

Для цитирования:

Леонтьев В.К., Кorableва О.Н., Юровская М.А. Оценка эффективности газожидкостных аппаратов с эжекционным диспергированием газа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 12. С. 107–111.

For citation:

Leontiev V.K., Korableva O.N., Yurovskaya M.A. Evaluation of efficiency of gas-liquid apparatus with ejection gas dispersion. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 12. P. 107–111.

УДК: 66.023.2

В.К. Леонтьев, О.Н. Кorableва, М.А. Юровская

Валерий Константинович Леонтьев (✉), Ольга Николаевна Кorableва, Мария Андреевна Юровская
кафедра химической технологии органических веществ, Ярославский государственный технический
университет, просп. Московский, 88, Ярославль, Российская Федерация, 150023
E-mail: leontievvk@ystu.ru (✉), korablevaon@yandex.ru, barashevama@ystu.ru

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ АППАРАТОВ С ЭЖЕКЦИОННЫМ
ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ГАЗА**

Рассмотрены различные конструкции газожидкостных аппаратов с эжекционным диспергированием газа. Экспериментальным методом с помощью «сульфитной методики» и коэффициента эффективности проведена сравнительная оценка эффективности работы газожидкостных эжекционных аппаратов различной конструкции.

Ключевые слова: газожидкостной эжекционный аппарат, диспергирование, «сульфитное число», коэффициент эффективности, сравнительная оценка

UDC: 66.023.2

V.K. Leontiev, O.N. Korableva, M.A. Yurovskaya

Valeriy K. Leontiev (✉), Olga N. Korableva, Mariya A. Yurovskaya
Department of Chemical Technology of Organic Substances, Yaroslavl State Technical University, Moskovsky
pr., 88, Yaroslavl, 150023, Russia
E-mail: leontievvk@ystu.ru (✉), korablevaon@yandex.ru, barashevama@ystu.ru

**EVALUATION OF EFFICIENCY OF GAS-LIQUID APPARATUS WITH EJECTION GAS
DISPERSION**

Various constructions of gas-liquid dispersion devices with gas ejection which can be used to implement many of the processes taking place in the gas - liquid system are compared. Experimental methods for comparative evaluation of the efficiency of gas-liquid ejection apparatuses of various designs are considered. Three constructions of gas-liquid dispersion devices with ejection of gas were investigated: the gas-liquid jet apparatus, short ejector apparatus with a long ejector, and apparatus with combined (multilevel) ejector. Evaluation of efficiency was performed with two ways: chemical and photographic techniques. The chemical method is based on determining the effective phase contact surface, which was estimated using the "sulphite number" of oxygen chemisorption from air. With the help of the photographic method the efficiency ratio was determined which takes into account not only the rate of the process, but also the energy costs of its conduction. The smaller value of the coefficient of efficiency the apparatus operates efficiently, i.e. for a

specific interfacial surface requires less energy. Experimental studies were carried out in an apparatus with a diameter of 200 mm for a variety of pressure at the nozzle and diameter of the nozzle. The pressure at the nozzle was varied from 0.2 to 0.4 MPa, and the diameter of the nozzle - from 2 to 4 mm. For each experiment the "sulphite number" was determined and further the criterion of efficiency of gas-liquid system was calculated on the experimental data. Graphic dependences of "sulphite number" and coefficient of efficiency are presented for the differential pressure at the nozzle for three examined constructions of gas-liquid vehicles with the gas ejection. The findings on the effectiveness of devices using gas-liquid "sulphite method" and the efficiency ratio are in good agreement. For devices with a long ejector and ejector combined with coefficients of similar efficiencies, but these devices are much more efficient than the gas-liquid jet apparatus and the short ejector. On the values of «sulphite number" the device with a combined ejector is the most effective. This is due to the fact that in this device there is mass transfer intensification by increasing the contact surface and contact time of the interacting phases.

Key words: gas-liquid ejection apparatus, dispersion, «sulphite number", efficiency coefficient, comparative evaluation

В химической, нефтехимической, микробиологической и других отраслях промышленности широко распространены газожидкостные аппараты с эжекционным диспергированием газа, которые можно использовать для осуществления многих процессов, проходящих в системе газ – жидкость. Непрерывно развивающиеся технологии производства в этих отраслях неразрывно связаны с необходимостью повышения эффективности тепло- и массообмена и интенсификации процесса смешения т.е. разработки новых газожидкостных аппаратов. Для решения поставленной задачи используют попеременное изменение формы и направления потока, удар потока о твердые преграды – отбойники, закручивание, взаимную эжекцию и инверсию фаз, наложение пульсаций, эффективное распыливание жидкости. При этом форма образующегося газо-жидкостного потока определяются конструкцией и классом рабочего элемента.

Ввиду наличия большого разнообразия конструкций газожидкостных аппаратов для правильного выбора той или иной конструкции возникает необходимость в оценке качественной работы аппаратов на теоретическом и экспериментальном уровне. 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, 2]. Этот метод основан на хемосорбции кислорода из воздуха, которая позволяет определить скорость проводимого процесса, и определении «сульфитного числа».

Были исследованы три конструкции газожидкостных аппаратов с эжекционным диспергированием газа: аппарат с газожидкостной струей и коротким эжектором (рис. 1а); аппарат с длинным эжектором (рис. 1б); аппарат с комбинированным (многоярусным) эжектором (рис. 1в).

Аппараты работают следующим образом: жидкость под давлением подается в форсунку, распыливается и засасывает газ, поступающий в эжекционную камеру. Образовавшаяся газожидкостная смесь походит через эжектор-смеситель. В эжекторе происходит контакт жидкости и газа при развитой поверхности распыленной жидкости. 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. При определенных условиях может происходить инверсия фаз. Подобный режим работы наиболее эффективен ввиду того, что в момент инверсии наблюдается наибольшее значение коэффициента массопередачи. При выходе из эжектора газожидкостный поток ударяется в диспергатор. При ударе газожидкостного потока о диспергатор газовые пузырьки дробятся – происходит следующая стадия контакта газа с жидкостью. Затем образовавшая смесь распределяется по реакционному объему аппарата, где происходит еще одна стадия контакта газа с жидкостью.

Экспериментальные исследования проводились в аппарате диаметром 200мм для различных давлений на форсунке и диаметрах сопла форсунки. Давление на форсунке p_f изменяли от

0,2 до 0,4 МПа, а диаметр сопла форсунки d_{ϕ} от 2 до 4 мм. Для каждого опыта определяли «сульфитное число» и далее по полученным экспериментальным данным рассчитывали критерий эффективности газожидкостного аппарата.

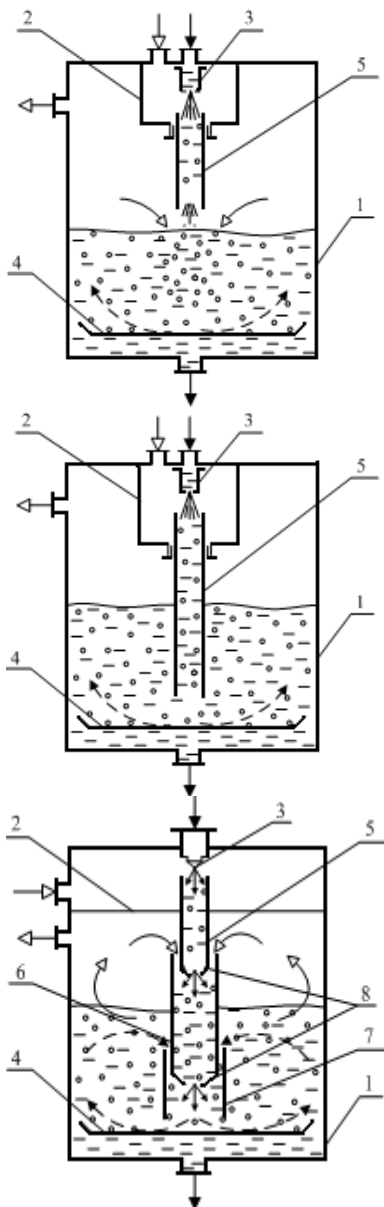


Рис. 1. Конструкции газожидкостных эжекционных аппаратов: 1 – корпус; 2 – эжекционная камера; 3 – распылитель жидкости (форсунка); 4 – диспергатор; 5,6,7 – эжекторы - смесители; 8 – сопла

Fig. 1. Designs of gas-liquid ejector devices 1 – body; 2 – ejector chamber; 3 – spray of liquid (nozzle); 4 – dispersator; 5,6,7 – ejectors - mixers; 8 – nozzles

Абсорбированный кислород реагирует с сульфитом согласно стехиометрическому соотношению:



После пуска насоса и выхода на заданный режим, за время которого жидкость тщательно перемешивалась и выравнивались концентрационные поля в объеме дисперсии, с помощью шприца отбирались пробы раствора в стеклянные герметично закрывающиеся колбы емкостью 100 мл.

Концентрация C [кмоль/м³] каждой пробы раствора определялась йодометрическим методом (обратным титрованием) и вычислялась по формуле [2]:

$$C(Na_2SO_3) = \frac{V(I_2) \cdot V(I_2)^{обш} - N(Na_2S_2O_3) \cdot V(Na_2S_2O_3)}{V(Na_2SO_3)}$$

где $N(I_2)$, $N(Na_2S_2O_3)$ – соответственно нормальности приготовленных стандартных растворов йода и тиосульфата натрия, моль/дм³; $V(I_2)^{обш}$ – объем избытка йода, см³; $V(Na_2S_2O_3)$ – объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование остатка йода, см³; $V(Na_2SO_3)$ – объем взятой на анализ пробы сульфита натрия, см³; $C(Na_2SO_3)$ – искомая концентрация сульфита натрия, моль/дм³.

Значения концентраций наносились на график в координатах концентрация – время, затем определялась скорость окисления в виде «сульфитного числа» K_C :

$$K_C = \frac{dC}{d\phi} = \operatorname{tg} \alpha,$$

где K_C – «сульфитное число», кмоль Na_2SO_3 /(м³·ч).

Экспериментальная зависимость изменения концентрации сульфитного раствора представляет собой прямую линию, расположенную под углом α к оси абсцисс и являющуюся геометрическим местом точек, отвечающих определенному соотношению режимных параметров. По значению «сульфитного числа» судят об эффективности газожидкостного аппарата, чем оно больше, тем эффективнее работа исследуемого аппарата.

При экспериментальных исследованиях эффективности использовался также фотографический метод оценки с применением коэффициента эффективности [3], который учитывает не только скорость проводимого процесса, но и энергетические затраты на его проведение:

$$K = \frac{N}{a \cdot Q_r \cdot \sigma},$$

где K – коэффициент эффективности; N – мощность, вводимая в аппарат, Вт; a – удельная поверхность массопередачи, м²/м³; Q_r – расход газа в аппарате, м³/с; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Чем меньше значение коэффициента K , тем эффективнее работает аппарат, т.е. на получение определенной межфазной поверхности требуются меньшие затраты энергии.

При экспериментальных исследованиях по этому способу измеряли: расход газа Q_r , перепад давления на форсунке Δp_ϕ , объем жидкости в аппарате V , объем образовавшейся газожидкостной смеси $V_{гж}$.

Расчеты выполнялись в следующей последовательности.

Определялось объемное газосодержание:

$$\varphi = (V_{гж} - V)/V,$$

где φ – объемное газосодержание; $V_{гж}$ – объем образовавшейся газожидкостной смеси, м³; V – объем жидкости в аппарате, м³.

Расход жидкости через форсунку:

$$Q_{ж} = \mu_p \cdot \frac{\pi \cdot d_\phi^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_\phi}{\rho_{ж}}},$$

где μ_p – коэффициент расхода через форсунку, $\mu_p = 0,73$; d_ϕ – диаметр сопла форсунки, м; Δp_ϕ – перепад давления на форсунке, Па; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости в аппарате, кг/м³.

Удельная поверхность массопередачи для системы водный раствор сульфита натрия – воздух определялась [2]:

$$a = 9000 \cdot \varphi^{1,68},$$

Мощность, вводимая в аппарат,

$$N = \Delta p_\phi \cdot Q_{ж}.$$

Экспериментальные и расчетные данные по оценке эффективности газожидкостных аппаратов при давлении на форсунке 0,2 МПа представлены в таблице.

Таблица

Экспериментальные и расчетные данные по определению «Сульфитного числа»
Table. Experimental and calculated data on determination of «Sulfite number»

Тип аппарата	Перепад давления на форсунке Δp_ϕ , МПа	Диаметр сопла форсунки, d_ϕ мм	«Сульфитное число» K_c , кмоль/(м ³ ·мин)
Аппарат с коротким эжектором	0,2	2	0,0041
		3	0,0044
		4	0,0045
Аппарат с комбин. эжектором	0,2	2	0,0042
		3	0,0045
		4	0,0046
Аппарат с длинным эжектором	0,2	2	0,0039
		3	0,0042
		4	0,0043

Анализ экспериментальных данных показывает, что с увеличением диаметра сопла форсунки растет межфазная поверхность контакта фаз для всех рассматриваемых газожидкостных аппа-

ратов. При этом наиболее эффективен газожидкостной аппарат с комбинированным эжектором.

Для определения оптимального рабочего давления на форсунке были проведены экспериментальные исследования по определению «сульфитного числа» в газожидкостных аппаратах при оптимальном диаметре сопла форсунки 4 мм для данного объема аппарата и рабочем давлении от 0,2 до 0,4 МПа.

Зависимости «сульфитного числа» от перепада давления на форсунке при диаметре сопла форсунки 4 мм представлены на рис. 2.

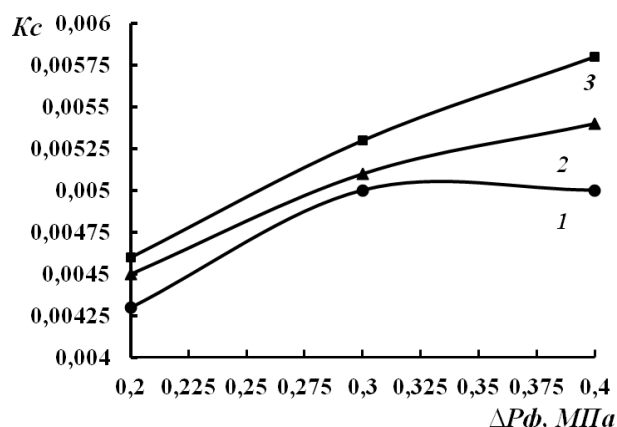


Рис. 2. Зависимость «сульфитного числа» от перепада давления на форсунке: 1 – аппарат с длинным эжектором; 2 – аппарат с коротким эжектором; 3 – аппарат с комбинированным (многоярусным) эжектором

Fig. 2. The dependence of sulfite number on the differential pressure at the nozzle: 1 - apparatus with a long ejector; 2 - the device with a short ejector; 3 - apparatus with combined (multilevel) ejector

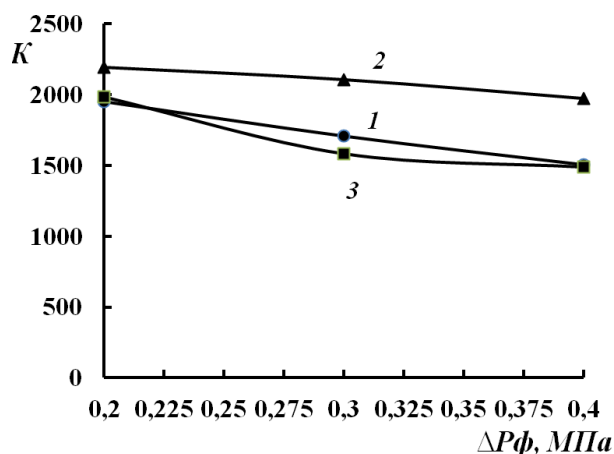


Рис. 3. Зависимость критерия эффективности от перепада давления на форсунке: 1 – аппарат с длинным эжектором; 2 – аппарат с коротким эжектором; 3 – аппарат с комбинированным (многоярусным) эжектором

Fig. 3. The dependence of the efficiency coefficient on the differential pressure at the nozzle: 1 - apparatus with a long ejector; 2 - the device with a short ejector; 3 - apparatus with combined (multilevel) ejector

Как видно из полученных графиков, согласно значениям «сульфитного числа» наиболее эффективным является аппарат с комбинированным эжектором. Это обусловлено тем, что в этом аппарате наблюдается интенсификация процессов массообмена путем увеличения поверхности контакта и времени контакта взаимодействующих фаз. Кроме того, с увеличением перепада давления на форсунке скорость процесса растет в любом газожидкостном аппарате, но при этом растут и энергетические (эксплуатационные) затраты, в связи с чем возникает необходимость в оценке не только скорости процесса, но и энергетических затрат, т.е. в расчете коэффициента эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев В.К., Барашева М.А. Расчет газожидкостного эжекторного аппарата для проведения процесса абсорбции. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 12. С. 98-100.
2. Леонтьев В.К., Барашева М.А. Оценка эффективности работы газожидкостного эжекторного аппарата с подвижной насадкой. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2013. Т. 56. Вып. 2. С. 111-114.
3. Леонтьев В.К., Гирба Е.А., Леонтьев А.В., Рябков И.А. Определение эффективности газожидкостных эжекторных аппаратов. *Изв. вузов. Химия и химическая технология.* 2003. Т. 46. Вып. 9. С. 123-125.

Экспериментальные исследования эффективности работы газожидкостных аппаратов фотографическим способом в зависимости от перепада давления на форсунке приведены на рис. 3.

Полученные данные по оценке эффективности газожидкостных аппаратов с использованием «сульфитной методики» и коэффициента эффективности хорошо согласуются. Из трех исследованных конструкций газожидкостных аппаратов с эжекторным диспергированием газа наиболее эффективным является аппарат с комбинированным эжектором.

REFERENCES

1. Leontiev V.K., Barasheva M.A. Calculation of gas-liquid ejection apparatus for the absorption process. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 12. P. 98 - 100 (in Russian).
2. Leontiev V.K., Barasheva M.A. Evaluation of the efficiency of gas-liquid injection apparatus with a movable nozzle. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 2. P. 111 - 114 (in Russian).
3. Leontiev V.K., Girba E.A., Leontiev A.V., Ryabkov I.A. Determining the efficiency of gas-liquid ejection apparatus. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2003. V. 46. N 9. P. 123 - 125 (in Russian).

*Поступила в редакцию 31.05.2016
Принята к опубликованию 28.11.2016*

*Received 31.05.2016
Accepted 28.11.2016*