

03.1

## Влияние угла наклона канала на конвективное смещение, вызванное неустойчивостью механического равновесия тройной газовой смеси при изотермической диффузии

© М.К. Асембаева<sup>1</sup>, В.Н. Косов<sup>1,2,¶</sup>, С.А. Красиков<sup>1</sup>, О.В. Федоренко<sup>1</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан<sup>2</sup> Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

¶ E-mail: kosov\_vlad\_nik@list.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2019 г.

В окончательной редакции 28 июня 2019 г.

Принято к публикации 8 июля 2019 г.

Экспериментально изучены особенности конвективного режима, возникшего за счет неустойчивости механического равновесия тройной газовой смеси гелий–аргон–азот при изотермической диффузии. Рассматривается влияние угла наклона диффузионного канала на интенсивность конвективных течений. Проведены измерения интенсивности парциального переноса компонентов в наклонном канале при повышенных давлениях. Обнаружена нелинейная зависимость скорости смешения компонентов от угла наклона. Установлено, что наблюдаемый нетипичный для диффузии перенос компонентов возможен при определенном составе газовой смеси.

**Ключевые слова:** диффузия, конвекция, угол наклона, неустойчивость механического равновесия, газовая смесь.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.21.48464.17952

Взаимодействие диффузионных и конвективных механизмов при межфазном теплопереносе реализуется в различных технологиях по ректификации и очистке газовых многокомпонентных смесей [1]. Интенсивность смешения во многом определяется как молекулярным, так и конвективным механизмом. Однако необходимо учитывать, что диффузия паров (газов) может привести к потере механического равновесия даже в неподвижных средах, что определяет возникновение концентрационной гравитационной конвекции, которая заметно меняет скорости смешения (испарения) компонентов системы [2,3] и влияет на прогнозируемый массоперенос. В опытах [2–6] по изучению изотермической диффузии в тройных смесях в вертикальных каналах были зарегистрированы синергетические эффекты, связанные со значительным увеличением парциальной скорости смешения в зависимости от давления и исходных составов исследуемых систем.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение многокомпонентного смешения в наклонном канале для тройных газовых смесей при различных давлениях и постоянной температуре.

Для решения поставленной задачи использовалась смесь гелий–аргон–азот. Опыты проводились на устройстве, изображенном на рис. 1, которое представляло собой модифицированный вариант двухколбового аппарата [7]. Диффузионная ячейка представляла собой две колбы приблизительно равного объема ( $V_u = 185 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ,  $V_l = 186 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ), которые соединялись прямоугольным вертикальным каналом разме-

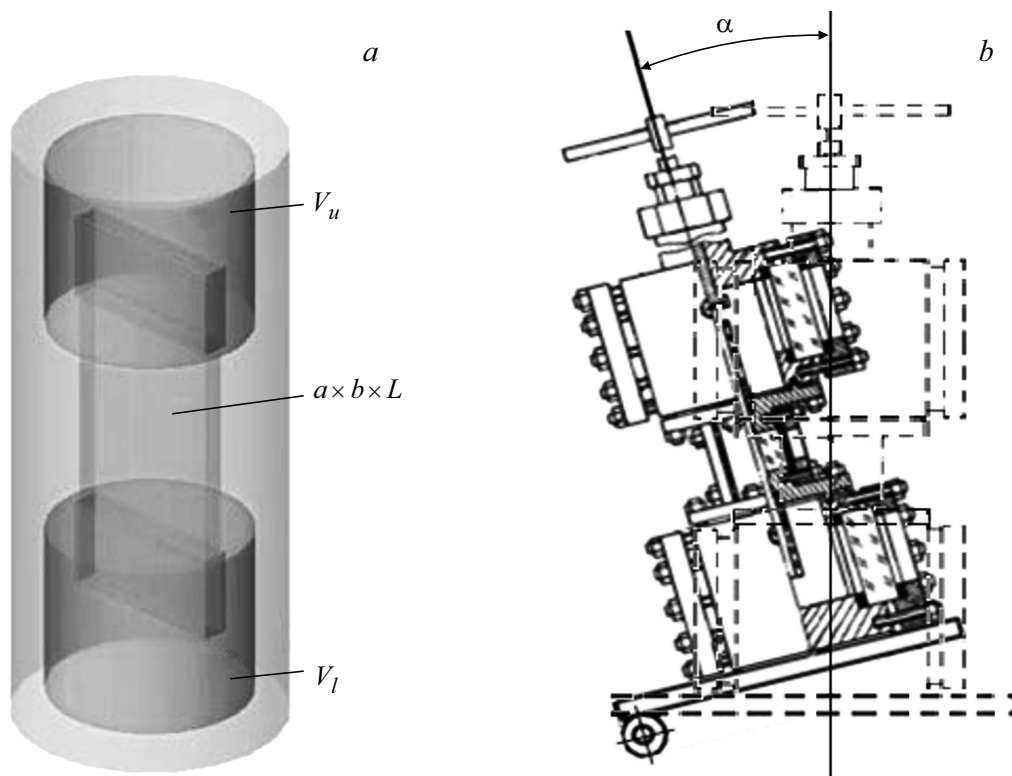
ром  $a \times b \times L = 30 \times 6 \times 160 \text{ мм}$  (рис. 1, а). Диффузионная ячейка была закреплена на устройстве наклона (рис. 1, б), что позволяло проводить опыты при различных углах по отношению к вертикальной оси в диапазоне  $\alpha = 0–90^\circ$ . Температура во всех опытах была постоянной и равной  $T = 298.0 \text{ К}$ .

Методика проведения эксперимента предполагала следующие процедуры. Верхняя колба объемом  $V_u$  заполнялась смесью гелия и аргона, нижняя колба объемом  $V_l$  — соответственно азотом. После фиксации давления опыта и угла наклона с помощью специального устройства соединяющий колбы канал открывался. При этом регистрировалось время начала процесса смешения. По окончании опыта канал перекрывался и отмечалось время завершения смешения. Анализ газовых смесей из каждой колбы осуществлялся хроматографическим способом, особенностью которого являлось непосредственное измерение концентрации для аргона и азота. Концентрация для гелия могла быть получена из условия сохранения числа частиц

$$\sum_{i=1}^3 c_i = 1,$$

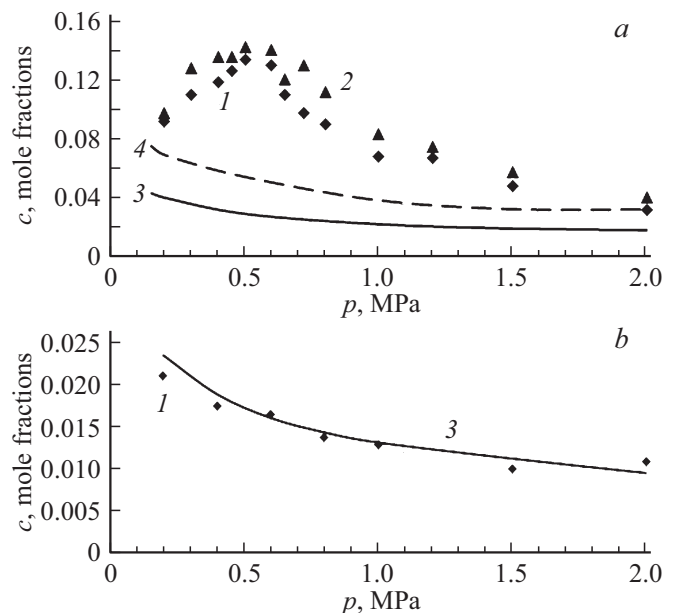
где  $c_i$  — концентрация  $i$ -го компонента.

Опыт повторялся несколько раз и посредством усреднения определялось конкретное значение концентрации компонентов. Во всех экспериментах при любых составах и давлениях плотность смеси гелия и аргона в верхней колбе была меньше, чем плотность азота, который располагался в нижней колбе.

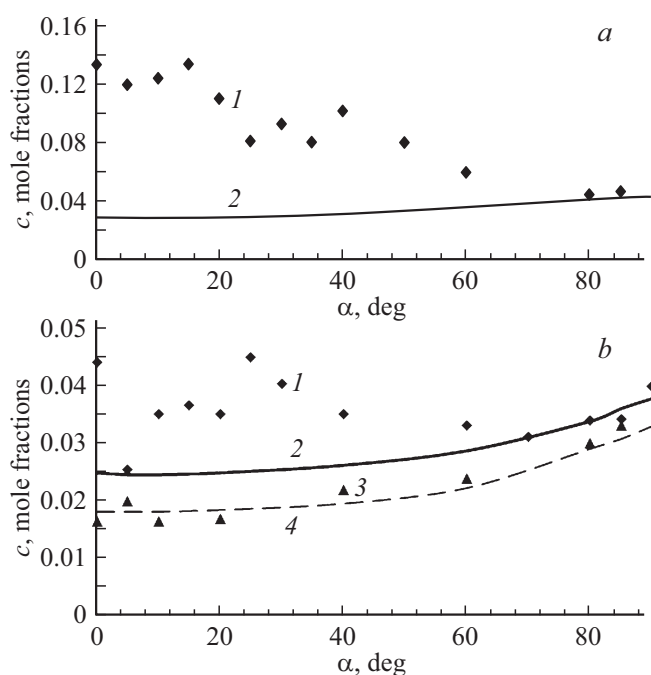


**Рис. 1.** Диффузионная ячейка двухколбового аппарата. *a* — виртуальная 3D-модель двухколбового устройства, *b* — двухколбовый аппарат при различных углах наклона.

На рис. 2 приведены концентрации переноса аргона и азота при различных давлениях для вертикальной ориентации канала. В системе  $(0.43\text{He} + 0.57\text{Ar})\text{-N}_2$  (числа перед химическим элементом соответствуют исходному составу компонента в смеси) прослеживается нелинейная зависимость концентраций от давления (рис. 2, *a*). Наблюдается существенное расхождение между экспериментальными результатами и вычисленными в предположении диффузии. Вычисления для заданных условий опыта и геометрических характеристик канала осуществлялись с помощью расчетного модуля Flow Simulation пакета Solid Works [8]. При расчетах принимались во внимание процессы диффузии, смешения, искажения диффузионного фронта и перетекания более тяжелого газа в легкий в зависимости от угла наклона. Приведенные зависимости не типичны для диффузии, при которой наблюдается уменьшение интенсивности смешения с ростом давления. Не соответствует диффузионному представлению смешения и зарегистрированный максимум по интенсивности переноса аргона и азота. Его возникновение можно объяснить неустойчивостью механического равновесия смеси с последующим возникновением конвективных течений [6]. Уменьшение доли аргона в исходном составе смеси влияет на повышение устойчивости системы. При определенном составе в смеси



**Рис. 2.** Концентрации компонентов при различных давлениях в вертикальном плоском канале при  $T = 298.0\text{ K}$  для систем  $(0.43\text{He} + 0.57\text{Ar})\text{-N}_2$  (*a*) и  $(0.66\text{He} + 0.34\text{Ar})\text{-N}_2$  (*b*). Экспериментальные точки: 1 — аргон, 2 — азот. Сплошная (3) и штриховая (4) линии соответствуют вычисленным в предположении диффузии данным для аргона и азота.



**Рис. 3.** Концентрации аргона для различных углов наклона диффузионного канала. *a* — экспериментальные (1) и вычисленные в предположении диффузии (2) данные для системы  $(0.43\text{He} + 0.57\text{Ar})-\text{N}_2$  при  $p = 0.34$  МПа и  $T = 298.0$  К, *b* — экспериментальные (1, 3) и вычисленные в предположении диффузии (2, 4) данные для системы  $(0.58\text{He} + 0.42\text{Ar})-\text{N}_2$  при  $p = 0.33$  МПа и  $T = 298.0$  К (1, 2) и для системы  $(0.66\text{He} + 0.34\text{Ar})-\text{N}_2$  при  $p = 0.4$  МПа и  $T = 298.0$  К (3, 4).

реализуются только диффузионные механизмы переноса (рис. 2, *b*). Опытные данные в пределах погрешности эксперимента совпадают с вычисленными в предположении диффузии. Аналогичная картина наблюдается и для азота. Чтобы исключить перегруженность рисунков подобными зависимостями, здесь и далее концентрационные распределения по азоту приводиться не будут.

На рис. 3, *a* представлены концентрации аргона при различных углах наклона диффузионного канала и давлении  $p = 0.34$  МПа. При максимальном содержании аргона в исследуемой смеси регистрируется сложный колебательный процесс (рис. 3, *a*). Экспериментальные данные значительно превышают вычисленные, что свидетельствует о наличии конвективных механизмов в суммарном массопереносе. Несмотря на общую тенденцию уменьшения интенсивности конвективного переноса при увеличении наклона диффузионного канала, при значениях угла  $\alpha = 15$  и  $40^\circ$  отмечаются максимумы. При углах  $\alpha \geq 45^\circ$  конвективная составляющая суммарного переноса начинает снижаться и при углах  $\alpha \geq 80^\circ$  в системе наблюдается диффузия. В этом случае экспериментальные значения совпадают с вычисленными.

С уменьшением содержания аргона в смеси сложный характер массопереноса сохраняется (рис. 3, *b*). Однако интенсивность конвективных течений слабее, чем для предыдущего случая. На это указывают существенно меньшие расхождения между экспериментальными и вычисленными данными. При угле наклона  $\alpha = 25^\circ$  отмечается максимум переноса. Затем система релаксирует к устойчивому диффузионному состоянию, которое наступает при угле  $\alpha \geq 70^\circ$ . Наконец, можно подобрать такой исходный состав смеси:  $(0.66\text{He} + 0.34\text{Ar})-\text{N}_2$ , при котором для любых углов наклона будет иметь место диффузионное смешение. Совпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдается при любых углах наклона диффузионного канала (рис. 3, *b*).

Таким образом, в наклонных каналах наблюдаются сложные конвективные режимы. При определенных углах наклона регистрируются нелинейные значения интенсивности переноса, которые не типичны для диффузии. Если в тройной смеси реализуется диффузионное смешение, то оно таковым и останется при любых углах наклона. Другим фактором, влияющим на возникновение сложных режимов смешения, является давление. Результаты эксперимента показывают, что угол наклона диффузионного канала и давление могут являться управляющими параметрами конвективного переноса, вызванного неустойчивостью механического равновесия изотермической тройной газовой смеси.

### Финансирование работы

Работа поддержана грантом Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта № AP05132427 „Реализация принципа конвективных сепараторов в наклонных каналах“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. Wiley, 2006. 999 p.
- [2] Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В 10. С. 139–140.
- [3] Дильман В.В., Липатов Д.А., Лотхов В.А., Каминский В.А. // Теорет. основы хим. технологии. 2005. Т. 39. № 6. С. 600–606.
- [4] Смирнов А.Ю., Каширская О.А. // Успехи в химии и хим. технологии. 2008. Т. 22. № 3(83). С. 57–60.
- [5] Жаврин Ю.И., Молдабекова М.С., Поляков И.В., Мукамеденкызы В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 15. С. 62–68.

- [6] Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Жаврин Ю.И., Федоренко О.В. // ЖФХ. 2017. Т. 91. № 6. С. 931–936.
- [7] Шашков А.Г., Золотухина А.Ф., Василенко А.Б. Фактор термодиффузии газовых смесей. Минск: Беларус. наука, 2007. 239 с.
- [8] Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.