

УДК 533.15:536.25

ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ДИФФУЗИОННОГО КАНАЛА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Н. Б. Анкушева, В. Н. Косов, В. Д. Селезнев*

Казахский национальный педагогический университет им. Абая,
050002 Алма-Ата, Казахстан

* Уральский государственный технический университет —
Уральский политехнический институт, 620078 Екатеринбург

E-mails: prorector.met@kaznpu.kz, kovnik62@mail.ru, natalie_@inbox.ru, seleznev@dpt.ustu.ru

Экспериментально исследована неустойчивость механического равновесия в изотермических бинарных газовых смесях при различных углах наклона диффузионного канала относительно вертикальной оси. Установлено, что при увеличении угла наклона интенсивность конвективного массопереноса уменьшается и при определенной величине угла затухает. Показано, что данные опытов согласуются с оценками, полученными в рамках линейной теории устойчивости.

Ключевые слова: диффузия, конвекция, смешение газов, неустойчивость механического равновесия газовой смеси, линейная теория устойчивости, число Рэлея, влияние геометрии диффузионного канала.

Как показано в экспериментальных работах [1–3], при изотермической диффузии бинарной газовой смеси в третий компонент в вертикальном или наклонном канале имеет место неустойчивость механического равновесия системы. На возникновение конвективных структурированных течений влияют различные факторы, исследованные в [1–6], в том числе геометрические характеристики диффузионного канала и его наклона [7, 8].

В данной работе опытным путем изучена смена режимов диффузия — концентрационная гравитационная конвекция, имеющая место при изотермическом режиме получения простых бинарных смесей Ar–He и Ar–N₂ при различных углах наклона канала. Полученные результаты обсуждаются в рамках линейной теории устойчивости [9, 10].

Эксперименты проводились по методике, предложенной в работах [2, 3], на двухколбовом аппарате, объемы верхней и нижней колб которого равны $V_{\text{в}} = 55,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $V_{\text{н}} = 54,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ соответственно, диаметр диффузионного канала $d = (4,50 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, длина диффузионного канала $L = (64,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [1, 2]. Угол наклона канала относительно вертикальной оси менялся в диапазоне $\varphi = 0 \div 70^\circ$. Измерения проводились при давлении $p = 0,584 \text{ МПа}$ и температуре $T = (298,0 \pm 0,1) \text{ К}$. В обоих случаях бинарных систем более тяжелый по плотности компонент находился в верхней колбе, а легкий — в нижней (рис. 1). Давление газов в колбах аппарата измерялось образцовыми манометрами. После завершения процедуры выравнивания давления диффузионный аппарат отсоединялся от блока подготовки газов и закреплялся на установке под требуемым углом. Поднятием штатива с помощью фторопластовой таблетки открывался диффузионный канал, и

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № 0103РК00617).

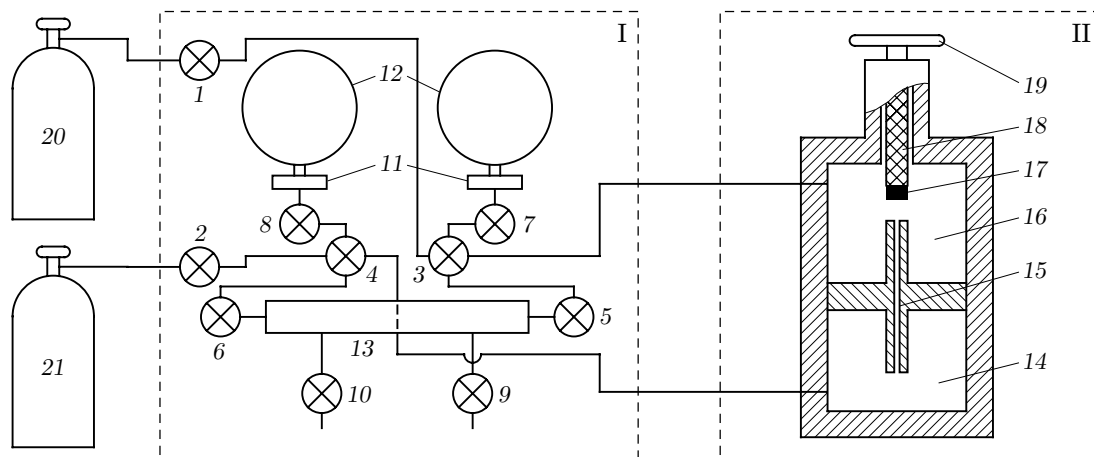


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

I — блок подготовки газов, II — диффузионный двухколбовый аппарат; 1–8 — краны; 9 — кран, соединенный с форвакуумным насосом; 10 — кран, соединенный с интерферометром или хроматографом; 11 — мембранные разделители; 12 — образцовые манометры; 13 — выравнивающая емкость; 14 — нижняя колба; 15 — диффузионный канал; 16 — верхняя колба; 17 — фторопластовая таблетка; 18 — шток; 19 — маховик; 20, 21 — баллоны с газами

регистрировалось время, соответствующее началу процесса. По окончании эксперимента колбы аппарата рассоединялись и фиксировалось время переноса. Состав газовых смесей в обеих колбах анализировался с помощью интерферометра ИТР-1 с погрешностью, равной 0,1 %, или хроматографа с погрешностью, равной 0,3 %. При заданных условиях измерения проводились несколько раз, и определялись средние значения концентраций компонентов. Затем диффузионный канал устанавливался под другим углом, и процедура повторялась. Во всех случаях время опыта составляло 17 мин.

Экспериментально полученные значения (концентрации продиффундировавших компонентов) нормировались на значения, вычисленные по формуле [2]

$$\frac{\Delta c_t}{\Delta c_0} = \exp \left[- \frac{(D_0)_{12} p_0 S t}{L p} \left(\frac{1}{V_B} + \frac{1}{V_H} \right) \right],$$

где Δc_0 , Δc_t — разность концентраций компонентов в начальный момент времени и в момент времени t соответственно; S — площадь диффузионного канала; t — время; $(D_0)_{12}$ — коэффициент взаимной диффузии исследуемой пары газов, который для смеси Ar–He принимался равным $(D_0)_{12} = 0,745 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, для смеси Ar–N₂ — $(D_0)_{12} = 0,211 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. На рис. 2 показана полученная таким образом зависимость отношения $\alpha = \Delta c_{exp} / \Delta c_{theor}$ от угла наклона φ для смеси Ar–N₂ (Δc_{exp} , Δc_{theor} — экспериментально и теоретически полученные разности концентраций смеси в верхней и нижней колбах через 17 мин после начала смешения).

На рис. 2 видно, что при угле наклона $\varphi = 0$ в рассматриваемой системе имеет место неустойчивость механического равновесия. Увеличение угла наклона приводит к снижению интенсивности конвективного течения. При угле наклона $\varphi^* \simeq 34^\circ$ смешение в системе становится диффузионным, о чем свидетельствует совпадение значений концентраций, полученных экспериментально и вычисленных в предположении, что изменение концентраций происходит за счет диффузии. Аналогичный характер смешения в рассматриваемых условиях наблюдался для бинарной смеси Ar–He.

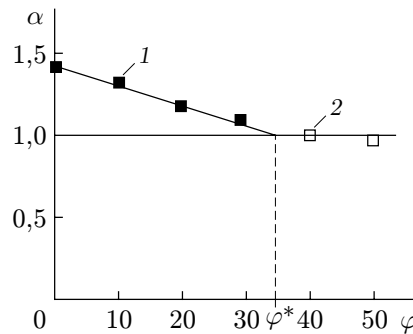


Рис. 2. Зависимость параметра α от угла наклона φ для смеси Ag-N₂ при $p = 0,584$ МПа, $T = 298$ К:

1 — неустойчивый режим, 2 — диффузионный режим

Зависимость критического числа Рэлея от моды возмущений и угла наклона канала в первом приближении имеет вид [10]

$$R_n = (n\pi)^4 / \cos^2 \varphi \quad (1)$$

($n = p/(kT)$ — концентрация компонентов; k — постоянная Больцмана).

С использованием экспериментальных данных, полученных для цилиндрического канала, выражение для критического числа Рэлея в соответствии с (1) записывается в виде

$$R_1(\varphi) = R_1(0) / \cos^2 \varphi,$$

где $R_1 = gr^4 n \Delta m \Delta c / (\rho_0 \langle \nu \rangle D_{12} L)$ — число Рэлея для рассматриваемой системы; g — ускорение свободного падения; r — радиус диффузионного канала; $\Delta m = m_1 - m_2$ — разность масс молекул компонентов; ρ_0 — средняя плотность смеси; $\langle \nu \rangle$ — средняя кинематическая вязкость; Δc — разность концентраций смеси в верхней и нижней колбах.

Поскольку в проведенных опытах переход от конвективного смешения к диффузионному происходит при $\varphi^* \approx 34^\circ$, по экспериментально полученному при этом угле наклона значению $R_1 = 115$ находим, что при $\varphi = 0$ $R_1 = 79$. Это значение хорошо согласуется с известным критическим значением числа Рэлея для вертикального бесконечного цилиндра $R_{cyl} \approx 67,95$ [10]. Таким образом, экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими, полученными в рамках теории устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жаврин Ю. И., Косов Н. Д., Белов С. М., Тарасов С. Б. Влияние давления на устойчивость диффузии в некоторых трехкомпонентных газовых смесях // Журн. техн. физики. 1984. Т. 54, № 5. С. 943–947.
2. Жаврин Ю. И., Косов В. Н. Влияние температуры на процесс диффузионной неустойчивости // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55, № 1. С. 92–97.
3. Жаврин Ю. И., Айткожаев А. З., Косов В. Н., Красиков С. А. Влияние вязкости на устойчивость диффузионного массопереноса в изотермических трехкомпонентных газовых системах // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21, вып. 6. С. 7–12.
4. Косов В. Н., Селезнев В. Д., Жаврин Ю. И. Эффект разделения компонентов при изотермическом смешении тройных газовых систем в условиях свободной конвекции // Журн. техн. физики. 1997. Т. 67, № 10. С. 133–140.
5. Жаврин Ю. И., Косов В. Н., Кульжанов Д. У. и др. Влияние частоты вращения диффузионного аппарата на процесс смешения в трехкомпонентной газовой смеси // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 3. С. 53–57.

6. **Жаврин Ю. И., Косов В. Н., Селезнев В. Д.** Аномальная гравитационная устойчивость механического равновесия при диффузионном смешении в изотермических трехкомпонентных газовых смесях // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2000. № 3. С. 185–190.
7. **Жаврин Ю. И., Косов В. Н.** Влияние длины канала на устойчивость диффузионного процесса в многокомпонентных газовых смесях // Вестн. АН КазССР. 1991. № 10. С. 63–65.
8. **Жаврин Ю. И., Косов В. Н.** Образование структур и концентрационная конвекция при изотермической диффузии в трехкомпонентных газовых смесях через переменное число каналов равной площади // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 10. С. 18–21.
9. **Ландау Л. Д.** Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986.
10. **Гершуни Г. З.** Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. М.: Наука, 1972.

*Поступила в редакцию 5/IV 2007 г.,
в окончательном варианте — 26/I 2009 г.*
