

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

**О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ МАССООТДАЧИ В ТУРБУЛЕНТНЫХ
ПОТОКАХ ЖИДКОСТЕЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ГАЗАМИ
НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

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

В практических рекомендациях по расчету абсорбционных и реактификационных аппаратов при оценке интенсивности массоотдачи в жидкой фазе, мерой которой является коэффициент массоотдачи $\beta_{ж}$, обычно (^{1, 2}) не включает поверхностное натяжение σ в список факторов, влияющих на $\beta_{ж}$, считая (¹), что от σ может зависеть лишь поверхность контакта фаз. Однако рекомендуемые расчетные зависимости чаще всего получены обобщением экспериментальных данных для водных систем без существенного изменения σ . Все немногочисленные работы, результаты которых, основанные на использовании не только водных, но и органических растворителей, говорят о несущественности влияния σ на $\beta_{ж}$, проведены (³⁻⁷) в условиях ламинарного течения пленки жидкости в лабораторных моделях насадочных колонн. Между тем для турбулентных потоков жидкости, характерных для интенсивных режимов работы современных массообменных аппаратов, теоретически можно ожидать влияния σ на $\beta_{ж}$. Так, описание механизма переноса массы в жидкости, взаимодействующей с газом (паром, другой жидкостью), на основе теории пограничного диффузионного слоя, полагающее действие сил поверхностного натяжения причиной гашения турбулентных пульсаций у свободной поверхности, привело (⁸) к предсказанию зависимости $\beta_{ж} \sim \sigma^{-0.5}$.

В настоящей работе подвергнуто экспериментальной проверке наличие влияния σ на $\beta_{ж}$ при турбулентном движении жидкостей. В таком исследовании нельзя идти по пути изменения σ с помощью поверхностноактивных веществ (п.а.в.), так как последние весьма сложно влияют (^{9, 10}) на массообмен (гидродинамический, барьерный и другие механизмы). Поэтому массоотдача в жидкой фазе изучалась при десорбции в воздух газа с низкой растворимостью — CO_2 из дистиллированной воды и ряда чистых органических жидкостей, что позволило иметь диапазон изменения $\sigma = 20,8 \div 72,8$ дин/см.

Контактной моделью служил сосуд с механическим перемешиванием жидкости, взаимодействующей с газом на свободной горизонтальной поверхности. Конструкция и размеры модели, условия в опытах и методики анализов и вычисления $\beta_{ж}$ описаны ранее (¹¹). При рабочих числах оборотов мешалки ($N = 250 \div 1000$ об/мин) жидкости двигались турбулентно ($Re_{ш} = 0,7 \cdot 10^3 - 0,5 \cdot 10^4$), а поверхность раздела жидкость — газ, не очень сильно отличаясь от горизонтальной, согласно визуальным наблюдениям заметно не различалась при каждом определенном N для всех использованных жидкостей. Наблюдения за тальком, помещавшимся на эту поверхность, показали отсутствие ее вращения. В то же время она была «живой» (¹²), без застоев, которые свидетельствовали бы о присутствии заметных количеств п.а.в.

При использовании сосудов с мешалками в качестве лабораторных моделей для изучения массообмена обычно считают (¹) равноценным проведение работы в динамических (т. е. с непрерывным потоком жидкости) или в статических (без протока) условиях. Настоящая работа подвергает это положение сомнению в определенном отношении. Что касается органических жидкостей, то в опытах с *n*-гептаном, гликолем, изопропиловым и изобутиловым спиртами, проведенных без протока жидкости и с непрерывным ее потоком и стоком непосредственно с поверхности раздела фаз, были получены практически идентичные значения $\beta_{ж}$ (см. рис. 1). Однако



Рис. 1. Зависимости коэффициента массоотдачи от интенсивности перемешивания: 1 и 1а — вода (дистиллированная), 2 — *n*-гептан, 3 — четыреххлористый углерод, 4 — этанол (абсолютированный), 5 — изопропанол, 6 — пропиленкарбонат, 7 — гликоль. Кругики соответствуют опытам со стоком жидкости с поверхности контакта, а квадраты — опытам без протока жидкости

по-видимому, именно несоблюдением этого условия, а также неучетом влияния вязкости на $\beta_{ж}$, объясняется получение сомнительного соотношения $\beta_{ж} \sim \sigma^{-1,3}$ в единственной работе (¹⁴), по экспериментальным данным которой можно было оценить влияние σ на $\beta_{ж}$ в перемешиваемых жидкостях до настоящего времени.

На рис. 1 представлены зависимости $\beta_{ж}$ от числа оборотов мешалки *N* для части изученных нами растворов. Во всех случаях значения показателя степени в зависимости $\beta_{ж} \sim N^q$ оказались равными $q = 0,7-0,85$. Это удовлетворительно согласуется с предсказаниями (^{15, 16}), основанными на теории локальной изотропной турбулентности Колмогорова, и с многочисленными экспериментальными данными (¹⁶) для водных систем. Если считать поверхность контакта практически одинаковой для всех изученных

при работе с водой в статических условиях (а также в динамических условиях, но с выводом воды через штуцер, расположенный вблизи дна сосуда), как видно из рис. 1, получены значительно более низкие значения $\beta_{ж}$, чем в динамических условиях с перетоком воды через штуцер, расположенный непосредственно у свободной поверхности. Хотя такой результат был получен даже при использовании водного бидистиллята, отсутствие подобного эффекта для названных органических жидкостей с различными физическими свойствами свидетельствует о том, что его причиной, по-видимому, является не различие гидродинамических условий при протоке и без него, а воздействие на массообмен в воде неконтролируемых загрязнений, обладающих поверхностноактивными свойствами и быстро накапливающихся (¹³) у поверхности воды в условиях отсутствия ее непрерывного обновления. Изменение расхода воды от 0,15 до 1 л/мин в опытах с потоком не меняло величины $\beta_{ж}$, так что гидродинамическая обстановка в сосуде в этих условиях практически полностью определялась действием мешалки, а влияние накопления загрязнений на $\beta_{ж}$ при расходе воды в большинстве опытов 0,44 л/мин не наблюдалось. Таким образом, специфика работы с водными системами требует обязательного проведения опытов для них в условиях постоянного удаления жидкости со свободной поверхности. В частности,

жидкостей, то различия значений $\beta_{ж}$ при десорбции CO_2 из разных растворителей при любом N , очевидные из рис. 1, могут быть следствием неодинаковости коэффициентов диффузии D в жидкостях, их вязкости μ , плотности ρ и поверхностного натяжения σ .

Ранее было экспериментально показано⁽¹¹⁾, что в широком диапазоне изменения σ и μ $\beta_{ж} \sim D^{0.5}$, что и принято здесь для дальнейшей обработки. При этом в основную обработку включены результаты опытов главным образом для тех жидкостей, для которых значения D определены экспериментально^(2, 5-7, 17, 18).

Оценка влияния μ и ρ на интенсивность массоотдачи в перемешиваемой жидкой фазе приведена на рис. 2, где в логарифмических координатах даны зависимости $\beta_{ж}/D^{0.5}$ от кинематической вязкости $\nu = \mu/\rho$ для жидкостей с практически одинаковым $\sigma = 20,8-24$ дин/см. Обработка результатов опытов методом наименьших квадратов дала значения показателя степени в зависимости $\beta_{ж} \sim$

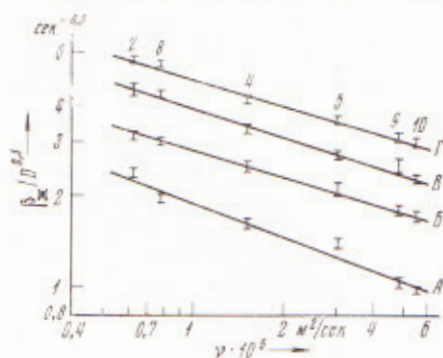


Рис. 2

Рис. 2. Влияние кинематической вязкости на интенсивность массоотдачи для жидкостей с $\sigma = 20,8-24$ дин/см при скоростях мешалки $N = 250$ (А), 500 (Б), 750 (В) и 1000 об/мин (Г). 8 — *n*-октанол, 9 — изобутанол, 10 — изопентанол. Обозначения те же, что и на рис. 1

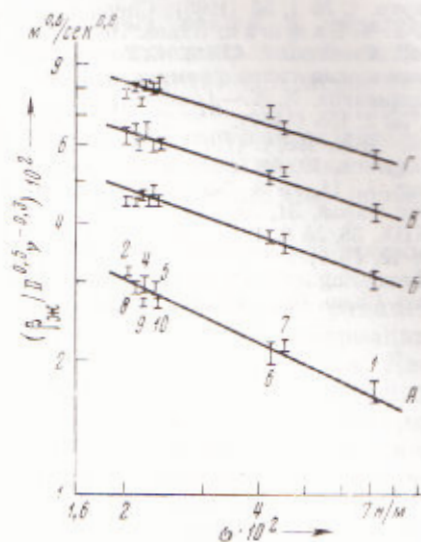


Рис. 3

Рис. 3. Влияние поверхностного натяжения на интенсивность массоотдачи. Обозначения те же, что и на рис. 1 и 2

$\sim \nu^m$ для $N = 250, 500, 750$ и 1000 об/мин — соответственно $m = -0,36 \pm 0,05; -0,28 \pm 0,04; -0,31 \pm 0,04; -0,29 \pm 0,04$ (здесь и ниже доверительные интервалы вычислены с 90% вероятностью).

Учет полученных зависимостей $\beta_{ж}$ от D и ν (принято $m \approx -0,3$) позволяет оценить чистое влияние σ на $\beta_{ж}$, как это сделано на рис. 3. Значения показателя степени в зависимости $\beta_{ж} \sim \sigma^p$ для $N = 250, 500, 750$ и 1000 об/мин оказались равными $p = -0,48 \pm 0,06; -0,34 \pm 0,05; -0,32 \pm 0,04; -0,30 \pm 0,05$ соответственно, т. е. в большинстве случаев $p \approx -1/3$.

Использование результатов опытов с более широким, чем представленный на рис. 3, кругом жидкостей (диоксан, метаксидол, этилбензол, бензиловый спирт, диметилформамид, ацетон), для которых нет экспериментальных данных о величине D , с вычислением D по уравнению Арнольда⁽¹⁾ (которое согласно⁽¹⁷⁾ для систем CO_2 — органические растворители лучше согласуется с опытом, чем уравнение Уилки — Чанга) дало сходные значения $p = -0,44 \pm 0,15$ и $-0,37 \pm 0,12$ при $N = 500$ и 750 об/мин соответственно, однако со значительно большим разбросом.

Полученный результат, качественно согласующийся с теоретическими предсказаниями Левича⁽⁸⁾, свидетельствует о возможности заметного

влияния поверхностного натяжения на массоотдачу в турбулентных потоках жидкостей при интенсивных режимах работы массообменной аппаратуры.

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

Поступило
18 XII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. М. Рамм, Абсорбция газов, М., 1966. ² Дж. Перри, Справочник инженера химика, Л., 1969. ³ F. Yoshida, T. Koyanagi, Ind. and Eng. Chem., 50, № 3, 365 (1958). ⁴ H. Hikita, K. Nakanishi et al., Chem. Eng. Japan, 23, № 7, 459 (1959); № 12, 808 (1959). ⁵ K. Onda, H. Takeuchi et al., J. Chem. Eng. Japan, 1, № 1, 56 (1968); Chem. Eng. Japan, 24, № 12, 918 (1960). ⁶ W. S. Norman, F. Y. Y. Sammak, Trans. Inst. Chem. Eng., 41, № 3, 109, 117 (1963). ⁷ J. Vitovec, Coll. Czechoslov. Chem. Commun., 33, № 4, 1203 (1968). ⁸ В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, М., 1959. ⁹ J. T. Davies, E. K. Rideal, Interfacial Phenomena, N. Y.—London, 1963. ¹⁰ Д. Еленков, Теоретич. основы хим. технол., 1, № 2, 158 (1967). ¹¹ И. А. Гильдеблат, А. И. Родионов, Б. И. Демченко, ДАН, 198, 5 (1971). ¹² J. T. Davies, A. A. Kilner, G. A. Rateliff, Chem. Eng. Sci., 19, № 8, 583 (1964). ¹³ R. L. Merson, J. A. Quinn, Am. Inst. Chem. Eng. J., 11, № 3, 391 (1965). ¹⁴ K. Fujisawa, T. Hanzawa, H. Abe, Chem. Eng. Japan, 31, № 6, 590 (1967). ¹⁵ Л. Н. Брагинский, И. С. Павлушенко, ЖЛХ, 38, № 6, 1290 (1965). ¹⁶ A. A. Kosinski, C. J. King, Am. Inst. Chem. Eng. J., 12, № 1, 100 (1966). ¹⁷ G. A. Davies, A. B. Ponter, K. Craine, Canad. J. Chem. Eng., 45, № 6, 372 (1967). ¹⁸ G. A. Rateliff, J. G. Holdcroft, Trans. Inst. Chem. Eng., 41, 315 (1963).