

В. Г. КАЦАШВИЛИ, Г. И. ЗОРИНА, А. И. ЕРШОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ СТУПЕНИ КОНТАКТА СО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ФАЗ В ЗАКРУЧЕННОМ ПРЯМОТОКЕ

Одной из перспективных конструкций контактных устройств для проведения процессов массообмена является элементная ступень контакта с закрученным прямотоком фаз, работающая при высоких скоростях газа без снижения эффективности по сравнению с известными барботажными ступенями контакта. Устройство и принцип действия такой ступени следующие. Контактная ступень представляет собой (рис. 1) полотно со вставленными в него трубчатыми элементами, диаметр которых может приниматься от 20 до 100 мм и отношение высоты к диаметру составляет от 3 до 5. Газ, поступая в элементы снизу, за счет специальных направляющих устройств получает закрученное движение жидкость с полотна подается в зону контакта по подводным устройствам, выполненным в виде трубочек или щелей. Контакт фаз происходит в восходящем закрученном прямотоке внутри элементов, а частично также и в зоне сепарации.

В настоящее время имеется еще недостаточно экспериментальных данных и расчетных зависимостей для описания работы прямоточных ступеней контакта. Как правило, экспериментальные исследования посвящены изучению отдельных параметров или типоразмеров и не поддаются обобщению, а предлагаемые расчетные зависимости носят чисто эмпирический характер. Большой интерес представляют полуэмпирические методы расчета эффективности с учетом реальной гидродинамической обстановки на ступени контакта. В данной работе решалась

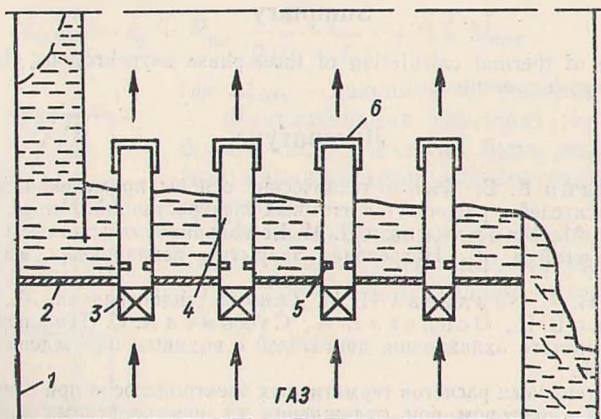


Рис. 1. Принципиальная схема элементной ступени контакта: 1 — корпус колонны, 2 — полотно ступени, 3 — закручивающее устройство для газовой фазы, 4 — элемент, 5 — подводное устройство для жидкости, 6 — сепаратор

задача математического описания эффективности элементной ступени на основании гидродинамической модели с проверкой адекватности ее реальному процессу без допущений о полном перемешивании жидкости как по всей ступени, так и в пределах отдельных конструктивных секций.

Поскольку все элементы ступеней в аппарате выполняются одинаковыми, то справедливо предположить, что газ распределяется равномерно по элементам и перед входом в них полностью перемешивается, так как этому способствует значительная турбулизация газового потока вследствие его закрутки. При разработке модели принято также обыч-

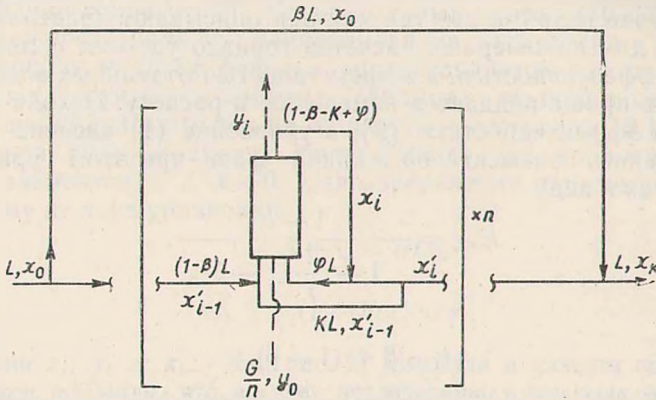


Рис. 2. Схема распределения потоков по предлагаемой модели

ное допущение о линейности равновесной зависимости в пределах изменения концентраций на ступени.

Контакт фаз происходит в основном внутри элементов, поэтому вполне вероятно, что на ступени могут возникнуть байпасирующие потоки по всей длине или мимо некоторых элементов. Часть жидкости, проконтактировавшей с газом и возвратившейся после сепарации в межэлементное пространство на тарелке, может снова попасть в тот же элемент, из которого она вышла, т. е. осуществляется циркуляция жидкости через элементы.

С учетом сказанного предлагается комбинированная модель, распределение потоков в соответствии с которой показано на рис. 2. При выводе расчетного выражения для эффективности использован метод модели функции распределения [1]. Полученное выражение имеет вид

$$E_{mL} = \frac{1 - a}{1 - \frac{1}{\lambda}(1 - a)}, \quad (1)$$

где

$$a = \beta + (1 - \beta) \left[ \frac{k}{1 - \beta} + \frac{(1 - k - \beta)^2 \bar{c}_L(\lambda_i E_v)}{(1 - \beta) [1 - \beta - k + \varphi - \varphi \bar{c}_L(\lambda_i E_v)]} \right]^n,$$

$$\lambda = \frac{mG}{L}, \quad \lambda_i = \frac{mG}{nL(1 - \beta - k + \varphi)},$$

$\bar{c}_L(\lambda_i E_v)$  — изображение по Лапласу функции распределения времени пребывания жидкости в отдельном элементе при  $p = \frac{\lambda_i E_v}{T}$ . Вид функции рас-

предельного зависит от того, какой характер движения жидкости принят внутри элемента, в частности, при идеальном перемешивании жидкости в элементе

$$\bar{c}_L(\lambda_i E_v) = \frac{1}{(\lambda_i E_v + 1)}, \quad (2)$$

при идеальном вытеснении

$$\bar{c}_L(\lambda_i E_v) = \exp(-\lambda_i E_v). \quad (3)$$

Чтобы применить для расчетов выражение (1), необходимо знать степень перемешивания жидкости в элементе, при этом уравнения (2) и (3) в общем случае непригодны, так как они описывают предельные случаи. Кроме того, для инженерных расчетов гораздо удобнее пользоваться не локальной эффективностью, а эффективностью отдельных элементов, ибо эта величина проще поддается измерению и расчету. Исходя из связи ее с локальной эффективностью [2], в уравнение (1) введена эффективность отдельного элемента по жидкой фазе, при этом уравнение (1) преобразуется к виду

$$E_{mL} = \frac{1-b}{1-\frac{1}{\lambda}(1-b)}, \quad (4)$$

где

$$b = \beta + (1-\beta) \times \left\{ \frac{\{\varphi k \lambda E_x + (1-\beta)(1-\beta-k)[E_x n(1-\beta-k+\varphi) + \lambda] - (1-\beta-k)^2 E_x \lambda\}^n}{(1-\beta) [\varphi E_x \lambda + (1-\beta-k) \{E_x n(1-\beta-k+\varphi) + \lambda\}]} \right\}.$$

Таким образом, уравнение (4) учитывает байпас жидкости от начала к концу ступени ( $\beta$ ), проскок жидкости мимо отдельных элементов ( $k$ ) и ее циркуляцию через зоны контакта в элементах ( $\varphi$ ). Уравнение (4) может быть применено для расчетов эффективности ступеней контакта независимо от конструктивных размеров элементов, так как входящая в (4) величина  $E_x$  учитывает и гидродинамическую обстановку, и соотношение расходов фаз в элементах.

Экспериментальное исследование эффективности контакта проводили при десорбции углекислого газа из водного раствора воздухом на ступени с четырьмя последовательно расположенными элементами диаметром 20 мм. В схеме предусмотрена стабилизация температуры газа и раствора, насыщение десорбирующего воздуха парами воды перед поступлением в зону контакта и система отбора проб жидкости, исключаяющая дополнительную десорбцию в пробоотборном тракте. В диапазоне изменения скорости газа от 18,5 до 27,0 м/сек и расходов жидкости на ступень от 143,7 до 440 л/час был поставлен полный факторный эксперимент 5×5 по рандомизированному плану. В каждом опыте измеряли расход жидкой фазы через элементы, концентрацию жидкости на входе и выходе ступени и элементов.

Для оценки гидродинамической обстановки на ступени в жидкой фазе нами проведен эксперимент по вымыванию электролита (индикатора) с получением кривых распределения времени пребывания для всех исследованных режимов. Расчет дисперсии времени пребывания показал, что на ступени не наблюдается ни идеальное вытеснение, ни идеальное перемешивание жидкости. Кроме того, характер кривых распределения свидетельствует об отсутствии байпасирующих потоков от начала к концу ступени. Последний вывод объясняется тем, что тарел-

Количество жидкости, поступающей в элемент

G, м/сек	L, л/час				
	143,7	257,0	316,0	375	440
18,0	81,7	83,0	83,5	84,1	84,1
20,9	81,0	81,1	81,9	82,3	83,2
23,6	80,0	80,7	81,2	81,2	81,2
25,6	76,6	78,3	78,3	78,6	79,8
27,5	74,5	75,6	76,6	76,6	76,7

ка представляла собой узкий прямоугольный лоток ( $70 \times 300$  м), в котором возможность полного байпасирования затруднена. Однако для круглых тарелок наличие байпаса представляется вполне вероятным.

Расход жидкости через элемент (таблица) во всех опытах был гораздо меньше общей нагрузки по жидкости и составлял  $(0,17-0,57) L_T$ . Следовательно, часть жидкости проскакивает по крайней мере мимо некоторых элементов, т. е.  $k \neq 0$ . Для определения параметров  $\varphi$  и  $k$  решали систему из двух уравнений

$$1 - k + \varphi = l/L_T, \quad (5)$$

$$kx'_{i-1} + (1 - k)x_i = x'_i.$$

Концентрации  $x_i$ ,  $x'_i$  и  $x'_{i-1}$  (см. рис. 2) замеряли в каждом опыте. Результаты расчетов показали, что во всех исследованных режимах значения  $\varphi$  не превышают 0,05 (в среднем 0,07), что объясняется конструкцией подвода жидкости в элементы (жидкая фаза поступала в элементы через трубочки диаметром 5 мм в основной серии экспериментов и 6 мм в дополнительной). Подставляя найденные значения  $k$  и  $\varphi$  в уравнение (4) при  $\beta = 0$ , рассчитывали значения эффективности по модели. Сравнение их с замеренными в опытах дало среднее отклонение 14,3 и 19,9 % для основной и дополнительной серий соответственно. Результаты сравнения могут служить подтверждением адекватности модели реальному процессу.

Поскольку значения  $\varphi$  очень малы, то возможно определение параметра  $k$  из соотношения

$$k = 1 - l/L_T, \quad (6)$$

при этом ошибка не превышала 8 % по сравнению с определением  $k$  из системы (5). Соответственно можно упростить расчетное уравнение (4), считая  $\varphi = \beta = 0$ :

$$E_{mL} = \frac{1 - \left[ \frac{E_x n (1 - k) + \lambda - (1 - k) E_x \lambda}{n E_x (1 - k) + \lambda} \right]^n}{1 - \frac{1}{\lambda} \left\{ 1 - \left[ \frac{n E_x (1 - k) + \lambda - (1 - k) E_x \lambda}{n E_x (1 - k) + \lambda} \right]^n \right\}}. \quad (7)$$

Сравнение рассчитанных по уравнению (7) и экспериментально найденных значений эффективности дало среднее отклонение 16,6 и 21 % для основной и дополнительной серий соответственно. Очевидно, что учет  $\varphi$  незначительно повышает точность расчетов, а определение значения  $\varphi$  связано с дополнительными замерами концентраций и усложняет расчеты. Поэтому применение для расчетов уравнения (7) более оправдано.

Адекватность модели реальному процессу дает возможность проанализировать изменение эффективности в зависимости от режимных

параметров совместно с изменением параметра модели  $k$ , характеризующего долю проскока жидкости (рис. 3 и 4). Доля проскока с ростом скорости газа заметнее всего возрастает при меньшей нагрузке по жидкости, что и приводит к некоторому падению эффективности; при больших и средних нагрузках по жидкости доля проскока растет слабее, и ее влияние компенсируется приростом эффективности за счет увеличения скорости газа.

Проскок жидкости отрицательно влияет на эффективность ступени контакта. Уменьшить величину проскока возможно за счет увеличения подачи жидкости в элементы, расположения элементов в шахматном порядке или установки специальных полуперегородок по потоку жидкости. Для устранения вредного проскока нами предложено секционирование

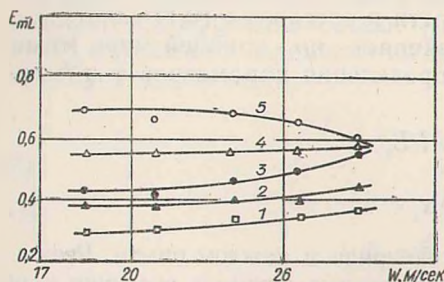


Рис. 3. Зависимость эффективности ступени от скорости газа. Нагрузка по жидкости: 1—440 л/час, 2—375, 3—316, 4—257, 5—143,7 л/час

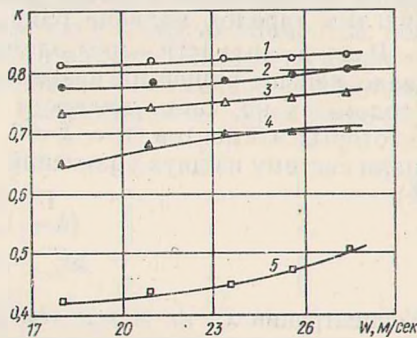


Рис. 4. Зависимость доли проскакивающей жидкости от скорости газа. Обозначения см. рис. 3

рование тарелки специальными воротниками, надеваемыми на элементы [3]. Одновременно устраняется и общий байпас жидкости, также снижающий эффективность (см. (4)).

Из уравнения (4) могут быть получены выражения для частных случаев, учитывающих только одно из рассмотренных гидродинамических явлений, например циркуляцию. Так как влияние числа конструктивных секций не проблематично, то влияние параметра  $\varphi$  на эффективность легко проследить при  $n = 1$

$$E_{mL} = \frac{(1 + \varphi) E_x}{1 + \varphi E_x} \quad (8)$$

При  $n \neq 1$  влияние  $\varphi$  на  $E_{mL}$  сложнее, и этот вопрос будет рассмотрен в отдельном сообщении.

#### Обозначения

$E_{mL}$  — эффективность ступени контакта по Мерффи в жидкой фазе,  $E_x$  — эффективность одного элемента по жидкой фазе,  $E_v$  — локальная эффективность,  $m$  — константа равновесия,  $G$  — расход газа, моль/час,  $L$  — расход жидкости, моль/час,  $\beta$  — доля байпасирующей жидкости,  $k$  — доля проскакивающей жидкости,  $\varphi$  — доля циркулирующей жидкости,  $n$  — число элементов в ряду (число конструктивных секций),  $p$  — параметр Лапласа,  $T$  — постоянная времени для элемента, сек,  $x$  — концентрация переходящего компонента в жидкой фазе,  $l$  — расход жидкости через элемент, л/час,  $L_T$  — расход жидкости на один ряд элементов, л/час.

### Summary

This paper presents the experimental results of the study of efficiency of contact stage with two-phase co-current swirling flow. The mathematical description of efficiency taking into account by-pass and recycle flows is derived. The mathematical model is in fair agreement with experimental data.

### Литература

1. Foss A. S., Gerster J. A., Pigford R. L. A.I.Ch.E. J., 4, № 2, 1958.
2. Bubble Tray Design Manual, A.I.Ch.E., N. Y., 1958.
3. К а ц а ш в и л и В. Г. и др. Авторское свид. № 401376, Бюл. изобр., № 4, 1973.

*Белорусский технологический институт  
им. С. М. Кирова*

*Поступило в редакцию  
3.VII 1974*