

УДК 66.021.3 (043.3)

**Е. В. Чернявская, Г. Н. Абаев****ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕНОСА  
В СТРУЙНЫХ АППАРАТАХ**

*Рассмотрено влияние различных параметров (геометрических и гидромеханических) на эжекцию, предложено уравнение, описывающее эжекцию, рассчитан по этому уравнению максимально возможный коэффициент эжекции, а также сделана попытка экспериментально рассчитать коэффициент массопередачи по испарению воды из струйного аппарата.*

Струйные аппараты (СА) получают достаточно широкое применение во многих отраслях техники. Их отличительной особенностью при исключительной простоте конструкции является эжектирование одной среды другой, обладающей большим потенциалом, при этом в жидкой фазе аппарата может формироваться высокоразвитая поверхность контакта фаз.

Использование струйных аппаратов в различных отраслях техники в настоящее время осуществляется по двум направлениям: с целью повышения давления инжектируемого потока, а также для инжектирования воздуха или газа в среду, которую необходимо насытить воздухом или газом, например, для обеспечения протекания биохимических реакций. Возможно применение СА, когда имеют место оба направления.

Необходимо отметить, что созданию и методам расчета струйных аппаратов для аэрации жидкости, а также проблеме массопереноса в струйных аппаратах посвящено сравнительно небольшое число противоречивых работ. Поэтому до сих пор остается спорным вопрос о том, как спроектировать оптимальный аппарат со струйным аэрированием жидкости.

В литературе, несмотря на разнообразие мнений, формируются две основные точки зрения на определение коэффициента эжекции. Первая группа авторов работ, куда входят ряд представителей отечественной школы [1, 2], основывают свой подход на уравнениях баланса импульсов для потоков жидкости и газа и на их взаимодействии.

Другой подход, как правило, известен по работам преимущественно ряда зарубежных исследователей [3, 6], эмпиричен, но учитывает физические характеристики взаимодействующих потоков.

Однако и эти зависимости в силу своей эмпиричности не дают ответа на вопрос о механизме и природе коэффициента эжекции, о его предельных характеристиках.

В статье рассмотрены следующие вопросы:

1) взаимосвязь  $K_e$  с гидродинамическим режимом истечения струи и геометрическими характеристиками сопла;

2) факторы, влияющие на формирование поверхности контакта фаз в СА;

3) закономерности, определяющие коэффициент массопередачи в СА.

Эксперименты проводились на лабораторном стенде струйного аппарата (см. рис. 1).

Аппарат представляет собой цилиндр 1, выполненный из оргстекла и закрепленный в металлической оправке. В сосуд опущена шахта 2, в которой происходит эжекция воздуха потоком воды. К шахте подведены два боковых штуцера: один для замера давления 4, другой 5 - для подачи (подсоса) газа (воздуха). Циркулирующая вода поступает к соплу 9. Манометр 3 фиксирует давление на головке сопла. По его показаниям судят о расходе воды, подаваемой на эжектирование. Расход газа замеряется ротаметром 7. Через штуцер 8 осуществляется выход паровоздушной смеси.

В аппарате постоянно находится жидкость (вода). Ее непрерывная циркуляция по системе осуществляется насосом 6.

Необходимый уровень жидкости в аппарате поддерживается по перепаду давления (или мерному соплу), а ее слив осуществляется через сливной вентиль.

Штуцер для ввода жидкости в аппарат заканчивается отверстием с резьбой, в которое вворачивается изучаемое сопло струйного аэратора, необходимое для эксперимента.

Внутренний диаметр стеклянного аппарата  $D_m = 112$  мм ( $F = 0.00985$  м<sup>2</sup>).

В ходе экспериментов определялось влияние на эжекцию диаметра сопла, угла наклона истечения струи из сопла, а также положения шахты (камеры смещения) относительно начального уровня жидкости.

Характеристикой эжекции является коэффициент

$$K_e = \frac{Q_r}{Q_{ж}}, \quad (1)$$

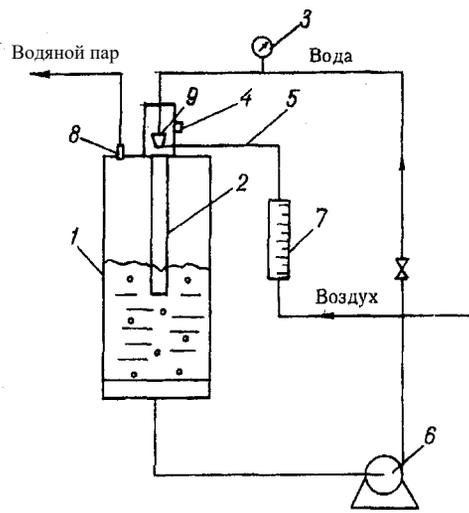


Рис. 1. Лабораторный стенд струйного аппарата

На стенде изучались также закономерности формирования поверхности контакта фаз и массопередача.

По величине  $K_3$  судили о влиянии тех или иных параметров на качество аэрации. Коэффициент эжекции  $K_3$  зависит также от гидродинамических характеристик потока.

На рис. 2, а изображена зависимость  $K_3 = f(W_{жс})$  при истечении жидкости из сопла  $d_1 = 8$  мм и  $d_2 = 5$  мм ( $t = 25$  °С). В экспериментах использовалась шахта диаметром  $d_{ш} = 34$  мм, при этом  $d_1/d_{ш} = 0.235$  и  $d_2/d_{ш} = 0.145$ . В настоящее время проводятся эксперименты по выявлению зависимости между размером и формой шахты и коэффициентом эжекции.

Анализ графика свидетельствует, что как для  $d_2 = 5$  мм, так и для  $d_1 = 8$  мм коэффициент эжекции растет с повышением скорости жидкости, и при заданном соотношении диаметров сопла и шахты он больше для сопла  $d_1 = 8$ . Для получения высоких значений  $K_3$  необходимо обеспечить большой расход газа.

Зависимость  $K_3$  от положения шахты относительно уровня жидкости в аппарате показана на рис. 2, б. Из графика видно, что:

1. Самые низкие  $K_3$  получаются в том случае, когда шахта находится выше уровня жидкости в аппарате. Это объясняется тем, что в данном случае подсос газа происходит не только из атмосферы через ротаметр, показывающий расход газа, но и из самого аппарата. Этот дополнительный подсос воздуха не учитывается ротаметром, поэтому в расчетах  $K_3$  фиксируется лишь та часть воздуха, которая подсасывается из атмосферы. Такое положение шахты приводит к более низким значениям  $K_3$ .

2. Наилучшие значения  $K_3$  получены в тех случаях, когда шахта погружена в жидкость (на глубину 80 мм).

Известно, что взаимосвязь сил трения и сил инерции выражается критерием Рейнольдса. При нагревании воды наблюдалось уменьшение  $K_3$ , а величина  $Re$  при этом росла, поскольку с повышением температуры снижается вязкость воды (молекулярная). Можно было бы предположить, что значение  $Re$  должно определять эжекцию в струйном аппарате. При интенсивной эжекции, которая характеризуется большим  $K_3$ , естественно было бы ожидать высокие числа  $Re$ , однако результаты эксперимента этого не показывают (см. рис. 3).

Это несоответствие, по-видимому, можно объяснить тем, что в ходе эксперимента для достижения хорошей эжекции числа  $Re$  должны превышать  $10^5$ , т. е. режим истечения из сопла - развитая турбулентность. В этом случае на характер течения может оказывать влияние уже не молекулярная, а турбулентная вязкость. Эффективная вязкость будет складываться из их суммы. В режиме развитой турбулентности большее значение приобретают не свойства среды, определяемые молекулярной вязкостью, а гидродинамические условия, влияющие на турбулентную вязкость, т. е.

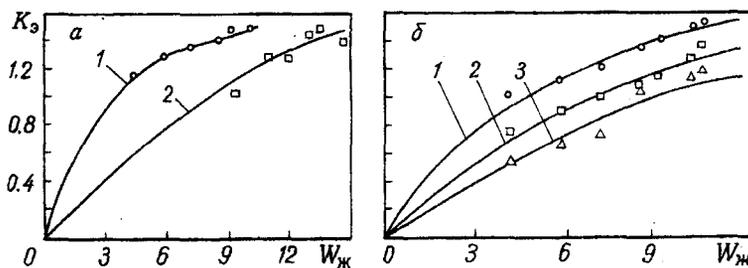


Рис. 2. Зависимость  $K_3$  от скорости жидкости (а) и от положения шахты (б): а) 1 -  $d_{сноп} = 8$  мм; 2 - 5; б) 1 - шахта погружена в воду на 8 см; 2 - шахта находится на границе раздела фаз; 3 - шахта выше зеркала аэрирования на 8 см

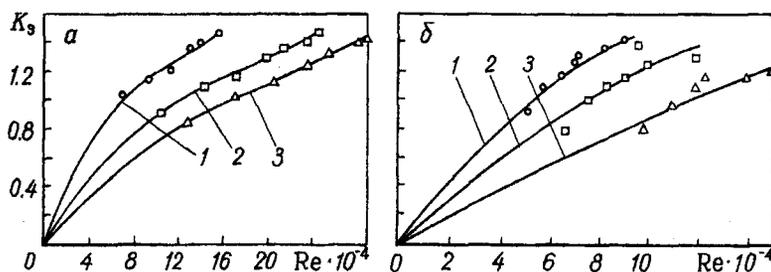


Рис. 3. Зависимость  $K_3$  от критерия Рейнольдса для различных температур и  $d_{\text{соп}} = 8$  мм (а) и 5 мм (б): а) 1 -  $t = 25$  °C; 2 - 38; 3 - 48; б) 1 -  $t = 25$  °C; 2 - 37; 3 - 25

$$\text{Re} = \frac{W_{\text{ж}}}{\frac{\nu}{\rho d}} = \frac{W_{\text{ж}}}{\frac{\nu_t + \nu_m}{\rho d}} = \frac{W_{\text{ж}}}{\nu_t \left(1 + \frac{\nu_m}{\nu_t}\right)} \quad (2)$$

Классическое число  $\text{Re}$  вырождается в число Маха ( $M$ ), представляющее собой отношение скорости течения  $W_{\text{ж}}$  к скорости звука в данной среде.

В аэрогидродинамике при больших значениях  $\text{Re}$  для характеристики аэрогидродинамической обстановки ( $\text{Re} > 10^5 - 10^6$ ) число Рейнольдса заменяют числом Маха.

Для скорости звука известно [7], что

$$W_{\text{зв}} = (W_{\text{зв}})_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (3a)$$

где  $(W_{\text{зв}})_0$  - скорость звука при  $T = 273$  К, или

$$W_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{1}{k\rho}} \quad (36)$$

Из анализа выражения (3a) следует, что  $W_{\text{зв}}$  растет с повышением температуры. Если скорость звука - характеристика турбулентности, то комплекс  $\nu_t/(\rho d)$  характеризует турбулентность при больших числах  $\text{Re}$  (как это принято в аэромеханике) и легко понять, почему этот комплекс растет с повышением температуры. Это принципиально отличает поведение молекулярной вязкости, которая существенно снижается с ростом температуры.

В то же самое время целесообразно обсудить сами значения чисел Маха, соответствующие  $\text{Re} > 10^5 - 10^6$ . Если число  $M$ , как и  $\text{Re}$ , выражает меру отношения сил инерции к силам трения в режиме развитой турбулентности, сами числа  $M$  для газов и жидкостей должны различаться по порядку из-за различия плотностей газа и жидкости, влияющих на оценку сил инерции. Из этого следует, что при одном и том же числе  $\text{Re}$  числа Маха для жидкости должны быть на 2-3 порядка ниже, чем для газа.

Установлено также, что зависимость коэффициента эжекции от числа Маха удовлетворительно описывается уравнением

$$K = K_{\text{max}} - K_{\text{max}} \exp(-BM) \quad (4)$$

Для сопла диаметром 8 мм коэффициент  $1/B$  равняется 0.00417 при оптимальных условиях эжекции, а максимальный коэффициент эжекции  $K_{\text{max}}$ , рассчитанный по данному уравнению, составляет 1.8084.

Таким образом:

1) коэффициент эжекции определяется мерой отношения сил инерции и сил трения. При больших значениях  $\text{Re}$  ( $\text{Re} > 10^5 - 10^6$ ) эта мера выражается числом  $M$ ;

2) значения  $M$ , соответствующие  $\text{Re} > 10^5 - 10^6$ , на 2-3 порядка ниже для жидкости, чем числа  $M$ , соответствующие режиму развитой турбулентности для газов.

На рис. 3 представлены графики, показывающие влияние  $\text{Re}$  на эжекцию, где  $\text{Re}$  в зависимости от температуры вычисляется через изменение молекулярной вязкости воды. На рис. 4 изображены графики, показывающие зависимость коэффициента эжекции от числа Маха для сопел различных диаметров, где  $W_{\text{зв}}$  определялась в числе Маха согласно [5].

Как видно из графиков, обобщение коэффициентов эжекции для различных температур целесообразно - проводить по числу Маха, в то время как по числам Рейнольдса такое невозможно выполнить.

При исследовании массообмена в струйных аппаратах необходимо было определить коэффициент массопередачи для аппаратов такого типа, приходящийся на единицу поверхности контакта фаз.

Эксперимент проводился на лабораторном стенде, описанном ранее для оптимальных условий эжекции при различных температурах.

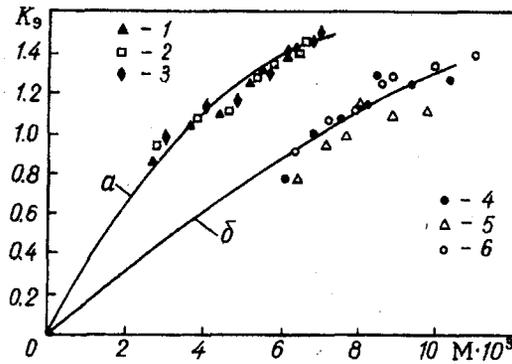


Рис. 4. Зависимость  $K_y$  от числа Маха: а)  $d_{\text{соп}} = 8$  мм: 1 -  $t = 25$  °С; 2 - 38; 3 - 48; б)  $d_{\text{соп}} = 5$  мм: 4 -  $t = 28$  °С; 5 - 40; 6 - 52

Зависимость коэффициента массопередачи от условий эжекции

$P$ , ат	$\tau$ , мин	$T_{\text{среды}}$ , °С	$Q_r$ , м <sup>3</sup> /ч	$dG/d\tau \cdot 10^2$ , м <sup>3</sup> /ч	$P^* \cdot 10^2$ , ат	$P_{\text{действ.}} \cdot 10^2$ , ат	$\Delta P \cdot 10^2$ , ат	$S$ , м <sup>2</sup>	$K$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч·ат)
0.3	25	28	1.158	2.15	3.9	1.76	2.14	2.36	0.446
		43	1.22	7.46	8.65	5.57	3.08	2.25	1
		53	1.258	19.3	14.35	13.3	1.49	2.16	5.2
0.4	25	30	1.45	2.86	4.3	1.93	2.37	3.15	0.39
		43	1.51	9.39	8.65	5.85	2.8	3.13	1.01
		53	1.56	23.1	14.35	12.5	1.88	2.45	3.5
0.5	25	28	1.49	3.1	3.9	1.97	1.92	3.53	0.49
		43	1.54	11.2	8.65	6.6	2.05	3.35	1.5
		53	1.61	27	14.35	13.9	0.5	2.94	-
0.6	25	27	1.67	3.6	3.65	2.1	1.55	4.51	0.55
		44	1.764	13.4	9	6.83	2.17	4.12	1.3
		53	1.81	31.2	14.35	14.2	0.1	3.73	-

Коэффициент массопередачи определяется из основного уравнения массопередачи по формуле

$$K = \frac{dG/d\tau}{\Delta P S}, \quad (5)$$

$$\Delta P = P^* - P_{\text{действ.}}, \quad (6)$$

$$P_{\text{действ.}} = \frac{G_{\text{вод.пара}}}{Q_{\text{возд}} + G_{\text{вод.пара}}} P_c, \quad (7)$$

$$G_{\text{вод.пара}} = \frac{\Delta G_{\text{воды}}}{\rho_{\text{вод.пара}}}. \quad (8)$$

Анализируя экспериментальные данные (см. таблицу), видим, что:

а) с повышением температуры увеличивается количество испарившейся влаги; это наблюдается также при росте расхода газа и расхода жидкости;

б) с повышением температуры растет парциальное давление паров воды в паровоздушной системе.

Как известно, коэффициент массопередачи рассчитывается по формуле

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}}. \quad (9)$$

Если  $\beta_x \gg \beta_y$  и  $1/\beta_y \gg 1/\beta_x$ , то слагаемым  $m/\beta_x$  можно пренебречь, поскольку в таком случае лимитирующей фазой является жидкая. Если наблюдается обратная картина, то лимитирующей является газовая фаза и тогда коэффициент массопередачи зависит также от равновесия, т. е.  $1/K_y \approx m/\beta_y$ .

В данном случае (см. таблицу) коэффициент массопередачи увеличивается во много раз при повышении температуры от 28 до 53 °С.

## Выводы

1. Выявлены факторы, влияющие на эжекцию: геометрические размеры сопла, положение сопла по отношению к штуцеру ввода воздуха, положение камеры смешения относительно зеркала аэрации.
2. Установлено, что высокие значения коэффициента эжекции ( $K_e > 1$ ) достигаются в режиме развитой турбулентности ( $Re > 10^5$ ); коэффициент эжекции  $K_e$  экспоненциально зависит от числа Маха.
3. В результате струйного аэрирования формируется поверхность контакта фаз, на 2-3 порядка превышающая поверхность зеркала аэрирования из достаточно однородных газовых пузырьков, размер которых зависит от диаметра сопла и, по-видимому, определяется масштабом турбулентности.
4. Установлено, что лимитирующей фазой процесса массопередачи в системе воздух-вода при струйном аэрировании является газовая фаза.

## Обозначения

$K_e$  – коэффициент эжекции;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр струйного аппарата, м;  $F$  – площадь поверхности зеркала аэрирования,  $m^2$ ;  $Q_g$  – расход газа,  $m^3/ч$ ;  $Q_{ж}$  – расход жидкости, циркулирующей через аппарат,  $m^3/ч$ ;  $W_{ж0}$  – скорость истечения жидкости из сопла, м/с;  $d_1, d_2$  – диаметры используемых сопел, м;  $t$  – температура среды,  $^{\circ}C$ ;  $d_{ш}$  – диаметр камеры смешения (шахты), м;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $K_{max}$  – максимальный коэффициент эжекции;  $M$  – число Маха;  $W_{зв}$  – скорость звука в данной среде, м/с;  $K$  – приведенный коэффициент массопередачи,  $m^3/(m^2 \cdot ч \cdot ат)$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $m^2/с$ ;  $\nu_m$  – молекулярная вязкость,  $m^2/с$ ;  $\nu_t$  – турбулентная вязкость,  $m^2/с$ ;  $\rho$  – плотность среды,  $кг/м^3$ ;  $d_{соп}$  – диаметр сопла, м;  $k$  – коэффициент адиабатической сжимаемости;  $T$  – температура среды, К;  $S$  – поверхность контакта фаз, образованная газовыми пузырями,  $m^2$ ;  $\Delta P$  – движущая сила процесса (разность давлений равновесного и действительного), ат;  $\Delta G_{воды} = dG/d\tau$  – количество испарившейся воды,  $кг/ч$  ( $m^3/ч$ ), определялось по испарению (убыли) воды из аппарата при установившемся режиме аэрирования;  $P$  – равновесное парциальное давление насыщенных водяных паров (справочные данные), ат;  $P_{действ}$  – действительное давление насыщенных водяных паров в системе, ат;  $G_{вод.пара}$  – количество получаемого в единицу времени водяного пара,  $m^3/ч$ ;  $Q_{возд} = Q_g$  – количество воздуха, захватываемого потоком жидкости,  $m^3/ч$ ;  $P_c$  – давление системы, ат;  $1/B$  – отрезок, отсекаемый на оси ординат касательной, проведенной к кривой в точке  $M = 0$ ;  $\rho_{вод.пара}$  – плотность водяного пара (по уравнению Менделеева–Клапейрона),  $кг/м^3$ ;  $\rho_{воды}$  – плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $K_y$  – коэффициент массопередачи, выраженный для газовой фазы,  $m^3/(m^2 \cdot с)$ ;  $\beta_y, \beta_x$  – коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах соответственно,  $Вт/(m^2 \cdot град.)$ ;  $t$  – тангенс угла наклона к линии равновесия (фактор разделения). Индексы: э – эжекция; вн – внутренний; г – газ; ж – жидкость; ш – шахта; max – максимальный; зв – звук; действ – действительный; вод.пара – водяного пара; возд – воздух; соп – сопло; с – система; в – вода; t – турбулентный; m – молекулярный; y – газовая (фаза); x – жидкая (фаза).

## Литература

1. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М., 1960.
2. Яблокова М. А., Соколов В. М., Сугак А. В. // Межвузовский сб. науч. тр. Л., 1988. С. 23-29.
3. Яблокова М. А., Соколов В. Н., Сугак А. В. // Т О Х Т. 1988. Т. 22, № 6. С. 363-369.
4. Попкович Г. С. Системы аэрации сточных вод. М., 1986.
5. Мещеряков Н. Ф. Флотационные машины и аппараты. М., 1982.
6. Ohkawa A., Shiokawa Y., Sakai N. // Chem. Eng. Japan. 1995. Vol. 18, N 2. P. 172-174.
7. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ./Под ред. В. Б. Когана, Л., 1971. (Rid R., Sherwood T. Properties of gases and liquids).