

УДК 531.2+531.3+66.015.23

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАВНОВЕСИЯ И КИНЕТИКИ В ПРОЦЕССЕ МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ БАРБОТАЖЕ

С. О. НАЛЧАДЖЯН

Ереванский государственный университет

Поступило 25 VI 1973

Показано, что средняя скорость газа относительно межфазной поверхности в всплывающем пузыре составляет несколько процентов скорости движения пузырей при барботаже и, следовательно, скорость жидкости относительно аппарата (плотность орошения) не должна существенным образом влиять на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Дано математическое описание процесса на основе приближенной модели взаимодействия потоков газа с радиальным циркуляционным потоком жидкости в газо-жидкостном слое. Показано, что влияние кинетических факторов на процесс незначительно, и в условиях, имеющих практическое значение, определяющими являются факторы равновесия и материального баланса.

Рис. 6. библиографических ссылок 16.

Процесс массообмена между газом и жидкостью, а также при барботаже состоит из последовательных процессов массоотдачи в каждой фазе и перехода от одной фазы в другую, совершающегося на поверхности раздела фаз.

По исследованиям в макросистемах с определенными геометрическими параметрами [1—3] скорость массоотдачи между данной поверхностью и текущей фазой однозначно определяется физико-химическими и геометрическими параметрами системы и средней скоростью движения фазы относительно геометрической фигуры, образуемой поверхностью, ограничивающей данную фазу. Распространяя указанные закономерности на газо-жидкостной слой, образуемый при барботаже, можно утверждать, что скорость массоотдачи в газовой фазе зависит от параметров скорости газа относительно межфазной поверхности, а скорость массоотдачи в жидкой фазе — от параметров скорости жидкости также относительно межфазной поверхности.

Между средними скоростями движения фаз относительно аппарата (являющимися непосредственно-измеряемыми величинами) и их средними скоростями относительно их поверхности раздела имеется следующее соотношение [4].

$$\frac{\bar{W}_r}{1-\varepsilon} - \frac{\bar{W}_ж}{\varepsilon} = \bar{I}_r + \bar{I}_ж, \quad (1)$$

где $\bar{I}_r$ и $\bar{I}_ж$ — средние скорости газа и жидкости относительно межфазной поверхности; $\bar{W}_r/(1-\varepsilon)$ — скорость геометрической фигуры пузыря относительно аппарата [4], но отличающаяся от средней скорости жидкости относительно межфазной поверхности вследствие подвижности последнего. Соотношение между указанными величинами схематично показано на рис. 1.

В пределах практически применяемых скоростей подачи жидкости в газо-жидкостной слой при барботаже (до $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$) скорость жидкости в аппарате составляет всего несколько процентов скорости всплывания пузырей, а также средней скорости жидкости относительно межфазной поверхности.

Зависимость $\bar{I}_r$ от $\bar{W}_r$ по расчетам на основе теоретически выведенных уравнений [5, 6] и экспериментальных данных [7, 8] по параметрам газо-жидкостного слоя, состоящего из воды и воздуха, которые являются сходными с данными для многих других систем, показывают, что $\bar{I}_r$ составляет также несколько процентов от скорости всплывания пузырей; следовательно, можно принять следующее приближение:

$$\bar{I}_ж \approx \frac{\bar{W}_r}{1-\varepsilon}. \quad (2)$$

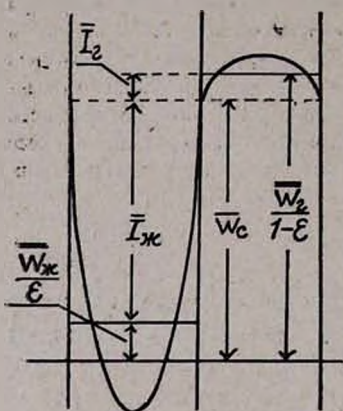


Рис. 1. Взаимная связь между отдельными составляющими скоростей газа и жидкости.

По закономерностям, наблюдаемым в микросистемах, коэффициент массоотдачи в жидкой фазе должен определяться значением $\bar{W}_r/(1-\varepsilon)$, а не $\bar{W}_ж$, изменение которой существенным образом не влияет на структуру и характерные параметры газо-жидкостного слоя.

Экспериментальные наблюдения показывают, что в ряде случаев, с так называемой «жидкофазной» стадией массоотдачи, замечается почти линейная пропорциональность между $\bar{W}_ж$ и скоростью переноса.

В экспериментах непосредственно измеряемыми параметрами массопередачи являются скорость перехода диффундирующих компонентов во всем объеме контактирования и определение разных выражений коэффициентов массопередачи или коэффициентов массоотдачи в отдельных фазах связано с задачей функциональной зависимости последних от суммарной скорости переноса каждого компонента.

Затронутая функциональная связь приближенно выражается [9] уравнением

$$G' = K_0 \Delta C_{\text{ср}} S, \quad (3)$$

где G' — суммарная скорость переноса в аппарате; K_0 — суммарный коэффициент массопередачи; $\Delta C_{\text{ср}}$ — средняя движущая сила переноса; S — поверхность контакта фаз.

Исходя из вышеизложенного, K_0 не должен существованно изменяться от $\bar{W}_{\text{ж}}$; следовательно, наблюдаемое изменение G' от $\bar{W}_{\text{ж}}$ может являться следствием изменения $\Delta C_{\text{ср}}$ или S , вызываемого изменением $\bar{W}_{\text{ж}}$. Если же учесть, что одинаковое изменение S , вызываемое изменением скорости газа, выражаемой ростом высоты газо-жидкостного слоя, не вызывает одинакового изменения G' , то можно заключить, что наблюдаемая функциональная зависимость G' от $\bar{W}_{\text{ж}}$ в системах с преобладанием жидкофазной стадии процесса преимущественно обусловлена зависимостью $\Delta C_{\text{ср}}$ от $\bar{W}_{\text{ж}}$. Зависимость G' от высоты газо-жидкостного слоя при изменении $\bar{W}_{\text{ж}}$ и $\bar{W}_{\text{г}}$ при десорбции CO_2 из водного раствора воздухом в аппарате провального типа [10, 11] приведена на рис. 2. Так как увеличение скорости газа также приводит к некоторому росту $\Delta C_{\text{ср}}$, а наблюдаемый при этом рост G' частично относится к росту $\Delta C_{\text{ср}}$ и повышение $\bar{W}_{\text{г}}$, приводящее к росту $\bar{I}_{\text{ж}}$ (параметра, непосредственно определяющего коэффициент массоотдачи в жидкой фазе), не вызывает значительного роста G' , то можно утверждать, что приведенные данные указывают на незначительное влияние кинетических факторов на процесс в обсуждаемом случае.

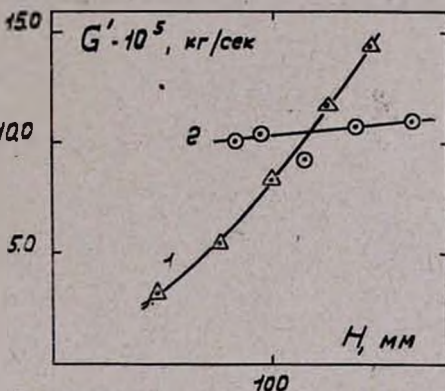


Рис. 2. Зависимость скорости десорбции (G') от высоты пены, при изменении плотности орошения (1) и скорости газа (2).

Более подробный анализ взаимных функциональных зависимостей параметров процесса можно осуществить, если G' выразить в виде явной функции от независимых аргументов процесса, зависящей от структуры потоков в газо-жидкостном слое. Необходимо учесть также, что $\Delta C_{\text{ср}}$ не является независимым аргументом и зависит также от G' ; для однозначных заключений необходимо выразить G' в виде непосредственной функции от независимых аргументов. Указанная зависимость выражается уравнением (4) при проточном и уравнением (5) при противоточном взаимодействии фаз

$$G' = -\frac{\Gamma_{y_{\text{н}}} - x_{\text{н}}}{\Gamma_{\text{г}} + \frac{1}{Q_{\text{ж}}}} (1 - e^{-F}) \quad (4)$$

$$G' = \frac{\Gamma y_n - x_n}{\frac{\Gamma}{Q_r} - \frac{1}{Q_{ж}}} (1 - e^{-F'}), \quad (5)$$

где

$$F = \left(\frac{\Gamma}{Q_r} + \frac{1}{Q_{ж}} \right) K_0 S \quad (6)$$

и

$$F' = \left(\frac{\Gamma}{Q_r} - \frac{1}{Q_{ж}} \right) K_0 S. \quad (7)$$

Q_r и $Q_{ж}$ — расходы жидкости и газа; Γ — средний коэффициент равновесия между двумя фазами по диффундирующему компоненту ($\Gamma = x/y$); x_n и y_n — начальные концентрации жидкости и газа.

Наблюдения и теоретические расчеты [12, 13] показывают, что всплытие пузырей при барботаже вызывает интенсивную радиальную циркуляцию жидкости по схеме, показанной на рис. 3, в которой потоки подачи и отвода жидкости соответствуют аппарату провального типа.

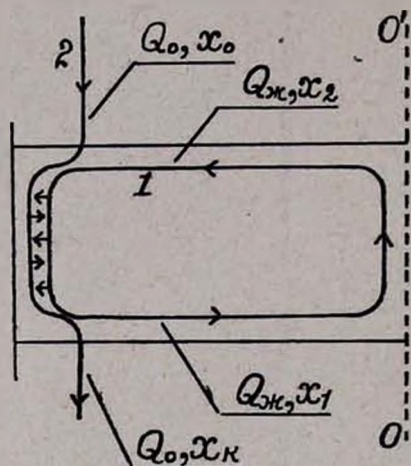


Рис. 3. Схема потоков жидкости в газо-жидкостном слое: 1 — циркуляционный поток; 2 — поток свежей жидкости.

В расчетах по массопередаче на провальных тарелках часто принимается полное перемешивание в жидкой фазе [6—8, 14]; при этом концентрация жидкой фазы принимается равной концентрации на дне слоя. Равновесной концентрацией газа считается значение соответствующей концентрации выходящей жидкости, а при расчете, достигнутом степени равновесия, необходимо было бы ее сравнивать с концентрацией жидкости на верхнем ее уровне, несомненно отличающейся от концентрации на дне слоя.

Строгого математического описания структуры потоков жидкости и распределения концентраций в данной стадии исследований нет; полагаем, что даже приближенное выражение циркуляционного потока жидкости и соответствующее изменение концентрации жидкости вдоль этого потока соответствует более высокой точности, чем принятие одинаковой концентрации жидкости во всем газо-жидкостном объеме. Например было показано [12], что неучет циркуляционного потока и принятие полного перемешивания может привести к значительным ошибкам в расчете коэффициентов массоотдачи.

Ниже приводится вариант выражения зависимости G' от определяющих параметров с учетом циркуляционного потока жидкости, для описания которого применяются уравнения, приводимые в работе [5].

Согласно схеме, принятой в основу данного обсуждения, в периферийной зоне на расстоянии r от оси аппарата, превышающей $r_1 = 0,79 R$ (радиус аппарата), средняя составляющая скорости жидкости имеет отрицательное, а в центральной зоне ($r < r_1$) — положительное значение.

Ниже приводится уравнение зависимости G' от определяющих параметров, в котором принято противоточное взаимодействие в периферийной зоне и прямоточное в центральной. В нем использованы следующие данные, вытекающие из работы [5]:

интенсивность циркуляционного потока жидкости

$$Q_{\text{ж}} = 0,21 \bar{W}_r \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \pi R^2, \quad (8)$$

интенсивность потока газа в центральной зоне

$$Q_{\text{гц}} = 0,825 Q_r \quad (9)$$

и в периферийной

$$Q_{\text{гп}} = 0,175 Q_r. \quad (10)$$

В выводах допущен возможный проскок свежей жидкости, что выражается коэффициентом перемешивания этого потока с циркуляционным потоком жидкости газо-жидкостного слоя (m). При этом принимается, что m — часть потока свежей жидкости (Q_0), полностью смешивающейся с циркуляционным потоком ($Q_{\text{ж}}$), а ее $(1-m)$ часть проходит через периферийную зону и выходит из аппарата без изменения.

82,5% потока газа проходит через центральную, а остальная часть — через периферийную зону. Объем и сечение центральной части составляет 62% всего сечения аппарата, а остальную часть — периферийная зона.

По принятой схеме потоков зависимость G' от определяющих параметров выражается следующим уравнением:

$$G' \left(\frac{1}{D_{\text{ж}}} \cdot \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{m Q_0} \right) = \Gamma y_{\text{н}} - x_0, \quad (11)$$

где x_0 — концентрация, Q_0 — расход свежей жидкости,

$$D_{\text{ж}} = \frac{\varphi(K_0)}{1,21 \Gamma + 5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} + \frac{\psi(K_0)}{5,7 \Gamma - 5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \quad (12)$$

$$\varphi(K_0) = 1 - e^{-f} \quad (13)$$

$$\psi(K_0) = 1 - e^{-f''} \quad (14)$$

$$f = \frac{K_0 S}{Q_r} \left(0,75 \Gamma + 3,4 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (15)$$

$$f' = \frac{K_0 S}{Q_r} \left(2,77 \Gamma - 1,8 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right). \quad (16)$$

Уравнение (11) удобно для использования в следующем преобразованном виде:

$$\frac{\Gamma y_n - x_0}{G'} = \frac{1}{D_k} \cdot \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{m Q_0}. \quad (17)$$

По экспериментальным данным массообмена в системах CO_2 — H_2O , NH_3 — H_2O [11], SO_2 — H_2O [10] и O_2 — H_2O [16] в барботажном аппарате провального типа наблюдается прямолинейная зависимость между $(\Gamma y_n - x_0)/G'$ с одной стороны и $1/Q_r$ и $1/Q_0$ с другой. На рис. 4—6 приведены примерные кривые, соответствующие десорбции O_2 [16] и абсорбции SO_2 [10].

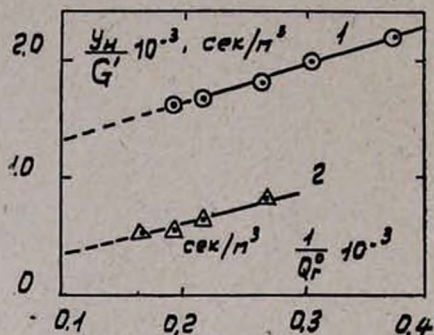


Рис. 4. Абсорбция SO_2 водой: 1 — $Q_0 = -1,165 \cdot 10^{-5}$; 2 — $Q_0 = 11,05 \cdot 10^{-5}$ м³/сек; сечение аппарата = 0,00568 м².

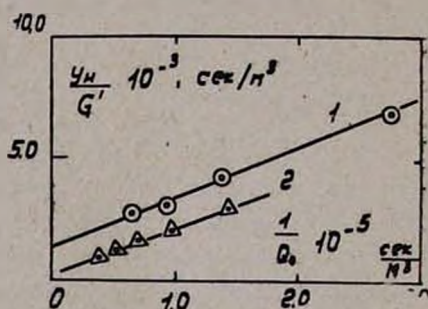


Рис. 5. Абсорбция SO_2 водой: 1 — $\bar{W}_r = 0,145$; 2 — $\bar{W}_r = 0,58$ м/сек; сечение аппарата = 0,00568 м².

В рассматриваемых случаях имеется функциональная зависимость типа $Y = aX + b$, где Y есть $(\Gamma y_n - x_0)/G'$, а X — $1/Q_r$ или $1/Q_0$.

В случае зависимости $(\Gamma y_n - x_0)/G'$ от $1/Q_0$ при десорбции O_2 , $a = 1/m$ и $b = 1/G_k \cdot Q_r$. При этом следует обратить внимание на нижеизлагаемые факты.

В случае низких значений Γ , имеющихсся при малорастворимых газах, $1/D_k Q_r \ll 1/m Q_0$ и функциональная зависимость выражается прямой линией, проходящей очень близко от начала координат (рис. 6). В этих случаях значения f и f' низкие, но соответствующие низкие значения $\varphi(K_0)$ и $\psi(K_0)$ не влияют существенным образом на суммарное значение функции.

При более высоких значениях Γ величина $1/D_k \cdot Q_r$ является существенной, но вышеуказанная прямолинейная зависимость сохраняется, что может наблюдаться при значительном постоянстве m и D_k или их линейном изменении симбатно с $1/Q_0$ или $1/Q_r$.

Линейное изменение $\varphi(K_0)$ и $\psi(K_0)$, содержащееся в D_* , может наблюдаться при низком значении f и f' , когда справедливо приближение

$$1 - e^{-Z} \approx 1 - (1 - Z) \approx Z, \quad (19)$$

где Z это f или f' . Но т. к. переносы веществ в обсуждаемых случаях значительны (больше 50%), низкие значения f и f' исключены.

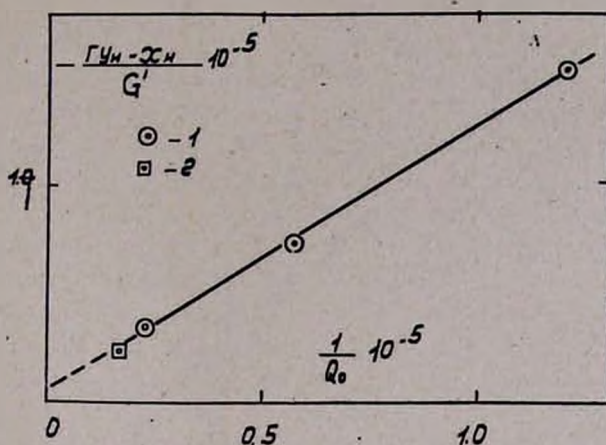


Рис. 6. Десорбция O_2 из воды: 1 — $\overline{W}_r = 0,74, 1,22$ и $1,85$ м/сек; 2 — $\overline{W}_r = 1,85$ м/сек; сечение аппарата = $0,01$ м².

Постоянство $\varphi(K_0)$ и $\psi(K_0)$ возможно при: а) постоянстве f и f' , б) при таких высоких значениях f и f' , при которых

$$1 - e^{-f} \approx 1 \quad (20)$$

$$1 - e^{-f'} \approx 1 \quad (21)$$

Случай (а) исключается, т. к. при изменении Q_0 изменяется, по крайней мере, S за счет изменения высоты газо-жидкостного слоя при практическом постоянстве других параметров, входящих в f и f' ($K_r, K_m, Q_r, Q_m, \Gamma$ и ϵ).

Из приведенного следует, что практическое постоянство D_* возможно при наличии условий, выражаемых уравнениями (20) и (21).

При изменении Q_r в выражениях f и f' одновременно изменяется несколько величин (Q_r, Q_m, K_0 и S). В отсутствии четкого выражения для функциональной зависимости всех переменных, входящих в f и f' от Q_r , невозможно определенно установить направление их изменения, но маловероятно, чтобы при разных системах, с параметрами значительно отличающимися друг от друга, изменения разных величин, входящих в f и f' , компенсировали бы друг друга и $\varphi(K_0)$ и $\psi(K_0)$ оставались бы постоянными. Кроме того, в опытах с переменным Q_r

значения f и f' такого же порядка, что и при опытах с переменным Q_0 и, следовательно, условия (20) и (21) справедливы также для функциональной зависимости, наблюдаемой в этих случаях.

Из уравнений (20) и (21) следует:

$$D'_x = \frac{1}{1,21 \Gamma + 5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} + \frac{1}{5,7 \Gamma - 5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}}. \quad (22)$$

Условия (20), (21) и (22) указывают на незначительное влияние кинетических факторов на процесс и преобладание влияния факторов равновесия и материального баланса.

Окончательное обоснование выдвинутой нами точки зрения требует более строгого математического описания процесса и использования в обсуждениях более богатых экспериментальных данных; но полученная при этом значительная согласованность с данными по абсорбции и десорбции газов, считавшихся типичными для разных режимов процесса (с жидкофазным, газофазным и смешанным сопротивлением), дает основание для представления изложенной точки зрения на обсуждение.

ԿԻՆԵՏԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՀԱՎԱՍՏԱՐԱԿՇՈՒԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՆՇԱՆԱԿԱԼԻՌՈՒԹՅԱՆ
ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄ ՆՅՈՒԹՈՒՓՈՒՆԱՆՑՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՈՒՄ,
ԲԱՐՔՈՏԱԺԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ս. Ն. ՆԱԼՉԱՃՅԱՆ

Տեսական հաշվարկներով ցույց է տրված, որ բարրոտածի պայմաններում միջֆազային մակերեսի նկատմամբ շարժվող գազային բշտիկում գազի միջին արագությունը կազմում է բշտիկի արագության մի քանի տոկոսը և, հետևաբար, հեղուկի արագությունը սարքի նկատմամբ (ողողման խտությունը) չպետք է էականորեն ազդի հեղուկ ֆազում նյութափոխանցման գործակցի վրա: Գազի և շառավղային շրջանառության հեղուկի հոսքերի մոտավոր մոդելի հիման վրա, տրված է պրոցեսի մաթեմատիկական նկարագրությունը: Դուրս բերված հավասարումների հիման վրա կատարված փորձնական տվյալների մշակումով ցույց է տրված, որ գործնական նշանակություն չունեցող պայմաններում պրոցեսի վրա կինետիկական ազդակների ազդեցությունն աննշան է, և որոշիչ են հանդիսանում հավասարակշռության և նյութական հաշվեկշռի ազդակները:

A RELATIVE METHOD FOR THE ESTIMATION OF FACTORS WHICH INFLUENCE MASS TRANSFER IN FOAMS

S. H. NALCHAJIAN

It has been shown theoretically that the mean velocity of the gas with respect to the interface constitutes only a few percent of the ve-

locity of the ascending bubble and velocity of the liquid does not affect the process of mass transfer. The kinetic parameters have a minor effect on the process, which is mainly controlled by the equilibrium conditions of the system.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии, ГХИ, М., 1960.
2. В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, Физматгиз, М., 1959.
3. Д. А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, Изд. «Наука», М., 1967.
4. С. О. Налчаджян, Уч. зап. ЕГУ, № 3, 112 (1968).
5. С. О. Налчаджян, Уч. зап. ЕГУ, № 1, 68, 1972.
6. В. В. Дильман, Э. В. Сенькина, Химия и технология топлива и масел, № 8, 46 (1964).
7. А. И. Родионов, В. М. Радиковский, ЖПХ, 41, № 1, 82 (1968).
8. А. И. Родионов, А. М. Кашиников, ЖПХ, 38, 1063 (1965).
9. В. В. Рамм, Абсорбция, Госхимиздат, М., 1965; Тадеуш Хоблер, Массопередача и абсорбция, Изд. Химия, Л., 1964.
10. Р. В. Григорян, Канд. дисс. Ер НИИ химии, Ереван, 1968 г.
11. Р. В. Григорян, Г. О. Григорян, Арм. хим. ж., 21, 428 (1968).
12. Л. Н. Колтунова, Л. С. Позин, Е. П. Даровских, М. Э. Азров, Т. А. Быстрова, Теор. основы хим. технол., 5, 295 (1971).
13. В. С. Талачев, И. В. Чепура, В. П. Павлов, Теор. основы хим. технол., 6, 219 (1972).
14. Ю. И. Дытнерский, А. Г. Касаткин, Л. П. Холпанов, ЖПХ, 39, 92 (1966).
15. С. О. Налчаджян, Уч. зап. ЕГУ, № 2, 47 (1972).
16. Кашиников А. М., Исследование поверхности контакта фаз и массоотдача в жидкой фазе на барботажных тарелках, МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1965.