

А.И. Ершов, А.П. Голдар

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ В ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫХ И БАРБОТАЖНО-ПРЯМОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Интенсификации процессов теплообмена при взаимодействии жидкожидкостных систем в аппаратах можно достичь применением прямоточно-центробежных (ПЦТ) /1,2/ и барботажно-прямоточных контактных тарелок (БПТ) /3,4/. В первых реализован принцип дисперсно-пленочного взаимодействия фаз, во вторых - инъекционный режим в условиях стесненного барботажа. Оба типа устройств имеют специальный узел центробежной сепарации фаз.

Принципиальные схемы устройств представлены на рис.1 и 2. ПЦТ состоит из патрубка 1, закрепленного на полоте тарелки 2 и снабженного в нижней части статическим закручивателем 3, формирующим закрученный поток газа. Жидкость поступает в зону контакта с

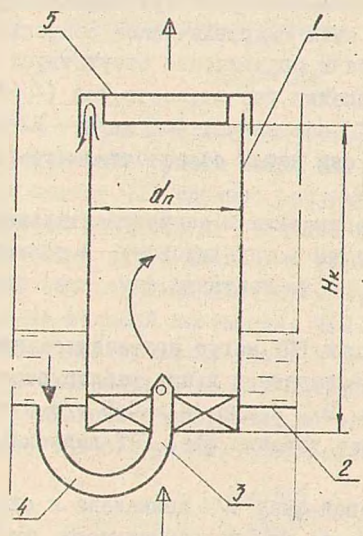


Рис.1. Прямоточная центробежная тарелка. —▷— газ; —▷— жидкость

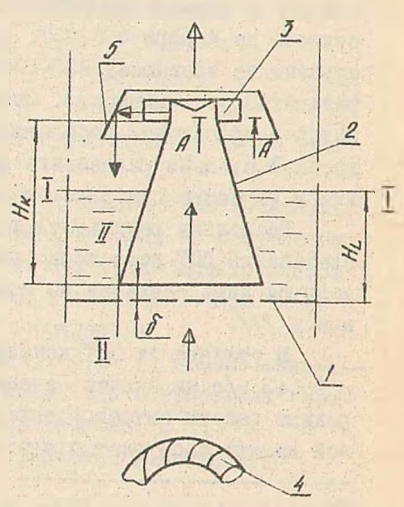
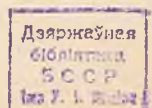


Рис.2. Барботажно-прямоточная тарелка. —▷— газожидкостный поток



юлотно тарелки по трубке 4 и под действием центробежных сил отбрасывается на стенку патрубка, где формируется пленка жидкости. В верхней части патрубка имеется узел сепарации 5, выполненный в данном случае в виде отбойного колпачка. Имеется ряд других конструктивных решений этого узла, обладающих меньшим гидравлическим сопротивлением при высокой эффективности сепарации.

БПТ состоит из газораспределительного устройства I, над которым с зазором δ установлена контактная камера в виде усеченного конуса 2. Узел сепарации включает решетку 3, снабженную криволинейными лопатками 4, а также отбойный конус 5. Подвод жидкости в зону контакта происходит под напором столба светлой жидкости высотой $H/2$, находящейся на полотне тарелки вне конуса. Часть отсепарированной жидкости поступает обратно в контактную камеру /4/.

Область применения представленных контактных устройств определяется их рабочими характеристиками и условиями технологического процесса.

Применение ПЦТ позволяет достичь скорости газовой фазы^{*/} 7–8 м/с в расчете на полное сечение аппарата при эффективности ступени по Мерффи 0,5–0,7. При этом гидравлическое сопротивление ступени не превышает 800–1000 Па и практически отсутствует межтарельчатый унос жидкости. Соотношение фаз жидкость/газ (L/G), при котором эффективно работают ПЦТ, составляет 0+3 кг/кг. Благодаря высокой степени разделения фаз, они нашли самостоятельное применение в качестве сепараторов /5,6/.

Поскольку результаты теоретических и экспериментальных исследований ПЦТ достаточно известны и опубликованы, в докладе приводятся лишь сведения по поверхности контакта фаз, не отраженные в /7/.

В отличие от ПЦТ конструкции БПТ могут применяться при $W = 0,5+3$ м/с на полное сечение аппарата и в них реализуются все режимы работы ситчатой тарелки /8/, а при $W > 0,8$ м/с в контактной камере наступает прямоточное течение фаз. БПТ допускают высо-

^{*/} Здесь и далее скорость газовой фазы W приведена к скорости воздуха W_1 при 0°C и 760 мм рт.ст. по зависимости $\rho W^2 = \rho_1 W_1^2$, где ρ и ρ_1 – соответственно плотность газа при рабочих условиях и воздуха при 0°C и 760 мм рт.ст., кг/м³.

или индукции по жидкости: весовое соотношение фаз (L/G) при их проточном движении может достигать 50 кг/кг при удельной плотности орошения ℓ_0 (в расчете на $\phi \mathcal{D}$) до 200 м³/(м²·ч) /10/.

Одной из важнейших характеристик, определяющей эффективность взаимодействия фаз в БПТ с циркулирующей жидкости на ступени контакта, является ее расход L_K в контактной камере.

Из уравнения Бернулли для сечений I-I и II-II (рис.2), можно получить

$$\frac{1}{2g} \left(\frac{L_K}{\mu_0 \pi \mathcal{D} \delta} \right)^2 = H_L - \frac{A \cdot L_K^m}{\gamma_L}, \quad (1)$$

где H_L - высота столба светлой жидкости вне конуса, м;

γ_L - удельный вес жидкости, Н/м³;

μ_0 - коэффициент расхода щели (зазора δ);

δ - ширина зазора между контактной камерой и перфорированным полотном, м;

\mathcal{D} - диаметр нижнего основания усеченного конуса, м;

L_K - расход жидкости в контактной камере, м/с;

n и m - коэффициенты в функции

$$\Delta P_K = A L_K^m, \quad (2)$$

где ΔP_K - гидравлическое сопротивление ступени контакта за вычетом сопротивления сухого сита, Па.

При выводе (1) сделано допущение о равенстве нулю радиального градиента давлений на ситчатом полотне, а также об отсутствии ожатия сечения струи жидкости, исходя из того, что жидкость после выхода из зазора немедленно превращается в газожидкостную смесь значительно меньшей плотности, чем ее собственная.

Коэффициент расхода отличается от обычно рекомендуемого в литературе /11,12/ значения 0,62, что потребовало провести специальный эксперимент по его определению.

Обработка полученных результатов привела к зависимости

$$\mu_0 = \frac{0,868}{Re_{\delta}^{0,14}} + 3,65 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

справедливой в интервале

$$Re_{\delta} = 30 + 3 \cdot 10^4,$$

где

$$Re_{\delta} = \frac{\rho_0 \cdot \delta^3 \cdot \rho_L}{2\mu_L} \quad (4)$$

$\rho_0 = \frac{4L_K}{\pi D^2}$ - удельная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

ρ_L и μ_L - соответственно плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) и динамическая вязкость ($\text{Па} \cdot \text{с}$) жидкости.

Зная гидравлическое сопротивление БПТ /9/, A и m в (2), можно, задаваясь H_L и δ , найти L_K или решить обратную задачу.

Информация о L_K позволила нам значительно упростить исследования массообмена и поверхности контакта фаз (F), которые были проведены без циркуляции жидкости на ступени при принудительной ее подаче под конус через зазор δ . Отсепарированная после контакта с газом жидкость собиралась в специальной ("ложной") обечайке и отводилась в отдельную емкость.

Эффективность массообмена исследовалась на моделях ПТТ и БПТ /12/ при абсорбции NH_3 водой из воздушно-аммиачной смеси и при десорбции CO_2 из воды в воздух. При этом коэффициенты массоотдачи β_G и β_L приравнивались к соответствующим коэффициентам массопередачи K_G и K_L , что вносило определенную погрешность, особенно в величину β_G .

Используя правило аддитивности фазовых сопротивлений, получили выражения для истинных коэффициентов β_G и β_L с учетом поправки на диффузионное сопротивление обеих фаз:

$$\beta_G = \frac{K_G \left(1 - \frac{m_G}{m_L \cdot d}\right)}{1 - \frac{K_G \cdot m_G}{K_L}} \quad (5)$$

$$\beta_L = \frac{\left(1 - \frac{m_G}{m_L \cdot d}\right)}{1 - \frac{K_L}{K_G \cdot m_L \cdot d}} \quad (6)$$

где m_G и m_L - константы фазового равновесия соответственно для систем $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$;

$$d = \left(\frac{D_{\text{CO}_2}}{D_{\text{NH}_3}}\right)^{1-n} \quad (7)$$

D_{CO_2} и D_{NH_3} — коэффициенты молекулярной диффузии CO_2 и NH_3 в воздухе;

n — показатель степени при критерии Pr' в общем критериальном уравнении конвективной диффузии

$$Nu' = AR C^m (Pr')^n Gd^p \left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^q. \quad (8)$$

По данным /8/ численное значение $n = 0,33 \pm 0,5$, а относительное изменение величины d' находится в пределах 5%. Принимая $n = 0,415$, равное его среднему значению, легко определить d' с погрешностью, соизмеримой с погрешностью эксперимента. Таким образом, определив K_G и K_L при абсорбции водой и десорбции CO_2 из воды при одинаковых гидродинамических условиях и температуре, можно установить по (5) и (6) истинные значения β_G и β_L при наличии диффузионного сопротивления только в одной из фаз. В результате чего данные /12/ по β_G и β_L следует рассматривать с учетом уточнений, приведенных выше. Выражения (5) и (6) можно использовать при определении β_G и β_L в других контактных устройствах не только на системах $NH_3 - H_2O$ и $CO_2 - H_2O$, но и в иных системах с учетом значения d' . При этом должен использоваться один и тот же поглотитель для газов разной растворимости. Концентрация абсорбата (десорбата) в газе-носителе должна быть такой, чтобы изменение вязкости и плотности газа находилось в пределах погрешности эксперимента.

Как следует из (5) и (6), ошибки, вносимые в результат определения β_G и β_L при их приравнивании к K_G и K_L , зависят от соотношения последних, т.е. от эффективности переноса массы в газовой и жидкой фазах. Так, для БИТ при $W = 2,2$ м/с и $\ell_0 = 8 \cdot 10^{-3}$ м³/м²·с) относительная ошибка в определении β_G составила -18,7%, а β_L -0,27%. При увеличении орошения до $80 \cdot 10^{-3}$ м³/м²·с) эти значения соответственно равнялись -5,2% и -1,1%. Знак минус указывает, что истинные величины коэффициентов (β_G и β_L), вычисленные по (5) и (6), больше K_G и K_L , что соответствует физической сущности процесса.

Поверхность контакта фаз F в ШТ и БИТ изучалась нами по сульфитной методике /13/, при этом учитывалось снижение p_i при окислении сульфита натрия.

Концентрация катализатора ($CoSO_4$) определялась в растворе аналитически по специально разработанной методике, т.к. ее определение по навеске вносит значительную случайную ошибку из-за возможного выпадения Co^{+2} в осадок в виде его гидроксиды. Ошибка в определении концентрации Co^{+2} приводит к ошибочным результатам в определении константы скорости реакции окисления Na_2SO_3 и F .

Зависимости F от L_K при $W=const$ оказались линейными во всем исследованном интервале скоростей газовой фазы. Различные угловые коэффициенты m и отрезки ординат M , отсекаемые прямыми $F = ML_K^m$, являются следствием сложного влияния на гидродинамику контактного устройства. Удельная поверхность контакта фаз (отнесенная к объему контактной камеры) изменялась от $1,5 \cdot 10^3$ до $50 \cdot 10^3$ м²/м³, что обуславливает высокую эффективность БПТ.

Нами проведены полупромышленные испытания БПТ в аппарате при абсорбции оксидов азота из разбавленных нитрозных газов растворами слабой азотной кислоты /14/. Для сравнения эффективности работы при одинаковых условиях в этом же аппарате была испытана ситчатая тарелка с геометрическими параметрами, близкими к параметрам тарелок, установленных в верхней части промышленных абсорберов производства слабой азотной кислоты. Испытания показали, что эффективность (по Мерффи) БПТ в 3+3,5 раза выше ситчатых тарелок. Аналогичные результаты получены и при абсорбции оксидов азота селективными поглотителями, такими, как суспензия пятиокиси ванадия в 20%-й HNO_3 и трибутилфосфат. Высокая эффективность БПТ позволила их применить в промышленности /4/ для закрепления HNO_3 (до 58 %).

В отличие от БПТ удельная поверхность контакта фаз у ШЦТ (отнесенная к объему патрубков) изменяется в более узком диапазоне и имеет абсолютное значение $(2,5+4) \cdot 10^3$ м²/м³.

Л и т е р а т у р а

1. А.с. 182108 СССР. Массообменный аппарат для взаимодействия газа с жидкостью /А.И.Ершов, И.М.Плехов (СССР). - 1966, Бюл. № II.

2. А.с. 679218 СССР . Массообменный аппарат / А.П.Голдар, А.Ф.Карпенков, А.И.Ершов (СССР). - 1979, Бюл. № 3.
3. А.с. 454003 СССР . Барботажно-примоточное контактное устройство / А.И.Ершов, И.М.Плехов, Г.И.Соловьев, А.И.Карпович (СССР). - 1974, Бюл. № 47.
4. А.с. 1036338 СССР . Теплообменный аппарат / А.И.Ершов, А.П.Голдар и др. (СССР). - 1983, Бюл. № 31.
5. Гусейнов Ч.С., Ершов А.И., Плехов И.М., Гухман Л.М., Довской Ф.П. К вопросу совершенствования процесса сепарации влаги и конденсата из природного газа // Развитие газовой промышленности. - М.: Недра. - 1970. - Вып. IV (8).
6. Ершов А.И., Плехов И.М., Бершевиц А.И. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов. - Минск: БелНИИТИ, 1973.
7. Ершов А.И. Разработка, исследование и применение элементных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученной потоке: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. - Л., 1975. - 41 с.
8. Рамм В.М. Абсорбция газов. - М.: Химия, 1976. - 655 с.
9. Карпович А.И. Разработка, исследование и практическое применение барботажно-примоточных контактных устройств: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Минск, 1975. - 21 с.
10. Чугаев Р.Р. Гидравлика. - Л.: Энергоиздат, 1982. - 672 с.
11. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. - М.: Недра, 1982. - 224 с.
12. Ершов А.И., Голдар А.П., Карпович А.И. Исследование гидродинамики и массообмена барботажно-примоточных контактных ступеней // Тез. докл. I Всесоюз. совещания по проблеме "Абсорбция газов". - Ташкент, 1979. - С.281-283.
13. Данквертс П.В. Газолидные реакции. - М.: Химия, 1973. - 296 с.
14. Ершов А.И., Голдар А.П., Карпович А.И., Иванов В.А. Исследование работы контактных тарелок при абсорбции окислов азота // Современные машины и аппараты хим. производств / Тез. докл. - Ташкент: 1980. - Т.2. - С.216-221.