



## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ЭЖЕКЦИОННОГО АППАРАТА С РАЗЛИЧНЫМ ДИАМЕТРОМ ЭЖЕКТОРА

В. К. Леонтьев<sup>1</sup>, К. Н. Будников<sup>1</sup>, И. А. Поткин<sup>1</sup>, Е. Б. Кочеткова<sup>2</sup>

Валерий Константинович Леонтьев, канд. техн. наук, доцент; Кирилл Никитович Будников, студент; Иван Андреевич Поткин, студент; Екатерина Борисовна Кочеткова, аспирант

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, [leontievvk@ystu.ru](mailto:leontievvk@ystu.ru); [budnikovkn.19@edu.ystu.ru](mailto:budnikovkn.19@edu.ystu.ru); [potkinia.19@edu.ystu.ru](mailto:potkinia.19@edu.ystu.ru)

<sup>2</sup>Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Ярославской области, Ярославль, Россия, [sra-ekaterina@yandex.ru](mailto:sra-ekaterina@yandex.ru)

**Ключевые слова:**  
газожидкостной эжекторный аппарат, распыливание, диспергирование, «сульфитное число», эффективность

**Аннотация.** В статье приведен анализ конструкций газожидкостных эжекторных аппаратов. Рассмотрены направления создания новых конструкций таких аппаратов. Приведены некоторые области применения аппаратов, использующих процесс распыливания жидкости. Проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности газожидкостного эжекторного аппарата. Получены экспериментальные зависимости «сульфитного числа» от перепада давления на форсунке и диаметра эжектора.

### Для цитирования:

Леонтьев В.К., Будников К.Н., Поткин И.А., Кочеткова Е.Б. Оценка эффективности газожидкостного эжекторного аппарата с различным диаметром эжектора // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 58-64. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/issue/view/2024-5-1>

### Введение

В химической промышленности и связанных с ней отраслях применяется множество аппаратов различных конструкций для проведения массообменных процессов и химических превращений в системах «жидкость–газ».

Газожидкостный эжекторный аппарат, разработанный в ЯГТУ, обладает рядом технологических и конструктивных преимуществ по сравнению с другими аппаратами для процессов в системе «газ–жидкость» [1].

Ранее были рассмотрены некоторые конструкции наиболее распространенных газожидкостных аппаратов, используемых в промышленности [2]. Отмечено, что одним из надежных способов оценки эффективности газожидкостных считается химический метод, основанный на определении «сульфитного числа».

В газожидкостных аппаратах с эжекторным диспергированием газа используются два важнейших процесса: 1) процесс распыливания (диспергирования) жидкости, 2) процесс смешения газа и жидкости. Для процесса диспергирования применяется



значительное количество распылителей различной конструкции [3]. Наиболее распространенными распылителями являются форсунки. Особое место занимает распыливание для получения крупных капель. Такое распыливание проводят в пищевой промышленности при гранулировании продуктов, в химической промышленности при производстве минеральных удобрений [4-5], в распылительных сушилках, при искусственном дождевании воды в градирнях [6-8].

Большое значение имеет процесс распыливания при химической защите растений агрохимикатами. Для решения конкретной задачи имеется свой оптимальный размер капель, который зависит от множества факторов. Известно, что чем больше одинаково концентрированных и схожих по размеру капель из класса мелкокапельных (50–150 мкм) или среднекапельных (150–300 мкм) попадает в цель, тем меньше требуется пестицидов. Размер капель зависит от диаметра сопла распылителя и давления. Различают следующие виды распыливания: механическое, электрическое, газовое [9-10].

Разработанные в ЯГТУ газожидкостные аппараты с эжекционным диспергированием газа в основном определяются двумя направлениями совершенствования соответствующего процесса химической технологии и делятся на два типа новых конструкций: 1) распылителей (форсунок), 2) смесителей.

В первом случае для интенсификации процесса смешения фаз распылитель выполняется в виде форсунки с завихряющим вкладышем в камере закручивания [11] или в распылитель устанавливается многозаходный шнек [12]. Во втором случае интенсификация процесса смешения фаз в смесителе достигается путем установки каскадного ударно-струйного устройства (например, набора усеченных конусов различных диаметров и углов конусности [13]) или поперечных перегородок в виде системы «диск–кольцо» для усиления эффекта перемешивания контактирующих фаз и увеличения времени их контакта [14].

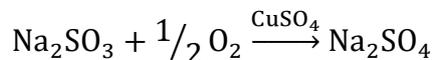
В последнее время газожидкостные эжекционные аппараты используются в качестве аппаратов для получения пены. Пены находят широкое применение во многих отраслях промышленности, в быту, например, при пожаротушении (в том числе емкостей с легко воспламеняющимися жидкостями внутри закрытых помещений подвалов, судов, самолетов и т.д.) и для теплоизоляции. В газожидкостном аппарате для получения пены [15] смеситель (эжектор) выполнен в виде диффузора, внутри которого установлены звездочные рабочие элементы. К конструктивным особенностям смесителя газожидкостного аппарата для получения пены большой кратности [16] относится наличие двух конусов – диффузора и конфузора, внутри которых установлены три трехлопастных пропеллера. Для достижения максимальной кратности пены расстояние форсунки распылителя до пакета сеток должно быть таким, чтобы проекция телесного угла факела распыла раствора практически полностью совпадала с проекцией рабочей поверхности первой сетки пакета [17].

### **Основная часть**

Цель данной работы заключается в экспериментальном определении эффективности классического газожидкостного эжекционного аппарата и оценке влияния на величину эффективности некоторых геометрических и технологических параметров.



Оценка эффективности массопереноса в газожидкостных потоках осуществляется с использованием «сульфитной методики» [18], которая основана на каталитическом окислении сульфита натрия кислородом воздуха:

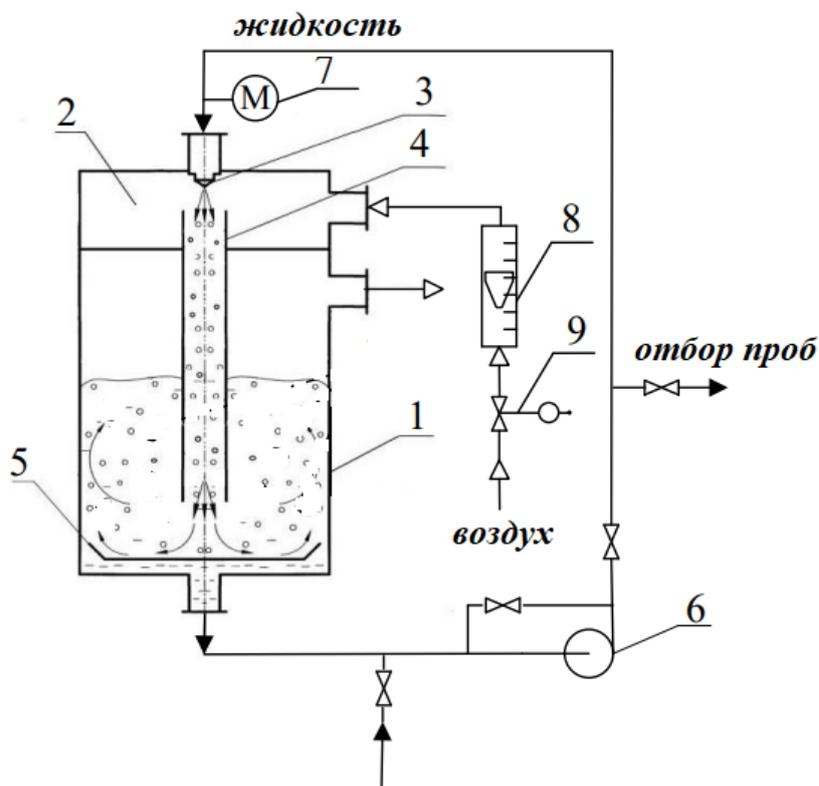


Взаимодействие сульфита натрия с кислородом протекает в диффузионной зоне, где скорость процесса полностью зависит от перехода кислорода из газовой фазы в жидкость. Из-за низкой растворимости кислорода в воде коэффициент массопередачи полностью определяется коэффициентом массоотдачи в жидкой фазе (диффузионной стадией кислорода от поверхности фазового раздела в объем жидкости). Поэтому увеличение скорости окисления сульфита натрия связано с усилением процесса массоотдачи в жидкой фазе.

Для оценки интенсивности растворения газа в газожидкостной реакционной смеси выбрано «сульфитное число»  $K_c$ , которое показывает количество кислорода, поглощенного единицей реакционного объема в единицу времени.

Значения «сульфитных чисел» для разных газожидкостных аппаратов варьируют в широком диапазоне. Например, для реактора с быстроходной механической мешалкой (с частотой вращения около 1700 об/мин)  $K_c = 0,5 \text{ кг O}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ , а для газожидкостных трубчатых турбулентных аппаратов оно значительно выше (от 18 до 21 кг  $\text{O}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ) [19].

Схема экспериментальной установки по определению эффективности газожидкостного эжекционного аппарата представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – корпус аппарата; 2 – эжекционная камера; 3 – форсунка; 4 – эжектор; 5 – диспергатор; 6 – центробежный насос; 7 – манометр; 8 – ротаметр; 9 – регулятор расхода воздуха



Раствор сульфита натрия центробежным насосом 6 под давлением подается в распылитель жидкости 3, распыливается, далее засасывается воздух, поступающий в эжекционную камеру 2. Образовавшаяся газожидкостная смесь походит через эжектор 4, где происходит интенсивный контакт сульфита натрия и воздуха. Затем газожидкостная смесь с большой скоростью ударяется в диспергатор 5. При ударе газожидкостного потока о диспергатор газовые пузырьки дробятся, и смесь распределяется по реакционному объему аппарата, где происходит очередная фаза контакта жидкости и газа.

Порядок проведения экспериментов следующий. Готовился водный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  с концентрацией 0,4 моль/дм<sup>3</sup>, который заливался в аппарат. Перед началом экспериментов в раствор добавлялся водный раствор катализатора – раствор  $\text{CuSO}_4$ . Эксперименты проводились на аппарате с внутренним диаметром 300 мм, диаметр сопла форсунки составлял 12 мм. Использовались эжекторы диаметром 25, 38 и 58 мм. Во время эксперимента изменялось давление перед форсункой  $p_\phi$ , которое измерялось манометром 7.

Расход жидкости через форсунку определялся по формуле

$$Q_{\text{ж}} = \mu_p \cdot \frac{\pi \cdot d_\phi^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot p_\phi}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (1)$$

где  $\mu_p$  – коэффициент расхода через форсунку;  $d_\phi$  – диаметр сопла форсунки, м;  $p_\phi$  – давление перед форсункой, Па.

Расход воздуха подбирался таким образом, чтобы коэффициент инжекции, т. е. отношение расхода воздуха к расходу жидкости, составлял 1,3. Расход воздуха устанавливался с помощью регулятора расхода воздуха 9 и измерялся с помощью ротаметра 8.

После пуска насоса и выхода на заданный режим, за время которого жидкость тщательно перемешивалась и выравнивались концентрационные поля в рабочем объеме, с помощью шприца отбирались пробы раствора в стеклянные герметично закрывающиеся колбы емкостью 100 мл. Отбор проб производился через различные промежутки времени, величина которых колебалась от 1 до 12 мин в зависимости от ожидаемой скорости протекания реакции. В течение всего времени проведения эксперимента поддерживался неизменный расход газа. По окончании опыта емкость промывалась горячей водой, затем проводились последующие эксперименты с запланированными значениями режимных и геометрических параметров.

Концентрация  $C$ , моль/дм<sup>3</sup>, каждой пробы раствора определялась йодометрическим методом (обратным титрованием) и вычислялась по формуле [2]

$$C(\text{Na}_2\text{SO}_3) = \frac{N(\text{I}_2) \cdot V(\text{I}_2)^{\text{общ}} - N(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) \cdot V(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)}{V(\text{Na}_2\text{SO}_3)}, \quad (2)$$

где  $N(\text{I}_2)$ ,  $N(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$  – нормальности приготовленных стандартных растворов йода и тиосульфата натрия соответственно, моль/дм<sup>3</sup>;  $V(\text{I}_2)^{\text{общ}}$  – объем избытка йода, см<sup>3</sup>;  $V(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$  – объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование остатка йода, см<sup>3</sup>;  $V(\text{Na}_2\text{SO}_3)$  – объем взятой на анализ пробы сульфита натрия, см<sup>3</sup>;  $C(\text{Na}_2\text{SO}_3)$  – искомая концентрация сульфита натрия, моль/дм<sup>3</sup>.



Значения концентраций наносились на график в координатах концентрация–время. Экспериментальная зависимость изменения концентрации сульфитного раствора имеет вид прямой, расположенной под углом  $\alpha$  к оси абсцисс, из которой определялся тангенс угла наклона  $\frac{\Delta C}{\Delta \tau}$ .

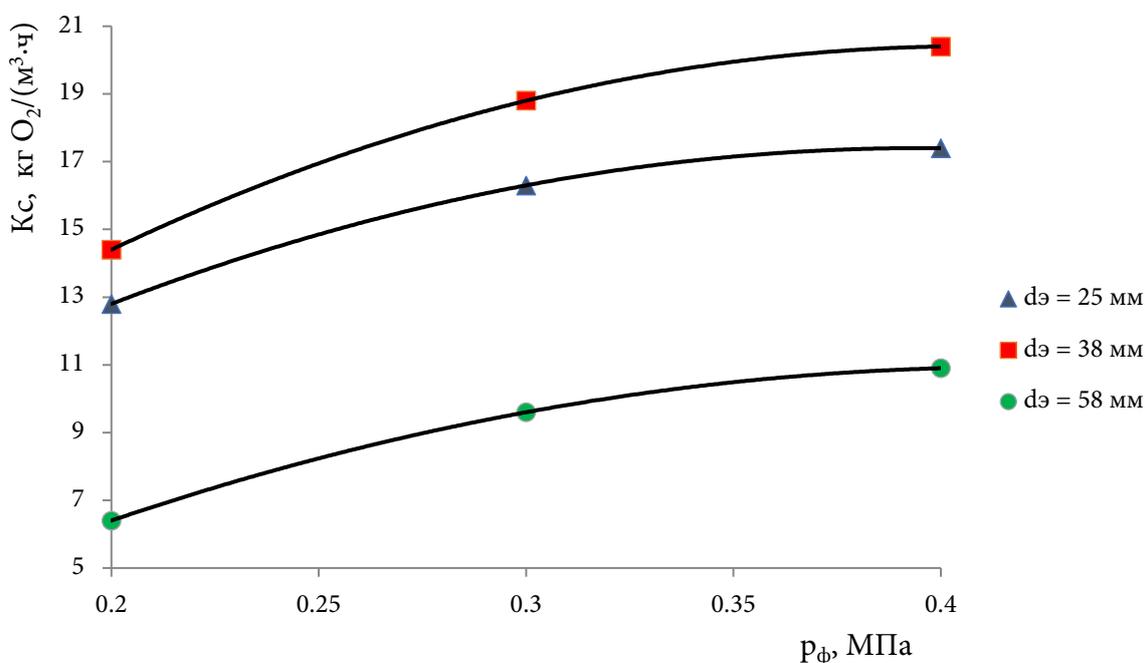
«Сульфитное число»  $K_c$ , кг  $O_2/(m^3 \cdot ч)$ , рассчитывалось согласно выражению

$$K_c = 16 \cdot \frac{\Delta C}{\Delta \tau}. \quad (3)$$

Экспериментальные данные приведены в табл. 1 и на рис. 2.

**Таблица 1.** Экспериментальные данные по определению эффективности газожидкостного эжекционного аппарата

№ п/п	Диаметр эжектора $d_{э}$ , мм	Давление перед форсункой $p_{ф}$ , МПа	Расход жидкости $Q_{ж}$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха $Q_{в}$ , м <sup>3</sup> /ч	«Сульфитное число» $K_c$ , кг $O_2/(m^3 \cdot ч)$
1	25	0,2	5,9	7,67	12,8
2	25	0,3	7,34	9,54	16,30
3	25	0,4	8,58	11,15	17,4
4	38	0,2	5,9	7,67	14,4
5	38	0,3	7,34	9,54	18,8
6	38	0,4	8,58	11,15	20,4
7	58	0,2	5,9	7,67	6,4
8	58	0,3	7,34	9,54	9,6
9	58	0,4	8,58	11,15	10,9



**Рис. 2.** Зависимость «сульфитного числа» от давления перед форсункой и диаметра эжектора



## Выводы

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Значения величин «сульфитного числа» соизмеримо со значениями «сульфитных чисел» для наиболее эффективных газожидкостных трубчатых турбулентных аппаратов.

2. Максимальный перепад давления на форсунке можно принять в пределах 0,35-0,4 МПа. Дальнейшее увеличение перепада давления не приводит к значительному увеличению «сульфитного числа», но при этом существенно увеличиваются затраты энергии на диспергирование.

3. При небольших значениях диаметра эжектора наблюдается стесненное движение газожидкостного потока в эжекторе, что не способствует получению оптимальной межфазной поверхности контакта фаз. При больших значениях диаметра эжектора в газожидкостном потоке не обеспечивается хороший контакт газа с жидкостью, что приводит к снижению значений «сульфитного числа». Имеется оптимальная величина диаметра эжектора, при котором межфазная поверхность и «сульфитное число» будут максимальными.

4. Теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена в газожидкостном эжекционном аппарате показали его высокую эффективность, поэтому применение его в различных отраслях промышленности является весьма перспективным.

## Список источников

1. **Леонтьев В.К.** Межфазная поверхность, структура потока и методика расчета аппаратов с эжекционным диспергированием газа: дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 1984. 186 с.
2. **Леонтьев В.К., Коралева О.Н., Гирба Е.А.** Использование газожидкостных аппаратов в промышленности // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2021. Т. 2, вып. 2. С. 76-80. DOI: 10.52957/27821900\_2021\_02\_76. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/issue/view/2021-2-2>
3. **Пажи Д.Г., Галустов В.С.** Основы техники распыливания жидкости. М.: Химия, 1984. 256 с.
4. Патент № 2483048РФ. Способ получения сульфат-нитрата аммония / **Гришаев И.Г., Долгов В.В., Казак В.Г., Пагалешкин Д.А.** Оpubл. 27.05.2013.
5. Патент № 2653019РФ. Способ сушки пульпы фосфорной кислоты в сушильном барабане при производстве минеральных удобрений / **Паникаровских К.С.** Оpubл. 04.05.2018.
6. **Папижук Е.Н., Рустамбеков М.К., Систер В.Г.** Диспергирование жидкости центробежной форсункой с внутренней вставкой со спиральными каналами в режиме образования крупных капель // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2016. № 8. С. 10-14.
7. **Крюкова Е.Н., Систер В.Г., Рустамбеков М.К., Иванникова Е.М.** Влияние поверхностного натяжения на размер капель при диспергировании жидкости центробежной форсункой // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2014. № 12. С. 6-12.
8. **Систер В.Г., Крюкова Е.Н., Рустамбеков М.К.** Исследование работы центробежной форсунки в режиме получения крупных капель // *Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. VII междунар. науч.-практ. конф.* Новосибирск: СибАК, 2013. URL: <https://sibac.info/conf/naturscience/vii/33245>
9. **Хажметов Л.М., Шекихачев Ю.А., Хажметова А.Л., Канкулова Ф.Х., Тхагапсова А.Р., Мишхожев К.В.** Пневмоакустический распылитель для внесения гербицида в приствольные полосы многолетних насаждений // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. 2022. № 2. URL: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st\\_230.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_230.pdf)



10. **Самсонов, Ю.В.** Анализ процесса распыливания агрохимикатов при химической защите растений // *Наука и Образование*. 2020. Т. 3, № 4. URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2723>
11. Патент № 187523 РФ. Устройство для контакта газа с жидкостью / **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н., Соболева Л.М., Марзаева К.А.** Оpubл. 11.03.2019.
12. Патент № 174136 РФ. Аппарат для контакта пара с жидкостью / **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н., Игнатъева М.С., Макарецв Д.В.** Оpubл. 03.10.2017.
13. Патент № 187844 РФ. Аппарат для контакта газа с жидкостью / **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н., Киселева А.А.** Оpubл. 19.03.2019.
14. Патент № 169750 РФ. Аппарат для контакта газа с жидкостью / **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н., Смирнова О.В., Погодина Т.В.** Оpubл. 31.03.2017.
15. Патент № 207087 РФ. Газожидкостный аппарат для получения пены / **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н.** Оpubл. 12.10.2021.
16. Патент № 216370 РФ. Газожидкостный аппарат для получения пены / **Кораблева О.Н., Леонтьев А.В.** Оpubл. 31.01.2023.
17. **Воевода С.С.** Влияние конструкции и режима работы пеногенерирующего устройства на процесс образования высокократной противопожарной пены // *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. Т. 13, № 3. С. 50-52.
18. **Леонтьев В.К., Сугак А.В., Москвичев Ю.А., Шалыгин Е.В., Никифоров П.А.** Повышение эффективности работы газожидкостного реактора под воздействием электромагнитного поля // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2008. Вып. 11. С. 14-16.
19. **Захаров В.П., Берлин А.А., Монаков Ю.Б., Дебердеев Р.Я.** Физико-химические основы протекания быстрых жидкофазных процессов. М.: Наука, 2008. 348 с.

*Поступила в редакцию 15.11.2023*

*Одобрена после рецензирования 15.02.2024*

*Принята к опубликованию 12.03.2024*