

И. А. ГИЛЬДЕНБЛАТ, А. И. РОДИОНОВ, Б. И. ДЕМЧЕНКО

**О ВЛИЯНИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ  
МАССООБМЕНА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ГАЗАМИ  
ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ  
НАТЯЖЕНИЯМИ И ВЯЗКОСТЯМИ**

(Представлено академиком Н. М. Жаворонковым 18 XII 1970)

Недостаточная разработанность теории турбулентности не позволяет теоретически получить закон затухания турбулентных пульсаций вблизи подвижной границы жидкость — газ (пар, жидкость). Это затрудняет развитие теории массопередачи для таких систем и расчет массообменной аппаратуры, работающей в интенсивных режимах. Однако об этом законе можно судить (<sup>1, 2</sup>) косвенно — по характеру зависимости коэффициента массоотдачи в жидкой фазе  $\beta_{ж}$  от коэффициента молекулярной диффузии  $D$ . Различия предсказаний в этом отношении, основанных на использовании разных моделей массопередачи, известны и неоднократно обсуждались в литературе (<sup>3-5</sup>). Отсюда важность экспериментального выявления влияния  $D$  на  $\beta_{ж}$  в турбулентных потоках.

Как показано ранее (<sup>5</sup>), наиболее надежные результаты экспериментальных работ свидетельствуют о том, что величина показателя степени  $n$  при принятии степенного характера влияния  $D$  на  $\beta_{ж}$  составляет при любых гидродинамических режимах не ниже  $n = 0,5$  — значение, предсказываемое моделями пограничного диффузионного слоя (<sup>1</sup>) и пропитания и обновления поверхности (<sup>6, 7</sup>). Однако все эти работы проведены с водой или водными растворами, со сходным с нею поверхностным натяжением  $\sigma$ . В то же время возможны предположения (<sup>1</sup>) о снижении влияния  $D$  на  $\beta_{ж}$  в жидкостях с достаточно малым  $\sigma$ . Заслуживают внимания и соображения (<sup>8</sup>) о возможной зависимости значения  $n$  от диффузионного числа Праудля  $Pr'$ , а значит и от вязкости жидкости  $\mu$ .

В настоящей работе изучено влияние физических свойств жидкостей на характер зависимости  $\beta_{ж}$  от  $D$  применительно к условиям свободной поверхности раздела с газом турбулентного потока жидкости в сосуде с механическим перемешиванием и пленочного течения в колонне с орошаемой стенкой. Влияние  $D$  на  $\beta_{ж}$  изучалось при десорбции из различных жидкостей в воздух газов с низкой растворимостью: He, CO<sub>2</sub> и Xe. Их коэффициенты диффузии в воде, определенные экспериментально (<sup>9, 10</sup>), составляют  $D_{He} = 6,8$ ;  $D_{CO_2} = 1,75$ ;  $D_{Xe} = 0,6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/сек, т. е. различаются более чем в 11 раз. Остальные свойства жидкой и газовой фаз, а значит и гидродинамические условия, при десорбции различных газов из одного и того же растворителя оставались неизменными.

Растворителями служили дистиллированная вода, изопропиловый и изобутиловый спирты, гликоль и гептан. При средней температуре в опытах 20° С они обладают следующими свойствами (соответственно):  $\sigma = 72,8$ ; 23,8; 22,5; 46,1 и 20,8 дин/см;  $\mu = 1,0$ ; 2,39; 3,91; 19,9 и 0,43 спз; относительные плотности — 1,0; 0,785; 0,80; 1,1 и 0,685. Диапазон изменения  $Pr'$  при этом составлял  $0,3 \cdot 10^2$  —  $1 \cdot 10^3$ .

Контактная модель при изучении массообмена в потоке со свободной поверхностью представляла собой цилиндрический вертикальный прозрач-

ный сосуд диаметром 0,15 м с четырехлопастной мешалкой для жидкости (ее диаметр  $d = 0,055$  м) и четырьмя отбойными перегородками шириной по 0,015 м. Рабочая жидкость (0,44 л/мин) с растворенным в ней газом и воздух (15 л/мин), насыщенный ее парами, поступали в сосуд непрерывно. Вывод жидкости (ее объем в сосуде 2,8 л) осуществлялся через

верхний штуцер-переток непосредственно со свободной поверхности, над которой продувался десорбирующий воздух.

Изучение массообмена при пленочном течении проводилось в трубке с орошаемой стенкой<sup>(11)</sup> высотой 1,04 и диаметром 0,02 м.

Определение  $\text{CO}_2$  в воде и гликоле производили химически<sup>(5, 11)</sup>. Не во всех растворителях и Хе в воде — на хроматографе ХЛ-4<sup>(12)</sup>, а  $\text{CO}_2$  и Хе в спиртах и в гептане — на хроматографе ЛХМ-7А (насадка — уголь СКТ, газ-носитель Не), в испаритель которого впрыскивались пробы объемом 0,01 или 0,02 мл. Коэффициенты массоотдачи вычисляли, используя методику<sup>(12)</sup>.

Из-за отсутствия экспериментальных данных о  $D_{\text{He}}$  и  $D_{\text{Xe}}$  в органических растворителях принималось, что для каждого из них соотношение между коэффициентами диффузии всех газов остается тем же, что и для воды, т. е.  $D_{\text{He}} : D_{\text{CO}_2} : D_{\text{Xe}} = 6,8 : 1,75 : 0,6 = 3,9 : 1 : 0,34$  ( $D_{\text{CO}_2}$  принят за единицу).

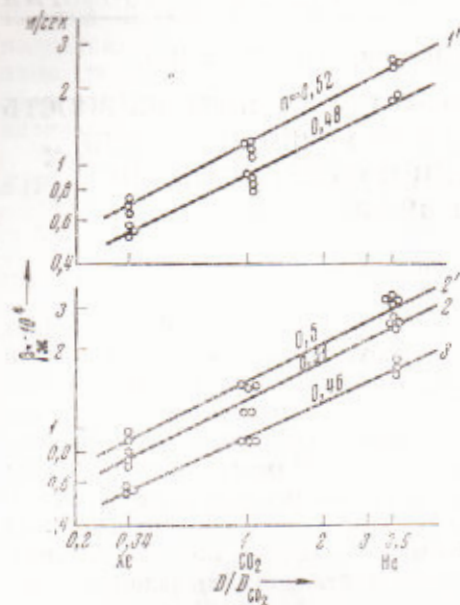


Рис. 1. Близкие  $D$  на  $\beta_w$  в сосуде с мешалкой: 1, 1' — с водой, 2, 2' — с изопропиловым спиртом, 3 — с изобутиловым спиртом. 1, 2, 3 —  $N = 500$  об/мин; 1', 2' —  $N = 750$  об/мин

Число оборотов в сосуде с мешалкой составляло  $N = 250; 500; 750$  и  $1000$  об/мин, что соответствовало турбулентному характеру течения<sup>(13)</sup>; изменение центробежного числа Рейнольдса  $Re_n = Nd^2/60\nu = 0,7 \cdot 10^3 - 0,5 \cdot 10^3$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость ( $\text{м}^2/\text{сек}$ ). Отборы проб в разных точках показали наличие практически полного перемешивания жидкости.

На рис. 1 представлены зависимости  $\beta_w$  от  $D$  для воды и двух спиртов при  $N = 500$  и  $750$  об/мин. Вместе с экспериментальными результатами, полученными при других  $N$ , эти данные свидетельствуют о том, что значения показателя степени  $n$  при  $D$  для всех трех растворителей, более чем втрое различающихся поверхностным натяжением, практически одинаковы и близки к 0,5. Аналогичный результат был получен в сосуде с мешалкой и при десорбции  $\text{CO}_2$  и Не из гликоля, имеющего в 20 раз большую вязкость, чем вода.

Результаты исследования массообмена при пленочном течении изопропилового спирта и гептана в колонне с орошаемой стенкой представлены на рис. 2 в виде зависимости  $\beta_w$  от  $Re = 4L/\nu$  ( $L$  — расход жидкости на единицу смоченного периметра ( $\text{м}^2/\text{м}\cdot\text{сек}$ )). Полученные данные соответствуют<sup>(3)</sup> ламинарно-волновой (для спирта и частично для гептана) и турбулентной (для гептана) областям течения. Вместе с данными<sup>(11)</sup> для десорбции Не и  $\text{CO}_2$  из воды, они демонстрируют на рис. 3 практическую неизменность значения показателя  $n$  при  $D$  и близость его к  $n = 0,5$ , вне зависимости от режима течения ( $Re = 120 - 4000$ ) и от величины  $\sigma$ , меняющейся в 3,5 раза.

Таким образом, при взаимодействии газов с турбулентными потоками жидкости, имеющими свободную поверхность и перемешиваемыми меха-



нически ( $Re_{cr} = 0,7 \cdot 10^3 - 0,5 \cdot 10^5$ ), а также движущимися в виде пленки ( $Re = 120 - 4000$ ), в исследованных пределах изменения  $\sigma = 20,8 - 72,8$  дин/см и  $\mu = 0,43 - 19,9$  спз ( $Pr' = 0,3 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$ ) характер зависимости  $\beta_{ж}$  от  $D$  остается практически неизменным. Значения показателя

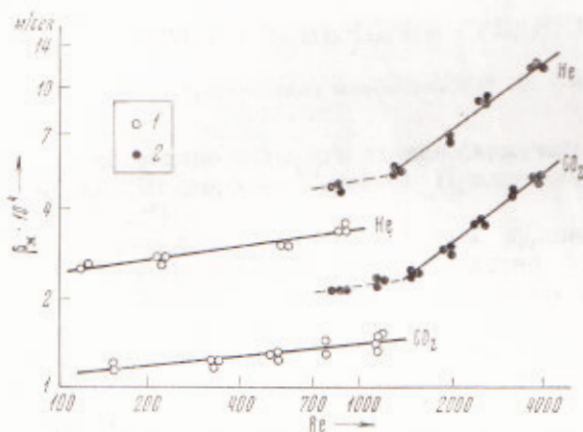


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости  $\beta_{ж}$  от  $Re$  при пленочном течении изопропилового спирта (1) и гептана (2)

Рис. 3. Влияние  $D$  на  $\beta_{ж}$  при пленочном течении: 1 — изопропиловый спирт,  $Re = 500$ ; 2 — гептан,  $Re = 850$  (а) и  $Re = 3840$  (б); 3 — вода,  $Re = 500$

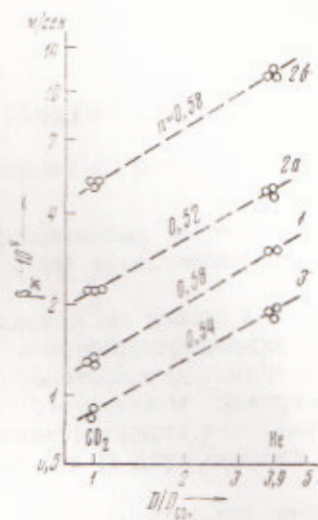


Рис. 3

степени при  $D$  во всех случаях близки к  $n = 0,5$ , что соответствует величине показателя степени в законе затухания турбулентных пульсаций с приближением к границе жидкость — газ, равной 2<sup>(1)</sup>.

Московский химико-технологический институт  
им. Д. И. Менделеева

Поступило  
18 XII 1970

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, М., 1959. <sup>2</sup> Д. А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, М., 1967. <sup>3</sup> В. М. Рамм, Абсорбция газов, М., 1966. <sup>4</sup> А. М. Розен, В. С. Крылов, Хим. пром., № 1, 51 (1966). <sup>5</sup> И. А. Гильденблат, А. И. Родионов, А. Л. Лашаков, Теоретич. основы хим. технол., 3, № 3, 344 (1969). <sup>6</sup> R. Higbie, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 31, № 2, 365 (1935). <sup>7</sup> P. V. Danckwerts, Ind. and Eng. Chem., 43, № 6, 1460 (1951). <sup>8</sup> В. В. Дильман, Теоретич. основы хим. технол., 1, № 4, 438 (1967). <sup>9</sup> D. L. Wise, G. Houghton, Chem. Eng. Sci., 21, № 11, 999 (1966); 23, № 10, 1211 (1968). <sup>10</sup> W. J. Thomas, M. J. Adams, Trans. Farad. Soc., 61, 668 (1965). <sup>11</sup> И. А. Гильденблат, А. Л. Лашаков и др., Теоретич. основы хим. технол., 3, № 2, 305 (1969). <sup>12</sup> И. А. Гильденблат, А. Л. Лашаков, А. И. Родионов, Тр. Московск. хим. технол. инст. им. Д. И. Менделеева, 56, 58 (1967). <sup>13</sup> З. Штербачек, П. Таусек, Перемешивание в химической промышленности, Л., 1963.