

03

## Особенности абсорбции газов во вращающейся пористой среде

© А.Н. Бажайкин

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
E-mail: bazhan@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 4 июля 2013 г.

Экспериментально исследована абсорбция аммиака, двуокиси серы и углекислого газа водой во вращающемся ячеисто-пористом диске. Получены данные по степени очистки воздуха от этих примесей и обнаружена аномально высокая их растворимость, превышающая равновесные значения. Результаты показали возможность создания эффективных и экономичных абсорберов для очистки воздуха от газообразных примесей.

Абсорбционная очистка газов (воздуха) от нежелательных примесей как наиболее универсальный способ осуществляется с помощью разнообразных скрубберов, которые имеют относительно большие габариты, требуют значительных расходов жидкого сорбента и материальных затрат при эксплуатации. Поэтому совершенствование абсорбционных процессов для повышения их эффективности и экономичности является актуальным. Решение данной задачи возможно путем интенсификации движения реагирующих сред, увеличения поверхности их взаимодействия и правильного подбора сорбента, т.е. создания условий для повышения вероятности селективного захвата и удержания молекул удаляемых примесей жидким сорбентом. Такие условия осуществимы в пористых материалах, обладающих большой внутренней поверхностью и проницаемых для газов и жидкостей, например в высокопористых ячеистых материалах (ВПЯМ) [1]. Диск из никелевого ВПЯМ, имеющий пористость 95% и размер ячеек 1–2 мм, показан на рис. 1, а. Вращения таких дисков вызывают сложные перемещения заполняющей их и окружающей среды [2]: находящаяся внутри диска среда (жидкость, газ) под действием центробежных сил и трения движется в радиальном направлении от центра к периферии и выбрасывается с

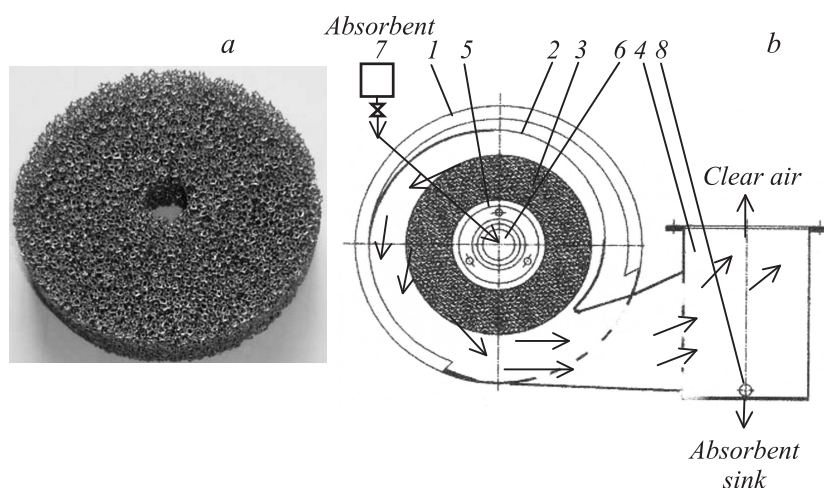


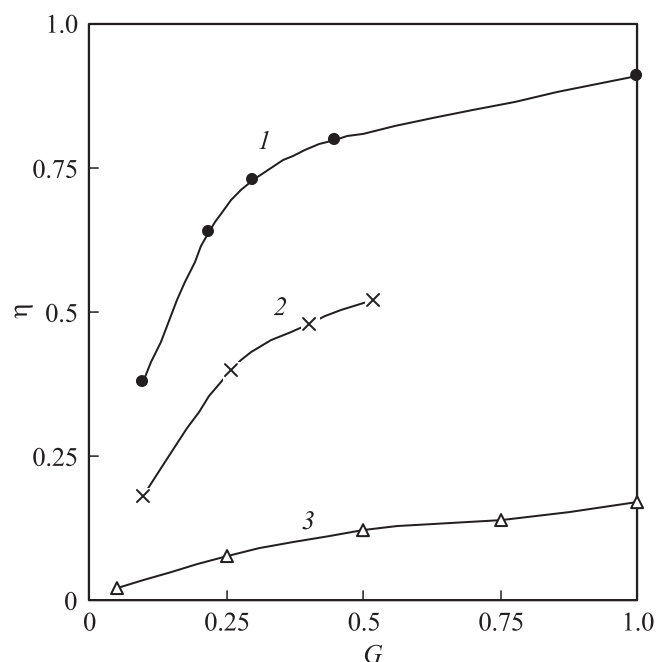
Рис. 1. Диск из ВПЯМ (а) и схема абсорбера (b).

цилиндрической поверхности диска; одновременно с этим к торцевым поверхностям подходят и всасываются (за счет разрежения внутри диска) новые порции среды и процесс повторяется, т.е. диск работает в качестве элемента вентилятора. При одновременной подаче двух сред: очищаемого газа (воздуха) и жидкого сорбента при совместном перемещении внутри вращающегося диска по развитой поверхности пор происходит их интенсивное взаимодействие с поглощением примесей сорбентом. Для практической реализации описанных процессов создан абсорбер [3], изображенный схематично на рис. 1, b и представляющий собой центробежный вентилятор, в корпусе которого 1 расположена обечайка — улитка 2 с диском 3. Корпус 1 соединен с выходным патрубком 4 и имеет входной патрубок 5, внутри которого имеется коллектор 6, куда подается сорбент из емкости 7. При вращении диска 3 очищаемый газ входит в патрубок 5, одновременно в коллектор 6 поступает жидкий сорбент и в результате прохождения через диск, сопровождающегося массообменными процессами, реагенты выбрасываются со всей цилиндрической поверхности диска в улитку 2, при соударении с которой происходит сепарация сред, заканчивающаяся в выходном патрубке 4; при этом жидкий сорбент с поглощенными примесями стекает по ограждающим поверхностям и эвакуируется

Удаляемая примесь	$C_o$ , ppm	$C_k$ , ppm	$G_a \cdot 10^3$ , kg/s	$G_w \cdot 10^3$ , kg/s
NH <sub>3</sub>	13	8	26	2.6
	195	70	37	8.3
	30	7	18	5.4
	225	45	40	18
	100	9	25	25
SO <sub>2</sub>	22	18	20	2.0
	15	9	19	5.0
	21	11	19	7.5
	21	10	19	10
CO <sub>2</sub>	310	303	44	2.2
	300	277	44	11
	306	270	42	21
	312	268	40	30
	310	257	38	38

через сливное отверстие 8, а очищенный газ покидает абсорбер через патрубок 4. Таким образом, описанное относительно простое и малогабаритное устройство выполняет одновременно 2 функции: вентилятора и абсорбера. Расход перерабатываемого газа зависит от размеров диска и частоты его вращения. В исследованиях использовался диск диаметром 150 mm, толщиной 20 mm и при скорости вращения 50 r/s давал расход воздуха 0.04 kg/s.

При испытаниях производилась очистка воздуха от аммиака, двуокиси серы и углекислого газа с использованием в качестве сорбента воды. Концентрация примесей в воздухе на входе ( $C_o$ ) и выходе ( $C_k$ ) абсорбера измерялись газоанализатором „Тест“ с относительной погрешностью 5%. Условия экспериментов и измеренные концентрации приведены в таблице, где  $G_a$  и  $G_w$  — расходы очищаемого воздуха и жидкого сорбента соответственно. На основании представленных в таблице данных рассчитывалась степень очистки воздуха:  $\eta = 1 - C_o/C_k$  — основная характеристика абсорбера. Графики зависимости  $\eta$  от относительного расхода сорбента  $G = G_w/G_a$  показаны на рис. 2, откуда видно качественное подобие аппроксимирующих экспериментальные данные кривых: с увеличением расхода сорбента повышается эффективность очистки, особенно при малых значениях  $G$ ; при больших расходах кривые стремятся к насыщению. Степень очистки существенно зависит от растворимости ( $\alpha$ ) примеси в воде, которая при 293 K составляет



**Рис. 2.** Зависимость степени очистки воздуха ( $\eta$ ) от относительного расхода сорбента ( $G$ ): 1 —  $\text{NH}_3$ , 2 —  $\text{SO}_2$ , 3 —  $\text{CO}_2$ .

для  $\text{NH}_3$  — 710, для  $\text{SO}_2$  — 33 и для  $\text{CO}_2$  —  $0.878 \text{ m}^3/\text{m}^3$  [4], поэтому кривая 1 расположена выше кривых 2 и 3. Так, например, при одинаковых  $G = 0.5$  значения  $\eta$  для данных примесей составляют 0.83, 0.52 и 0.12 соответственно, хотя значения  $\alpha$  отличаются друг от друга в 20–40 раз. Полученные данные являются результатом взаимодействия противоположных процессов: абсорбции и десорбции, причем роль последней возрастает со снижением  $\alpha$ . Так, если вероятность поглощения водой различных молекул (в том числе азота и кислорода воздуха) одинакова, то вероятность обратного выхода из воды молекул  $\text{NH}_3$  меньше, чем  $\text{SO}_2$ , еще меньше, чем  $\text{CO}_2$  и тем более молекул в составе воздуха:  $\text{O}_2$  ( $\alpha = 0.032$ ) и  $\text{N}_2$  ( $\alpha = 0.016$ ) [4], которые практически не поглощаются водой.

Немаловажным представляется рассмотрение полученных результатов с точки зрения равновесия абсорбционных процессов, кото-

рое для идеальных и разбавленных растворов системы жидкость–газ описывается законом Генри:  $P_a = K_H C_{w^*}$ , где  $P_a$  — парциальное давление поглощаемого компонента в газовой среде,  $C_{w^*}$  — мольная концентрация компонента в воде,  $K_H$  — коэффициент Генри. При сравнении  $C_{w^*}$  с концентрацией компонента, поглощенного водой, рассчитанной по экспериментальным данным ( $C_w$ ), можно определить степень отклонения результатов экспериментов от равновесия в виде отношения:  $\beta = C_w/C_{w^*}$  (при равновесии  $\beta = 1$ ). Значения  $C_w$  рассчитываются по материальному балансу поглощаемого компонента:  $C_o G_a = C_k G_a + C_w G_w$ , где в левой части расход компонента в очищаемом воздухе, а в правой части расходы компонента в очищенном воздухе и поглощенного водой. Учитывая, что  $G = G_w/G_a$ , получим

$$G_w = (C_o - C_k)/G, \quad (1)$$

где все величины в правой части находятся из таблицы.

Значения  $P_a$  определяются на основании закона Дальтона в виде

$$P_a = P_o C_o M_a / M_k, \quad (2)$$

где  $P_o$  и  $M_a$  — давление и молекулярный вес очищаемого воздуха,  $M_k$  — молекулярный вес удаляемого компонента. Подставляя (2) в формулу Генри, получим выражение для  $C_{w^*}$ :

$$C_{w^*} = P_o C_o M_a / M_k K_H; \quad (3)$$

тогда расчетная формула для  $\beta$  получается делением (1) на (3):

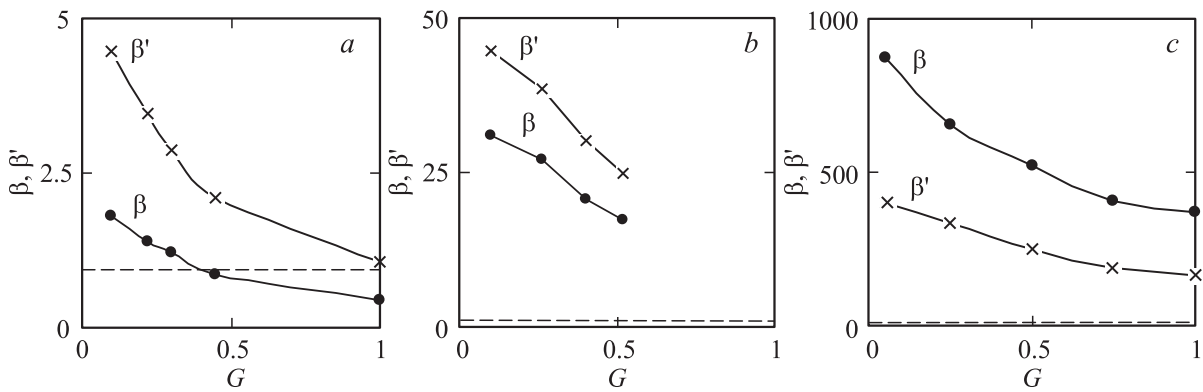
$$\beta = (C_o - C_k) M_k K_H / P_o C_o M_a G;$$

учитывая  $(C_o - C_k)/C_o = \eta$ , окончательно получим

$$\beta = \eta K_g M_k / G P_o M_a. \quad (4)$$

В формуле (4) значения  $\eta$  и  $G$  берутся из рис. 2, коэффициенты Генри при температуре 293 К для  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$  равны 0.823, 7.8 и 1440 atm [5];  $P_o = 1$  atm.

На рис. 3, *a, b, c* представлены данные расчета по формуле (4) для перчисленных газов, откуда видно, что величины  $\beta$  в основном больше 1 ( $\beta = 1$  — штриховые линии), т. е. превышают равновесные значения, что



**Рис. 3.** Превышение над равновесной абсорбцией  $\beta$  (по формуле [4]) и  $\beta'$  (по формуле [8]) для разных примесей:  $a$  —  $\text{NH}_3$ ,  $b$  —  $\text{SO}_2$  и  $c$  —  $\text{CO}_2$ .

является неожиданным с точки зрения теории растворимости, согласно которой газы поглощаются жидкостью до тех пор, пока между ними не наступит равновесие. Для разных газов это превышение имеет место в разной степени (данные показаны точками). Значения  $\beta$  у  $\text{NH}_3$  достигают 1.8 при малых  $G$  и только с ростом  $G$  больше 0.4 становятся меньше 1 (рис. 3, *a*). Еще большие величины  $\beta$  наблюдаются на рис. 3, *b* для  $\text{SO}_2$  ( $\beta = 17-31$ ), т.е. превышение больше чем на порядок. И более чем на 2 порядка больше равновесия составляет поглощение  $\text{CO}_2$  водой ( $\beta = 370-870$ ), показанное на рис. 3, *c*.

Полученные результаты расчетов, показавшие аномально высокую растворимость газов, нуждаются в подтверждении, тем более что закон Генри справедлив для разбавленных растворов или для слабо-растворимых в воде газов. Критерием равновесия также является равенство парциальных давлений компонента в несущем газе и поглощенного жидкостью:  $P_a = P_{w^*}$ . Значения  $P_a$  определяются формулой (2), а  $P_{w^*}$  находится из уравнения состояния компонента в жидкости:  $P_w = m_k R T_k / M_k V_k$ , где  $m_k$ ,  $M_k$ ,  $V_k$  и  $T_k$  — масса, молекулярный вес, парциальный объем и абсолютная температура компонента;  $R$  — газовая постоянная. Умножая числитель и знаменатель на  $V_w$  — объем жидкости в растворе, после преобразований и замен получим

$$P_{w^*} = C_{w^*} \rho_w R T_k / \alpha M_k. \quad (5)$$

В формуле (5)  $\rho_w = m_w / V_w$  — плотность жидкости,  $C_{w^*} = m_k / m_w$  — концентрация компонента в жидкости при равновесии,  $\alpha = V_k / V_w$  — растворимость компонента в воде. Подставляя формулы (2) и (5) в критерий равновесия после преобразований получим выражение для  $C_{w^*}$ :

$$C_{w^*} = \alpha C_0 P_o M_a / R T_k \rho_w. \quad (6)$$

Степень отклонения результатов экспериментов от равновесия  $\beta' = C_w / C_{w^*}$ , определенную последним способом, получим делением формул (1) на (6):

$$\beta' = \eta \rho_w R T_k / \alpha G P_o M_a; \quad (7)$$

подставляя в (7) значения величин:  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $R = 8.31 \text{ kJ/(kmol} \cdot \text{K)}$ ,  $T_k = 293 \text{ K}$ ,  $P_o = 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $M_a = 29 \text{ kg/(kmol)}$ , получим расчетную формулу для  $\beta'$ :

$$\beta' = 840 \eta / (\alpha \cdot G); \quad (8)$$

значения растворимости  $\alpha$  для соответствующих примесей приведены выше, а пары величин  $\eta$  и  $G$  для них взяты из рис. 2.

Результаты расчетов по формуле (8) представлены на рис. 3, *a, b, c*, откуда видно, что для всех 3 газовых примесей значения  $\beta'$  превышают равновесные значения во всем диапазоне изменения  $G$ , что подтверждает данные по  $\beta$ , хотя значения  $\beta$  и  $\beta'$  различаются в 1.5–2 раза для одной и той же примеси. Проведенные аналогичные расчеты для промышленных скрубберов (по очистке от  $\text{NH}_3$ ) показали значения  $\beta = 0.1–0.2$ , что на порядок меньше описываемых результатов и предполагает возможность создания эффективных и экономичных абсорберов с пронизаемым пористым ротором. Причиной сверхравновесной абсорбции газов может быть совокупность факторов, связанная с интенсивным перемешиванием реагирующих сред, форсированной абсорбцией и ограниченной десорбцией примесей в стесненных условиях пористых каналов и ячеек при наличии значительных перегрузок и локальных давлений, вызываемых центробежными силами.

## Список литературы

- [1] Анциферов В.Н., Храпцов В.Д. // Перспективные материалы. 2000. № 5. С. 56–60.
- [2] Баев В.К., Фомин В.М., Чусов Д.В. и др. / Патент RU № 2256861. 2005.
- [3] Баев В.К., Бажайкин А.Н., Исмагилов З.Р. и др. / Патент RU № 2343960. 2009.
- [4] Справочник по неорганической химии / Под ред. Р.А. Лидина. М.: Химия, 1987. 319 с.
- [5] Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1966. 767 с.