

УДК 66.015.23:541.12.012.6

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

И. А. ГИЛЬДЕНБЛАТ, А. Й. 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 диффузационного 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 — CO₂ 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 ($Re_{ж} = 0,7 \cdot 10^3 \div 0,5 \cdot 10^5$), а поверхность раздела жидкость — газ, не очень сильно отличаясь от горизонтальной, согласно визуальным наблюдениям заметно не различалась при каждом определении 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⁾ равнозначным проведение работы в динамических (т. е. с непрерывным протоком 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, изопропиолем и изобутиловым спиртами, проведенных без протока жидкости и с непрерывным ее протоком и стоком непосредственно с поверхности раздела фаз, были получены практически идентичные значения $\beta_{\text{ж}}$ (см. рис. 1). Однако

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 $\beta_{\text{ж}}$, 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 поверхностьюактивными 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 протоком не меняло величины $\beta_{\text{ж}}$, так что гидродинамическая обстановка в сосуде в этих условиях практически полностью определялась действием мешалки, а влияние накопления загрязнений на $\beta_{\text{ж}}$ 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, по-видимому, именно несоблюдением этого условия, а также неучетом влияния вязкости на $\beta_{\text{ж}}$, объясняется получение сомнительного соотношения $\beta_{\text{ж}} \sim \sigma^{-1.3}$ в единственной работе⁽¹⁴⁾, по экспериментальным данным которой можно было оценить влияние σ на $\beta_{\text{ж}}$ в перемешиваемых жидкостях до настоящего времени.

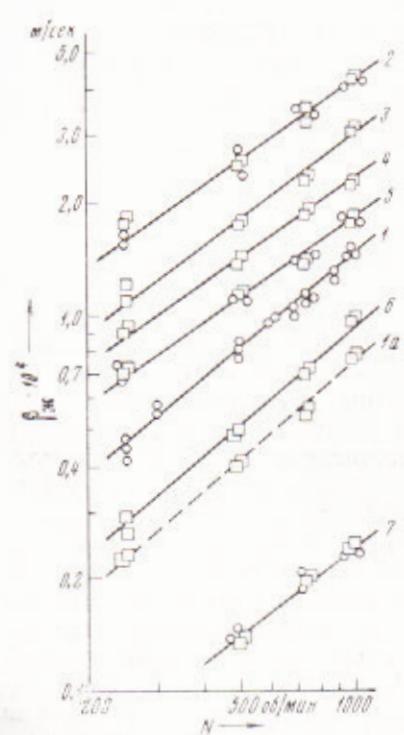


Рис. 1. Зависимости коэффициента массоотдачи от интенсивности перемешивания: 1 и 1а — вода (дистилированная), 2 — *n*-гептан, 3 — четыреххлористый углерод, 4 — этанол (абсолютированный), 5 — изопропанол, 6 — пропиленкарбонат, 7 — гликоль. Кружки соответствуют опытам со стоком жидкости с поверхности контакта,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

по-видимому, именно несоблюдением этого условия, а также неучетом влияния вязкости на $\beta_{\text{ж}}$, объясняется получение сомнительного соотношения $\beta_{\text{ж}} \sim \sigma^{-1.3}$ в единственной работе⁽¹⁴⁾, по экспериментальным данным которой можно было оценить влияние σ на $\beta_{\text{ж}}$ в перемешиваемых жидкостях до настоящего времени.

На рис. 1 представлены зависимости $\beta_{\text{ж}}$ от числа оборотов мешалки N для части изученных нами растворителей. Во всех случаях значения показателя степени в зависимости $\beta_{\text{ж}} \sim N^q$ 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

жидкостей, то различия значений β_{jk} при десорбции CO₂ 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 $\beta_{jk} \sim D^{0.5}$, 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 $\beta_{jk}/D^{0.5}$ от кинематической вязкости $v = \mu/\rho$ для жидкостей с практически одинаковым $\sigma = 20.8-24$ дин/см. Обработка результатов опытов методом наименьших квадратов дала значения показателя степени в зависимости $\beta_{jk} \sim$

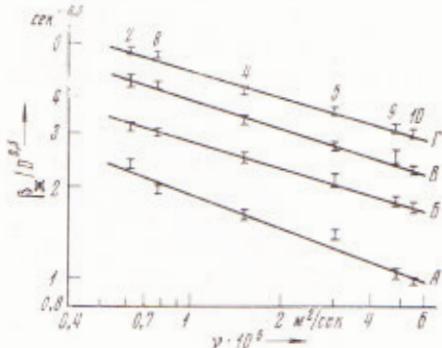


Рис. 2

Рис. 2. Влияние кинематической вязкости на интенсивность массоотдачи для жидкостей с $\sigma = 20.8-24$ дин/см при скоростях мешалки $N = 250$ (A), 500 (B), 750 (G) и 1000 об/мин (F). 8 — н-октан, 9 — изобутанол, 10 — изопентанол. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

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

$\sim v^m$ 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 β_{jk} от D и v (принято $m \approx -0.3$) позволяет оценить чистое влияние σ на β_{jk} , как это сделано на рис. 3. Значения показателя степени в зависимости $\beta_{jk} \sim \sigma^p$ 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 $p \approx -\frac{1}{3}$.

Использование результатов опытов с более широким, чем представленный на рис. 3, кругом жидкостей (диоксан, метаксилол, 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 CO₂ — органические растворители лучше согласуется с опытом, чем уравнение Уилки — Чанга) дало сходные значения $p = -0.44 \pm 0.15$ и -0.37 ± 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

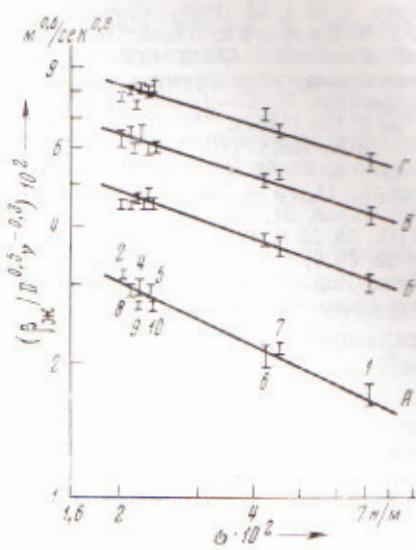


Рис. 3

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. Nukita, 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. Гильденблат, 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. Hanazawa, H. Abe, Chem. Eng. Japan, 31, № 6, 590 (1967). ¹⁵ Л. Н. Брагинский, И. С. Павлушкина, ЖПХ, 38, № 6, 1290 (1965). ¹⁶ A. A. Kosinski, C. J. King, Am. Inst. Chem. Eng. J., 12, № 1, 109 (1966). ¹⁷ G. A. Davies, A. B. Ponter, K. Craine, Canad. J. Chem. Eng., 45, № 6, 372 (1967). ¹⁸ G. A. Ratiliff, J. G. Holdcroft, Trans. Inst. Chem. Eng., 41, 315 (1963).