

03;12

## Эффект разделения компонентов при изотермическом смешении тройных газовых систем в условиях свободной конвекции

© В.Н. Косов, В.Д. Селезнев, Ю.И. Жаврин

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики при Казахском государственном университете им. Аль-Фараби, 480000 Алма-Ата, Казахстан

(Поступило в Редакцию 24 января 1997 г.)

1. Экспериментальные исследования изотермического смешения в тройных газовых смесях показали, что из них при определенных условиях (давление, температура, геометрические параметры диффузионного канала) возникают конвективные потоки, наложение которых на диффузию делает процесс неустойчивым [1–4]. Сравнительный анализ полученных в [1–4] результатов показал, что на некоторых стадиях конвективного смешивания происходит нарушение пропорциональности количества перенесенного через капилляр вещества по отношению к исходным значениям концентраций компонентов перед каналом. Это позволяет предположить, что при наличии развитых конвективных течений, характерных для неустойчивых систем, происходит концентрационное разделение компонентов системы, обусловленное, по-видимому, различием в коэффициентах диффузии.

Цель данной работы заключается в экспериментальной проверке указанного предположения и анализе причин, вызывающих эффект.

2. Измерения проводились на установке, реализующей двухколбовый метод [1,2]. Геометрические параметры диффузионного аппарата следующие: объемы верхней и нижней колб составляют  $V_I = 214.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  и  $V_{II} = 226.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  соответственно; длина и диаметр канала  $L = 0.165 \text{ м}$ ,  $d = 6.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Методика проведения эксперимента была общепринятой [2,5]. Изучался диффузионный перенос бинарной смеси в чистый компонент. Состав бинарной смеси при заданных давлении и температуре подбирался таким образом, чтобы ее плотность была меньше плотности однокомпонентного газа, находящегося в нижней части аппарата. Определялась зависимость количества продиффундировавших компонентов от времени при фиксированном начальном составе и постоянных условиях опыта. Каждый эксперимент при данных условиях проводился неоднократно количество раз и итоговые значения определялись как арифметическое среднее результата.

На рис. 1 приведены значения концентраций компонентов при различных временах переноса для систем  $0.5673\text{H}_2(1) + 0.4327\text{Ar}(2) - \text{N}_2(3)$ ;  $0.6210\text{He}(1) + 0.3790\text{R}12(2) - \text{H} - \text{C}_4\text{H}_{10}(3)$  (в скобках у химических символов указана нумерация компонентов). В первые часы диффузионно неустойчивого режима наблюдается anomальное для развитых конвективных течений концентрационное разделение элементов бинарной смеси, которое заключается в повышенном

содержании тяжелого компонента в нижней колбе. С течением времени эффект ослабевает, но различие в разделенных концентрациях сохраняется достаточно долго.

3. Обогащение смеси тяжелым компонентом может быть объяснено различием в коэффициентах взаимной диффузии газов  $D_{ij}$  и наличием встречных конвективных потоков в канале (экспериментально обнаруженных в [1]) при диффузионной неустойчивости. Моделируя наблюдаемые потоки, рассмотрим встречное движение в плоском вертикальном канале (рис. 2) бинарной газовой смеси, поступающей на вход левой половины канала с концентрацией  $C_{2l}$ , и однокомпонентного газа, текущего вверх по его правой половине. Полагаем, что скорость газа однородна по сечению каждой половины канала и равна  $u$ .

Встречные потоки различаются по составу и поэтому будут обмениваться молекулами, причем за время движения бинарной смеси на пути  $L$  она обедняется легким компонентом, так как он быстрее будет проникать во встречный поток за счет диффузии.

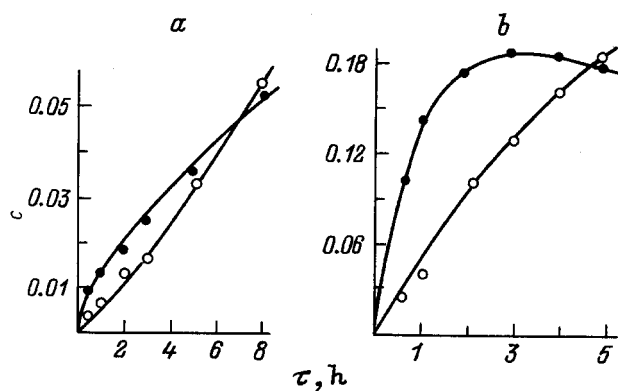


Рис. 1. Концентрации легкого 1 и тяжелого 2 компонентов смеси при различных временах смешения в нижней колбе аппарата для систем. *a* —  $0.5673\text{H}_2(1) + 0.4327\text{Ar}(2) - \text{N}_2(3)$ ,  $P = 3.04 \text{ МПа}$ ,  $T = 295.0 \text{ К}$ ; *b* —  $0.6210\text{He}(1) + 0.3790\text{R}12(2) - \text{H} - \text{C}_4\text{H}_{10}(3)$ ,  $P = 0.22 \text{ МПа}$ ,  $T = 298.0 \text{ К}$  (концентрация компонента 3 в верхней колбе определяется сложением 1 и 2). ●, ○ — экспериментальные данные концентраций для тяжелого и легкого компонентов бинарной смеси; сплошные линии — полиномиальная обработка экспериментальных результатов; *c* в мол. долях.

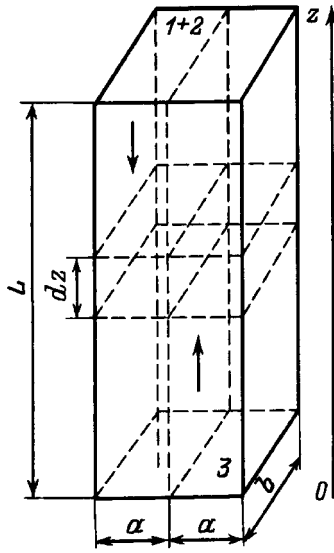


Рис. 2. Диффузионный канал. Геометрия задачи.

Для того чтобы рассчитать эффект разделения в описываемой ситуации, рассмотрим уравнение баланса числа частиц 1-го компонента в элементе толщиной  $dz$  в правом канале (рис. 2).

$$\frac{dc_1^r}{dt} = \frac{J}{n \cdot a}, \quad (1)$$

где  $n$  — числовая плотность молекул,  $c_1^r$ ,  $c_1^l$  — концентрация молекул 1-го компонента в правой и левой частях канала,  $J$  — плотность диффузионного потока.

Принимая во внимание, что

$$dt = \frac{dz}{u}, \quad u = \frac{Q}{a \cdot b \cdot n}, \quad J = nD_{13} \frac{c_1^l - c_1^r}{a},$$

уравнение (1) принимает вид

$$\frac{dc_1^r}{dz} = \frac{b}{Q} nD_{13} \frac{c_1^l - c_1^r}{a}, \quad (2)$$

где  $Q$  — модуль гидродинамического потока.

Аналогичное соотношение имеет место и для молекул 1-го сорта в другой половине канала

$$\frac{dc_1^l}{dz} = \frac{b}{Q} nD_{13} \frac{c_1^l - c_1^r}{a}. \quad (3)$$

При выводе (3) необходимо учитывать, что в левой и правой частях канала направления потока различны. Решения (2), (3) с учетом граничных условий  $z = 0$ ,  $c_3^r = 1$ ;  $z = L$ ,  $c_1^l = c_1^l(L)$ ,  $c_2^l = c_2^l(L)$  и положения, что перенос осуществляется в канале с одинаковыми квадратными сечениями его частей ( $b = a$ ), имеют вид

$$c_1^r = \frac{nD_{13}zc_1^l(L)}{Q + nD_{13}L}, \quad c_1^l = \frac{(Q + nD_{13}z)c_1^l(L)}{Q + nD_{13}L}, \quad (4)$$

где  $L$  — длина диффузионного канала.

Аналогичный (1)–(3) подход дает выражения для тяжелого компонента 2

$$c_2^r = \frac{nD_{23}zc_2^l(L)}{Q + nD_{23}L}, \quad c_2^l = \frac{(Q + nD_{23}z)c_2^l(L)}{Q + nD_{23}L}. \quad (5)$$

Осуществляя переход от (4), (5) к выражениям для парциальных расходов компонентов, необходимо учитывать присутствие газов 1 и 2 в обеих частях канала, а также направление  $Q_i$ . Для системы координат рис. 2 и в соответствии с условием анализа компонентов 1 и 2 ( $z = 0$ ) окончательно получим

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{c_2^l(L)}{c_1^l(L)} \left( \frac{Q + nD_{13}L}{Q + nD_{23}L} \right). \quad (6)$$

Максимальное значение (6) будет определяться условием  $Q \ll nD_{ij}L$ , т. е.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{c_2^l(L)}{c_1^l(L)} \frac{D_{13}}{D_{23}}.$$

Для экспериментально исследованных систем это отношение составляет 2.8 и 6.1 соответственно. Сравнение измеренных данных (рис. 1) показывает, что в первые часы конвективного смешения такое соотношение справедливо и определяет максимальную величину разделения компонентов смеси. В дальнейшем количественные измерения необходимо производить в предположении  $Q > 0$ , что требует его корректного определения.

4. Таким образом, при изучении явления диффузионной неустойчивости обнаружен эффект разделения компонентов смеси, приводящий к ее обогащению тяжелым компонентом. Предложенная теоретическая модель на основе положения о различии в коэффициентах взаимной диффузии компонентов позволяет получить количественные оценки, характеризующие эффект в начальной стадии конвективного смешения.

## Список литературы

- [1] Жаврин Ю.И., Косов Н.Д. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 943–947.
- [2] Жаврин Ю.И., Косов В.Н. // ИФЖ. 1988. Т. 5. № 2. С. 92–97.
- [3] Жаврин Ю.И., Косов В.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 10. С. 18–21.
- [4] Айткожаев А.З., Жаврин Ю.И., Косов В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 6. С. 7–12.
- [5] Ивакин И.Ф., Лойко А.Э., Суетин П.Е. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 4. С. 873–876.