

Диффузионное и конвективное смешение бинарной смеси пропана и двуокиси углерода с чистой закисью азота

© Ю.И. Жаврин, М. Мукамеденкызы, И.В. Поярков

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
480012 Алматы, Казахстан
e-mail: zhavrin@physics.kz

(Поступило в Редакцию 26 октября 2006 г.)

Методом двухколбового прибора исследованы процессы смешения бинарных смесей пропана и двуокиси углерода в закись азота. Эксперименты проводились при различном расположении исходных газов в колбах диффузионного аппарата в зависимости от давления и концентрации смешивающихся компонентов. Определены режимы смешения и границы перехода „молекулярная диффузия–концентрационная конвекция“.

PACS: 51.10.+y

Экспериментальное изучение диффузии в изотермических многокомпонентных газовых смесях (в дальнейшем ограничимся простейшей многокомпонентной системой — тройной, когда бинарная смесь диффундирует в чистый газ) при изотермических условиях показало, что в определенных условиях возможно возникновение конвективных потоков [1]. Существенное влияние на конвективный перенос оказывает давление, температура, вязкость, концентрации смешивающихся компонентов, а также геометрические характеристики диффузионного канала. На начальном этапе смешения при изначально устойчивом расположении газов происходит образование в диффузионном канале стратифицированных областей, когда более тяжелая смесь оказывается над легкой, что порождает образование „ячеек конвекции“, которые начинают перемещаться по каналу в противоположных направлениях [2]. Наложение конвективных течений на молекулярный перенос компонентов существенным образом искажает ожидаемые результаты, что необходимо учитывать при разработке и проектировании массообменных процессов, в частности, синтезе аммиака из природного газа [3].

Проведенные ранее исследования в основном были связаны с системами, в которых бинарная смесь (легкого газа и самого тяжелого) диффундировала в чистый газ с промежуточной плотностью, например $\text{H}_2 + \text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ [4]. В таких системах достаточно легко можно реализовать конвекцию различной интенсивности простым варьированием термодинамическими параметрами. Однако сказать, какой должна быть минимальная разность плотностей стратифицированных областей, чтобы возникла конвекция, практически невозможно. Это в первую очередь относится к коэффициентам диффузии компонентов. Поэтому задача настоящей работы состояла в изучении процесса смешения в тройной системе, когда бинарная смесь, в нашем случае пропана и двуокиси углерода, диффундировала в чистую закись азота. Выбор данной газовой системы обусловлен тем, что при нормальных услови-

ях плотности этих газов практически равны ($\rho_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1.8037$, $\rho_{\text{CO}_2} = 1.8003$, $\rho_{\text{N}_2\text{O}} = 1.8004 \text{ kg/m}^3$), коэффициенты диффузии близки по величине ($D_{\text{C}_3\text{H}_8-\text{CO}_2} = 0.0863 \cdot 10^{-4}$, $D_{\text{C}_3\text{H}_8-\text{N}_2\text{O}} = 0.0860 \cdot 10^{-4}$, $D_{\text{N}_2\text{O}-\text{CO}_2} = 0.1170 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{c}$), коэффициенты вязкости также приблизительно равны. Однако эти газы при увеличении давления проявляют реальные свойства неравномерно, что, в свою очередь, сказывается на неодинаковом изменении их плотностей.

Цель работы состояла в определении режимов смешения в зависимости от давления и концентрации, т.е. определении границы перехода „диффузия–концентрационная гравитационная конвекция“, а также выявления закономерностей процесса.

Исследования проводились методом двухколбового диффузионного прибора [5].

Экспериментальная установка состояла из двух частей. Первая — блок подготовки газов, который включает в себя набор игольчатых вентилях для заполнения из баллонов исходными газами колб аппарата и, по окончании опыта, взятия проб газов на анализ.

Вторая часть установки — диффузионный аппарат с объемами колб верхней и нижней: $V_b = 2.268 \cdot 10^{-4}$ и $V_n = 2.145 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ соответственно. Колбы соединялись щелевым диффузионным каналом с размерами $(0.17 \times 0.05 \times 0.006) \cdot 10^{-4} \text{ m}$ с прозрачными стенками в нижней колбе, что позволяло визуально наблюдать за процессом смешения — молекулярным и конвективным — используя теневой прибор.

На установке была проведена серия опытов и получена зависимость интенсивности процесса смешения от давления. Продолжительность всех экспериментов составляла 20 min. Давление варьировалось от 3 до 20 МПа, а концентрация пропана в бинарной смеси составляла 0.14, 0.21, 0.38, 0.42 и 0.68 мольных долей. Верхний предел давлений соответствовал условию, когда пропан находился в газовой фазе. Нижний предел определялся возможностью взятия нескольких проб для анализа на хроматографе.

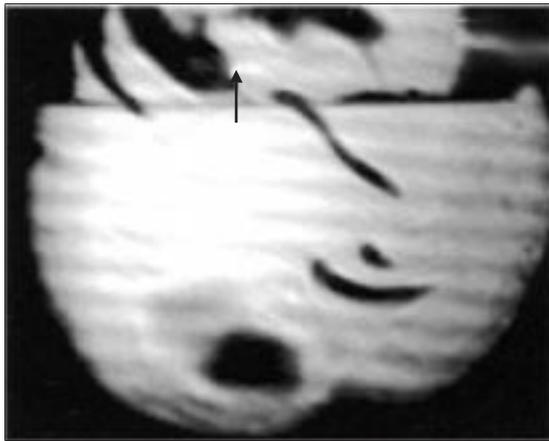


Рис. 1. Теневая картина неустойчивого диффузионного процесса в системе $0.76\text{C}_3\text{H}_8 + 0.24\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$ при $P = 4 \text{ МПа}$; процесс смешения через 3 min после открытия колб, стрелкой отмечен нижний срез диффузионного канала.

Эксперименты показали, что при расположении в верхней колбе диффузионного аппарата бинарной смеси с концентрацией пропана 0.76 мольных долей наблюдается конвективный процесс смешения (рис. 1). На рис. 1 четко видны структурные образования, которые перемещаются как внутри диффузионного канала, так и в нижней колбе диффузионного аппарата (интенсивность конвекции возросла с увеличением давления).

Граничный переход „молекулярная диффузия–диффузионная неустойчивость“ можно проследить различными способами: через визуализацию процесса либо через изменение параметра α , рассчитанного согласно зависимости

$$\alpha_i = \frac{C_{iex}}{C_{ith}}, \quad (1)$$

где C_{iex} — экспериментальные значения концентраций газов; C_{ith} — расчет концентраций по уравнениям Стефана–Максвелла в предположении диффузии ($i = 1, 2, 3$). Если $\alpha = 1$ для всех газов, то можно говорить, что перенос компонентов происходит по законам молекулярной диффузии, а при $\alpha > 1$ (хотя бы для одного компонента) — о присутствии конвективных потоков.

Этот процесс отображен на рис. 2, где представлена зависимость безразмерного коэффициента α , рассчитанного для пропана от давления. Анализ результатов рис. 2 показывает, что для системы $0.14\text{C}_3\text{H}_8 + 0.86\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$ при всех значениях давления процесс смешения протекает устойчиво по законам молекулярной диффузии. Это заключение подтверждается совпадением опытных данных с результатами расчетов по уравнению Стефана–Максвелла. В системе $0.21\text{C}_3\text{H}_8 + 0.79\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$ были определены границы перехода „молекулярная диффузия–диффузионная неустойчивость“. Для данной системы давление перехода соответствует 2.4 МПа.

Эксперименты показали, что увеличение концентрации пропана приводит к уменьшению давления перехода. Для смеси, содержащей более 0.68 мольных долей пропана, не существует диффузионного процесса смешения. Дальнейшее увеличение давления приводит к неустойчивости механического равновесия трехкомпонентной смеси, и диффузионный процесс переходит в конвективное смешение.

Такое поведение зависимости трехкомпонентной газовой системы от давления обусловлено только проявлением реальных свойств пропана с повышением давления. Действительно, при повышении давления парциальная плотность пропана растет быстрее, чем парциальные плотности двух других компонентов (двуокись углерода и закись азота), и бинарная смесь становится тяжелее, чем чистый компонент.

Было также обнаружено, что при концентрации пропана, равной 0.76 мольных долей, наблюдается снижение интенсивности конвективного процесса смешения.

Для случая, когда бинарные смеси располагались в нижней колбе диффузионного аппарата, процесс смешения при любом давлении для всех систем носил диффузионный характер, в этом случае $\alpha = 1$ (рис. 2).

Таким образом, из экспериментальных данных следовало, что при расположении бинарной смеси в верхней колбе диффузионного аппарата, в зависимости от давления и концентрации пропана в смеси, может наблюдаться как конвективный процесс смешения, так и диффузионный. При расположении бинарных смесей в нижней колбе аппарата, при любых значениях концентраций пропана процесс смешения в трехкомпонентной системе носит диффузионный характер.

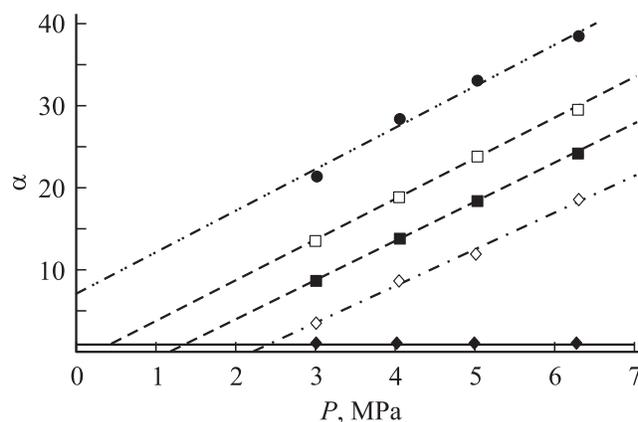


Рис. 2. Зависимость $\alpha_1 = C_{iex}/C_{ith}$ от давления. Точки — экспериментальные данные для систем: ◆ — $0.14\text{C}_3\text{H}_8 + 0.86\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$; ◇ — $0.21\text{C}_3\text{H}_8 + 0.79\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$; ■ — $0.38\text{C}_3\text{H}_8 + 0.62\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$; □ — $0.42\text{C}_3\text{H}_8 + 0.58\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$; ● — $0.68\text{C}_3\text{H}_8 + 0.32\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$. Линии — результаты обработки эксперимента.

Список литературы

- [1] *Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Поярков И.В.* // Мат. X Росс. конф. по теплофизическим свойствам веществ. Казань, 2002. С. 99.
- [2] *Косов В.Н., Селезнев В.Д.* Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции в изотермических тройных газовых смесях. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 151.
- [3] *Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Кульжанов Д.У., Каратаева К.К.* // ИЖФ. 2002. Т. 74. № 2. С. 133–136.
- [4] *Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Каратаева К.К.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 24. С. 76–79.
- [5] *Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Поярков И.В.* // Химия и компьютерное моделирование. 2002. № 10. С. 184–185.