

В.Н. Косов¹, И.В. Поярко², А.П. Лысенко¹, Н.Б. Анкушева¹

Алматинский государственный университет им. Абая, Алматы, Казахстан (1)
 Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики при
 Казахском национальном университете им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан (2)

ДИФфуЗИОННОЕ И КОНВЕКТИВНОЕ СМЕШЕНИЕ В БИНАРНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ CO₂ – N₂O

АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследован процесс смешения двухкомпонентной газовой смеси CO₂ – N₂O. Определена зависимость характера смешения от термодинамических параметров (давление, температура, вязкость смеси, концентрации смешиваемых компонентов), а также от расположения исследуемых газов в естественном гравитационном поле. Найдены условия, при которых возникает срыв устойчивости механического равновесия. Исследования проводились на установке, реализующей метод двухколбового аппарата.

1. ВВЕДЕНИЕ

Судя по публикациям, интерес к изучению устойчивости систем в процессах теплопереноса не ослабевает. В частности, к таким исследованиям можно отнести явление неустойчивости механического равновесия (в литературе иногда это явление называют диффузионной неустойчивостью (нестабильностью) или концентрационной гравитационной конвекцией), возникающей при диффузионном смешении в некоторых многокомпонентных газовых смесях [1]. Исследование этого явления актуально с точки зрения как практического приложения, так и развития и совершенствования теории теплопереноса. Изучение диффузии в двухкомпонентных газовых системах показало, что при определенных условиях возможно нарушение устойчивого состояния механического равновесия смеси и возникновение конвективных потоков [2, 3]. На интенсивность конвективного переноса существенное влияние оказывают термодинамические параметры (давление, температура, вязкость смеси, концентрации смешиваемых компонентов) и геометрические характеристики диффузионного канала. В случае неустойчивой диффузии в двойных газовых смесях конвективное смешение приводило к существенному перераспределению концентраций компонентов, которые заметно отличались от расчетно ожидаемых в случае только диффузионного процесса. Газовая смесь CO₂ – N₂O также дает возможность оценить возникновение конвекции в системе с одинаковыми термодинамическими параметрами в определенной области давлений проведения опытов. При нормальных условиях плотности этих газов близки до третьего знака после запятой ($\rho_{N_2O} = 1.978 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{CO_2} = 1.9768 \text{ кг/м}^3$), коэффициенты

диффузии близки по значению, коэффициенты вязкости также приблизительно равны. При повышении давления увеличивается только разность плотностей, причем существенно, следовательно, в опытах, где снималась зависимость перешедшего газа от давления, наблюдалась конвекция, обусловленная только лишь разностью плотностей.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились двухколбовым методом, позволяющим в широком диапазоне варьировать давление и температуру, а также условия проведения опытов. Используемый метод дает возможность проведения обзорных экспериментов, охватывающих широкую область параметров и условий, влияющих на характер смешения исследуемых газов. В настоящей обзорной работе получены результаты, явно характеризующие области перехода к неустойчивости.

Экспериментальная установка состоит из двухколбового аппарата и блока подготовки газов (рис. 1).

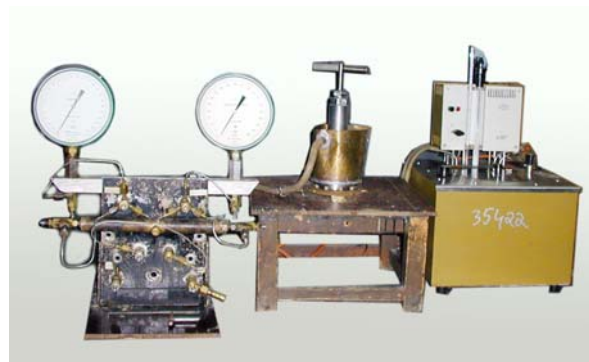


Рис. 1. Экспериментальная установка

Блок подготовки газовых смесей включает в себя: игольчатые вентили для заполнения из баллонов исходными газами верхней и нижней колб аппарата, а также взятия проб на анализ после завершения опыта; буферную емкость, способствующую выравниванию давления в колбах, которое контролируется манометрами со специальными мембранными разделителями. Основная часть установки — двухколбовый аппарат с термостатирующим его устройством (нижняя часть подогревается, а верхняя охлаждается до постоянной температуры). Диффузионный аппарат изготовлен стандартным

образом из нержавеющей стали X18H10T и представляет собой две камеры с заданными идентичными по величине объемами, соединенные капилляром. Капилляр перекрывается штоком с фторопластовой таблеткой, совершающим поступательные вертикальные движения посредством воротка. Конструкция перекрывающего устройства не меняет объемы колб аппарата в моменты перекрытия (открытия) капилляра. Длина капилляра 63,8 мм, диаметр — 4 мм, а постоянная аппарата — 2022. Колбы располагаются одна над другой, соединяющий их капилляр расположен вертикально.

Изучение смешения на установке двухколбового метода преследовало цели, связанные с определением границы перехода «диффузия — концентрационная гравитационная конвекция», изучения зависимости смешения от изменяемой величины и поиска закономерностей. Исследование неустойчивости диффузионного процесса производилось путем варьирования одной из величин, причем остальные оставались постоянными.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Произведены эксперименты по изучению смешения бинарной смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$ (время проведения опыта во всех случаях составляло 120 мин).

1. Проведена серия опытов с целью получения зависимости интенсивности смешения от давления при разных расположениях газов (CO_2 — верх, N_2O — низ, и наоборот) в изотермических условиях ($t_{\text{в}} = t_{\text{н}} \approx 20^\circ\text{C}$).

По полученным данным, при расположении N_2O в верхней колбе, CO_2 в нижней колбе, определены две характерные точки: одна из них — переход от диффузионного смешения к конвективному ($p \approx 14.25$ атм), другая — точка максимума по концентрации в области 28 атм (рис. 2).

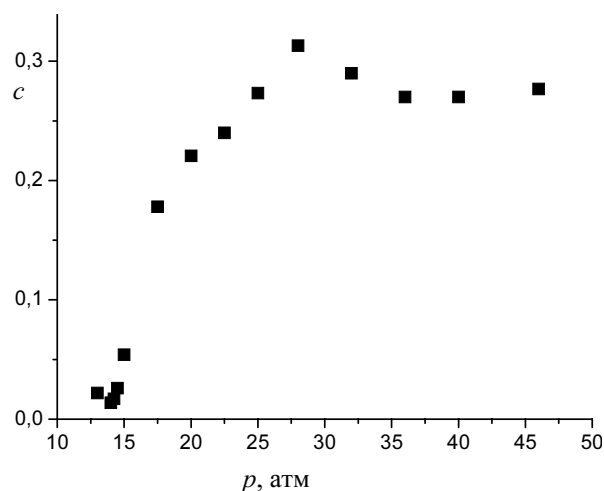


Рис. 2. Зависимость перешедшей концентрации от давления (N_2O — верх, CO_2 — низ)

При давлении от 13 до 14.25 атм — область диффузионного смешения, от 14.25 до 50 атм — область конвекции.

При расположении CO_2 — верх, N_2O — низ не было замечено явно выраженного конвективного течения (рис. 3).

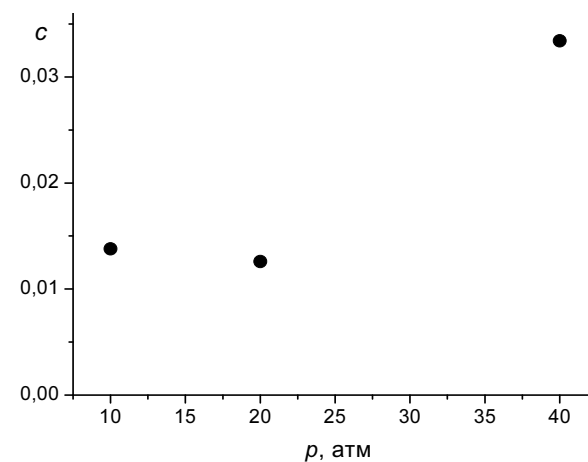


Рис. 3. Зависимость перешедшей концентрации от давления (CO_2 — верх, N_2O — низ)

2. При постоянном давлении (10 атм), взятом из области диффузионной устойчивости, основываясь на результатах пункта 1, и варьировании разницы температур между верхней и нижней колбой снималась зависимость α (безразмерный параметр, равный отношению экспериментально найденной концентрации к вычисленной в предположении диффузии) от средней температуры ($t_{\text{cp}} = (t_{\text{в}} + t_{\text{н}})/2$) также при разных ориентациях расположения газов (рис. 4, 5).

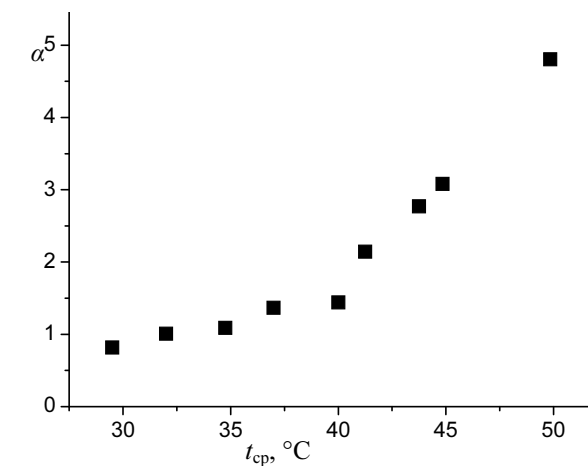


Рис. 4. Зависимость α от средней температуры колб (CO_2 — верх, N_2O — низ)

Из приведенного графика (рис. 4) виден переход «диффузия — конвекция» в области 40 $^\circ\text{C}$.

В случае, когда N_2O располагался сверху, а CO_2 — внизу (рис. 5), переход «диффузия — конвекция» был также замечен, но уже при меньшей температуре ≈ 16 $^\circ\text{C}$.

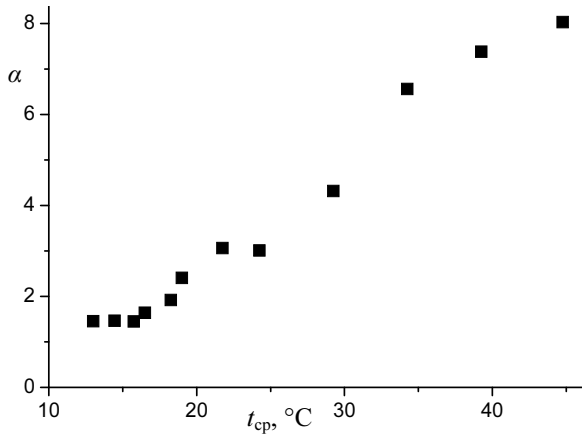


Рис. 5. Зависимость α от средней температуры колб (N₂O — верх, CO₂ — низ)

3. Снятие концентрационной зависимости при постоянном давлении 28 атм, которое соответствует максимальной интенсивности согласно пункту 1, при расположении газов CO₂ + N₂O — X% в верхней колбе и CO₂ — 100 % в нижней. Для каждой экспериментальной точки составлялась смесь, состоящая из CO₂ и N₂O в разной молекулярной пропорции как газовый компонент верхней колбы. Производилась серия опытов по определению зависимости концентрации CO₂ эталонной смеси от количества перешедшего N₂O (рис. 6).

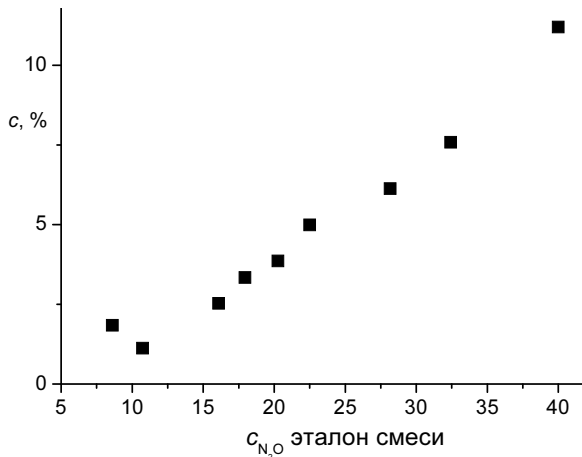


Рис. 6. Зависимость перешедшей концентрации от содержания N₂O в верхней колбе

Из эксперимента видно, что срыв устойчивости наблюдается при концентрации N₂O ≈ 11%.

4. ТЕОРИЯ

Описание макроскопического движения бинарной газовой смеси в температурном поле было проведено в рамках теории устойчивости [4, 5]. Общая система уравнений гидродинамики в данном случае состоит из уравнения движения Навье-Стокса, уравнения непрерывности, уравнений переноса тепла и массы:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u} \nabla \right) \vec{u} \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g},$$

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \vec{u} \nabla s \right) = -\mathbf{div} \vec{q} + \mu \mathbf{div} \vec{j},$$

$$\rho \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{u} \nabla c \right) = -\mathbf{div} \vec{j},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div} \left(\rho \vec{u} \right) = 0,$$

где $\mu = \frac{\mu_1}{m_1} + \frac{\mu_2}{m_2}$. Учитывая малость нестационарных возмущений, пренебрегая квадратичными по возмущениям членами, обезразмеривая полученную систему уравнений, учитывая, что хотя \vec{u} и \vec{v} различны, их возмущения приблизительно одной величины, и пренебрегая перекрестными эффектами, окончательно получим:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla^2 \vec{u} + (RT + R_d c) \vec{\gamma},$$

$$P \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\vec{u} \cdot \vec{\gamma} \right) = \nabla^2 T,$$

$$P_d \frac{\partial c}{\partial t} - \left(\vec{u} \cdot \vec{\gamma} \right) = \nabla^2 c,$$

$$\mathbf{div} \vec{u} = 0.$$

Геометрию задачи представим в виде бесконечного плоского вертикального канала. Возмущения примем в следующем виде:

$$u_x = u_y = 0, \quad u_z = u(x), \quad c = c(x), \quad T = T(x).$$

Считаем, что решение системы (2) имеет вид

$$\{c, T, u\} = \left\{ c^0, T^0, u^0 \right\} \sin \left[(n+1) \frac{\pi}{2} x \right] \exp[-\lambda t], \quad (3)$$

где $n=1, 3, 5, \dots$ — характерные нечетные моды возмущений. Граничные условия приняты следующими:

$$u = c = T = 0, \quad x = \pm 1.$$

Совместное решение (2), (3) позволяет получить кубическое уравнение для декрементов λ :

$$p\lambda^3 + q\lambda^2 + r\lambda + s = 0, \quad (4)$$

откуда находим линию нейтральных монотонных возмущений ($s=0$) в виде

$$R + R_d = \pi^4. \quad (5)$$

На рис. 7 изображена плоскость чисел Рэлея, на которую нанесены граничная линия монотонных

возмущений (ММ), а также экспериментальные данные по смешению в бинарной смеси $N_2O - CO_2$.

Судя по графику (рис. 7), система должна находиться в устойчивой области, а из графика на рис. 2 следует, что при давлении ≈ 14.25 атм уже начинается конвекция. По-видимому, на устойчивость диффузии в газовой смеси $N_2O - CO_2$ существенное влияние оказывает сжимаемость компонентов.

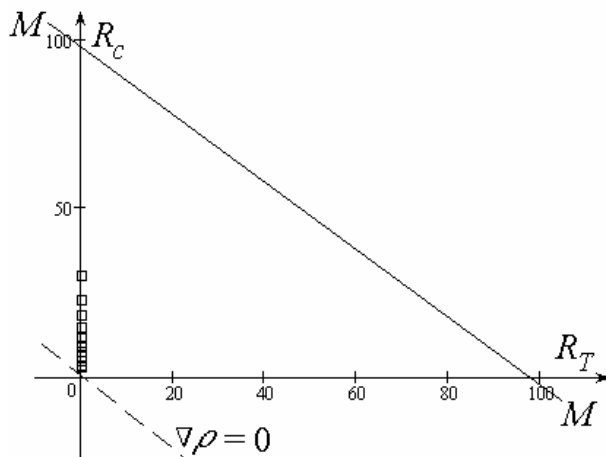


Рис. 7. Области устойчивой и неустойчивой диффузии системы $N_2O - CO_2$, линии нейтральных монотонных возмущений MM и нулевого градиента плотности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи установки с двухколбовым аппаратом произведены опыты в изотермических и неизотермических условиях при разных положениях газовых составляющих в гравитационном поле. Исследования проводились с бинарной смесью $CO_2 - N_2O$. Варьируя состоянием газовой смеси, было получено несколько переходов от диффузии к конвекции, а также в изотермическом случае при расположении газов N_2O — верх, CO_2 — низ отмечен максимум скорости смешения в области 28 атм. Заметная разница в процессе смешения при приблизительно идентичных газодинамических параметрах наблюдалась в опытах, отличительной особенностью которых было взаиморасположение одна газовая составляющая над другой.

Авторы выражают благодарность профессору Жаврину Ю.И. за консультации при выполнении данной работы.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- c_i — концентрация i -го компонента;
- \rightarrow
- g — ускорение силы тяжести, m/c^2 ;
- \rightarrow
- j — плотность диффузионного потока тяжелого компонента, $kg/(m^2 \cdot c)$;
- m_i — массы молекулы i -го компонента, kg ;
- n — мода возмущений;
- P — число Прандтля;
- P_d — концентрационное число Прандтля (число Шмидта);
- p — давление, $kg/(m \cdot c^2)$;
- R — тепловое число Рэлея;
- R_d — концентрационное число Рэлея;
- s — энтропия единицы массы смеси, kg^{-1} ;
- t_{cp} — средняя температура, $^{\circ}C$;
- t — время, c ;
- \rightarrow
- u — среднemasовая скорость смеси, m/c ;
- \rightarrow
- v — среднеобъемная скорость смеси, m/c ;
- x, y, z — координаты, m ;
- α — безразмерный параметр, показывающий устойчивость или неустойчивость системы;
- \rightarrow
- γ — единичный вектор, направленный вертикально вверх;
- η — коэффициент динамической вязкости, $kg/(m \cdot c)$;
- λ — декремент затухания, c^{-1} ;
- μ — эффективный химический потенциал;
- μ_i — химический потенциал i -го компонента;
- ρ — плотность смеси, kg/m^3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller L., Mason E.A. Oscillating instabilities in multi-component diffusion // Phys. Fluids. 1966. V. 9. No 4. P. 711—721.
2. Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Анкушева Н.Б., Жаврин Ю.И. Неустойчивость механического равновесия изотермических бинарных газовых смесей при различных давлениях // Известия НАН РК, сер. физ.-мат. 2002. № 2. С. 81—87.
3. Косов В.Н., Лысенко А.П. Неизотермическая диффузия и неустойчивость механического равновесия в бинарных газовых смесях при различных давлениях // Вестник КазНУ, сер. физ.-мат. Алматы, 2004. № 3 (18). С. 111—113.
4. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 733 с.