

## ЛИТЕРАТУРА

1. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
2. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. СО АН СССР, Новосибирск, Ин-т теплофизики, 1964.
3. Л е о н т ь е в А. И., М и р о н о в Б. П., Л у г о в с к о й П. П. Экспериментальное определение критического параметра вдува на пористой пластине. Инж.-физ. ж., 1966, т. 10, № 4.
4. Л у г о в с к о й П. П., М и р о н о в Б. П. Влияние продольного положительного градиента давления на критический параметр вдува. Инж.-физ. ж., 1967, т. 13, № 4.
5. М у г а л е в В. П. Экспериментальное исследование дозвукового турбулентного пограничного слоя на пластине со вдувом. Изв. вузов, Авиационная техника, 1959, № 3.
6. H a s k e r D. S. Interferometric investigation of the stability of a turbulent boundary layer with Mass addition. An ASME publication. Paper Number 58-A-249.
7. W i l l s I. A. B. The correction of hot-wire readings for proximity to a solid boundary. J. Fluid Mech., 1962, vol. 12, pt. 3.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОБМЕНА В СИСТЕМЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ И ЖИДКОСТИ

И. В. Белов, Е. В. Проколов

(Свердловск)

Экспериментально исследован процесс растворения системы пузырей  $\text{CO}_2$  в воде и в водных растворах декстрозы. Расчетом оценена площадь межфазной поверхности и определен коэффициент массоотдачи  $\beta$ .

Установлена связь величины  $\beta$  с диаметром пузыря, физическими свойствами жидкости и интенсивностью продувки жидкости потоком газа.

Предложено критериальное уравнение для расчета  $\beta$ .

Общепризнанной теории массообмена между системой газовых пузырей и жидкостью нет [1]. Даже для единичного пузыря в жидкости при числах Рейнольдса  $N_{\text{Re}} > 1$  известные теоретические модели массообмена, как показано в работе [2], не соответствуют экспериментальным данным. Например, для растворения  $\text{CO}_2$  из единичного пузыря в воде величина коэффициента массоотдачи  $\beta$  по уравнению В. Г. Левича [3, стр. 332] в 11-12 раз выше опытных значений, полученных в работах [2,4]. Поэтому закономерности массообмена и величина  $\beta$  определяются на опыте.

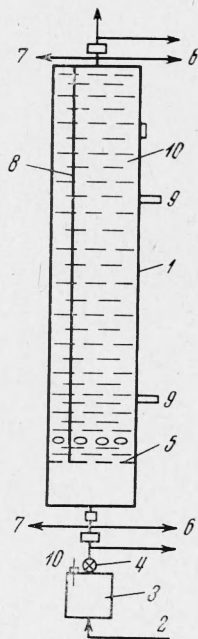
Обычно результаты экспериментальных исследований массообмена между системой пузырей и жидкостью даются в форме зависимости величины  $\beta F$  или ее аналогов от параметров процесса [5-7]. Такая форма представления экспериментальных данных не раскрывает механизма массообмена (связанного либо с ограничением межфазной поверхности  $F$ , либо с характеристикой переноса вещества  $\beta$ ), исключает оценку влияния режимных параметров массообмена на его интенсивность и затрудняет использование опытных данных при анализе массообмена в иных условиях.

Ниже при расчете межфазной поверхности  $F$  использованы закономерности движения и формоизменения единичных пузырей, описанные авторами в работе [8].

1). Опыты проводились в прозрачной колонне 1 высотой 2 м, поперечным сечением  $S = 0.2 \times 0.2$  м.

Схема установки представлена на фиг. 1, где 1 — экспериментальная колонна, 2 линия от баллона, 3 — промежуточная емкость, 4 — регулировочный вентиль, 5 — решетка, 6 — диафрагмовый реометр, 7 — манометр, 8 — перегородка, 9 — штуцер, 10 — термометр.

Углекислый газ чистотой 99.8% из баллона 2 через промежуточную емкость 3с регулировочным вентилем 4 подавался в камеру под медную решетку 5 с 16 отверстия-



Фиг. 1

ми диаметром  $d = 0.15 \cdot 10^{-2}$  м (живое сечение — 0.07%). Высота  $H$  наполнения колонны жидкостью изменялась от 0.7 до 2.0 м, а объем  $V^0$  жидкости в колонне — от 0.028 до 0.080 м<sup>3</sup>. Пусть удельный расход газа  $\theta = Q_1 / V^0$  ( $0.30-1.60$ )  $\cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сек; здесь  $Q_1$  — объемный расход газа на входе в колонну.

		$\rho \cdot 10^{-3}$	$\nu \cdot 10^4$	$D \cdot 10^8$	$\varphi_{10132.5}^0$	$\sigma \cdot 10^3$
Вода	1	0.998	0.009	1.9	3.50	72.75
Водные	2	1.095	0.015	1.37	2.92	73.01
растворы	3	1.150	0.035	1.07	2.45	74.89
декстрозы	4	1.175	0.054	0.94	2.18	75.51

В опытах использовалась дистиллированная вода (1) и водные растворы декстрозы различной плотности (строки 2, 3, 4 таблицы). Плотность растворов  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) измерялась денсиметрами с ценой деления 1 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент кинематической вязкости жидкостей  $\nu$  (м<sup>2</sup>/сек) определялся на вискозиметре ВПЖ-1 с диаметром капилляра 0.86 мм. Коэффициенты диффузии  $CO_2$  в воде и в водных растворах декстрозы  $D$  (м<sup>2</sup>/сек) и константы растворимости  $\varphi_0$  (кмоль/мм) для соответствующих значений плотности растворов  $\rho$  принимались по данным работы [2]. Коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma$  (н/м) принят по данным [9, стр. 1010]. Для водных растворов декстрозы величина  $\sigma$  оценена через величину парахора [10]. Все характеристики жидкости определены при температуре проведения опытов 20° С.

Основное сопротивление растворению  $CO_2$  в воде и в водных растворах декстрозы сосредоточено в жидкой фазе [2,4], и коэффициент массоотдачи  $\beta$  определяется уравнением

$$\langle \beta \rangle = \frac{q}{\langle F \rangle (C_0 - \langle C \rangle)} \quad (1.1)$$

Здесь  $q$  — скорость массопереноса, кмоль/сек;  $F$  — площадь межфазной поверхности, м<sup>2</sup>;  $C_0$  — концентрация газа в жидкости, равновесная концентрации в объеме газовой фазы, кмоль/м<sup>3</sup>;  $\langle C \rangle$  — средняя за время массообмена концентрация газа в жидкости, кмоль/м<sup>3</sup>.

Реакция  $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$  протекает очень медленно (константа скорости 0.025 л/моль сек при 25° С [11]) и оказывает пренебрежимо малое влияние на скорость растворения.

При установившемся режиме скорость массообмена определяется как разность молярных расходов газа на входе ( $Q_{1,0}C_1$ ) и выходе ( $Q_{2,0}C_2$ ) системы, приведенных к температуре 293° К и давлению 101.325 кн/м<sup>2</sup>

$$q = Q_{1,0}C_1 - Q_{2,0}C_2 \quad (1.2)$$

Здесь  $Q$  — объемный расход газа,  $C$  — молярная концентрация  $CO_2$  в газе.

В опытах исходный газ на входе в колонну считался сухим, а выходящий из колонны — полностью насыщенным парами воды. Расходы газа на входе в колонну  $Q_1$  и на выходе из нее  $Q_2$  измерялись диафрагмовыми реометрами 6 с точностью 2.5%, а давление газа перед диафрагмами — жидкостными манометрами 7.

Для труднорастворимых газов разность  $C_0 - \langle C \rangle$  определяется преимущественно величиной  $C_0$  и поэтому в уравнении (1.1) величину  $\langle C \rangle$  с достаточной точностью можно определить как среднеарифметическую значений концентраций  $CO_2$  в жидкости до опыта  $C'$  и после опыта  $C''$

$$\langle C \rangle = 0.5 (C' + C'') \quad (1.3)$$

Величины  $C'$  и  $C''$  определялись как средние по данным щелочного титрования двух проб жидкости, отобранных в 100 мл пикнометры с разных уровней колонны через штуцера 9. Относительная погрешность анализа составляла 6%.

Растворимость  $CO_2$  в воде и в водных растворах декстрозы достаточно хорошо [2,4] подчиняется закону Генри

$$C_0 = \varphi_0 \langle p \rangle \quad (1.4)$$

где  $\varphi_0$  — постоянная Генри, кмоль/мм;  $\langle p \rangle$  — среднее по высоте жидкости парциальное давление  $CO_2$  в пузырьках, н/м<sup>2</sup>.

Для системы равномерно распределенных в жидкости больших пузырей

$$\langle p \rangle = y (p + 0.5 H g \rho) \quad (1.5)$$

Здесь  $y$  — мольная доля  $CO_2$  в газовой фазе,  $p$  — абсолютное давление над жидкостью,  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение силы тяжести.

Контроль в опытах величин  $q$  и  $\langle C \rangle$  позволяет определить величину  $\langle \beta F \rangle$ . Для определения  $\langle \beta \rangle$  величина межфазной поверхности  $\langle F \rangle$  оценивается расчетом.

В общем случае суммарная поверхность пузырей

$$\langle F \rangle = N \int_0^H P(h) F(h) dh \quad (1.6)$$

Здесь  $N$  — число одновременно находящихся в жидкости пузырей,  $F(h)$  — площадь поверхности единичного пузыря на высоте  $h$ ,  $P(h)$  — дифференциальная функция распределения пузырей по высоте.

Практически скорость всплывания пузыря  $u \approx \text{const}^1$  и поэтому

$$P(h) = \frac{1}{H}, \quad \langle F \rangle = \frac{N}{H} \int_0^H F(h) dh \quad (1.7)$$

Выраженная через объем  $V$ , поверхность пузыря, рассматриваемого как сплюснутый сфероид

$$F(h) = \varphi V^{2/3}(h), \quad \varphi = 3.42 \frac{(m^2 + 1)^{1/2}}{m^{1/3}}, \quad m = \frac{a}{b} \quad (1.8)$$

Здесь  $a$  — фронтальный диаметр пузыря,  $b$  — высота пузыря. Параметр  $m$  является функцией начальной деформации пузыря  $m^*$  и времени от начала всплывания (сек) [8]. Так для воды

$$m = m^* - 0.08\tau \quad (\tau < 7.5 \text{ сек}) \quad (1.9)$$

Для растворов декстрозы численный коэффициент при  $\tau$  в этой зависимости оценивался расчетом и лежал в пределах 0.12–0.43.

При  $\tau < 15 \text{ сек}$  изменение  $\varphi$  в пределах  $H$  не превышает 12% и в формуле (1.8) можно принять среднеарифметическое  $\langle \varphi \rangle$  из значений  $\varphi$  в начале и в конце движения пузыря. Текущий объем пузыря

$$V(h) = V^* (1 - Kh) \frac{B}{B - h}, \quad B = H + \frac{p}{\rho g} \quad (1.10)$$

Здесь  $V^*$  — отрывной объем пузыря;  $K$  — коэффициент, учитывающий уменьшение массы пузыря за время всплывания.

Значение  $K$  подсчитывалось по количеству абсорбированного в опыте газа

$$K = \frac{1}{H} \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \frac{B - H}{B} \right) \quad (1.11)$$

Подстановка в уравнение (1.7) уравнений (1.8) и (1.10) дает

$$\langle F \rangle = \frac{N}{H} \langle \varphi \rangle V^{*2/3} B^{2/3} \int_0^H \left( \frac{1 - Kh}{B - h} \right)^{2/3} dh \quad (1.12)$$

Интеграл в уравнении (1.12) вычислялся численно. Величины  $N$  и  $V^*$  связаны очевидным соотношением

$$N = \frac{Q_1 T}{V^*} \quad (1.13)$$

где  $T$  — время всплывания пузыря на высоту  $H$ .

Число одновременно находящихся в колонне пузырей подсчитывалось по фотографиям ее продольного сечения, выделенного вдоль одного ряда отверстий тонкой непрозрачной перегородкой 7 (фиг. 1).

При всех расходах газа не наблюдалось сколь-нибудь заметных перемещений пузырей в поперечном сечении колонны или их циркуляции в ее объеме.

При небольших расходах газа (для объемного газосодержания)

$$\psi = \frac{Q_1}{\langle u \rangle S} \leq 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

<sup>1</sup> По данным [8] при всплывании пузыря  $d = 0.65 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  на высоту 2 м диаметр его увеличивается до  $0.78 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , а скорость всплывания уменьшается от 23.1 до 22.7 м/сек.

действительное количество пузырей близко совпадает с расчетным, если отрывной объем пузыря в уравнении (1.13) определяется из условия равновесия подъемных сил и сил поверхностного натяжения

$$V^* = \frac{\pi d_0 \sigma}{g(\rho - \rho')} \quad (1.14)$$

где  $\rho'$  — плотность газа.

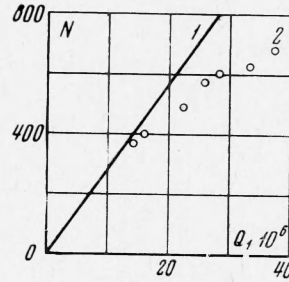
С увеличением расхода газа ( $\psi = 1.7 \cdot 10^{-3} - 7.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) отклонение между расчетным (кривая 1) и действительным числом пузырей (точки 2) возрастает (фиг. 2).

Это обусловлено, по-видимому, изменением отрывного объема пузырей при повышенных расходах газа [12] и их слиянием в объеме жидкости, заметном на фотографиях по резко выраженной несоизмеримости объемов пузырей в одном и том же сечении колонны.

Поэтому расчет  $\langle \bar{F} \rangle$  производился по условному отрывному объему пузыря  $V_*$ , вычисленного из уравнения (1.13) при найденных в опыте значениях  $N$ . Тем самым очень сложная действительная картина движения системы пузырей сводится к приближенной модели, в которой отсутствует слияние отдельных пузырей, а их скорость всплывания, форма и поверхность могут быть рассчитаны по формулам для единичного пузыря. Применение такой модели оправдывается очень слабой зависимостью скорости всплывания пузыря от его диаметра. Абсолютные значения такого расчетного «отрывного» диаметра пузыря  $d_*$  лежали в пределах  $(0.5 - 1.0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Текущая скорость всплывания пузыря [8]

$$u = 121.50v^{0.37} \frac{m^{0.03}}{d^{0.06}} \quad (1.15)$$



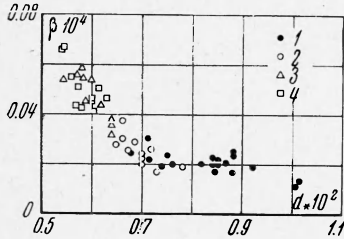
Фиг. 2

Подставим  $u = dh/d\tau$  в уравнение (1.15), а  $m$  и  $d$  из соотношений (1.9) и (1.10). После интегрирования в результате получим уравнение для вычисления времени всплывания  $T$  пузыря в воде

$$\int_0^H \left( \frac{1-Kh}{B-h} \right)^{0.02} dh = \frac{121.50v^{0.37}}{d_*^{0.06} B^{0.02}} \int_0^T (m_* - 0.08\tau)^{0.03} d\tau \quad (1.16)$$

Для условий опытов с точностью 2%

$$\int_0^T (m_* - 0.08\tau)^{0.03} d\tau = T, \quad \int_0^H \left( \frac{1-Kh}{B-h} \right)^{0.02} dh = H$$



Фиг. 3

Поэтому

$$T = \frac{H d_*^{0.06} B^{0.02}}{121.50v^{0.37}} \quad (1.17)$$

Объединение уравнений (1.17) и (1.13) дает приближенное выражение

$$V_* = \frac{1.013HB^{0.02} Q_1}{121.50v^{0.37} N} \quad (1.18)$$

По найденному значению  $d_*$  определяется  $m_*$ , затем  $\langle \varphi \rangle$ . Метод расчета  $m_*$  рассмотрен в работе [8]. Для растворов декстрозы величины  $T$  и  $V_*$  рассчитывались аналогичным способом.

Предельная относительная ошибка определения величины  $\beta$  составляет 15%.

2. Исследование динамики растворения  $\text{CO}_2$  в воде при постоянном расходе газа  $Q_1$  показало, что величина  $\beta \bar{F}$  в широких пределах изменения продолжительности опыта (45—300 сек) остается постоянной<sup>1</sup>.

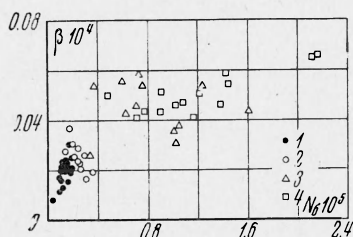
В опытах обнаружено, что при  $d_* < 0.7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  величина  $\beta$  резко убывает с ростом  $d_*$ , а при  $d_* > 0.7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  остается практически постоянной (фиг. 3). Здесь

<sup>1</sup> Это подтверждает допустимость определения величины  $\beta \bar{F}$  по средней за время опыта концентрации  $\text{CO}_2$  в жидкости (уравнение (1.3)).

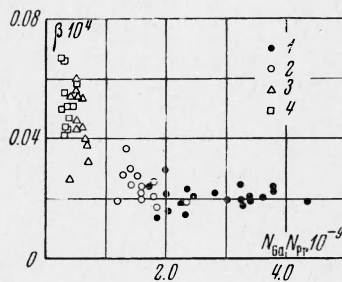
и дальше номера точек на фигурах соответствуют строчкам табл. 1. Установленный характер зависимости  $\beta$  от  $d_*$  связан, по-видимому, с режимом движения жидкости в окрестности пузыря: так, по Бэрду [4] уменьшение и постепенная стабилизация  $\beta$  с ростом  $d$  объясняется развитием и стабилизацией турбулентного следа за пузырем; в турбулентном следе происходит выравнивание концентраций и поверхность пузыря в этой области исключается из массообмена.

Как для воды, так и для водных растворов декстрозы изменение экспериментальной величины  $\langle \beta F \rangle$  практически прямо пропорционально изменению расхода газа  $Q_1$ . Это объясняется тем, что скорость увеличения  $\langle F \rangle$  значительно превышает скорость уменьшения  $\beta$  при увеличении среднего диаметра пузыря.

При растворении  $\text{CO}_2$  в воде численные значения  $\beta$  (0.010—0.030 см/сек) хорошо соответствуют сводке экспериментальных данных для единичных пузырей [13]. Значения  $\beta$  для растворов декстрозы (0.020—0.065 см/сек) близки к данным [2].



Фиг. 4



Фиг. 5

Для рассматриваемого процесса анализом размерностей получена следующая система определяющих критериев:

$$N_{\delta} = \frac{\nu Q_1}{g d_*^2 S}, \quad N_{Ga} N_{Pr} = \frac{g d_*^3}{\nu D}, \quad N_{We} = \frac{\sigma}{g d_*^2 (\rho - \rho')}, \quad N_{\Gamma} = \frac{H}{d_*}$$

Здесь  $N_{\delta}$  — критерий барботирования,  $N_{Ga}$  — критерий Галлилея,  $N_{Pr}$  — диффузионный критерий Прандтля;  $N_{We}$  — критерий Вебера,  $N_{\Gamma}$  — критерий геометрического подобия.

Обнаружено (фиг. 4, 5), что, начиная с  $N_{\delta} = (0.4-0.6) \cdot 10^{-5}$  и  $N_{Ga} N_{Pr} = 2.0 \times 10^9$ , практически наступает стабилизация значений  $\beta$ . Независимость  $\beta$  от  $N_{\delta}$  и  $N_{Ga} N_{Pr}$  в рассматриваемой области может быть объяснена следующим: с увеличением интенсивности барботирования объем части пузырей вследствие их слияния увеличивается, а  $\beta$  (в соответствии с фиг. 3) уменьшается; это компенсирует увеличение  $\beta$  за счет турбулизации жидкости.

Результаты опытов хорошо описываются критериальным уравнением

$$\frac{\beta d_*}{D} = 2.0256 \cdot 10^{10} N_{\delta}^{0.10} N_{\Gamma}^{0.16} (N_{Ga} N_{Pr})^{-0.88} N_{We}^{-1.16} \quad (2.1)$$

справедливым в области значений  $N_{\delta} = (0.03-2.10) \cdot 10^{-5}$ ,  $N_{Ga} N_{Pr} = (0.27-4.30) \cdot 10^9$ ,  $N_{\Gamma} = 96-260$ ,  $N_{We} = 0.065-0.226$ .

Анализ уравнения (2.1) показывает, что при увеличении расхода газа  $Q_1$  (но сохранении постоянным диаметра пузырей) скорость массообмена  $q$  определяется преимущественно развитием межфазной поверхности (увеличение числа пузырей в системе) и лишь в небольшой степени интенсифицируется за счет турбулизации жидкости. Так, при увеличении расхода газа в шесть раз (увеличение межфазной поверхности  $\langle F \rangle$  в 3.3 раза) величина  $\langle \beta \rangle$  увеличивается лишь в 1.18 раза, а  $\langle \beta F \rangle$  — в 3.8 раза. Это говорит о том, что перенос вещества определяется главным образом режимом течения жидкости в окрестности пузыря и слабо зависит от степени турбулизации жидкости в объеме.

Наиболее сильное влияние на величину  $\beta$  оказывает изменение диаметра пузыря  $d_*$ . Например, при постоянном расходе газа  $Q_1$  при уменьшении  $d_*$  в 1.42 раза (увеличение поверхности в том же отношении)  $\beta$  увеличивается в 1.78 раза, а  $\beta F$  — 2.53 раза. Следовательно, увеличение дисперсности фаз ускоряет процессы массообмена за счет увеличения межфазной поверхности и коэффициента массоотдачи  $\beta$ . Роль последнего фактора для таких систем ранее не учитывалась.

