

ДИФфуЗИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И НЕКОТОРЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЮ

Ю.И. Жаврин, В.Н. Косов, М.К. Асембаева, И.В. Поярков, О.В. Федоренко
НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Приведены оценки влияния на диффузию в трехкомпонентных газовых смесях некоторых параметров, в частности, температуры, диаметра и длины диффузионного канала, приводящих к возникновению диффузионной неустойчивости. Оценки проводилась применительно к двухколбовому аппарату, и были связаны с анализом поведения чисел Релея, по которым можно было судить о границе перехода процесса смешения от молекулярной диффузии к конвекции. В результате исследования показано, какой из параметров вносит наиболее существенный вклад в возникновение диффузионной неустойчивости.

Одна из особенностей многокомпонентного массопереноса связана с изменением характера смешения компонентов, когда диффузионный процесс на молекулярном уровне при определенных условиях и параметрах переходит конвекцию [1-3]. Такая смена режима смешения получила название диффузионной неустойчивости (нестабильности) или неустойчивости механического равновесия.

Исследования этого явления в многокомпонентных газовых смесях начались в середине 60-х годов прошлого века [1,2,4] и небезуспешно продолжаются по настоящее время (см., например, [5-8]). Особо обращаем внимание читателя на явление, обнаруженное ранее, чем то, о котором идет речь в данной статье. Это явление получило название «двойной диффузии» [9]. Отметим, что физическая основа возникновения обоих явлений одна и та же и связана с диффузионными процессами. В нашем случае возникает чисто концентрационная конвекция, а при «двойной диффузии» тепловая конвекция.

Возникновение конвекции в диффундирующих многокомпонентных газовых системах, в которых изначально ожидают смешение на молекулярном уровне, может быть нарушено с изменением некоторых параметров, входящих в число Релея, которое выступает в качестве численной характеристики движения жидкости при решении задач конвективного теплообмена (см., например, [10,11])

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta_T \Delta T L^3}{\nu \chi}, \quad (1)$$

здесь $Gr = \frac{g\beta_T \Delta T L^3}{\nu^2}$ - число Грасгофа, $Pr = \frac{\nu}{\chi}$ - число Прандтля, g - ускорение силы

тяжести; $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ - коэффициент объемного расширения жидкости; ΔT - разность температур; ν - кинематическая вязкость жидкости; χ - коэффициент температуропроводности; ρ - плотность жидкости.

Для идеальных газов в случае концентрационной конвекции (в нашем случае диффузионной неустойчивости), протекающей в цилиндрическом канале формулу (1) можно представить в виде

$$R = \frac{g\beta \Delta x d^4}{\eta DL}, \quad (2)$$

где $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p,T}$; D - коэффициент диффузии; Δx - разность концентраций; η - динамическая вязкость смеси газов; d, L - диаметр и длина цилиндрического диффузионного канала соответственно.

Выражение (2) позволяет судить о характере смешения газов, если оно меньше критического, то смешение происходит на молекулярном уровне, а если больше, то течение газов обусловлено конвективными потоками. Из (2) видно, что явление диффузионной неустойчивости достаточно сложно в исследовании, так как зависит от многих условий и параметров, поэтому нами будет рассмотрено только влияние диаметра и длины диффузионного канала, а также температуры.

Влияние диаметра, длины диффузионного канала, а также температуры на возникновение неустойчивого процесса будет определяться соотношениями:

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Влияние диаметра} & \quad R = R_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^4, \\
 2. \text{ Влияние длины} & \quad R = R_0 \left(\frac{L_0}{L} \right), \\
 3. \text{ Влияние температуры} & \quad R = R_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^3.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В этих формулах обозначения физических величин, имеющих нижний индекс 0, относятся к значениям, когда диффундирующая система находится на границе устойчивого и неустойчивого состояний.

Таким образом, изменение значения критического числа Релея в зависимости от указанных параметров будет определяться выражением

$$R = R_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^4 \cdot \left(\frac{L_0}{L} \right) \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)^3. \tag{4}$$

Здесь $R_0 = 67,95$ – критическое число Релея для цилиндрического канала [11] при параметрах d_0, T_0, L_0 .

Из формулы (4) следует, чтобы перевести неустойчивую диффузию в молекулярную необходимо либо уменьшать диаметр диффузионного канала, либо увеличивать его длину, либо повысить температуру процесса.

Оценим влияние на критическое число Релея изменение диаметра диффузионного канала, в частности, изменив его критическое значение 2,65 мм всего на 0,15 мм. В результате расчета $R = 67,95 \cdot \left(\frac{2,5}{2,65} \right)^4 = 53,82$ получим число Релея равное 53,82, что на ~ 21% меньше критического значения, а это означает, что диффузионный процесс находится в области устойчивости (молекулярная диффузия).

Чтобы выяснить влияние длины канала решим обратную задачу. Для этого определим длину для полученного выше числа Релея, если неустойчивый процесс наблюдался при $L_0 = 70$ мм. Расчеты показали, что стабилизация процесса наступит при длине канала равной 88,4 мм.

Для учета влияния температуры еще раз обратимся к решению обратной задачи. Будем полагать, что неустойчивость наблюдается при $T_0 = 298$ К при критическом числе Релея равном 67,95. Расчеты показали, что стабилизация процесса (число Релея равно 53,82) наступит при температуре равной $T = 322$ К.

Из приведенных расчетов видно, что при изменениях параметров d, L, T (диаметра ~ на 5,7%, длины ~ на 26,2% и температуры ~ на 8%) изменение числа Релея меньше его критического значения примерно на 13%, а это уже существенное проявление устойчивого режима смешения. Из трех взятых параметров наибольший вклад в стабилизацию вносит изменение диаметра диффузионного канала, затем температуры и, наконец, длины канала. Отметим, что изменение диаметра всего на 0,05 мм (можно сопоставить с погрешностью при его измерении) также приводит к слабому проявлению неустойчивости. Об этом было сказано нами в одной из первых наших публикаций [12].

Историческая справка. В конце 80-х годов прошлого века по заданию ВНИЦ МВ Госстандарта СССР нами выполнялись измерения эффективных коэффициентов диффузии в некоторых трехкомпонентных системах. В частности, исследовалась диффузия в изотермических условиях бинарной смеси водорода с азотом в аммиак ($H_2 + N_2 - NH_3$) в зависимости от концентрации компонентов в бинарной смеси и давления [13]. Такой диффузионный процесс реализуется к колонне синтеза аммиака [14]. В зависимости от давления и концентрации компонентов в бинарной смеси диффузионный процесс в некоторых таких смесях будет неустойчивым.

Для того чтобы исключить возможность возникновения конвекции при экспериментах с неустойчивой системой диаметр диффузионного канала приходилось уменьшать, используя вместо каналов диаметрами 3,3 и 4,0 мм каналы в 1,5 мм [13]. Такой подход, когда диаметр диффузионного канала был значительно меньше критического (2,65 мм), позволил полностью исключить возникновение конвекции и, как следствие, ее влияние на молекулярный перенос компонентов. В результате были измерены эффективные коэффициенты диффузии в заданных интервалах концентраций. Единственный недостаток такого приема значительное увеличение продолжительности опытов.

Влияние температуры на характер смешения диффузионно неустойчивых газовых систем детально рассмотрено в [15] и оно также значительно, так как отношение для чисел Релея связаны с отношением температур с показателем в третьей степени. Увеличивая температуру, мы добиваемся стабилизации диффузионного процесса, однако такой прием не всегда можно реализовать в опытах, например, из-за конструктивных особенностей экспериментальных установок.

Влияние длины диффузионного канала на возникновение неустойчивого процесса проявляется в меньшей степени (см., например, [16]), но оно существует. Реализовать влияние длины достаточно сложно, так как это связано с полной реконструкцией диффузионного аппарата, поэтому его фактически не используют.

Таким образом, при необходимости измерения коэффициентов диффузии в неустойчивых многокомпонентных газовых смесях для стабилизации диффузионного процесса в первую очередь необходимо варьировать диаметром диффузионного канала, затем температурой опыта и в случае крайней необходимости длиной диффузионного канала.

Литература

1. Miller L., Mason E.A. Oscillation instabilities in multicomponent diffusion // Phys. Fluids. – 1966. – V. 9, N 4. – P. 711-721.
2. Miller L., Spurling T.H., Mason E.A. Instabilities in ternary diffusion // Phys. Fluids. – 1967. – V. 10, N 8. – P. 1809-1811.
3. Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Белов С.М., Семидоцкая Н.И. О применении метода эффективных коэффициентов к описанию диффузии в многокомпонентных газовых смесях при повышенных давлениях // Тепломассоперенос в жидкостях и газах. – Алма-Ата, 1982. – С. 3-12.
4. Ивакин Б.А., Суетин П.Е., Харин Г.С. О неустойчивости трехкомпонентной диффузии // Тр. Уральского политех. ин-та, 1969. - № 172. – С. 154-156.
5. Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Белов С.М., Тарасов С.Б. Влияние давления на устойчивость диффузии в некоторых трехкомпонентных газовых смесях // ЖТФ. – 1984. – Т. 54, № 5. – С. 943-947.
6. Жаврин Ю.И., Косов В.Н. Образование структур и концентрационная конвекция при изотермической диффузии трехкомпонентных газовых смесей через переменное число каналов равной площади // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19, вып. 10. – С. 18-21.

7. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Каратаева К.К. Экспериментальное определение границы монотонных возмущений при неустойчивости механического равновесия в трехкомпонентных газовых смесях // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 4. – С.80-83.

8. Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В., Поярков И.В. Диффузионное и конвективное смешение бинарной смеси пропана и двуокиси углерода с чистой закисью азота // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, вып. 7. – С.127-129.

9. Хапперт Г., Тернер Дж. Конвекция, обусловленная двойной диффузией // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. – М.: Мир, 1984. – С.413-453.

10. Джозеф Д. Устойчивость движения жидкости: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. - 301 с.

11. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.

12. Косов В.Н., Жаврин Ю.И. Экспериментальное исследование на диффузионную устойчивость некоторых трехкомпонентных газовых систем // Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат. – 1990. - № 2. – С. 66-69.

13. Айткожаев А.З., Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Курмакаев Ф.З. (Водород + азот) – аммиак. Водород-азот-метан-аммиак. Эффективные коэффициенты диффузии в диапазоне давлений 0,2...1,0 МПа при температуре 298 К // Таблицы РСД зарегистрированы во Всесоюзном научно-исследовательском центре по материалам и веществам Госстандарта 05.03.1992 г. под № ГСССД Р 421-92.

14. Кузнецов Л.Д., Дмитренко Л.М., Рабина П.Д., Соколинский Ю.А. Синтез аммиака / Под ред. Л.Д. Кузнецова. – М.: Химия, 1982. – 296 с.

15. Жаврин Ю.И., Косов В.Н. Влияние температуры на процесс диффузионной неустойчивости // ИФЖ. – 1988. – Т. 55, № 1. – С.92-97.

16. Жаврин Ю.И., Косов В.Н. Влияние длины канала на устойчивость диффузионного процесса в многокомпонентных газовых смесях // Вестник АН КазССР. – 1991. - № 10. – С. 63-65.

ДИФфуЗИЯЛЫҚ ОРНЫҚСЫЗДЫҚ ЖӘНЕ ОНЫҢ ПАЙДА БОЛУЫНА ӘКЕЛЕТІН КЕЙБІР КРИТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕР

Ю.И. Жаврин, В.Н. Косов, М.К. Әсембаева, И.В. Поярков, О.В. Федоренко

Үш компоненттік газ қоспасының диффузиясына әсер ететін кейбір параметрлер, оның ішінде, диффузиялық каналдың ұзындығы және диаметрі, температураның диффузиялық орнықсыздықтың пайда болуына әкелетіндігі қарастырылды. Араласу процесінің молекулалық диффузиядан конвекцияға өту шегін анықтауда Рэлей санын талдау мен екі колбалық аппараттың қолданылуы негізінде бағалау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде, диффузиялық орнықсыздықтың пайда болуына параметрлердің қайсысы аса қажет екендігі көрсетілді.

DIFFUSIVE INSTABILITY AND SOME CRITICAL PARAMETERS RESULTING IN ITS OCCURRENCE

Yu.I. Zhavrin, V.N. Kosov, M.K. Asembaeva, I.V. Poyarkov, O.V. Fedorenko

The influence estimations of some parameters particularly temperature, diameter and length of a diffusion channel on the diffusion in ternary gas mixtures reducing to the onset of diffusion instability are given. Estimations were carried out by the two flask apparatus and were connected with the behavioral analyses of Rayleigh numbers, which permit to judge the boundary transition of mixing process from the molecular diffusion to the convection. In the result of study is shown what parameters make the most contribution to the formation of diffusive instability.