

УДК 66.021.3:532.5.001.5

А.Е.Рабко, ассистент;  
А.И.Ершов, профессор

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В БАРБОТАЖНОМ СЛОЕ МАССООБМЕННЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

In this article the new method of the definition the parameters of gas phase in gas-liquid streams is proposed. The method of solving is based on the using the profiles of local air-hydrodynamic characters of double-phase systems. The profiles were obtained by experimental way with the application on the double-electrod pick device and the measuring system based on the apparatus "ИГС".

Для моделирования процессов хемосорбции трудногаство-  
римых га ов в массообменных аппаратах с контактными уст-  
ройствами барботажного типа необходимо знать некоторые па-  
раметры состояния газовой фазы в барботажном слое [1,2].  
Целью настоящего исследования явилась разработка модели  
полидисперсного потока газовой фазы в газожидкостной сис-  
теме, позволяющей с достаточной точностью оперативно опре-  
делять распределение газовых включений по размерам и скоро-  
стям, оценивать вклад каждой фракции пузырей в их концент-  
рацию  $N$ , в газосодержание  $\epsilon$ , в поверхность контакта фаз  
 $a$ , в частоту прохождения пузырей  $f$ , в перенос газа че-  
рез барботажный слой  $V$ , а также рассчитать локальную при-  
веденную скорость  $\omega_{GN}$  и удельный расход газа в пузырьках  
 $\beta_N$  и струях при осреднении по сечению потока.

Метод расчета параметров газовой фазы основан на об-  
работке профилей локальных аэрогидродинамических характе-  
ристик двухфазной системы, полученных экспериментальным пу-  
тем с помощью двухэлектродного датчика и измерительного  
комплекса на базе разработанного авторами прибора ИГС [3,4].

Последовательность определения характери сти движения  
газовой фазы с учетом распределения пузырей по размерам и  
скоростям рассмотрим в цилиндрическом восходящем двухфазном  
потоке с изменяющимися по радиусу сечения локальными значе-  
ниями  $\epsilon, a, f$ . Введем условие, что при времени осреднения  
 $t_2 - t_1 \rightarrow \infty$  и числе фракций пузырей  $n \rightarrow \infty$ , в пределах каж-  
дой  $i$ -й фракции пуз: ри, пересекающие датчики, в совокупности  
приближаются к сферической форме и пр: этом  $D_{Ni} \approx D_{N1} \approx D_{Nn}$ . Тог-  
да количество пузырей, прошедших через кольцевую площадку  
 $2\sqrt{r} dz$  в сечении, перпендикулярном направлению потока, равно

$$N_g = J \cdot 2\pi r \cdot dz \quad (1)$$

Значение удельного локального потока пузырей  $\gamma$  определим с учетом их распределения по размерам и скоростям, если принять, что каждая фракция будет иметь свою осредненную по количеству пузырей скорость. Введя дифференциальную функцию распределения пузырей по размерам  $\varphi(D)$  и перейдя, соответственно, от дискретных величин к непрерывным при условии, что диапазон диаметров пузырей лежит в пределах  $[D_1, D_2]$ , получим

$$\gamma = N \cdot \int_{D_1}^{D_2} u(D) \cdot \varphi(D) \cdot dD. \quad (2)$$

Выражение для приведенной локальной скорости газовой фазы при этом примет вид

$$w_{CN} = \frac{J \cdot N}{6} \cdot \int_{D_1}^{D_2} u(D) \cdot \varphi(D) \cdot D^3 \cdot dD. \quad (3)$$

Локальную концентрацию пузырей определим из выражения

$$N = \frac{6 \cdot \epsilon}{J \cdot D_1^3} = \frac{6 \cdot \epsilon}{J \cdot \int_{D_1}^{D_2} \varphi(D) \cdot D^3 \cdot dD}. \quad (4)$$

Для установления вида функции  $u(D)$  проанализируем процесс регистрации пузырей с помощью точечного электрода. Пусть  $f_i$  - число пузырьков  $i$ -й фракции, зарегистрированное зондом в единицу времени. Тогда  $f_i \sim p_i \cdot N_i$ , где  $p_i$  - вероятность появления пузырей  $i$ -й фракции в исследуемой точке. С учетом размеров и скоростей пузырей  $p_i = u_i \cdot J \cdot dt_i^2 / 4$ . При условии неразрывности потока и бесконечном времени регистрации с абсолютной строгостью можно принять

$$f_i = u_i \cdot N_i \cdot \frac{J \cdot D_i^2}{4}. \quad (5)$$

Перейдя к непрерывным величинам и интегрируя по числу фракций пузырей, получим выражение для локальной частоты прохождения пузырей:

$$f = \frac{J \cdot N}{4} \int_{D_1}^{D_2} u(D) \cdot \varphi(D) \cdot D^2 \cdot dD. \quad (6)$$

Из литературы [5,8] зависимость  $u(D) = f(D)$  возможно представить в виде

$$u(D) \sim D^m, \quad (7)$$

где  $m$ , по данным различных авторов, изменяется в пределах 0,36-0,63, а теоретическое значение  $m = 0,5$ .

Для дальнейшего анализа необходимо ввести понятие фиктивной гомогенной скорости  $u_e$ , т.е. скорости, с кото-

рой должен двигаться относительно электродов датчика фиктивный полидисперсный гомогенный поток, по своей структуре  $(\epsilon, a, f)$  совпадающий со структурой исследуемого гетерогенного потока, когда частоты прохождения пузырей для обоих потоков становятся равными, т.е.  $f_e = f$ .

Тогда возможно представить выражение (7) в виде безразмерной зависимости

$$u(D)/u_e = B_u \cdot D^m \quad (8)$$

где  $B_u$  - коэффициент распределения, зависящий от структуры потока. На основании зависимостей (4), (6) и (8) определим значение коэффициента распределения:

$$B_u = \frac{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^2 \cdot dD}{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^{m+2} \cdot dD} \quad (9)$$

Выражение (3) с учетом (6), (8) и (9) примет вид

$$W_{6N} = \frac{2}{3} f \cdot \frac{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^{m+3} \cdot dD}{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^{m+2} \cdot dD} \quad (10)$$

Одновременное определение  $\epsilon$ ,  $a$  и  $f$  в локальной точке потока дает возможность однозначно задать функцию распределения пузырей по размерам  $\psi(D)$ . Для этой цели хорошо подходит достаточно часто встречающееся в литературе [8] нормальное логарифмическое распределение

$$\psi(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \beta \cdot D} \cdot \exp \left[ - \left( \ln \frac{D}{D_N} - \alpha \right) / (2 \beta^2) \right] \quad (11)$$

Обработка данных, взятых из литературных источников [5-8], позволила выявить ряд закономерностей в структуре гетерогенного потока и, в частности, существенную и устойчивую зависимость между медианным и объемно-поверхностным диаметром пузырей в локальной точке потока. Так, для барботажных аппаратов в области  $D_{V5} = (0,05-0,03)$  м данные распределения со средним относительным отклонением  $\pm 8,5\%$  хорошо аппроксимируются выражением

$$D_N = 0,113 \cdot D_{V5}^{0,62} \quad (12)$$

Параметры распределения (11) для указанной области были получены путем решения системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} D_N - \int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D \cdot dD = 0; \\ D_{V5} - \frac{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^2 \cdot dD}{\int_{D_1}^{D_2} \psi(D) \cdot D^2 \cdot dD} = 0; \\ D_N - 0,113 \cdot D_{V5}^{0,62} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Решение было проведено численным методом на ЭВМ. Диа-

пазон интегрирования и шаг автоматически выбирались на каждом цикле счета, исходя из условий:

$$D_1 = 0,0005 \text{ м}, D_2 = D_N \cdot (1 + 6 \cdot \sqrt{\beta^2});$$

$$\sigma^2 = \exp(2 \cdot \alpha + \beta^2) \cdot [\exp(\beta^2) - 1], \quad (14)$$

где  $\sigma^2$  - дисперсия нормального логарифмического распределения.

Зависимости рассчитанных параметров распределения от  $D_N$  аппроксимированы зависимостями:

$$\alpha = 0,0854 - 35,1 \cdot D_N + 1055 \cdot D_N^2 - 17125 \cdot D_N^3,$$

$$\beta = -0,1375 + 132 \cdot D_N - 7466 \cdot D_N^2 + 166798 \cdot D_N^3. \quad (15)$$

Среднее относительное отклонение при расчете  $\alpha$  равно  $\pm 2,16 \%$ ,  $\beta$  -  $\pm 1,48 \%$ .

Таким образом, на основании полученных в локальной точке газожидкостного потока экспериментальных значений  $\epsilon$ ,  $a$  и  $f$  возможно рассчитать величину

$$D_{15} = 6 \cdot \epsilon / a \quad (16)$$

и, используя выражения (II), (12) и (15), достаточно точно предсказать структуру двухфазного потока для расчета  $\overline{d_{GN}}$ .

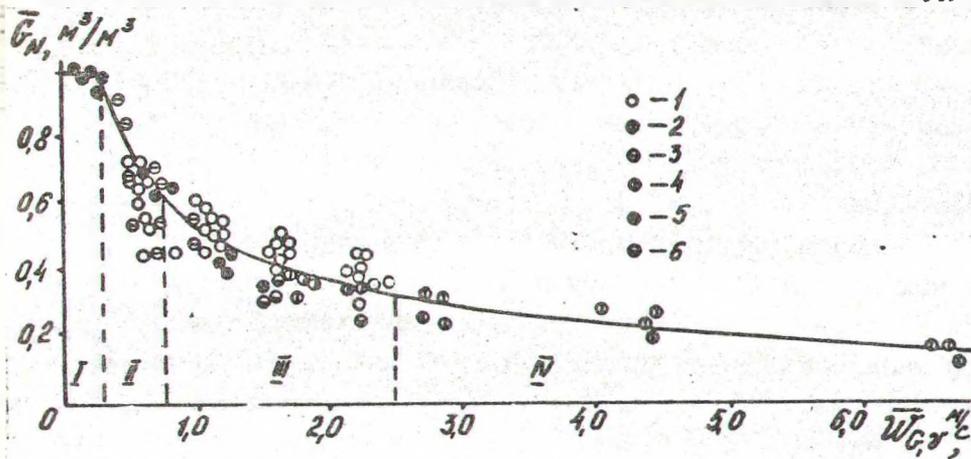


Рис.1. Зависимость удельного расхода газа в пузырьках от скорости газа, приведенной к площади восходящего потока, для различных конструкций контактных устройств:  
 1 - БПКУ2; 2 - БПКУ1; 3 - СПТ1; 4 - БПКУ3; 5 - КВЭС; 6 - СПТ2.  
 I - газ распределен в жидкости; II - появление пульсирующих струй газа; III - режим устойчивых газовых струй ("эмульгирования"); IV - жидкость распределена в газе.

Удельный расход газа в пузырьках для характерного сечения восходящего потока радиусом  $R_T$  определяется на основании полученных профилей локальных аэродинамических

ких характеристик газожидкостного потока из выражения

$$\bar{G}_N = 2 / (R_N^2 \bar{w}_{cr}) \cdot \int_0^{R_N} w_{GN} \cdot z \cdot dz \quad (17)$$

Результаты расчетов, проведенных для различных конструкций контактных устройств и описанных в [2,4], показали, что основным фактором, влияющим на соотношение расходов газа в пузырьках и струях, является скорость газовой фазы  $\bar{w}_{cr}$ , приведенная к площади сечения восходящего потока в барботажном слое. Анализ полученной зависимости (рис.1), а также данные визуальных наблюдений позволяют выделить четыре гидродинамические состояния структуры восходящего газожидкостного потока, хорошо согласующиеся с данными [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод Ю.В. Газожидкостные хемосорбционные процессы. - М., 1989.
2. Тарат Э.Я., Мухленов И.П., Туболкин А.Ф. и др. Пенный режим и пенные аппараты. - Л., 1977.
3. Рабко А.Е., Ершов А.И. Исследование структуры газожидкостных потоков в массообменных контактных устройствах барботажного типа // Химия и хим.технология. - Мн., 1988. - Вып.2. - С. 92-98.
4. Рабко А.Е., Ершов А.И., Голдар А.П. Разработка контактных устройств с формируемой структурой высокого барботажного слоя для колонных противоточных хемосорберов // Совр менн. и машины и аппараты химических производств: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Чимкент, 1988. - Ч.1. - С.106-107.
5. Matsuura A., Liang-Shih Fan. Distribution of bubble properties in a Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed // AIChE Journal. - 1984. - U. 30. - N 6. - P.894-903.
6. Akita K., Yoshida F. Bubble Size Interfacial Area and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Column // Ind.Eng.Chem.Proc.Des.Dev. -1971.-U. 13. -N 1.- P.84-91.
7. Levis D.A., Davidson J.F. Bubble size produced by shear and turbulence in a bubble column // Chem. Eng. Sci. - 1983.- U. 38. - N 1. - P.161-167.
8. Burgess J.M., Colderbank P.H. The measurement of bubble parameters in two-phase dispersions - II // Chem. Eng. Sci.- 1975. - U. 30. - P.1107-1121.