

*Эбтикар Сайд Сарвар,
преподаватель
Кабульский Университет
Афганистан, г. Кабул*

*Садит Руяа
преподаватель
Кабульский Университет
Афганистан, г. Кабул
e-mail: alawi1709@gmail.com*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА-РАЗБАВИТЕЛЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ПО ДИФФУЗИОННЫЙ КАНАЛ

Аннотация: Циркуляция разбавляющего газа в выхлопном канале тесно связана с многокомпонентными системами, Потому что он используется для применения в науке и технике, особенно для создания многокомпонентных систем газовых смесей. Целью данного исследования является изучение роли газа-разбавителя при перемешивании через диффузионный канал в многокомпонентной системе, а также изучение областей механических возмущений в трехкомпонентной газовой смеси с газом-разбавителем. В этой статье, в соответствии с условиями и правилами циркуляции газа-разбавителя по диффузионному каналу, приводится обзор графических результатов, теоретических, математических и технических достижений в области механического равновесия. Обсуждается циркуляция разбавляющего газа в многокомпонентной системе с расчетными параметрами, которые влияют на характеристики переноса разбавленного газа и явления циркуляции массы. В результате изучается эффективность аргона, азота, гелия, кислорода и углекислого газа в циркуляции сжиженного нефтяного газа.

Ключевые слова: Газ-разбавитель, многокомпонентная система, диффузионный канал, давление, углеводород, циркуляция.

*Ebtekar Sayed Sarwar,
teacher
Kabul University
Afghanistan, Kabul*

*Sadid Roya
teacher*

STUDY OF CIRCULATION OF A DILUENT GAS IN A MULTICOMPONENT SYSTEM THROUGH A DIFFUSION CHANNEL

Abstract: *The circulation of the dilution gas in the exhaust duct is closely related to multicomponent systems, because it is used for applications in science and technology, especially for creating multicomponent gas mixture systems. The aim of this study is to study the role of a diluent gas during mixing through a diffusion channel in a multicomponent system, as well as to study the areas of mechanical disturbances in a three-component gas mixture with a diluent gas. In this article, in accordance with the conditions and rules for the circulation of the diluent gas through the diffusion channel, an overview of the graphical results, theoretical, mathematical and technical advances in the field of mechanical equilibrium is provided. Circulation of the dilution gas in a multicomponent system with design parameters that affect the transport characteristics of the diluted gas and mass circulation phenomena. As a result, the effectiveness of argon, nitrogen, helium, oxygen and carbon dioxide in the circulation of liquefied petroleum gas is studied.*

Key words: Diluent gas, multicomponent system, diffusion channel, pressure, hydrocarbon, circulation.

Введение

Исследование различных природных и технологических процессов, обусловленных особенностями многокомпонентного массопереноса по канала (горение топлива, снятие тепловых напряжений пульсаций давления при отсутствии вынужденной конвекции в реакторных устройствах, регазификация природного газа) позволяет изучить влияние различных условий протекания процесса на характеристики конечных продуктов разделения [2].

Описание массообменного по канал процесса включает не только молекулярную диффузию, но также и перенос массы путем конвекции. В отличие от обширных исследований диффузии в бинарных и тройных смесях при устойчивой стратификации плотности практически отсутствуют «диффузия - конвекция», когда нарушается состояние механического-равновесия в системе. В этом случае процесс многокомпонентной диффузии может сопровождаться

эффектами, по канал которые не наблюдаются при взаимной диффузии. Выяснение смены режима диффузионного массопереноса по канал на конвективный и тех факторов, которые определяют этот переход, играют определяющую роль при проектировании промышленных процессов, зависящих от массообмена, когда имеют дело с несколькими потоками газов [5].

Вследствие этого исследуется вопрос о теоретическом и экспериментальном исследовании характерных особенностей, проявляющихся не только при переходе системы из области канал молекулярной диффузии в область концентрационной гравитационной конвекции, но и конвективных течений, связанных с неустойчивостью механического равновесия [1].

циркуляции газа-разбавителя по диффузионный канал

В работах был исследован в режиме диффузионной неустойчивости массоперенос в трехкомпонентных системах, когда два основных газа в равных пропорциях разбавляются третьим - балластным газом, градиент концентрации которого равен нулю. Из полученных этими авторами результатов следовало, что при неустойчивом диффузионном процессе наблюдается циркуляция газа-разбавителя по диффузионному каналу, то есть переноса его из одной колбы диффузионного аппарата в другую с последующим возвращением в первую[8].

В газовой системе $H_2 + C_3H_8 - CH_4 + N_2O$ во время неустойчивого диффузионного процесса авторы [80] наблюдали циркуляцию балластного газа, которая влияла на характер процесса смешения. При давлении $1,07 \text{ МПа}$ и $T = 298,0 \text{ К}$ было обнаружено, что в начальный момент времени процесс смешения подчинялся законам молекулярной диффузии, затем при увеличении продолжительности опыта в некоторой момент времени этот процесс нарушался, появлялся конвективный перенос. Дальнейшее увеличение времени эксперимента показало преобладание диффузии над конвекцией. Из этих результатов исследования следовало, что циркуляция балластного газа позволяет поддерживать неустойчивой характер диффузии в течение длительного времени.

Пропан и закись азота выполняли роль балластного газа, так как по своим диффузионным свойствам они близки – одинаковые молекулярные веса, равные коэффициенты вязкости, совпадающие коэффициенты диффузии. Проанализируем более подробно результаты этих исследований. Для этого на одном рисунке отобразим две системы, рисунок 22 [7].

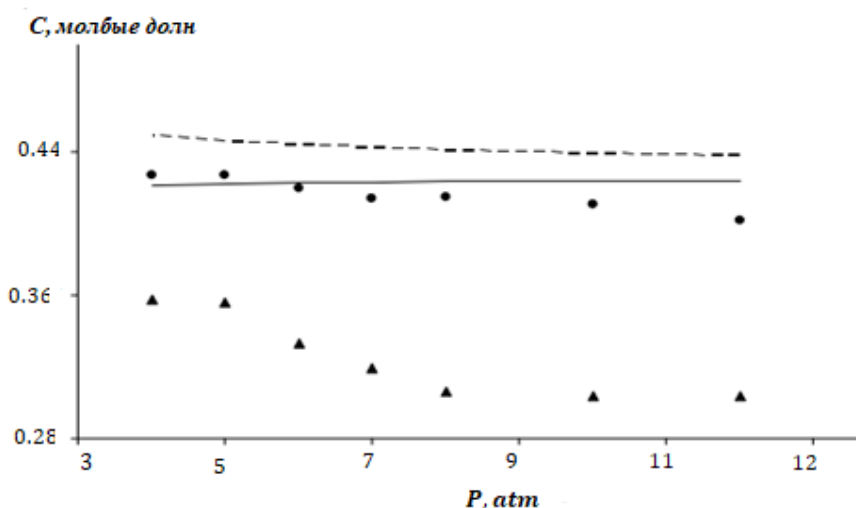


Рисунок 1 - Изменение концентрации C_3H_8 в верхней колбе аппарат [3].

точки эксперимент, линии - расчет в предположении диффузии: пунктирная линия: ● система $0,430He + 0,570C_3H_8 - 0,420CH_4 + 0,580C_3H_8$ сплошная линия: ● система $0,425He + 0,575C_3H_8 - 0,426CH_4 + 0,574N_2O$.

Анализ результатов исследования показывает, что до давления $5,0атм$ интенсивность конвективного массопереноса постоянна, то есть наблюдается направленное движение балластного газа, а, следовательно, и всей смеси из верхней колбы диффузионного аппарата в нижнюю. Начиная с давления $5,0атм$ и до $8,0атм$ рисунок 1, видим уменьшение концентрации пропана в верхней колбе в системе с балластным газом C_3H_8, N_2O . При этом же давлении для системы, где газ-разбавитель C_3H_8 , концентрация пропана остается практически постоянной. Это свидетельствует о циркуляционном движении пропана из верхней колбы в нижнюю и обратно. При давлении более $8,0атм$ опять наблюдаем стабилизацию конвективного

массопереноса. Повторяющийся конвективный поток, но большей интенсивности, имеет направление из верхней колбы в нижнюю. В таблице 4 представлены концентрации перешедших компонентов по истечении одного часа опыта.

Таблица 1 - Количество перешедших компонентов в газовых смесях при неустойчивом диффузионном процессе при $T = 298,0\text{K}$ и $P = 10\text{атм}$ [4].

Система	Концентрация компонентов после диффузии			
	He	C_3H_8	CH_4	N_2O
1. $0,430He + 0,570C_3H_8 - 0,420CH_4 + 0,580C_3H_8$	0	0	0	-
2. $0,425He + 0,575C_3H_8 - 0,426CH_4 + 0,574N_2O$	5260	1110	192	0
	5142	2025	177	2410

таблицы 1- видно, что в первой системе ($0,430He + 0,570C_3H_8 - 0,420CH_4 + 0,580C_3H_8$).

чистый перенос концентрации пропана в нижней колбе возрос всего на 0,054 мольных долей, а концентрация закиси азота во второй системе ($0,425He + 0,575C_3H_8 - 0,426CH_4 + 0,574N_2O$) изменилась почти на 0,24 мольных долей.

Таким образом, если отождествить пропан в верхней колбе первой системы с закисью азота в этой же колбе второй системы, то количество пропана примерно - 0,1965 мольных долей, то есть эта разность концентраций весьма существенна и ее можно отнести к циркуляционному потоку, организуемому в диффузионном канале.

Таким образом, исследование системы $He + C_3H_8 - CH_4 + N_2O$, показало, что при неустойчивом диффузионном процессе перенос закиси азота значительно превышает перенос пропана при диффузии смеси гелия и пропана в смесь метана и пропана, так как в этой системе невозможно разделить потоки пропана в противоположных направлениях. Это говорит о том, что в системе $He + C_3H_8 - CH_4 + C_3H_8$ во время неустойчивого процесса газ-разбавитель (пропан) циркулирует по диффузионному каналу из одной колбы в другую, непрерывно

участвуя в процессе. В нижнюю колбу пропан переносится конвективным потоком, плотность которого больше средней плотности находящейся там смеси, а в верхнюю - потоком по плотности меньше средней плотности смеси. Из полученных данных следует, что циркуляция балластного газа поддерживает нестабильный характер диффузии в течение продолжительного времени. При этом происходит как бы самоорганизация (самовоспроизведение) процесса[6].

Анализируя экспериментальные исследования диффузионной неустойчивости, можно сделать вывод, что как и само явление аномальной диффузии, так и основные закономерности и особенности этого процесса были обнаружены в диффузионных каналах цилиндрического сечения. Поэтому целесообразным является теоретическое исследование неустойчивости механического равновесия в ограниченном цилиндрическом канале с массонепроницаемыми стенками. Задача данного экспериментального исследования состоит в том, чтобы определить области диффузионной неустойчивости в системах с балластным газом.

$$\nabla^2 u + R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2 = 0, \quad (1)$$

$$\tau_{11} \nabla^2 c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \nabla^2 c_2 + u = 0, \quad (2)$$

$$\frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \nabla^2 c_1 + \nabla^2 c_2 + u = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} u = 0. \quad (4)$$

Как видно из рисунка 23, в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , ось z направлена по оси цилиндра вверх, рассматриваемая задача имеет частные решения, при которых скорость \vec{u} и концентрации компонентов c_i зависят от угла φ по гармоническому закону:

$$u(r, \varphi) = u^0(r) \cos \varphi, \quad (5)$$

$$c_i = C_i^0(r) \cos \varphi, \quad (6)$$

$$c_i = C_i^0(r) \cos \varphi, \quad (7)$$

где мода возмущений $-n$ принимает целочисленные значения $n = 0, 1, 2, \dots$

Подставляя (7) в (6), получим уравнения для радиальных функций u^0 и C_i^0 [5].

$$u^{0//} + \frac{1}{r} u^{0//} - \frac{n^2}{r^2} u^0 + R_1 \tau_{11} C_2^0 = 0, \quad (8)$$

$$u_0 + \tau_{11} \left(C_1^{0//} + \frac{1}{r} C_1^{0//} - \frac{n^2}{r^2} C_1^0 \right) + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \left(C_2^{0//} + \frac{1}{r} C_2^{0//} - \frac{n^2}{r^2} C_2^0 \right) = 0, \quad (9)$$

$$u^0 + \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \left(C_1^{0//} + \frac{1}{r} C_1^{0//} - \frac{n^2}{r^2} C_1^0 \right) + C_2^{0//} + \frac{1}{r} C_2^{0//} - \frac{n^2}{r^2} C_2^0 = 0. \quad (10)$$

Исключая

$$(D^2 - R)u^0 = 0, \quad (11)$$

где

$$D = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{n^2}{r^2}, \quad (12)$$

$$R = R_1 \tau_{11} K_1 + R_2 K_2, \quad (13)$$

$$K_1 = \frac{\left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right)}{\left(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21} \right)}, K_2 = \frac{\left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right)}{\left(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21} \right)}. \quad (14)$$

Общее решение (9) имеет вид:

$$u^0 = a_1 J_n(\gamma r) + a_2 I_n(\gamma r), \quad (15)$$

здесь j_n и I_n – функции Бесселя 1-го рода для действительного и мнимого аргумента, соот-

ветственно; α_1 и α_2 произвольные постоянные, а

$$\gamma = (R_1 \tau_{11} K_1 + R_2 K_2)^{1/4}. \quad (16)$$

Концентрации компонентов c_i найдем из уравнений:

$$\nabla^2 C_i^0 = -u^0 K_i, i = 1, 2. \quad (17)$$

При вычислении концентраций следует учитывать решение лишь неоднородного уравнения, получающегося при подстановке выражения (60) в (61). В результате получаем:

$$C_i^0 = \frac{K_i}{\gamma^2} (a_1 J_n(\gamma r) - a_2 I_n(\gamma r)) \quad (18)$$

Произвольные постоянные α_1 и α_2 потока вещества на границах канала:

$$u = 0, \frac{\partial c_i}{\partial r} = 0, i = 1, 2, n, \text{pur} = \pm 1, \quad (19)$$

найдем при равенстве нулю скорости из однородной системы уравнений

$$a_1 J_n(\gamma) + a_2 I_n(\gamma) = 0, \quad (20)$$

$$a_1 J'_n(\gamma) - a_2 I'_n(\gamma) = 0. \quad (21)$$

Условие существования нетривиального решения этой системы состоит в обращении в нуль ее определителя. Раскрывая определитель, получим характеристическое соотношение, определяющее спектр критических значений числа Рэлея:

$$\frac{J'_n(\gamma)}{J_n(\gamma)} + \frac{I'_n(\gamma)}{I_n(\gamma)} = 0. \quad (22)$$

Определяя постоянные α_1 и α_2 из системы (5), найдем профили скорости и концентраций, соответствующие критическим движениям:

$$u = \left[\frac{J_n(\gamma r)}{J_n(\gamma)} - \frac{I_n(\gamma r)}{I_n(\gamma)} \right] \cos n\phi, \quad (23)$$

$$c_i = \frac{K_i}{\gamma^2} \left[\frac{J_n(\gamma r)}{J_n(\gamma)} + \frac{I_n(\gamma r)}{I_n(\gamma)} \right] \cos n\phi. \quad (24)$$

Критические числа Рэлея определяются как корни трансцендентного уравнения (6). При фиксированном номере (азимутальная составляющая структуры движения) уравнение (6) имеет бесконечную последовательность корней пронумерованных в порядке возрастания. Соответствующие движения отличаются радиальной структурой: более высокому значению верхнего индекса отвечает

большее число узлов скорости и концентрации [5]. Любое критическое число Рэлея для движений рассматриваемого вида имеет два индекса:

$$R_n^{(l)} = \left[\gamma_n^{(l)} \right]^4. \text{ Численное решение уравнения (6) для } l = 1 \text{ дает следующие корни:}$$

$$\gamma_1 = 2,871; \gamma_2 = 4,259; \gamma_3 = 5,541; \gamma_4 = 6,6771; \dots \quad (25)$$

и, соответственно, критические числа Рэлея:

$$R_1 = 67,95; R_2 = 329,1; R_3 = 942,5; R_4 = 2102. \quad (26)$$

Для нахождения линии монотонных возмущений умножим уравнение системы (5) на s с учетом профилей скорости (6) и концентрации (7), проинтегрируем полученное выражение по сечению цилиндра:

$$\int u \nabla^2 u dS + R_1 \tau_{11} \int u c_1 dS + R_2 \int u c_2 dS = 0. \quad (27)$$

Положение линии монотонной неустойчивости для представлено на рисунке 24, в качестве сравнения на этом же рисунке представлено расположение линии монотонной неустойчивости для плоского вертикального слоя [8].

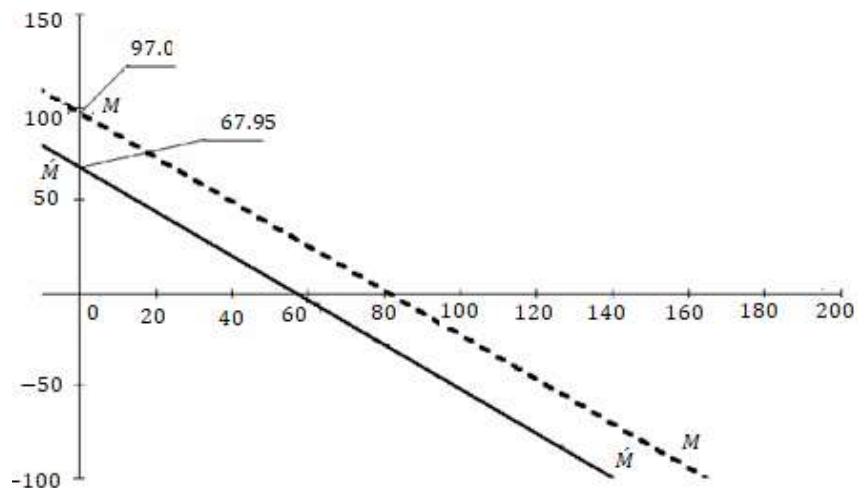


Рисунок 2 – Линии монотонной неустойчивости для системы [8].

Как видно из рисунка 24, смена формы бесконечного канала с плоской на цилиндрическую с одновременным учетом массонепроницаемости смещает линию устойчивости. При этом критическое число Рэлея, представляющее собой значение R_1 при $R_2 = 0$ меняет свое численное значение с 97 на 67,95. Таким образом, учет

массонепроницаемости цилиндрической формы канала уточняет положение линии монотонной неустойчивости на 30%. Ограниченный массопроницаемый цилиндрический канал. Рассмотрим вопрос о влиянии ограниченности канала на параметры возникновения диффузионной неустойчивости [1].

В соответствии с рисунком 25, в диффузионном канале конечной длины существенны трехмерные движения, поэтому при аппроксимации скорости следует считать все компоненты вектора \vec{u} отличными от нуля.

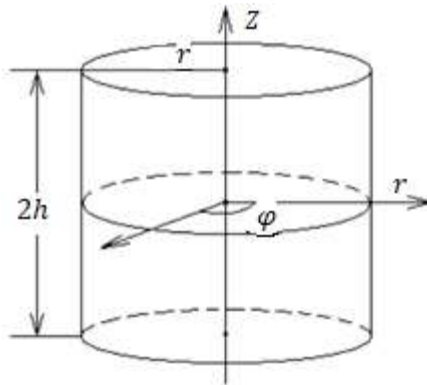


Рисунок 3 – Ограниченный цилиндрический канал[8].

Рассматривая в цилиндрической системе координат периодические по φ движения и удовлетворяя условиям на твердых ограниченных границах $z = \pm h$ ($h = L/d$) – геометрический параметр, характеризующий устойчивость; d – диаметр канала, L – длина канала), можно записать аппроксимацию скорости в виде [2]:

$$u_z = \frac{1}{4}(h^2 - z^2)^2 u(r) \cos \varphi, \quad (28)$$

$$u_r = Z(h^2 - z^2)^2 v(r) \cos \varphi, \quad (29)$$

$$u_\varphi = Z(h^2 - z^2)^2 \omega(r) \sin \varphi, \quad (30)$$

($n = 0, 1, 2, \dots$).

Радиальные функции u, v, ω должны обращаться в нуль на твердой боковой поверхности цилиндра (при $r=1$). Из уравнения непрерывности следует соотношение, которое связывает эти функции:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv) + \frac{n}{r} \omega - u = 0, \quad (31)$$

причем

$$u = \frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n, \quad (32)$$

$$v = -\frac{1}{kJ_n(k)} \left[J_n'(kr) - J_n'(k)r^{n+1} \right],$$

$$\omega = \frac{n}{k^2 J_n(k)} \left[\frac{1}{r} J_n(kr) - J_n(k)r^{n+1} \right], \quad (33)$$

где $J_n(kr)$ – функция Бесселя n -го порядка от вещественного аргумента, а параметр k находится из уравнения:

$$kJ_n''(k) = (n+1)J_n'(k). \quad (34)$$

Полагая для первых двух уравнений концентрационной конвекции в безразмерных величинах (34), что $\frac{\partial c_i}{\partial t} = 0$, найдем концентрации компонентов из уравнения:

$\nabla^2 c_i = -u^0 K_i$, $i = 1, 2$. Будем считать, что $c_i = f_i(r, z) \cos \varphi$, тогда

$$\frac{\partial^2 f_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f_i}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} f_i + \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{4} \left[\frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n \right] (h^2 - z^2)^2 K_i. \quad (35)$$

Считая, что на торцевых поверхностях исчезают возмущения концентраций, на торцах диффузионного канала, имеем условия:

$$\text{при } z = \pm hf_i = 0, \quad \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = 0, \quad (36)$$

С учетом дополнительного условия, вытекающие из (36) – обращение в нуль второй производной $\partial^2 f_i / \partial z^2$ на торцах диффузионного канала, можно выбрать для функции f_i следующую аппроксимацию:

$$f_i(r, z) = (h^2 - z^2)(5h^2 - z^2)C_i(r), \quad (37)$$

где $C_i(r)$ – радиальная функция концентрации. Для определения $C_i(r)$ применим

метод Канторовича. Как и в [3], подставляя (35) в (36), умножая на зависящую от z часть $f_i(r, z)$ и интегрируя в пределах от $-h$ до h , получим уравнения:

$$C_i'' + \frac{1}{r} C_i' - \left(\frac{n^2}{r^2} + \alpha^2 \right) C_i = -\frac{11}{248} \left[\frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n \right] K_i, \quad (38)$$

где $\alpha^2 = \frac{153}{62h^2}$, $i = 1, 2$.

При нахождении концентраций компонентов уравнения (38) решались с граничным условием $\frac{\partial C_i}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0$, отражающим массопроницаемость стенок. При этом конечное в центре решение имеет вид [4].

$$c_i = \frac{11K_i (h^2 - z^2)(5h^2 - z^2) \cos \varphi}{248\alpha^2 (k^2 + \alpha^2)} \left[\alpha^2 \frac{J_n(kr)}{J_n(k)} + \frac{I_n(\alpha r)}{\alpha I_n(\alpha)} \times \right. \\ \left. \times \left\{ n(\alpha^2 + k^2) - \alpha^2 k \frac{J_n'(k)}{J_n(k)} \right\} - (k^2 + \alpha^2) r^n \right]. \quad (39)$$

(39) Полученные выражения для концентрации и скорости позволяют вычислить критическое число Рэлея, которое для системы и применяемой в опыте высоте канала мм, составило и достаточно хорошо согласуется с числом, приведенным для вертикального кругового цилиндра в работе [7]. Таким образом, учет ограниченности цилиндрического канала вносит незначительную поправку на положении линии устойчивости.

закключение

В заключение можно сказать, что учет массопроницаемости диффузионного канала позволяет перейти к количественному определению параметров срыва диффузионного процесса смешения в каналах различной геометрии.

Рассмотрим трехкомпонентные системы с балластным газом. Методику теоретического определения областей устойчивого и неустойчивого процесса смешения применить к выше перечисленным системам с балластным газом сложно. В методе балластного газа на концах диффузионного канала, то есть в верхней и нижней колбах диффузионного аппарата, находится один и тот же газ, градиент

концентрации которого равен нулю, другими словами, в обеих колбах двухколбового прибора находятся бинарные смеси. Еще сложнее применить теоретические исследования для систем с «двойным балластным газом», в этом случае имеем дело с четырехкомпонентной газовой системой. Методом «двойного балластного газа» нами были экспериментально определены направления конвективного массопереноса, организуемого в диффузионном канале при диффузионной неустойчивости. Исходя из вышесказанного, мы представили газовую смесь, расположенную, например, в нижней колбе двухколбового аппарата как один газ.

Показана аналогия поведения вынужденного массопереноса от внешнего воздействия с массопереносом, организуемым в диффузионном канале в гравитационном поле. Смена диффузионного режима на конвективный массоперенос «подобна» смене ламинарного течения на турбулентный. На основе линейной теории устойчивости трехкомпонентных газовых смесей предложена математическая модель рассматриваемого процесса смешения, учитывающая многокомпонентность системы. Для исследованных систем на плоскости парциальных чисел Релея показано взаимное согласие между теоретической линией устойчивости и данными, отражающими экспериментальные результаты.

Список литературы:

1. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: Пер. с англ. М.: Илю, 1991. 929 с.

2. Жаврин Ю., Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Федоренко О.В. Экспериментальные методы исследования диффузии и концентрационной гравитационной конвекции, вызванной неустойчивостью механического равновесия в многокомпонентных газовых смесях. Алматы, «Қазақ университеті», 2015. 172 с.

3. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1997. 502 с.
4. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов: Пер. с нем. М.: Мир, 2003. 544 с.
5. Stefan J. Uber das Gleichwicht und die Bewegung, insbesondere die Diffusion von Gasgemengen // Wien. Akad. Sitzungsberichte. 2001. Pp. 63-74.
6. Toor H.L. Solution of linearized equations of multicomponent mass transfer // A.I. Ch. E. Journal. 1999. Vol. 10, No. 4. Pp. 448–455.
7. Arnold K.R., Toor H.L. Unsteady diffusion in ternary gas mixtures // A. I. Ch. E. Journal. 2007. Vol. 13. № 6. Pp. 909-914.
8. Лапин Ю. В. Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука. Г. ред. физ.-мат. лит., 2009. 600 с.