

Асембаева М.К.,
Молдабекова М.С.,
Федоренко О.В.

**Экспериментальное
исследование устойчивости
механического равновесия
многокомпонентных газовых
смесей, содержащих
углеводороды**

Asembaeva M.K.,
Moldabekova M.S.,
Fedorenko O.V.

**Experimental study of the
stability of mechanical
equilibrium of multicomponent
gas mixtures containing
hydrocarbons**

Асембаева М.К.,
Молдабекова М.С.,
Федоренко О.В.

**Көмірсутектер қосылатын
газдар қоспасындағы
механикалық тепе-теңдіктің
орнықтылығы эксперименттік
зерттеу**

Методом балластного газа экспериментально изучена неустойчивость механического равновесия в газовых смесях, содержащих углеводороды. Эксперименты проводились со следующими газовыми смесями: $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700 \text{ He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$ и $0,4250 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5750 \text{ He} - 0,4260 \text{ N}_2\text{O} + 0,5740 \text{ CH}_4$. в диапазоне давлений от 1,0 до 10,0 МПа при $T = 298,0 \text{ K}$. Проведенные исследования показали, что на интенсивность возникающих при диффузионном смешении конвективных течений влияет природа газа-разбавителя.

Ключевые слова: газы, смеси, газ-разбавитель, балластный газ, диффузия, концентрация, диффузионная неустойчивость, устойчивость механического равновесия, углеводороды.

The instability of mechanical equilibrium in gas mixtures containing hydrocarbons has been studied experimentally by means of the method of ballast gas. The experiments were performed in the pressure range from 1.0 to 10.0 MPa at $T = 298.0 \text{ K}$ with the following gas mixtures: $0.4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.5700 \text{ He} - 0.4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.5800 \text{ CH}_4$ and $0.4250 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.5750 \text{ He} - 0.4260 \text{ N}_2\text{O} + 0.5740 \text{ CH}_4$. Studies have shown that the nature of the diluent gas affects the intensity of convective flows arising under the diffusion mixing.

Key words: gases, mixtures, diluent gas, ballast gas, diffusion, concentration, diffusion instability, stability of mechanical equilibrium, hydrocarbons.

Көмірсутектер қосылатын газдар қоспасындағы механикалық орнықтылық балласты газ әдісімен экспериментте зерттелді. Қысымы 1,0 мен 10,0 МПа аралығында $T = 298,0 \text{ K}$ температурада мына: $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700 \text{ He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$ және $0,4250 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5750 \text{ He} - 0,4260 \text{ N}_2\text{O} + 0,5740 \text{ CH}_4$ газдар қоспаларымен эксперименттер жүргізілді. Диффузиялық араласу кезінде пайда болатын конвективтік ағындардың қарқындылығына газ қосылғыштың табиғаты әсер ететінін жүргізілген эксперименттер көрсетті.

Түйін сөздер: газдар, қоспа, газ-сұйылтқыш (балласты газ), диффузия, концентрация, диффузиялық орнықтылық, механикалық тепе-теңдіктің орнықтылығы, көмірсутектер.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ
МЕХАНИЧЕСКОГО
РАВНОВЕСИЯ МНОГО-
КОМПОНЕНТНЫХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ,
СОДЕРЖАЩИХ
УГЛЕВОДОРОДЫ**

Используя балластный газ как индикатор при многокомпонентной диффузии, можно определить собственно молекулярный перенос компонентов и выделить гидродинамическую составляющую, с помощью которой можно исследовать некоторые сопутствующие эффекты: бароэффект, противодиффузия, диффузионный затвор и, наконец, неустойчивое протекание диффузии, когда на молекулярный перенос накладываются мощные конвективные потоки, существенным образом искажающие процесс смешения. Важнейшим из этих эффектов является неустойчивость механического равновесия, приводящая к возникновению в поле силы тяжести гравитационной концентрационной конвекции. Для некоторых диффундирующих систем она возникает при изначально устойчивой стратификации плотности. Из экспериментальных результатов следует, что при неустойчивом диффузионном процессе концентрация балластного газа возрастает в нижней колбе диффузионного аппарата (при обычной диффузии, наоборот, в верхней колбе), т.е. проявляется одна из особенностей многокомпонентного массопереноса, так называемая, «противодиффузия» или «обратная диффузия» [1-3].

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование на устойчивость диффузионного процесса для газовых систем, содержащих в качестве основных газов метан и гелий. Основные компоненты разбавлялись в одном случае аргоном, а в другом случае газы разбавители N_2O и C_3H_8 имеют примерно одинаковые теплофизические свойства (плотность, вязкость) и по своим диффузионным способностям, по отношению к основным диффундирующим газам, мало отличаются друг от друга. Даже, если при всех прочих равных условиях начальный градиент балластного газа равен нулю, и эти два компонента имеют одинаковые собственные градиенты в противоположных направлениях, возможно влияние их на состояние механического равновесия при диффузионном смешении газов.

Эксперименты проводились в двухколбовом диффузионном аппарате с объемами колб $V_1 = V_2 = 62,0 \text{ см}^3$. Колбы соединялись диффузионным каналом длиной $L = 0,613 \text{ см}$ и диаметром $d = 0,04 \text{ см}$. Схема экспериментальной установки приведена на

рисунке 1. Давление в опытах изменялось от 1,0 до 10,0 МПа, а температура была постоянной и равной 298,0 К. Продолжительность экспериментов составляла 3600 с. Анализ смеси газов до диффузии проводился на интерферометре ИТР-1, а после диффузии – на хроматографе ХРОМ-4. Погрешность концентрации для интерферометрического метода анализа составляла 1%, а хроматографического – 3% [4].

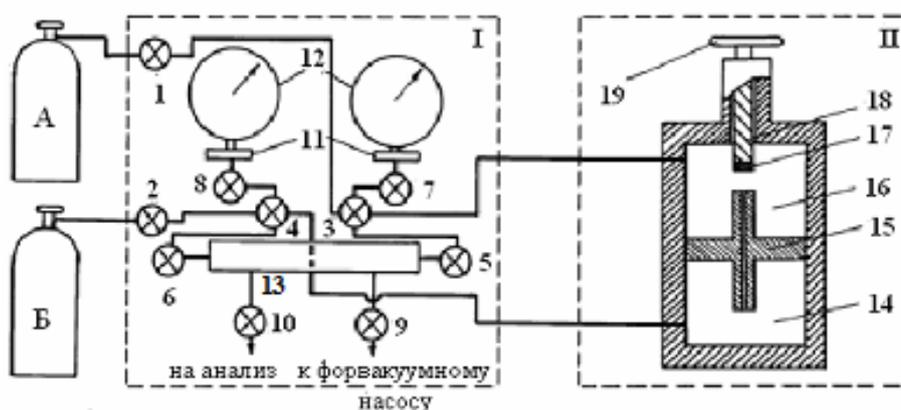
Экспериментальная установка, на которой проводились опыты, состояла из двух частей. Первая часть – это блок подготовки газов, состоящий из баллонов А и Б с газами, кранов 1-10, мембранных разделителей 11, образцовых манометров 12, выравнивающей емкости 13. Вторая основная часть – сам двухколбовый аппарат, помещенный в термостат.

Диффузионные колбы 14 и 16 выполнены в виде цилиндрических сосудов, соединенных каналом 15. Концы канала размещались по центру колб, и тогда в этом случае распределение концентрации диффундировавших компонентов сферически симметрично относительно центра объемов. Прибор располагался вертикально в рабочей камере термостата. Перекрытие канала осуществляется в верхней колбе фторопластовой таблеткой 17, которая крепится к болту и может перемещаться только поступательно в вертикальном направлении. Перемещение бол-

та обеспечивает вороток 19, расположенный в трубке.

Конструкция перекрывающего устройства не нарушает постоянства объемов диффузионных камер в начале и конце опыта (в момент открытия и закрытия), надежна и удобна в эксплуатации при различных температурах и давлениях.

Методика работы на диффузионной установке следующая: заполнение объемов 14 и 16 (см. рис. 1) исследуемыми газами начинается после установления заданной температуры опыта в диффузионном приборе, при этом капилляр 16 перекрыт, т.е. колбы 14 и 16 разобщены. Перед заполнением колбы 14 и 16 многократно откачиваются форвакуумным насосом с последующей промывкой исследуемой смесью газов из баллонов А и Б. Давление в колбах контролируется образцовыми манометрами 12, атмосферное давление – манометром-барометром МБП. Заполнение каждой колбы проводили до некоторого избыточного давления (составляющего 3-5% от давления опыта), затем через краны 5 и 6 обе колбы соединялись с выравнивающей емкостью, что позволяло выравнивать давление в диффузионных колбах 14 и 16. Излишки газов при выравнивании давлений в колбах стравливались в атмосферу. Подводящие трубки и выравнивающий объем были такими, что полностью исключали переход газов из одной колбы в другую.



А, Б – баллоны с газами; 1-10 – краны; 11 – мембранные разделители; 12 – образцовые манометры; 13 – выравнивающая емкость; 14 – нижняя колба; 15 – диффузионный канал; 16 – верхняя колба; 17 – фторопластовая таблетка; 19 – вороток.

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

После тщательного выравнивания давлений в колбах 14 и 16 в момент открытия диффузионного канала 15 фиксировалось начало опыта, и

одновременно включался секундомер. По окончании эксперимента колбы аппарата опять раз-
единялись, и отмечалось время процесса. Ана-

лиз газов, как из верхней, так и из нижней колб прибора, проводился на хроматографе.

На рисунке 2 представлена зависимость безразмерного парциального параметра α для основного газа метана в зависимости от давления в системе $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700 \text{ He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$ (здесь и далее концентрации компонентов приведены в мольных долях), а также для сравнения приведены данные для хорошо изученной системы $0,5143 \text{ Ar} + 0,4857 \text{ He} - 0,5148 \text{ Ar} + 0,4852 \text{ CH}_4$ [5]. Параметр α рассчитывался по формуле

$$\alpha_i = \frac{c_{i\text{exp}}}{c_{i\text{theor}}}, \quad (1)$$

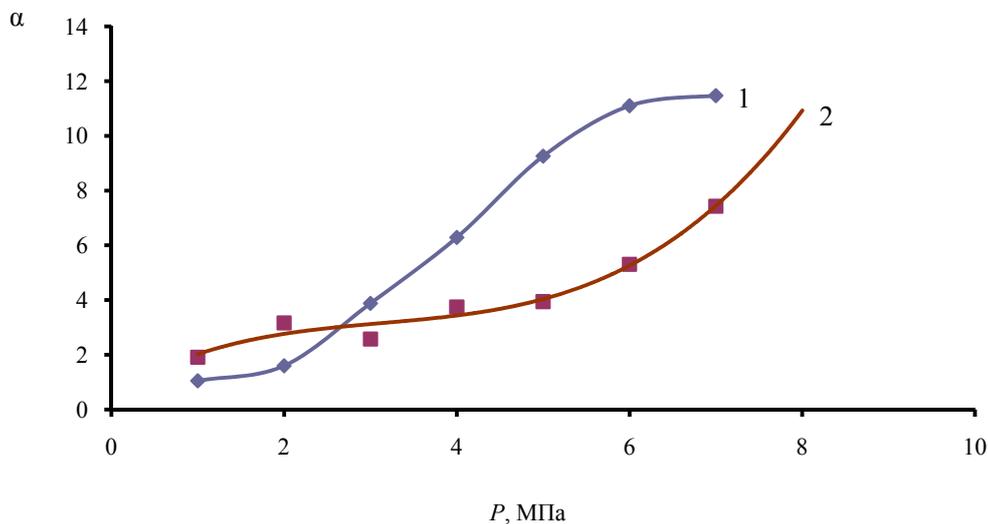
где $c_{i\text{exp}}$ – экспериментальное значение концентрации i -го компонента ($i = 1, 2, 3$); $c_{i\text{theor}}$ – расчет концентраций по уравнениям Стефана-Максвелла в предположении диффузии. Если $\alpha = 1$ для всех газов, то можно говорить, что перенос компонентов происходит по законам молекулярной диффузии, а при $\alpha > 1$, хотя бы для одного компонента, о присутствии конвективных потоков. Как видно из рисунка 2, поведение параметра α для метана в системах $0,5143 \text{ Ar} + 0,4857 \text{ He} - 0,5148 \text{ Ar} + 0,4852 \text{ CH}_4$ и $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700$

$\text{He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$ свидетельствует о неустойчивом протекании процесса.

Из рисунка 2 также видно, что в этих системах, начиная с 3,0 МПа, наблюдается рост безразмерного параметра α . В системе с газом-разбавителем аргоном рост параметра α более интенсивен, чем в системе с метаном. Такое поведение обусловлено тем, что коэффициент взаимной диффузии аргона в основные компоненты больше, чем у пропана.

Проведенные эксперименты также показали, что при одних и тех же условиях эксперимента в системе с аргоном перенос концентрации метана в нижней колбе возрастает быстрее, а в системе с пропаном концентрация метана растёт медленнее. Таким образом, данные рисунка 2 свидетельствуют о том что, интенсивность неустойчивого диффузионного процесс зависит от природы газа разбавителя.

Дальнейшее экспериментальное исследование на устойчивость диффузионного процесса было проведено для четырехкомпонентной газовой системы, составленной из основных газов гелия и метана, разбавленных не одним и тем же газом, а разными газами, которые по своим свойствам (плотность, вязкость) были примерно одинаковы, например, закись азота и пропан.



1 – система $0,5143 \text{ Ar} + 0,4857 \text{ He} - 0,5148 \text{ Ar} + 0,4852 \text{ CH}_4$;
 2 – система $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700 \text{ He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$.

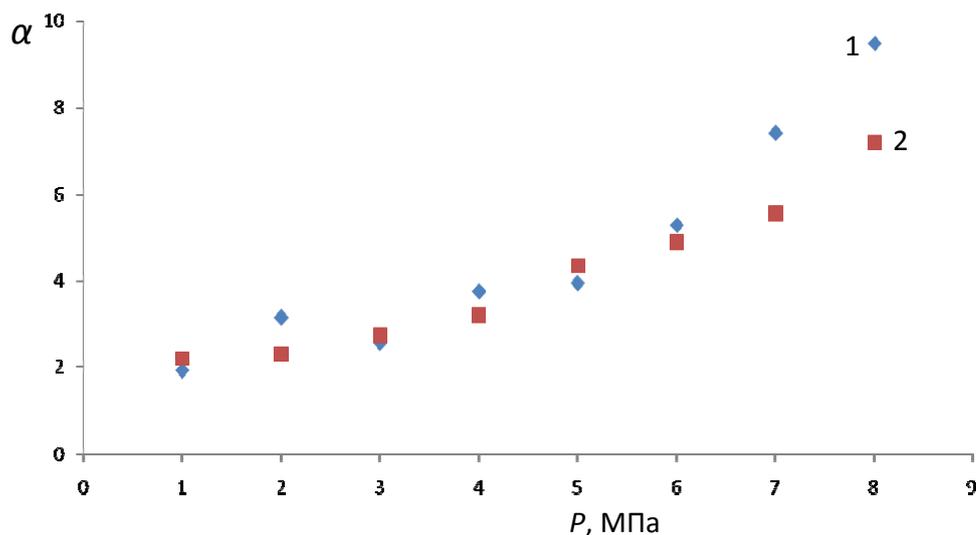
Рисунок 2 – Зависимость парциального параметра α для CH_4 от давления

Из рисунка 3 видно что, безразмерный параметр α для метана при всех значениях давления больше 1, т.е. рассматриваемые смеси изначально

но диффузионно неустойчивые. На начальной стадии процесса смешения в области давлений от 1,0 до 6,0 МПа значения параметра α для

обеих систем практически не отличаются друг от друга. Начиная с давления 6,0 МПа наблюдается более интенсивный рост параметра α для системы $0,4250 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5750 \text{ He} - 0,4260 \text{ N}_2\text{O} + 0,5740 \text{ CH}_4$. Такое поведение обусловлено нелинейной зависимостью N_2O и C_3H_8 от давления. Сравнение значений плотностей закиси азота

и пропана в зависимости от давления показало [6], что до давления 0,65 МПа более тяжелым является закись азота, а при более высоких значениях давления плотность пропана больше. Поэтому, в рассматриваемой области давления перенос N_2O происходит более интенсивно, чем перенос C_3H_8 .



1 – система $0,4250 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5750 \text{ He} - 0,4260 \text{ N}_2\text{O} + 0,5740 \text{ CH}_4$;
 2 – система $0,4300 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5700 \text{ He} - 0,4200 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,5800 \text{ CH}_4$.

Рисунок 3 – Зависимость парциального параметр α для CH_4 в зависимости от давления

Экспериментальные данные рисунка 3 свидетельствуют о том что, если основные газы разбавляются близкими по диффузионным свойствам газами, то интенсивность конвективного переноса зависит от того, какой из газов раньше проявляет свои реальные свойства, т.е. порядок в расположении изучаемых газов по плотности существенно нелинейно зависит от давления.

Таким образом, проведенные исследования показали, что

в трехкомпонентной газовой системе $\text{He} + \text{Ar} - \text{CH}_4 + \text{Ar}$ замена балластного газа аргона на пропан приводит к уменьшению интенсивности

неустойчивого диффузионного процесс;

если основные газы He и CH_4 разбавляются разными газами-разбавителями, но имеющими близкие диффузионные свойства, например N_2O и C_3H_8 , то интенсивность возникающих конвективных течений зависит от реальных свойств газов-разбавителей, в частности, от симметрии молекул, нелинейной зависимости плотности газов и коэффициентов диффузии от давления.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК (грант номер 3482/ГФ4).

Литература

- 1 Тоог Н.Л. Diffusion in three-component gas mixture // A.I.Ch.E Journal. – 1957. – Vol. 3, No. 2. – P. 198-207.
- 2 Айтхожаев А.З., Жаврин Ю.И., Косов Н.Д. О переносе газа-разбавителя в трехкомпонентной системе в случае неустойчивого диффузионного процесса // Изв. АН КазССР, серия физ.-мат.– 1991. – № 6. – С. 88-92.
- 3 Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Поярков И.В. О методике проведения экспериментов по диффузии в многокомпонентных газовых смесях // Вестник КазНПУ, серия физ. – 2002. – № 2 (13). – С. 122-126.
- 4 Молдабекова М.С., Поярков И.В., Асембаева М.К., Бекетбаева М. Экспериментальное исследование системы $0.425 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.575 \text{ He} - 0.426 \text{ N}_2\text{O} + 0.574 \text{ CH}_4$ // Вестник КазНПУ, серия физ. – 2011. – № 2 (37). – С. 3-6.

- 5 Косов В.Н., Жаврин Ю.И. Экспериментальное исследование на диффузионную устойчивость некоторых изотермических трехкомпонентных газовых систем // Изв. АН КазССР, серия физ.-мат. – 1990. – № 2. – С. 66-69.
- 6 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. – 708 с.

References

- 1 Toor H.L. Diffusion in three-component gas mixture // A.I.Ch.E Journal. – 1957. – Vol. 3, No. 2. – P. 198-207.
- 2 Aytkozhaev A.Z., Zhavrin Yu.I., Kosov N.D. O perenose gaza-razbavitelya v trekhkomponentnoy sisteme v sluchae neustoychivogo diffuzionnogo protessa // Izv. AN KazSSR, seriya fiz.-mat. – 1991. – No. 6. – S. 88-92.
- 3 Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Poyarkov I.V. O metodike provedeniya eksperimentov po diffuzii v mnogokomponentnykh gazovykh smesyakh // Vestnik KazNU, seriya fiz. – 2002. – No. 2 (13). – S. 122-126.
- 4 Moldabekova M.S., Poyarkov I.V., Asembaeva M.K., Beketaeva M. Eksperimentalnoe issledovanie sistemy $0.425 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.575 \text{ He} - 0.426 \text{ N}_2\text{O} + 0.574 \text{ CH}_4$ // Vestnik KazNU, seriya fiz. – 2011. – No. 2 (37). – S. 3-6.
- 5 Kosov V.N., Zhavrin Yu.I. Eksperimentalnoe issledovanie na diffuzionnyuyu ustoyichivost nekotorykh izotermicheskikh trekhkomponentnykh gazovykh sistem // Izv. AN KazSSR, seriya fiz.-mat. – 1990. – No. 2. – S. 66-69.
- 6 Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey. – М.: Fizmatgiz, 1963. – 708 s.