

Одним из наиболее перспективных способов интенсификации очистки выбросов от газообразных вредных примесей является использование прямоточного движения плёнки жидкости и газового потока. Как показали исследования массопереноса в плёнке жидкости в условиях прямоточного 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 прямоточного течения вызвано наличием сложной структуры волн, образующихся на поверхности плёнки. Анализ осциллограмм показал существование трёх различных типов волн: мелких (ряби) с относительной амплитудой $=0,25-0,3$, крупных с $=0,55-0,6$ и так называемых волн возмущения с $=0,75-0,9$ [6,7].

Рис. 1 - Зависимость относительного количества дисперсной фазы от длины трубки l : $d = 20$ мм; $q = 3,0$ м³/м·ч. $U_{г}$, 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 прямоточного 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 O₂ 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 $U_{г}$ - 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 $U_{г}=15-55$ м/с и плотностях орошения $q=0,3-3,2$ м³/м·ч (рис. 3).

Рис. 2 - Влияние шага спиральной вставки на $\beta_{ж}$, а 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 $q=1,14$ м³/м·ч, $l = 200$ мм; 1 - осевое движение; 2 - $S=118$ мм; 3 - $S=85$ мм; 4- $S=62$ 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]: (1) где S – шаг спирали, м; R – внутренний радиус трубки, м. Приведённые скорость газа и плотность орошения можно рассчитать по следующим формулам ; (2) , (3) где $GГ$ - объёмный расход газовой фазы, м³/ч; q - объёмная плотность орошения, м³/м·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 находятся в этой работе из уравнения: (4) где A , m , n - находятся из таблицы. УПР, м/с

$q_{ПР1,1}$ м ³ /м·ч	$q_{ПР>1,1}$ м ³ /м·ч	A	m	n	A	m	n
УПР 27 м/с	0,36	0,85	0,67	0,36	0,85	0,75	
УПР >27 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 УПР. Данные работы [10], $q = 0,662$ м³/м·ч; 1 осевое движение; 2 - $S=150$ мм; 3 - $S=120$ мм; 4- $S=100$ мм; 5 - $S=80$ мм; 6 - $S=60$ 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 проточном 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: $t_D \gg t_P$, (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 УПР [11]; q , м³/м·ч: а - 0,491; б - 1,134; в - 2,4; 1 - осевое движение; 2 - $S=118$ мм; 3 - $S=85$ мм; 4 - $S=62$ мм

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]: (6) где $\beta'_{Ж}$ коэффициент химической абсорбции; $\beta_{Ж}$ - коэффициент физической абсорбции; D_A - коэффициент диффузии растворённого газа A в жидкости, м²/с; D_B коэффициент диффузии реагента B в жидкости, м²/с; B_0 концентрация жидкого реагента в объёме жидкой фазы, моль/м³; A^* концентрация растворённого газа A у поверхности жидкости, равновесная с составом газа у этой поверхности, моль/л; 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: , (7) где $\beta_{Ж}$ можно вычислить по формуле(4). Для расчёта же общей скорости хемосорбции можно использовать следующую формулу [13]: . (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.