением жидкости и газа. Двухфазный поток может быть с дисперсной жидкой, либо газовой фазой [9-11].

В зависимости от соотношения площадей сечений сопла форсунки и эжектора предложено классифицировать такие струйные аппараты [2] (рис. 1):

1. Если $Sc/Sэ < 0,0013$, то в таких струйных аппаратах жидкая фаза всегда сплошная (рис. 1а).
2. Если $0,0013 < Sc/Sэ < 0,741$, то в таких струйных аппаратах возможно существование сплошной и газовой и жидкой фазы (рис. 1б), т.е. наблюдается инверсия фаз.
3. Если $Sc/Sэ > 0,741$, то в таких струйных аппаратах жидкая фаза всегда дисперсная (рис. 1в).

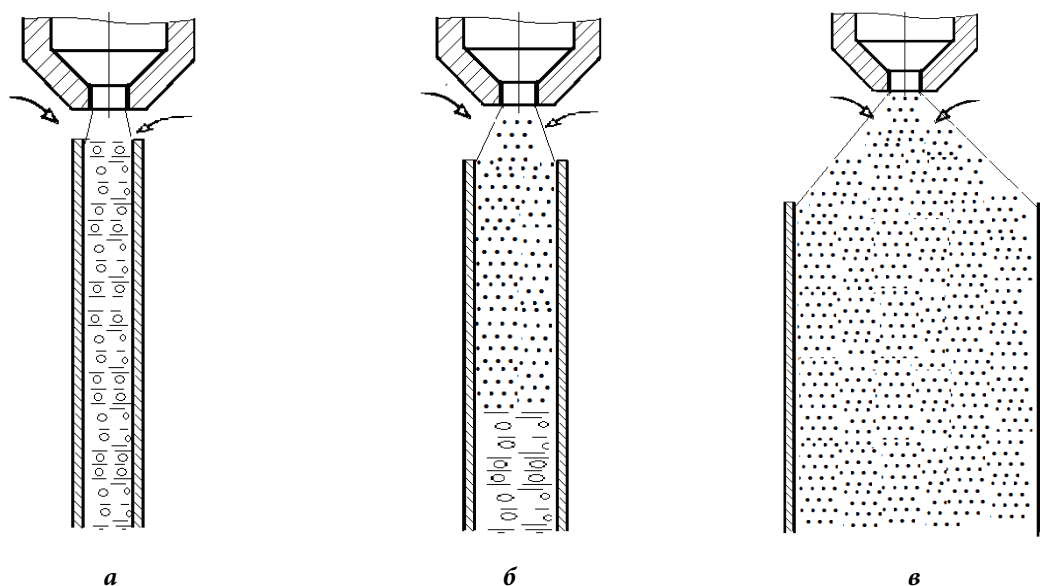


Рис. 1. Классификация струйных аппаратов в зависимости от соотношения площадей сечений сопла форсунки и эжектора



Особый интерес представляет струйный аппарат, в котором происходит инверсия фаз (рис. 16), что позволяет без изменений конструкционных размеров аппарата **повышать эффективность массообмена** в газожидкостных системах. Это происходит за счёт увеличения коэффициента массоотдачи путем устранения обратного перемешивания и создания на пути контактирующих фаз зон эффективного контакта [12-14].

Также существует мнение, что в момент образования двухфазного потока (эмульсии) при барботировании и в момент разрушения эмульсии происходит **полный 100%-ный массообмен** между фазами [15].

Целью данной работы является изучение гидродинамики струйного аппарата, имеющего форсунку и проточную часть – эжектор, а конкретно, механизма взаимодействия рабочего (жидкого) и ижектируемого (газового) потоков в эжекторе струйного аппарата.

Предлагается рассматривать процесс жидкогазовой инъекции как процесс фильтрации газа через слой взвешенных частиц жидкости при ее опережающем движении. В этом случае процесс будет аналогичен движению газа через псевдооживленный слой. Перепад давления можно определять по известному уравнению Эргана, пригодному для широкого диапазона значений критерия Рейнольдса.

В начальной части эжектора (рис. 2) выделим элемент высотой dz .

В таком аппарате можно выделить четыре зоны:

- зона свободного факела;
- зона стесненного движения двухфазного потока с дисперсной жидкой фазой;
- зона формирования газожидкостной эмульсии;
- зона движения двухфазного потока с дисперсной газовой фазой.

Сила, приводящая в движение жидкие частицы, равна геометрической сумме сил, действующих на частицы в выделенном объеме.

$$F = G + F_{\text{ар}} - F_c, \quad dF = dG + dF_{\text{ар}} - dF_c, \quad (1)$$

где dG – сила тяжести частиц;

$dF_{\text{ар}}$ – сила Архимеда;

dF_c – сила сопротивления.

$$dG = dm_{\text{ж}} \cdot g = \rho_{\text{ж}} \cdot dV \cdot g,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы кг/м³;

$$dF_{\text{ар}} = dm_{\text{г}} \cdot g = \rho_{\text{г}} \cdot dV \cdot g,$$

где $\rho_{\text{г}}$ – плотность газовой фазы кг/м³;

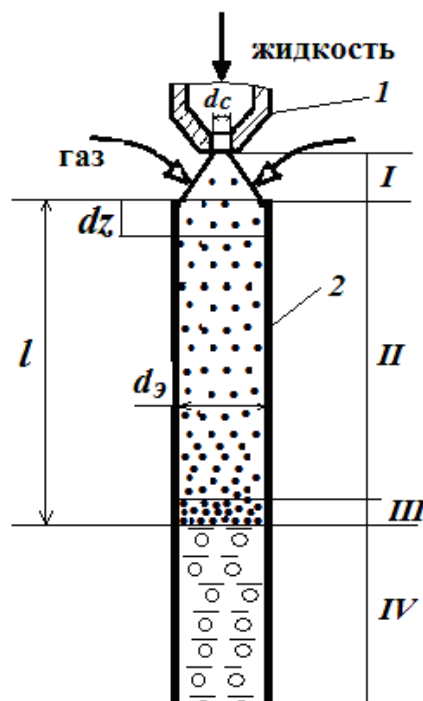


Рис. 2. Схема струйного аппарата с форсункой и эжектором: 1 – форсунка; 2 – эжектор.



$$dG - dF_{ap} = (\rho_{ж} - \rho_{г}) \cdot dV \cdot g = \frac{(\rho_{ж} - \rho_{г}) dm_{ж}}{\rho_{ж} g}.$$

Уравнение движения:

$$\frac{dm_{ж} dV}{d\tau} = \frac{(\rho_{ж} - \rho_{г}) dm_{ж}}{\rho_{ж} g} - dF_c,$$

$$dF_c = \left[150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu_{г}(v_{ж} - v_{г})}{d_{к}^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_{г}(v_{ж} - v_{г})^2}{d_x} \right] S_{эж} \cdot d_z, \quad (2)$$

где ε – порозность среды;

$\mu_{г}$ – вязкость газа, Па·с;

$S_{эж}$ – площадь эжектора, м².

Упрощаем уравнение, пренебрегаем членами: $\frac{(\rho_{ж} - \rho_{г}) dm_{ж}}{\rho_{ж} g}$ и $150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu_{г}(v_{ж} - v_{г})}{d_{к}^2}$ ввиду их малости и полагая, что $v_{г} = 0$, получаем:

$$\rho_{ж} V_{ж} \cdot dV_{ж} = -1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_{г}}{d_x} S_{эж} \cdot v_{ж}^2 \cdot d_z. \quad (3)$$

Так как $\varepsilon = 1 - \frac{V_{ж}}{S_{эж} \cdot v_{ж}}$, то в уравнении (3) можно произвести замену переменных:

$$v_{ж} = \frac{S_c}{S_{эж}} \cdot \frac{v_{ж0}}{1 - \varepsilon},$$

$$v_{ж} = \frac{S_c}{S_{эж}} \cdot v_{ж0} \frac{d\varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

Тогда переменные в уравнении (3) легко разлагаются, и можно записать:

$$d_z = -\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \cdot \frac{d_{к}}{1,75} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} d\varepsilon.$$

Для того, чтобы жидкость успела затормозиться от ε_0 до $\varepsilon_{кр}$, длина эжектора должна быть больше некоторого значения, определяемого по уравнению:

$$l \geq \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \cdot \frac{d_{к}}{1,75} \int_{\varepsilon_{кр}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} d\varepsilon.$$

Интеграл

$$\int_{\varepsilon_{кр}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} d\varepsilon = \int_{\varepsilon_{кр}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{-\varepsilon + 1} d\varepsilon =$$

$$= \left(-\frac{\varepsilon^3}{3} - \frac{\varepsilon^2}{2} - \varepsilon \right) - \ln(\varepsilon - 1) - \frac{\varepsilon_0^3}{3} - \frac{\varepsilon_0^2}{2} - \varepsilon_0 - \ln(\varepsilon_0 - 1) + \frac{\varepsilon_{кр}^3}{3} - \frac{\varepsilon_{кр}^2}{2} - \varepsilon_{кр} - \ln(\varepsilon_{кр} - 1) =$$

$$= \frac{\varepsilon_{кр}^3 - \varepsilon_0^3}{3} + \frac{\varepsilon_{кр}^2 - \varepsilon_0^2}{3} + (\varepsilon_{кр} - \varepsilon_0) + \ln \frac{\varepsilon_{кр} - 1}{\varepsilon_0 - 1}.$$

Таким образом,

$$l \geq \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \cdot \frac{d_{к}}{1,75} \left[\frac{\varepsilon_{кр}^3 - \varepsilon_0^3}{3} + \frac{\varepsilon_{кр}^2 - \varepsilon_0^2}{3} + (\varepsilon_{кр} - \varepsilon_0) + \ln \frac{\varepsilon_{кр} - 1}{\varepsilon_0 - 1} \right].$$

Выполним расчет для струйного аппарата, который наиболее часто используется в газожидкостных эжекционных реакторах с диаметрами сопла и эжектора $d_c = 12$ мм и $d_э = 25$ мм соответственно.



Тогда начальная порозность составит:

$$\varepsilon_0 = \left(1 - \frac{S_c}{S_{\text{эж}}}\right) = \left(1 - \frac{12^2}{25^2}\right) = 0,77.$$

Критическая порозность определяется в зависимости от упаковки капель в зоне формирования газожидкостной эмульсии [10]:

1. для плотной упаковки $\varepsilon = 0,259$;
2. для неплотной упаковки $\varepsilon = 0,476$;
3. для сыпучих материалов принимается средняя порозность $\varepsilon = 0,4$.

Диаметр капли d_k определяется в зависимости от критерия Рейнольдса $Re = \frac{v_{\text{ж}} \cdot d_c \cdot \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}$, где $v_{\text{ж}}$ – скорость жидкости, вытекающей из сопла, которая рассчитывается по выражению:

$$v_{\text{ж}} = \varphi_c \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{ф}}}{\rho_{\text{ж}}}},$$

где φ_c – коэффициент скорости, ($\varphi_c = 0,95 \dots 0,97$), $p_{\text{ф}}$ – давление на форсунке, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

При $2280 < Re < 18280$ диаметр капли можно определить из выражения $\frac{d_k}{d_c} = \frac{18,3}{Re^{0,59}}$, при $Re > 20000$ увеличение скорости истечения и уменьшение вязкости жидкости практически не приводят к улучшению качества распыливания, и отношение $\left(\frac{d_k}{d_c}\right)$ в этом случае может быть принято равным $\sim 0,06$ [4].

При давлениях на форсунке более 0,1 Мпа и значении скорости $v_{\text{ж}}$ более 13 м/с $Re > 150000$, поэтому используем выражение $\left(\frac{d_k}{d_c}\right) = 0,06$. Тогда диаметр капель составит $d_k = 0,00072$ м.

С учетом величины критической порозности капель значение интеграла будет:

$$1) \quad \int_{\varepsilon_{\text{кр}}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} = \frac{0,259^3 - 0,77^3}{3} + \frac{0,259^2 - 0,77^2}{2} + (0,259 - 0,77) + \ln\left(\frac{0,259 - 1}{0,77 - 1}\right) = 0,250.$$

$$2) \quad \int_{\varepsilon_{\text{кр}}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} = \frac{0,476^3 - 0,77^3}{3} + \frac{0,476^2 - 0,77^2}{2} + (0,476 - 0,77) + \ln\left(\frac{0,476 - 1}{0,77 - 1}\right) = 0,234.$$

$$3) \quad \int_{\varepsilon_{\text{кр}}}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} = \frac{0,400^3 - 0,77^3}{3} + \frac{0,400^2 - 0,77^2}{2} + (0,400 - 0,77) + \ln\left(\frac{0,400 - 1}{0,77 - 1}\right) = 0,242.$$

Длина Эжектора соответственно составит:

$$1) \quad l_1 \geq 0,32 \cdot 0,250 = 0,080 \text{ м.}$$

$$2) \quad l_2 \geq 0,32 \cdot 0,234 = 0,075 \text{ м.}$$

$$3) \quad l_3 \geq 0,32 \cdot 0,242 = 0,0774 \text{ м.}$$



Таким образом, результаты расчета говорят о том, что, независимо от значений критической порозности капле, во всех расчетах глубина эжектора, на которой происходит инверсия фаз, практически одинакова.

Выводы

Полученные результаты можно применять при расчетах тепло-массообмена как в струйных аппаратах, так и в газожидкостных реакторах, где используются струйные аппараты такого типа.

Список источников

1. Леонтьев В.К., Барашева М.А. Расчет газожидкостного эжекционного аппарата для проведения процесса абсорбции. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2012, 55(12), 98-100.
2. Леонтьев В.К., КорABLEVA О.Н., ЮРОВСКАЯ М.А. Оценка эффективности газожидкостных аппаратов с эжекционным диспергированием газа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2016, 59(12), 107-112. DOI: 10.6060/tcct.20165912.5420.
3. Leontiev V.K., KorABLEVA O.N. Development of gas-liquid ejection apparatus construction designs. *Chem. Pet. Eng.*, 2016, 52(3), 160-163. DOI: 10.1007/s10556-016-0167-8.
4. Леонтьев В.К., КорABLEVA О.Н. О поверхности контакта фаз в газожидкостном эжекционном аппарате. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2014, 57(8), 84-86.
5. Леонтьев В.К., КорABLEVA О.Н., ГИРБА Е.А. Использование газожидкостных аппаратов в промышленности. *От химии к технологии шаг за шагом*, 2021, 2(2), 76-80. DOI: 10.52957/27821900_2021_02_76.
6. Леонтьев В.К., ГИРБА Е.А., Леонтьев А.В., РЯБКОВ И.А. Исследование массообмена в газожидкостном эжекционном аппарате. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2009, 52(9), 133-134.
7. Leontiev V.K., KorABLEVA O.N. Experimental determination of the aeration energy and gas content of the medium in a gas-liquid ejection apparatus. *Chem. Pet. Eng.*, 2021, 57(7), 551-554. DOI: 10.1007/s10556-021-00974-1.
8. Леонтьев В.К., Будников К.Н., Поткин И.А., Кочеткова Е.Б. Оценка эффективности газожидкостного эжекционного аппарата с различным диаметром эжектора. *От химии к технологии шаг за шагом*, 2024, 5(1), 58-64. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5007/view> (дата обращения: 14.05.2025).
9. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкости. М.: Химия, 1984, 256 с.
10. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты под ред. Т.И. Мушинска. Москва: Энергоатом, 1989, 352 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/10437?ysclid=mapjvgh4c516632659> (дата обращения: 14.05.2025).
11. Гущин Ю.И., Галицкий И.В., Басаргин Б.Н. К вопросу о классификации струйных аппаратов для систем жидкость – газ. Массообменные и теплообменные процессы химической технологии в сб. научных трудов Ярославск. политехн. ин-та, 1975, 32-38.
12. Леонтьев В.К. Межфазная поверхность, структура потока и методика расчета аппаратов с эжекционным диспергированием газа: дис. канд. техн. наук. Ярославль, 1984, 186 с.
13. Луканин А.В. Инженерная экология: процессы и аппараты очистки газовоздушных выбросов, учебное пособие. М.: Инфра-М., 523 с.
14. Гущин Ю.И., Галицкий И.В., Басаргин Б.Н. Коэффициент полезного действия струйного аппарата. *Массообменные и теплообменные процессы химической технологии*, 1975, 20-25.
15. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии, в двух книгах. М.: Химия, 1981, 812 с.

Поступила в редакцию 07.05.2025

Одобрена после рецензирования 21.05.2025

Принята к опубликованию 02.06.2025