

М. Р. Вахитов, Ю. А. Хакимова, А. И. Дубкова,
И. А. Дубков, А. Н. Николаев

ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ В ПЛЁНОЧНЫХ АППАРАТАХ

Ключевые слова: очистка, газовые выбросы, массоотдача, двухфазный поток.

Рассмотрены закономерности переноса массы в жидкой фазе в условиях дисперсно-кольцевого течения газожидкостного потока в цилиндрических каналах. Установлена связь коэффициентов массоотдачи в условиях осевого и винтового движения двухфазного потока.

Keywords: cleaning, gas emissions, mass transfer, two-phase flow.

The characteristics of the mass transfer in the liquid phase in the dispersion-annular gas flow in the cylindrical liquid flow channels. The connection between the mass transfer coefficients in the axial and helical motion of two-phase flow.

Одним из наиболее перспективных способов интенсификации очистки выбросов от газообразных вредных примесей является использование прямооточного движения плёнки жидкости и газового потока. Как показали исследования массопереноса в плёнке жидкости в условиях прямооточного восходящего и нисходящего движения фаз, значения коэффициентов массоотдачи на порядок превышают их значения в условиях свободного плёночного стекания и на два порядка, в условиях распыления жидкости или барботажа [1,2,3,4,5]. Такое увеличение коэффициентов массоотдачи в плёнке жидкости в условиях прямооточного течения вызвано наличием сложной структуры волн, образующихся на поверхности плёнки. Анализ осциллограмм показал существование трёх различных типов волн: мелких (ряби) с относительной амплитудой $\alpha = 0,25-0,3$, крупных с $\alpha = 0,55-0,6$ и так называемых волн возмущения с $\alpha = 0,75-0,9$ [6,7].

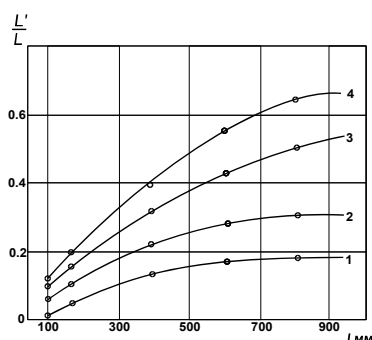


Рис. 1 - Зависимость относительного количества дисперсной фазы от длины трубки l : $d = 20$ мм; $q = 3,0$ м³/м·ч. U_r , м/с: 1 - 20,2; 2 - 31,7; 3 - 44,01; 4 - 51,84. (L' - количество дисперсной фазы; L - общее количество подаваемой жидкости)

Вместе с тем экспериментально установлено, что в условиях прямооточного движения плёнки жидкости и газа происходит срыв капель с гребней волн и их постепенное распределение в объёме газового потока [8,9], причём количество жидкости, срываемой с поверхности и уносимой потоком газа, может

достигать 60-70 % и более от общей подачи жидкости рис. 1. Переход части жидкости в дисперсную фазу ведёт к снижению эффективности очистки газа, а также выдвигает задачу необходимости сепарации капель из газового потока. С целью подавления образования дисперсной фазы в каналах большой длины было предложено использовать завихрители потока в виде винтовых вставок, устанавливаемых на всю длину канала или на отдельных его участках.

Исследование массопередачи, проведённое в трубках с завихрителями из скрученной ленты при десорбции O_2 из воды в воздух [10], с диаметром трубки $d = 16,8 \pm 0,1$ мм, длиной $l = 150$ мм, с шагом винтовой лопасти S : 60, 80, 100, 120 и 150 мм, при изменении скорости газа U_r - от 10 до 46 м/с, и объёмной плотности орошения q - от 0,2 до 4 м³/м·ч, показало, что придание двухфазному потоку закрученного движения ведёт к увеличению коэффициентов массоотдачи в плёнке жидкости в 1,5-2 раза по сравнению с осевым восходящим движением с одинаковыми расходами по жидкости и газу (рис. 2). Этот вывод подтверждается также результатами исследований [11], проведёнными на той же системе при диаметре и длине трубки $d = 16,8$ мм, $l = 200$ мм, скоростях газа $U_r = 15-55$ м/с и плотностях орошения $q = 0,3-3,2$ м³/м·ч (рис. 3).

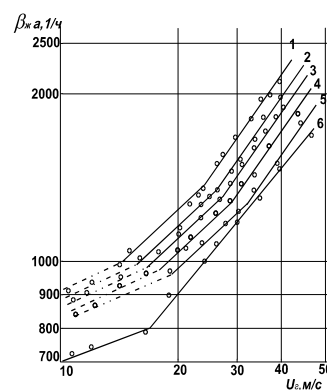


Рис. 2 - Влияние шага спиральной вставки на $\beta_k a$ при восходящем винтовом движении в трубке с длиной контактной зоны $l = 150$ мм. $q = 0,66$ м³/м·ч: 1 - $S = 60$ мм; 2 - 80; 3 - 100; 4 - 120; 5 - $S = 150$ мм; 6 - контактная трубка без винтовой лопасти

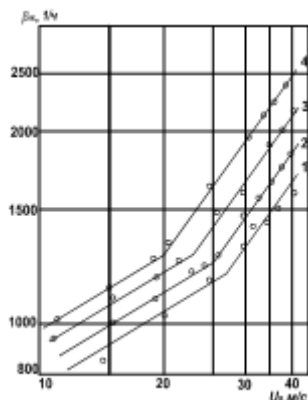


Рис. 3 - Зависимость коэффициентов массоотдачи от скорости газа $q=1,14 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, $l = 200\text{мм}$; 1 - осевое движение; 2 - $S=118\text{мм}$; 3 - $S=85\text{мм}$; 4 - $S=62\text{мм}$

Причины указанного эффекта следует искать, в первую очередь, в изменении гидродинамической обстановки в канале в связи с изменением реальных скоростей фаз. Наличие в трубке спирального завихрителя ведёт к изменению площади живого сечения канала, а следовательно и к увеличению скорости газа и жидкости по сравнению с осевым движением. Площадь живого сечения канала F в этом случае определяется по уравнению [11]:

$$F = S \left[\sqrt{R^2 + \left(\frac{S}{2\pi} \right)^2} - \frac{S}{2\pi} \right] \quad (1)$$

где S – шаг спирали, м; R – внутренний радиус трубки, м.

Приведённая скорость газа и плотность орошения можно рассчитать по следующим формулам

$$U_{\text{пр}} = \frac{G_{\text{г}}}{F}; \quad (2)$$

$$q_{\text{пр}} = q \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}, \quad (3)$$

где $G_{\text{г}}$ – объёмный расход газовой фазы, $\text{м}^3/\text{ч}$; q – объёмная плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; α – угол наклона винтовой образующей спирали.

Из уравнения (3) следует, что при одинаковом массовом расходе жидкости с уменьшением шага спирали действительная плотность орошения увеличивается. Это объясняется уменьшением гидравлического радиуса и величины смоченного периметра с уменьшением площади живого сечения винтового канала.

В работе [11] при исследовании средней толщины и волновых параметров плёнки жидкости в трубках со спиральными завихрителями показано, что при одинаковых действительных скоростях газа в живом сечении винтового канала основные гидродинамические характеристики потока не зависят от шага спирали и совпадают с величинами, наблюдавшимися при осевом движении. Зависимость коэффициента массоотдачи от

расходных параметров при различной степени крутки находится в этой работе из уравнения:

$$\beta_{\text{ж}} = A \cdot U_{\text{пр}}^m \cdot q_{\text{пр}}^n \quad (4)$$

где A , m , n – находятся из таблицы.

$U_{\text{пр}}$, м/с	$q_{\text{пр}} < 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$			$q_{\text{пр}} > 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$		
	A	m	n	A	m	n
$U_{\text{пр}} < 27 \text{ м/с}$	0,36	0,85	0,67	0,36	0,85	0,75
$U_{\text{пр}} > 27 \text{ м/с}$	0,26	0,95	0,67	0,26	0,95	0,75

Обработанные по этой методике экспериментальные данные представлены на рис. 4 и 5. Как видно из графиков, приведённые коэффициенты массоотдачи при одинаковых приведённых скоростях газа и жидкости в живом сечении винтового канала не зависят от шага спирали и совпадают с коэффициентами массоотдачи, наблюдавшимися в условиях осевого движения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в слабозакрученных двухфазных потоках эффект увеличения коэффициентов массоотдачи при винтовом движении фаз в трубках можно объяснить увеличением скоростей газа и жидкости за счёт уменьшения площади живого сечения винтового канала.

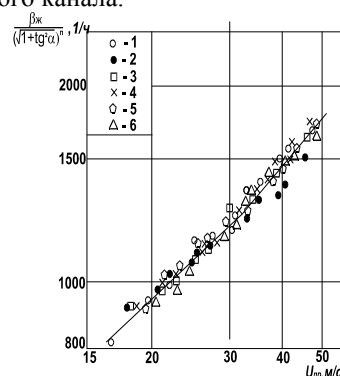


Рис. 4 - Зависимость приведённых коэффициентов массоотдачи от действительной скорости газа $U_{\text{пр}}$. Данные работы [10], $q = 0,662 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; 1 - осевое движение; 2 - $S=150\text{мм}$; 3 - $S=120\text{мм}$; 4 - $S=100\text{мм}$; 5 - $S=80\text{мм}$; 6 - $S=60\text{мм}$

Таким образом, перспективным способом реализации массопереноса в жидкой фазе является применение закрученного однонаправленного движения газа и плёнки жидкости при высоких скоростях фаз, которой может быть широко использовано не только в рамках процессов физической сорбции, но и при химическом взаимодействии.

Реальным для случая переноса массы в плёнке жидкости при прямоточном сильном взаимодействии фаз является процесс с химической реакцией, протекающий в диффузионной области. Так как интенсивность массопереноса в нашем случае очень велика, то для того, чтобы процесс проходил в диффузионной области необходимо выполнение условия:

$$t_D \gg t_P, \quad (5)$$

которого можно достичь при наличии очень быстрой реакции (практически мгновенной). В данном случае t_D и t_P - время диффузии и время реакции. Газ, диффундируя в плёнку жидкости, вступает в реакцию с реагентом жидкой фазы практически на поверхности раздела, образуя продукт реакции, т.е. часть газообразного компонента переходит в связанное состояние. При этом концентрация свободного компонента в жидкости уменьшается, что приводит к ускорению процесса по сравнению с процессами без химического взаимодействия фаз, так как увеличивается движущая сила процесса.

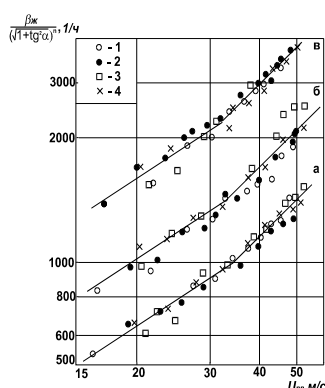


Рис. 5 - Зависимость приведённых коэффициентов массоотдачи от действительной скорости газ $U_{пр}$ [11]; q , $m^3/m \cdot c$: а - 0,491; б - 1,134; в-2,4; 1 - осевое движение; 2 - $S=118mm$; 3 - $S=85mm$; 4 - $S=62mm$

Коэффициент ускорения абсорбции E_i , т.е. число показывающее, во сколько раз количество абсорбируемого компонента A увеличивается из-за наличия химической реакции в жидкой фазе, или во сколько раз скорость абсорбции перемешиваемой жидкости увеличивается вследствие протекания реакции, можно определить [12]:

$$E_i = \frac{\beta'_{ж}}{\beta_{ж}} = 1 + \frac{D_B}{D_A} \cdot \frac{B^0}{z \cdot A^*} \quad (6)$$

где $\beta'_{ж}$ - коэффициент химической абсорбции; $\beta_{ж}$ - коэффициент физической абсорбции; D_A - коэффициент диффузии растворённого газа A в жидкости, m^2/c ; D_B - коэффициент диффузии реагента B в жидкости, m^2/c ; B^0 - концентрация жидкого реагента в объёме жидкой фазы, mol/m^3 ; A^* - концентрация растворённого газа A у поверхности жидкости, равновесная с составом газа у этой поверхности, mol/l ; z - стехиометрический коэффициент.

Данное уравнение выведено на основе плёночной теории и хорошо реализуется, особенно при $D_A=D_B$. Уравнение (6) показывает, что в режиме мгновенной реакции коэффициент химической

абсорбции пропорционален коэффициенту физической абсорбции. Это значит, что химическая абсорбция в этом режиме зависит от гидродинамических условий таким же образом, как и процесс физической абсорбции. Влияние химической реакции проявляется в увеличении скорости абсорбции на определённую величину, которая не зависит от гидродинамических условий. Из уравнения (6) коэффициент химической абсорбции рассчитаем по:

$$\beta'_{ж} = \beta_{ж} \left(1 + \frac{B^0}{z \cdot A^*} \right), \quad (7)$$

где $\beta_{ж}$ можно вычислить по формуле(4).

Для расчёта же общей скорости хемосорбции можно использовать следующую формулу [13]:

$$\bar{R} = \beta_{ж} \left(A^* + \frac{D_B \cdot B^0}{z \cdot D_A} \right). \quad (8)$$

Плёночная хемосорбция при сильном взаимодействии фаз может быть использована как для очистки газов, так и для получения соответствующих продуктов реакции. Примерами использования данного процесса могут послужить: абсорбция NH_3 растворами H_2SO_4 , абсорбция двуокиси углерода растворами моноэтаноламина (МЭА) и т.д.

Литература

1. М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 8, 130-134 (2011)
2. А.Н. Николаев, О.В. Козулина, Р.Р. Фатыхов, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 3, 155-160 (2011)
3. Б.И. Конобеев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков, В сб. *Доклад АН СССР*, АН СССР, Москва, 1957, 117, 4, С. 671
4. Б.И. Конобеев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков, *Хим. пром.*, 7, 475 (1961)
5. Н.А. Николаев, Н.М. Жаворонков, *Хим. пром.*, 4, 290 (1965)
6. Н.А. Николаев, А.Д. Сергеев, А.П. Холпанов, В.Т. Забрудский, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков, *Теор. основы хим. технол.*, 9, 3, 406 (1975)
7. А.Д. Сергеев, Л.П. Холпанов, Н.А. Николаев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков, *ИФЖ*, 29, 5, 843 (1975)
8. В.Н. Щербаков, Н.А. Николаев, А.М. Николаев, *Тр. КХТИ им. С.М. Кирова*, 53, 71 (1974)
9. В.Т. Забрудский, Л.П. Холпанов, Н.А. Николаев и др. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 19, 6, 964 (1976)
10. Н.А. Николаев, В.А. Булкин, Н.М. Жаворонков, *Теор. основы хим. технол.*, 4, 3, 418 (1970)
11. А.Д. Сергеев, Н.А. Николаев, *Изв. вузов. Химия и химич. технология*, 19, 3, 465-468 (1976)
12. Дж. Астарита, *Массопередача с химической реакцией*. Химия, Москва, 1971. 224 с.
13. П.В. Данквертс, *Газожидкостные реакции*. Химия, Москва, 1973. 296 с.