

УДК 533.15

Поярков И.В., Жаврин Ю.И., Федоренко О.В.

Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

АНОМАЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Розглянуто аномальне розділення газової суміші у стаціонарних умовах. Отримано коефіцієнт розділення як функцію потоку. Показано можливість керування процесом збагачення. Визначено критичну концентрацію виділеної речовини, наприклад фреону-12, нижче якої виділення неможливе.

Рассмотрено аномальное разделение газовой смеси в стационарных условиях. Получен коэффициент разделения как функция потока. Показана возможность управления процессом обогащения. Определена критическая концентрация выделяемого вещества, например фреона-12, ниже которой выделение невозможно.

Abstract: An anomalous separation of gaseous mixture under stationary conditions is considered. The separation coefficient as a function of flow is obtained. Possibility of control over enrichment process is shown. Critical concentration of isolated substance, for example freon-12, below which the extraction impossible is defined.

C_{iI}, C_{iII} – концентрация i -го компонента в верхней I и нижней II колбах;

C_{He}, C_{R12} – концентрации гелия и фреона-12;

$C_{кр}$ – критическая концентрация “запирающая”;

D_{ij} – коэффициент взаимной диффузии;

L – длина канала;

n – число молекул в единице объема;

q – среднеобъемный поток;

q_{He}, q_{R12} – парциальный расход гелия и фреона –12;

χ – коэффициент разделения.

Экспериментальное изучение диффузии в тройных газовых смесях при изотермических условиях показало, что при определенных условиях (давление, температура, концентрация, геометрические размеры диффузионного канала) имеет место неустойчивость механического равновесия с последующим возникновением в поле силы тяжести концентрационной конвекции [1-3]. Наложение конвективного потока на молекулярный перенос компонентов в тройных смесях может привести как к переносу компонента в отсутствие его собственного градиента и по градиенту концентрации, так и к отсутствию переноса компонента при отличном от нуля градиенте концентрации. Эти особенности в многокомпонентных системах получили название эффектов Тура и в литературе достаточно изучены [4]. Добавление третьего компонента при определенных условиях приводит в изотермическом случае к возникновению стратификации газовой смеси по плотности с последующим появлением в поле силы тяжести конвективных потоков, во мно-

го раз превосходящих гидродинамическое течение, вызванное диффузионным бароэффектом. В этом случае наложение на молекулярный перенос конвективных течений приводит к неустойчивому диффузионному процессу (явление свободной аномальной гравитационной конвекции), возникающему в трехкомпонентных смесях при устойчивой стратификации плотности.

Явление диффузионной неустойчивости представляет собой интерес не только для теоретического изучения, но и для приложений в ряде областей науки и техники.

Идея использования режима диффузионной неустойчивости для разделения многокомпонентной смеси газов сформировалась после того, как это явление в основном было изучено экспериментально и отчасти теоретически [5, 6].

Сравнительный анализ результатов полученных в [7, 8] 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 различием в коэффициентах диффузии, когда тяжелый компонент проникает через канал быстрее легкого.

В работе [6] был получен коэффициент разделения через концентрации тяжелого компонента в нижней и верхней колбах. Однако если коэффициент разделения представить как функцию потока, то при изменении суммарного потока можно регулировать количество выделяемого вещества. А также, зная поток, мы можем перейти к геометрии канала.

Эксперименты по изучению разделения газовой смеси при многокомпонентной диффузии были

проведены при комнатной температуре и атмосферном давлении на смеси He(1)+R₁₂(2)-Ar(3), при этом бинарная смесь гелия и фреона-12 размещалась в верхнем канале, а чистый аргон – в нижнем.

Когда легкая смесь гелия и фреона-12 находится над тяжелым аргонном, то гелий быстрее пройдет в нижнюю колбу, чем и создаст диффузионный бароэффект, то есть вызовет среднечисловой гидродинамический поток в сторону смеси гелия и фреона-12. При определенных условиях фреон-12 будет не в состоянии пройти вниз и произойдет его запираение.

На рис. 1 представлена зависимость концентрации “запираения” фреона – 12 от среднечислового потока, а также теоретическая граница “запираения”, рассчитанная для устойчивого режима диффузии по формуле:

$$q_{R12} = q \frac{C_{2I} - C_{2II} \exp\left(\frac{q\varphi}{nD_{12}D_{23}}L\right)}{1 - \exp\left(\frac{q\varphi}{nD_{12}D_{23}}L\right) + \frac{\xi D_{13}}{(D_{23}D_{12} - \varphi D_{13}) \left[\exp\left(\frac{q\varphi}{nD_{12}D_{23}}L\right) - \exp\left(\frac{q}{nD_{13}}L\right) \right]}}, \quad (1)$$

где:

$$\varphi = D_{12} - (D_{12} - D_{23}) \frac{C_{1I} - C_{1II} \exp\left(\frac{q}{nD_{13}}L\right)}{1 - \exp\left(\frac{q}{nD_{13}}L\right)},$$

$$\xi = (D_{23} - D_{12}) \frac{C_{1II} - C_{1I}}{1 - \exp\left(\frac{q}{nD_{13}}L\right)}.$$

Из условия равенства среднеобъемного потока $q_{R12} = 0,0110^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Эта формула получена с учетом произвольных значений среднеобъемного потока q .

Из рис. 1 видно, что при наличии конвекции для «запираения» фреона-12 нужны потоки, в десятки раз превышающие потоки «запираения» для устойчивой диффузии. По-видимому, это связано с тем фактом, что в случае устойчивой диффузии скорость потока фреона-12 имеет порядок $D_{23} \frac{C_{R12}}{L}$, а при конвекции она резко увеличивается.

Для случая, когда бинарная смесь находится сверху, а чистый компонент внизу, можно фиксировать обогащение газовой смеси тяжелым компонентом при ее проникновении через капилляр. Это обогащение можно характеризовать коэффициентом разделения, который рассчитывается по формуле

$$\chi = \frac{q_{R12} C_{He}}{q_{He} C_{R12}}. \quad (2)$$

С использованием опытных данных по парциальным расходам и концентрациям компонентов по формуле 2 были рассчитаны коэффициенты разделения, которые представлены на рис. 2. Нанесенные на этом рисунке линии получены путем обработки совокупности опытных данных методом наименьших квадратов.

Согласно рис. 2, коэффициент разделения сравнительно слабо (10%) зависит от объемного потока смеси q в исследованном диапазоне (до $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$), однако меняется в десять раз при изменении концентрации фреона-12 от 4,9% до 19,4%.

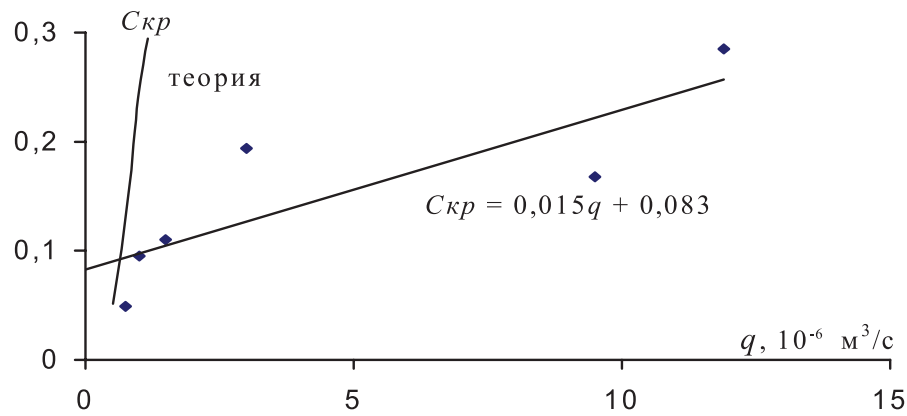


Рис. 1. Зависимость критической концентрации “запирания” от потока. \blacklozenge — точки полученные на основе экспериментальных данных.

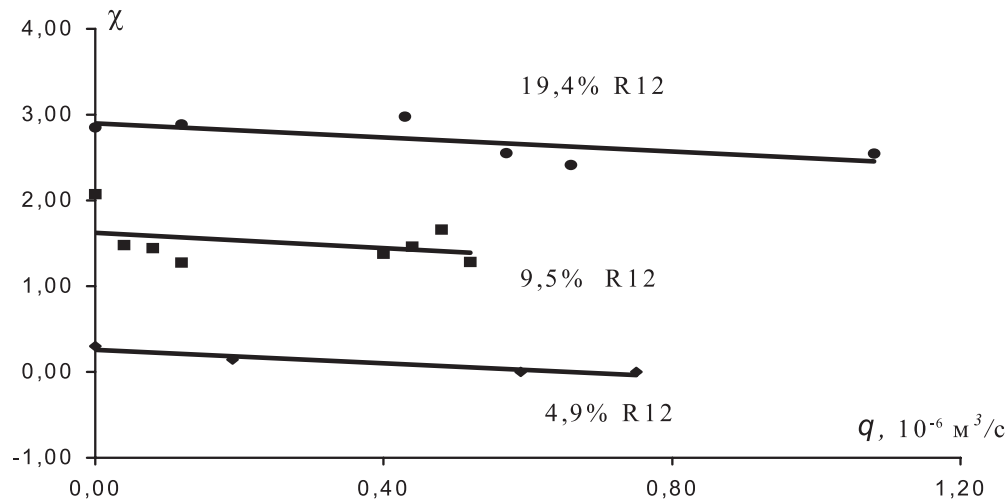


Рис. 2. Зависимость обогащения газовой смеси тяжелым компонентом от величины среднечислового потока. Экспериментальные точки: для концентрации фреона-12 в верхнем канале: \blacksquare — 4,9%, \blacktriangle — 9,5%, \bullet — 19,4%.

Если зафиксировать среднечисловой поток, то можно получить зависимость обогащения газовой смеси тяжелым компонентом от концентрации для различных потоков.

Так, на рис. 3 показана такая зависимость для равного нулю среднечислового потока. Аппроксимировав опытные точки методом наименьших квадратов для логарифмической зависимости, можно найти точку пересечения с осью концентрации фреона-12. Проведя данную операцию для значений потоков $(0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, можно получить зависимость критической концентрации запирания фреона-12 ($C_{кр}$, $\chi = 0$) от среднечислового потока, которая представлена на рис. 4.

Сравнивая результаты рис. 1 и рис. 4, можно заметить, что на рис. 4 удалось более детально и точно рассмотреть зависимость $C_{кр}(q)$ в области малых значений среднечислового потока. При отрицательных значениях q , когда поток смеси “помогает” фреону-12 проходить в нижний канал, $C_{кр}$, как и следовало ожидать, имеет тенденцию к затуханию, то есть к исчезновению эффекта “запирания”.

Выводы

1. По измеренным парциальным потокам компонентов найден коэффициент разделения гелия и фреона-12 как функции перепада кон-

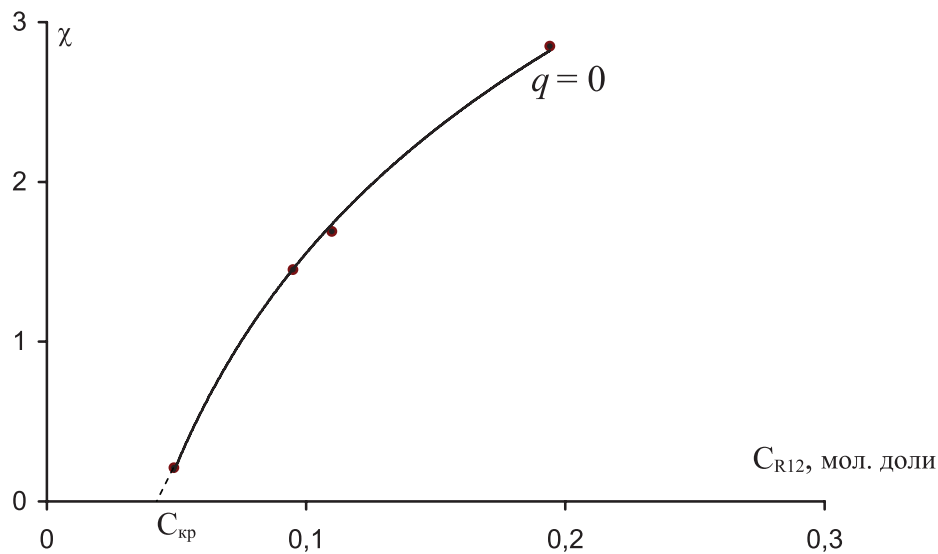


Рис. 3. Зависимость χ от концентрации при $q = 0$.

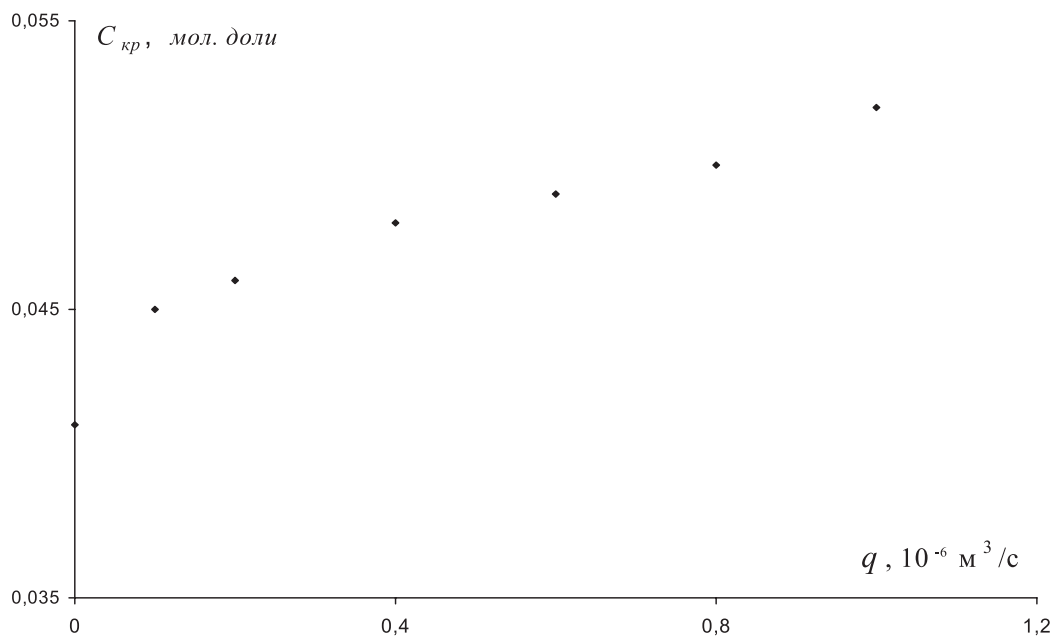


Рис. 4. Зависимость концентрации “запирания” от среднечислового потока.

центрации и объемного потока смеси и показана возможность его изменения в десятки раз.

2. Из проведенных исследований можно дать рекомендации по созданию установок обогащения газовых смесей, а именно: при одних значениях числового потока коэффициент разделения будет максимальным, а при других значениях будет отсутствовать поток одного из компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. О диффузионной неустойчивости в трехкомпонентных газовых смесях // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 21. – С. 127-135.
2. Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. Колебательная и монотонная неустойчивость на границе перехода “молекулярная диффузия –

концентрационная конвекция” в трехкомпонентных газовых смесях // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 2. – С. 313-320.

3. Косов В.Н., Селезнев В.Д. Аномальная диффузионная неустойчивость многокомпонентных изотермических газовых смесей // Алматы – Екатеринбург: Принт, 1998. – 180 с.

4. Toor H.L. Diffusion in three-component gas mixture // A. I. Ch. E. J. – 1957. – V. 3, № 2. – P. 198-207.

5. Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. Эффект разделения компонентов при изотермическом смешении тройных газовых систем в условиях свободной конвекции // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 10. – С. 139-140.

6. Жаврин Ю.И., Селезнев В.Д., Косов В.Н., Красиков С.А. Разделение многокомпонентных газовых смесей в режиме диффузионной неустойчивости // Вестник ТГТУ. – 1998. – Т. 4, № 2-3. – С. 297-306.

7. 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.

8. Жаврин Ю.И., Косов В.Н. Влияние температуры на процесс диффузионной неустойчивости // ИФЖ. – 1988. – Т. 55, № 2. – С. 92-97.

Получено 11.07.2005 г.