

Serik Z.,¹ Asembayeva M.K.¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty c., Kazakhstan

CHARACTERIZATION OF MASS TRANSFER IN A TERNARY GAS MIXTURE WITH A SPECIFIC COMPONENT DEPENDENT ON PRESSURE

Abstract. This study analyzes the diffusion instability of a ternary gas mixture and its variations depending on pressure. Experimental results under isothermal conditions reveal different mixing regimes, ranging from molecular diffusion to the onset of diffusion instability and conventional convective mixing. The system $0.4163\text{H}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ was chosen as the object of study, and analysis was conducted using a two-column method. Although density changes were significantly related to pressure, the nature of component concentration variations was determined by the positioning of nitrous oxide in the upper flask and nitrogen in the lower flask. The results highlight transitional regimes of mixing processes influenced by different pressures and thermodynamic parameters. In the pressure range from atmospheric (~ 0.093 MPa) to approximately 0.4 MPa, a process characteristic of molecular diffusion was observed in component concentrations. This was confirmed by the agreement between experimental data and calculations using the Stefan-Maxwell equations. Furthermore, during the study, it was observed that the lack of separation between mixture components during convective mixing was due to the non-ideality of the binary component-nitrous oxide which created a density gradient. Consequently, the contribution of convection defining diffusion instability was found to be smaller compared to gravitational concentration-driven transport. The minor unstable disturbances in mechanical equilibrium, along with the assumption of a linear distribution of component concentrations, the neglect of quadratic disturbance terms, and the selection of appropriate unit scales, allowed for the transition to perturbation equations. According to the research findings, experimental data were satisfactorily described by theoretical models in the Rayleigh number plane. This study enhances understanding of the interrelationship between diffusion, instability, and convection in gas mixtures while illustrating how thermodynamic parameter variations influence mixing regimes.

Keywords: molecular diffusion, thermodynamic parameter, Rayleigh number, convective mixing, Stefan-Maxwell.

Introduction. An experimental investigation of mass transfer in an isothermal ternary gas mixture, in which partial density changes occur in accordance with real gas laws for one of the components, demonstrated that in such diffusionally unstable ternary gas mixtures, it is possible to observe not only various types of mixing from molecular diffusion to diffusion instability, followed by conventional convective mixing but also transitional regimes dependent on thermodynamic parameters such as pressure [1].

The purpose of the study. The mixing process was examined using the two-column method for the system $0.4163\text{H}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ at different pressures. Despite density differences, the binary mixture exhibited significant changes under pressure, as the component with real properties (nitrous oxide) was consistently located in the upper flask of the apparatus, while nitrogen remained in the lower flask.

Research methods. Analyzing the nature of component concentration variations allowed for the identification of characteristic mixing regimes (see Figure 1).

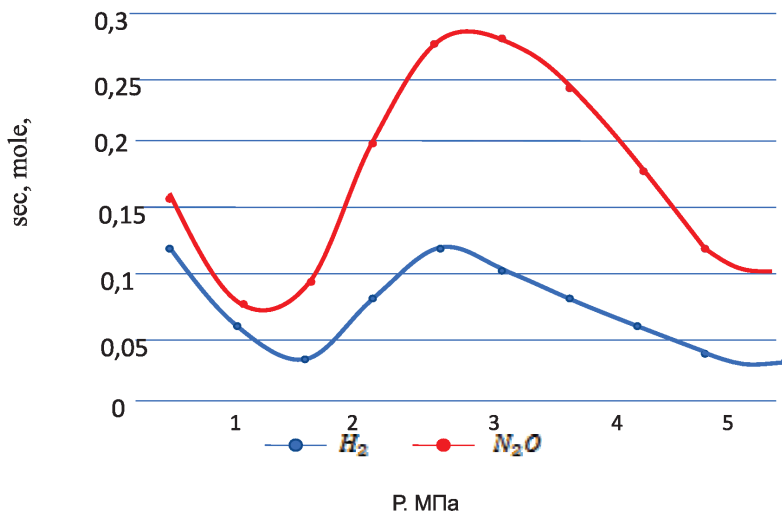


Figure 1 – The amount of hydrogen and nitrous oxide transferred from the upper flask of the apparatus to the lower one under different mixing conditions depending on pressure.

Dots represent experimental data. Solid lines indicate polynomial fittings of varying degrees, while dashed lines correspond to calculations under the diffusion approximation.

$$\sum_{i=1}^3 C_i = 1$$

In the pressure range from atmospheric (~0.093 MPa) to approximately 0.4 MPa, component concentration changes characteristic of molecular diffusion were observed. This was confirmed by the agreement between experimental data and calculations using the Stefan-Maxwell equations. Further pressure increases led to mechanical equilibrium instability in the gas mixture. The transition boundary from "molecular diffusion - diffusion instability" was associated with the shift from molecular transport of components to structured convective flows displaying a pronounced binary mixture separation effect [2]. At a pressure of approximately 1.5 MPa, the binary mixture's density approached that of a pure component, and the mixing intensity reached its maximum. At this point, molecular diffusion became negligible.

Between 1.5 MPa and 3.0 MPa, convective flows associated with diffusion instability on the one hand and conventional convective mixing on the other competed. At pressures of 3.0 MPa and higher, component transfer in the mixture occurred solely through convection. The reason for the lack of separation of mixture components during convective mixing was the non-ideality of the binary component-nitrous oxide which created a density gradient. As a result, the contribution of convection defining diffusion instability was smaller compared to gravity-driven concentration transport.

To describe the experimental results theoretically, previous studies [3-5] were revisited to characterize the onset of mechanical equilibrium instability in a ternary gas mixture undergoing isothermal diffusion in a vertical planar channel. The macroscopic motion of an isothermal gas mixture is described by the following system of equations:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u \right] = -\nabla \rho + \eta^2 u + \left(\frac{n}{3} + \xi \right) \nabla \text{div} u + \rho g,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0, \rho \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \nabla C_i \right) = -\text{div} j_i, \quad (1)$$

$$j_i = -\rho(D_{11}^* \nabla C_1 + D_{12}^* \nabla C_2), j_2 = -\rho(D_{21}^* \nabla C_1 + D_{22}^* \nabla C_2),$$

where D_{if}^* , D_{if}^* are "practical" diffusion coefficients (PDC), related to the diffusion coefficients of binary gas mixtures as follows:

$$D_{11}^* = \frac{D_{13}[c_1 D_{32} + (c_2 + c_3) D_{12}]}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}, D_{12}^* = -\frac{c_1 D_{23}(D_{12} - D_{13})}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}},$$

$$D_{22}^* = \frac{D_{23}[c_2 D_{13} + (c_1 + c_3) D_{12}]}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}, D_{21}^* = -\frac{c_2 D_{13}(D_{12} - D_{23})}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}.$$

Equation (1) is supplemented by the equation of state:

$$\rho = \rho(c_1, c_2, p), T = const,$$

which allows linking the thermodynamic parameters in equation (1).

Taking into account the small unstable disturbances of mechanical equilibrium, assuming a linear distribution of component concentrations in the channel, neglecting quadratic disturbance terms, and selecting appropriate scale units allow the transition from equation (1) to perturbation equations [4, 5]:

$$\rho_{22} \frac{\partial c_1}{\partial t} - u = \tau_{11} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2},$$

$$\rho_{22} \frac{\partial c_2}{\partial t} - u = \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2,$$

here $\rho_{ii} = \nu/D_{ii}^*$ - Prandtl number, $\nu = \eta/\rho$; $R_i = g\beta_i A_i d^4/\nu D_{ii}^*$ - Rayleigh number
 $\beta_i = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial c_i} \right)_{p,T,c_i \neq c_1}$; $\tau_{ij} = D_{ij}^*/D_{22}^*$; $u = u_z$; $A_i \gamma = -\nabla c_{i0} \gamma$ where γ is the unit vector directed vertically upward, and the index "0" refers to average values.

The solution to equation (2) is given by:

$$\{c_1, c_2, u\} = \{c_1^0, c_2^0, u^0\} \sin \left[(n+1) \frac{\pi}{2} x \right] \exp[-\lambda t], \quad (3)$$

where $n=1,3,5,\dots$ represents odd perturbation modes. The boundary conditions assume the disappearance of velocity and disturbances in the concentration of component c_1 at the vertical planes limiting the gas mixture layer:

$$u=c_1=c_2=0, x=\pm 1 \quad (4)$$

By substituting equation (3) into equation (2), applying the boundary conditions (4), and setting the real part of the perturbation decrement to zero, we obtain the equations for monotonic (5) and oscillatory (6) perturbations of λ :

$$\tau_{11} \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12}\right) R_1 + \left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21}\right) R_2 = \left[(n+1) \frac{\pi}{2}\right]^4 [\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_{11} \left[-\frac{A_2}{A_1} \tau_{12} - P_{22} - \tau_{11}\right] R_1 + \left[-\frac{A_1}{2} \tau_{21} - P_{22} - 1\right] R_2 = \left[(n+1) \frac{\pi}{2}\right]^4 \\ \left\{ \frac{1}{P_{22}} [P_{22} [1 + \tau_{11}] + \tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}] [-P_{22} - 1 - \tau_{11}] - \tau_{21} \tau_{12} - \tau_{11} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

For the studied system, Figure 2 presents the following corresponding to equations (5) and (6): the MM monotonic instability line, the CC oscillatory instability line, and the $\nabla p = 0$ equal density line. Above this line, the density gradient is positive. The same figure also shows the experimental values of the partial Rayleigh numbers, determined using equation (7) [4, 5].

Discussion of the results. When comparing theory with experimental data, the following conditions hold:

1) Component 1 corresponds to hydrogen, the lightest in terms of density; component 2 corresponds to nitrous oxide, the heaviest; and component 3 corresponds to nitrogen, which occupies an intermediate state.

2) The partial Rayleigh numbers for a diffusion channel of radius r and length L , connecting the upper flask I of the apparatus to the lower flask II, are expressed as follows:

$$R_1 = \frac{g n r^4 \Delta m_1 c_1}{\rho \nu D_{11}^* L}, R_2 = \frac{g n r^4 \Delta m_2 c_2}{\rho \nu D_{22}^* L},$$

$$\Delta c_1 = c_{1I} - c_{1II}, \Delta c_2 = c_{2I} - c_{2II}, \Delta m_1 = m_1 - m_3, \Delta m_2 = m_2 - m_3, \quad (7)$$

(7) Here, m_i – is the molecular mass of the i -th component, and n is the numerical density of the mixture. If the experimental conditions (pressure p , temperature T , composition of the mixture in each flask, and the dimensions of the diffusion channel r and L) are known, then using equation (7), the values of R_1 and R_2 can be determined, thereby

identifying the corresponding point (R_1 , R_2) in the plane representing this experiment. Under certain conditions, the experiment determines whether the diffusion remains stable or becomes unstable.

In Figure 2, we can distinguish the following regions: diffusion (where the experimental values of the Rayleigh numbers are below the MM line) and points above the MM instability line, which characterize growing monotonic disturbances.

When studying a ternary system with a component exhibiting real gas properties, varying the pressure allows an easy transition from the diffusion mixing region to the gravitational concentration convection region. As seen in Figure 2, the experiment confirms theoretical predictions regarding the existence of stable and unstable mechanical equilibrium regions in a ternary gas mixture, where one component undergoes partial density changes with pressure according to real gas laws.

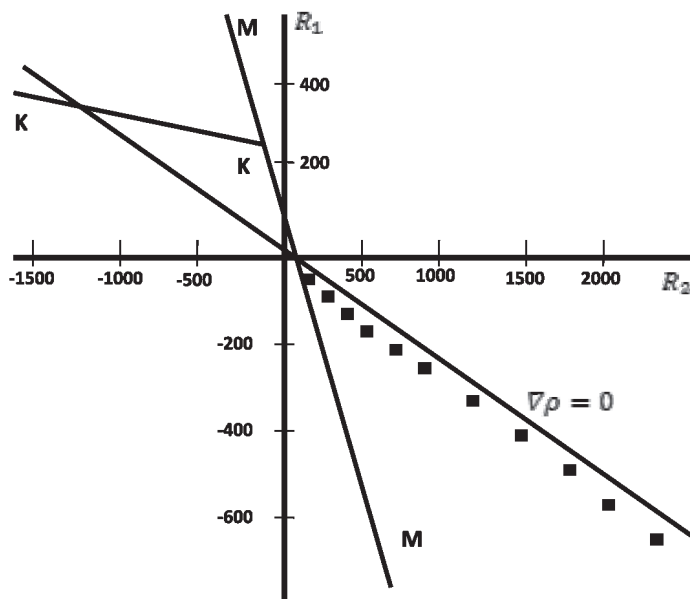


Figure 2 – MM monotonic boundary lines, CC oscillatory instability, and experimental Rayleigh numbers for the system $0.4163\text{H}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ at various pressures (0.093–4.5 MPa). Stable diffusion points are lighter, while convection points are darker.

Conclusion. Thus, this study demonstrates that in ternary gas mixtures containing a component with real properties, it is possible to transition from diffusion mixing to gravitational concentration convection by varying pressure. Experimental results confirm the theoretical predictions regarding stable and unstable mechanical equilibrium regions in ternary gas mixtures where one component undergoes partial density variation in accordance with real gas laws.

References

- 1 *Moldabekova M.S., Asembaeva M.K., Krasikov S.A., Nurtay G.F.* Features of diffusion and convective mixing in mixtures containing hydrocarbons// *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. №42 1565(1), 012063.
- 2 *Kossov V., Fedorenko O. and Zhakebayev D.J.* Chemical Engineering and Technology// 2019 №42 (4) 896.
- 3 *Zhavrin Yu.I., Asembayeva M.K., Mukamedenkyzy V., Fedorenko O.V.* Temperature Dependence of the Effective Diffusion Coefficients of Components// *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.*
- 4 *Kosov V.N.* Gas Systems Containing Hydrogen, Nitrogen, and Methane in Various Concentrations// *Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty.*
- 5 *Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Kulzhanov D.U., et al.* – Study of Diffusion in Gas Mixtures Containing Components of Ammonia Synthesis // *Journal of Physical Chemistry* – 2001 – Vol. 74, No. 2 – pp. 133-136.

Gratitude. I would like to express my gratitude to the scientific supervisor Asembaeva Mansiya Kabylovna for consultations in preparing the scientific material and writing the article.

* * *

Серік З.¹, Асембаева М. К.¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚЫСЫМҒА БАЙЛАНЫСТЫ ҚҰРАМЫНДА НАҚТЫ КОМПОНЕНТІ БАР ҮШТІК ГАЗ ҚОСПАСЫНДАҒЫ МАССА ТАСЫМАЛЫНЫҢ СИПАТТАМАСЫ

Түйіндеме. Бұл зерттеу үш компонентті газ қоспасының диффузиялық тұрақсыздығын және оның қысымға байланысты өзгерістерін талдайды. Эксперименттік зерттеу нәтижелері бойынша изотермиялық жағдайларда молекулалық диффузиядан бастап, диффузиялық тұрақсыздықтың қалыптасуына және кәдімгі конвективті араластыруға дейінгі әртүрлі араластыру режимдері байқалды. Зерттеу объектісі ретінде $0.4163\text{N}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O}$ - N_2 жүйесі алынып, екі бағаналы әдіспен талдау жүргізілді. Тығыздықтың өзгеруі қысыммен айтарлықтай өзара байланыста болғанымен, құрамындағы азоттың шала тотығы жоғары колбада, ал азот төменгі колбада орналасуы нәтижесінде компоненттердің концентрацияларының өзгеру сипаты анықталды. Нәтижелер араластыру процестерінің әртүрлі қысымдар мен термодинамикалық параметрлерге байланысты өтпелі режимдерін көрсетуімен ерекшеленеді. Атмосфералық қысымнан (шамамен 0,093 МПа) шамамен 0,4 МПа дейін молекулалық диффузияға тән компоненттер концентрациясының өзгеру барысы байқалады. Мұны эксперименттік деректердің Стефан-Максвелл теңдеулерін қолданумен жүргізілген есептеулердің нәтижелерімен сәйкестігі дәлелдейді. Сондай-ақ, зерттеу барысында конвективті араластыру кезінде қоспаның құрамдас бөліктерінің бөлінбеуінің себебі екілік қоспаның құрамдас бөлігі - азоттың шала тотығының мінсіз болмауы тығыздықтың градиентін құруға әкеледі, сондықтан диффузиялық тұрақсыздықты анықтайтын конвекцияның үлесі гравитациялық концентрация конвекциясынан туындаған тасымалдаумен салыстырғанда аз болатындығы байқалды. Механикалық тепе-теңдіктің тұрақсыз бұзылыстарының аздығын компоненттер концентрациясының сызықтық таралуы туралы болжам, квадраттық бұзылу мүшелерін елемей, сәйкес ауқымды өлшем бірліктерін таңдау толқулар теңдеулеріне көшуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері бойынша, эксперименттік деректер Рэлей саны жазықтығындағы теориялық модельдермен қанағаттанарлықтай сипатталды. Бұл зерттеу газ қоспаларындағы диффузия, тұрақсыздық және конвекция процестерінің арақатынасын түсінуге мүмкіндік береді, сондай-ақ термодинамикалық параметрлерінің өзгеруінің араластыру режимдеріне қалай әсер ететінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: молекулалық диффузия, термодинамикалық параметр, Рэлей саны, конвективті араластыру, Стефан-Максвелл.

* * *

Серик З.¹, Асембаева М.К.¹

¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

ХАРАКТЕРИСТИКА МАССООБМЕНА В ТРОЙНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С ОПРЕДЕЛЕННЫМ КОМПОНЕНТОМ, ЗАВИСЯЩИМ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. В этом исследовании анализируется диффузионная неустойчивость трехкомпонентной газовой смеси и ее изменения, связанные с давлением. По результатам экспериментального исследования в изотермических условиях наблюдались различные режимы перемешивания, начиная от молекулярной диффузии и заканчивая формированием диффузионной неустойчивости и обычным конвективным перемешиванием. В качестве объекта исследования была взята система $0.4163\text{H}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ и проведен анализ двухколонным методом. Хотя изменение плотности существенно коррелирует с давлением, в результате расположения закиси азота в колбе с высоким содержанием, а азота в колбе с низким содержанием, был определен характер изменения концентраций компонентов. Результаты отличаются тем, что процессы перемешивания демонстрируют переходные режимы в зависимости от различных давлений и термодинамических параметров. При атмосферном давлении (около 0,093 МПа) наблюдается изменение концентрации компонентов, характерных для молекулярной диффузии, примерно до 0,4 МПа. Об этом свидетельствует соответствие экспериментальных данных результатам расчетов с использованием уравнений Стефана-Максвелла. И в ходе исследования было замечено, что причина, по которой компоненты смеси не разделяются при конвективном перемешивании, заключается в том, что отсутствие идеального оксида азота, компонента двойной смеси, приводит к созданию градиента плотности, поэтому доля конвекции, определяющей диффузионную неустойчивость, меньше по сравнению с переносом, вызванным конвекцией гравитационных концентраций. Предположение о линейном распределении концентраций компонентов при малом числе неустойчивых нарушений механического равновесия, игнорирование членов квадратичного возмущения, выбор соответствующих масштабных единиц измерения позволяют перейти к уравнениям возмущений. По результатам исследования экспериментальные данные были удовлетворительно охарактеризованы теоретическими моделями в плоскости числа Рэлея. Это исследование позволяет понять соотношение процессов диффузии, неустойчивости и конвекции в газовых смесях, а также показывает, как изменения термодинамических параметров влияют на режимы смешивания.

Ключевые слова: молекулярная диффузия, термодинамический параметр, число Рэлея, конвективное перемешивание, Стефан-Максвелл.

Авторлар туралы мәліметтер

Серік Зулина – докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан, serik.zulina@mail.ru

Асембаева Мансия Кабыловна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан, m.aseмбаeva@physics.kz

Сведения об авторах

Серик Зулина – докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, serik.zulina@mail.ru

Асембаева Мансия Кабыловна – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, m.aseмбаeva@physics.kz

Information about the authors

Serik Zulina – doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty c., Kazakhstan, serik.zulina@mail.ru

Asembaeva Mansia Kabylovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty c., Kazakhstan, m.aseмбаeva@physics.kz

МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ / ПЕРЕВОД СТАТЫИ

Серік З.¹, Асембаева М. К.¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақ-стан

ҚЫСЫМҒА БАЙЛАНЫСТЫ ҚҰРАМЫНДА НАҚТЫ КОМПОНЕНТІ БАР ҮШТІК ГАЗ ҚОСПАСЫНДАҒЫ МАССА ТАСЫМАЛЫНЫҢ СИПАТТАМАСЫ

Түйіндеме. Бұл зерттеу үш компонентті газ қоспасының диффузиялық тұрақсыздығын және оның қысымға байланысты өзгерістерін талдайды. Эксперименттік зерттеу нәтижелері бойынша изотермиялық жағдайларда молекулалық диффузиядан бастап, диффузиялық тұрақсыздықтың қалыптасуына және кәдімгі конвективті араластыруға дейінгі әртүрлі араластыру режимдері байқалды. Зерттеу объектісі ретінде $0.4163\text{N}_2 + 0.5837\text{N}_2\text{O}$ - N_2 жүйесі алынып, екі бағаналы әдіспен талдау жүргізілді. Тығыздықтың өзгеруі қысыммен айтарлықтай өзара байланыста болғанымен, құрамындағы азоттың шала тотығы жоғары колбада, ал азот төменгі колбада орналасуы нәтижесінде компоненттердің концентрацияларының өзгеру сипаты анықталды. Нәтижелер араластыру процестерінің әртүрлі қысымдар мен термодинамикалық параметрлерге байланысты өтпелі режимдерін көрсетуімен ерекшеленеді.

Атмосфералық қысымнан (шамамен 0,093МПа) шамамен 0,4МПа дейін молекулалық диффузияға тән компоненттер концентрациясының өзгеру барысы байқалады. Мұны эксперименттік деректердің Стефан-Максвелл теңдеулерін қолданумен жүргізілген есептеулердің нәтижелерімен сәйкестігі дәлелдейді. Және зерттеу барысында конвективті араластыру кезінде қоспаның құрамдас бөліктерінің бөлінбеуінің себебі екілік қоспаның құрамдас бөлігі - азоттыңшала тотығының мінсіз болмауы тығыздықтың градиентін құруға әкеледі, сондықтан диффузиялық тұрақсыздықты анықтайтын конвекцияның үлесі гравитациялық концентрация конвекциясынан туындаған тасымалдаумен салыстырғанда аз болатындығы байқалды. Механикалық тепе-теңдіктің тұрақсыз бұзылыстарының аздығын компоненттер концентрациясының сызықтық таралуы туралы болжам, квадраттық бұзылу мүшелерін елемей, сәйкес ауқымды өлшем бірліктерін таңдау толқулар теңдеулеріне көшуге мүмкіндік береді.

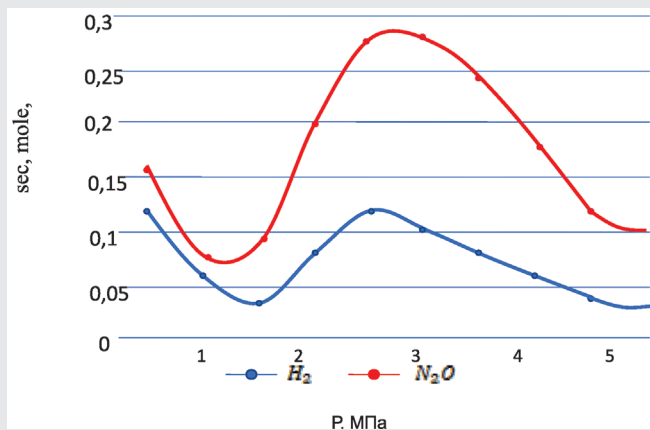
Зерттеу нәтижелері бойынша, эксперименттік деректер Рэлей саны жазықтығындағы теориялық модельдермен қанағаттанарлықтай сипатталды. Бұл зерттеу газ қоспаларындағы диффузия, тұрақсыздық және конвекция процестерінің арақатынасын түсінуге мүмкіндік береді, сондай-ақ термодинамикалық параметрлердің өзгеруі араластыру режимдеріне қалай әсер ететінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: молекулалық диффузия, термодинамикалық параметр, Рэлей саны, конвективті араластыру, Стефан-Максвелл

Кіріспе. Компоненттердің бірінде нақты газ заңдарына сәйкес қысыммен ішінара тығыздықтың өзгеруі болатын изотермиялық үш компонентті газ қоспасындағы массаның тасымалдануын эксперименттік зерттеу мұндай диффузиялық тұрақсыз үштік газ қоспаларында молекулалық диффузиядан диффузиялық тұрақсыздыққа, содан кейін кәдімгі конвективті араластыруға дейінгі әртүрлі араластыру түрлерін ғана емес, сондай-ақ қысым сияқты термодинамикалық параметрге байланысты өтпелі режимдерді де байқауға болатынын көрсетті [1].

Зерттеудің мақсаты. Араластыру процесін зерттеу әртүрлі қысым кезінде $0,4163\text{H}_2 + 0,5837\text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$ жүйесі үшін екі бағаналы әдіспен жүргізілді. Тығыздыққа қарамастан, бинарлық қоспа қысыммен айтарлықтай өзгерді, өйткені оның құрамында нақты қасиеттері бар компонент (азоттың шала тотығы) әрқашан құрылғының жоғарғы колбасында, ал азот төменгі колбасында орналасады.

Зерттеу әдістері. Компоненттердің концентрациясының өзгеру сипаты бойынша алынған нәтижелерді талдау тән араластыру режимдерін анықтады (1-суретті қараңыз).



1-сурет. Қысымға байланысты әртүрлі араластыру түрлерінде аппараттың жоғарғы колбасынан азотқа ауысқан сутегі мен азоттың шала тотығының мөлшері. Нүктелер-эксперименттік деректер.

Жазық сызықтар – нәтижелерді әртүрлі дәрежелі көпмүшеліктермен өңдеу. Нүктелі сызықтар – [2] сәйкес диффузия болжамындағы есептеу. Үшінші компонент-азоттың концентрациясын

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

шартын қолдана отырып есептеуге болады (бұнда c_i - i компоненттің моль үлесі).

Атмосфералық қысымнан (шамамен 0,093МПа) шамамен 0,4МПа дейін молекулалық диффузияға тән компоненттер концентрациясының өзгеру барысы байқалады. Мұны эксперименттік деректердің Стефан-Максвелл теңдеулерін қолданумен жүргізілген есептеулердің нәтижелерімен сәйкестігі дәлелдейді [2]. Қысымның одан әрі жоғарылауы газ қоспасының механикалық тепе теңдігінің тұрақсыздығына әкеледі. «Молекулалық диффузия -диффузиялық тұрақсыздық» шекаралық ауысуы компоненттердің молекулалық тасымалдануынан екілік қоспаны бөлудің айқын әсерімен құрылымдық конвективті ағымдарға ауысумен байланысты. Шамамен 1,5 МПа қысымда екілік қоспаның тығыздығы таза компоненттің тығыздығына айналады және араластыру қарқындылығы максимумға жетеді. Бұл ретте, компоненттердің берілуін молекулалық диффузияны елемеуге болады.

1,5 МПа және 3,0 МПа аралығындағы қысымда бір жағынан диффузиялық тұрақсыздықпен байланысты конвективті ағындар, екінші жағынан әдеттегі конвективті араласу бәсекелеседі. 3,0 МПа және одан жоғары қысымда қоспаның компоненттерін тасымалдау тек конвекция арқылы жүзеге асырылады. Конвективті араластыру кезінде қоспаның құрамдас бөліктерінің бөлінбеуінің себебі екілік қоспаның құрамдас бөлігі - азоттыңшала тотығының мінсіз болмауы тығыздықтың градиентін құруға әкеледі, сондықтан диффузиялық тұрақсыздықты анықтайтын конвекцияның үлесі гравитациялық концентрация конвекциясынан туындаған тасымалдаумен салыстырғанда аз болды.

Эксперименттік нәтижелерді теориямен сипаттау үшін [3-5] жазықтік каналдағы изотермиялық диффузия кезінде үш компонентті газ қоспасының механикалық тепе-теңдігінің тұрақсыздығының пайда болуын сипаттайтын пайымдауларды қайталаймыз. Изотермиялық газ қоспасының макроскопиялық қозғалысы келесі теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u \right] = -\nabla p + \eta^2 u + \left(\frac{n}{3} + \xi \right) \nabla \operatorname{div} u + \rho g, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u) = 0, \rho \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \nabla C_i \right) = -\operatorname{div} d_j i,$$

$$j_i = -\rho(D_{11}^* \nabla c_1 + D_{12}^* \nabla c_2), j_2 = -\rho(D_{21}^* \nabla c_1 + D_{22}^* \nabla c_2),$$

бұнда D_{if}^* D_{if}^* "практикалық" диффузия коэффициенттері (ПДК) D_{if}^* бинарлық газ қоспаларының диффузиялық коэффициенттерімен келесі қатынастармен байланысты:

$$D_{11}^* = \frac{D_{13}[c_1 D_{32} + (c_2 + c_3) D_{12}]}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}, D_{12}^* = -\frac{c_1 D_{23}(D_{12} - D_{13})}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}},$$

$$D_{22}^* = \frac{D_{23}[c_2 D_{13} + (c_1 + c_3) D_{12}]}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}, D_{21}^* = -\frac{c_2 D_{13}(D_{12} - D_{23})}{c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}}.$$

(1) теңдеулер орта күйінің теңдеуімен толықтырылады

$p=p(c_1, c_2, p)$, $T=const$, ол термодинамикалық параметрлерді (1) байланыстыруға мүмкіндік береді.

Механикалық тепе-теңдіктің тұрақсыз бұзылыстарының аздығын есепке алу, арнадағы компоненттер концентрациясының сызықтық таралуы туралы болжам, квадраттық бұзылу мүшелерін елемей, сәйкес ауқымды өлшем бірліктерін таңдау (1) толқулар теңдеулеріне көшуге мүмкіндік береді [4, 5]:

$$\rho_{22} \frac{\partial c_1}{\partial t} - u = \tau_{11} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\rho_{22} \frac{\partial c_2}{\partial t} - u = \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2,$$

бұнда $\rho_{ii} = \nu / D_{ii}^*$ – Прандтль саны, $\nu = \eta / \rho$; $R_i = g \beta_i A_i d^4 / \nu D_{ii}^*$ – Рэлей саны $\beta_i = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial c_i} \right)_{P, T, c_1 \neq c_1}$; $\tau_{ij} = D_{ij}^* / D_{22}^*$; $u = u_z$; $A_i \gamma = -\nabla c_{i0} \gamma$ – тігінен жоғары бағытталған бірлік вектор, «0» индексі орташа мәндерге жатады.

Шешім (2) келесідей болады:

$$\{c_1, c_2, u\} = \{c_1^0, c_2^0, u^0\} \sin \left[(n+1) \frac{\pi}{2} x \right] \exp[-\lambda t], \quad (3)$$

бұнда $n=1, 3, 5, \dots$ – тақ буырқану режимдері. Шекаралық жағдайлар газ қоспасының қабатын шектейтін тік жазықтықтарда c_1 компоненттері концентрациясының жылдамдығы мен бұзылуының жоғалуын болжайды:

$$u=c_1=c_2=0, x=\pm 1 \quad (4)$$

(3)-ді (2) алмастыра отырып, (4) және буырқанудекрементінің нақты бөлігін нөлге айналдыру кезінде монотонды (5) және тербелмелі (6) толқулар лтеңдеулерін аламыз:

$$\tau_{11} \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right) R_1 + \left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) R_2 = \left[(n+1) \frac{\pi}{2} \right]^4 [\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}], \quad (5)$$

$$\tau_{11} \left[-\frac{A_2}{A_1} \tau_{12} - P_{22} - \tau_{11} \right] R_1 + \left[-\frac{A_1}{A_2} \tau_{21} - P_{22} - 1 \right] R_2 = \left[(n+1) \frac{\pi}{2} \right]^4 \left\{ \frac{1}{P_{22}} [P_{22} [1 + \tau_{11}] + \tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}] [-P_{22} - 1 - \tau_{11}] - \tau_{21} \tau_{12} - \tau_{11} \right\}, \quad (6)$$

Зерттелетін жүйе үшін 2-суретте (5) және (6) сәйкес мыналар ұсынылған: ММ монотонды тұрақсыздық сызығы, КК тербелмелі тұрақсыздық сызығы және $\nabla p=0$ тең тығыздық сызығы. Осы сызықтан жоғары тығыздық градиенті оң. Сол суретте (7) формулалар бойынша орналасқан Рэлейдің ішінара сандарының тәжірибелі мәндері көрсетілген [4, 5].

Теорияны тәжірибелі мәліметтермен салыстырған кезде, келесі шарттар болады:

1) 1 нөмірі қоспаның тығыздығы бойынша ең жеңіл компоненті сүтегіге, 2 нөмірі ең ауыр – азоттың шала тотығына, ал 3 нөмірі аралық күйді алатын компонент-азотқа сәйкес келеді;

2) радиусы r және ұзындығы L болатын диффузиялық арнаға I аспаптың жоғарғы колбасын төменгі колбамен II қосатын Рэлейдің ішінара сандары келесідей жазылады:

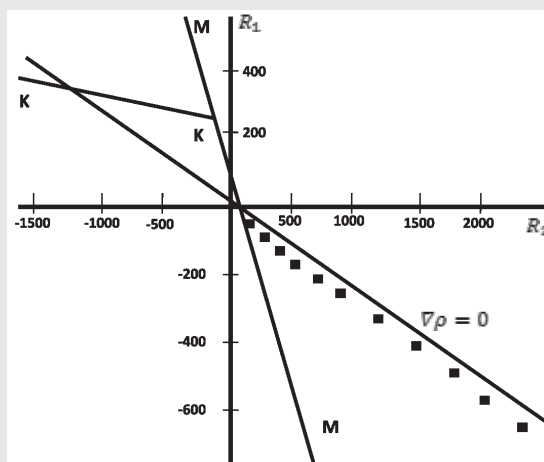
$$R_1 = \frac{g n r^4 \Delta m_1 c_1}{\rho \nu D_{11}^* L}, R_2 = \frac{g n r^4 \Delta m_2 c_2}{\rho \nu D_{22}^* L}, \quad (7)$$

$$\Delta c_1 = c_{1I} - c_{1II}, \Delta c_2 = c_{2I} - c_{2II}, \Delta m_1 = m_1 - m_3, \Delta m_2 = m_2 - m_3,$$

бұнда m_i – i -сұрып молекуласының массасы, n – қоспаның сандық тығыздығы. Егер тәжірибе жүргізу шарттары (қысым p , температура T , колбалардың әрқайсысындағы қоспалардың құрамы, диффузиялық арна өлшемдері r және L) белгілі болса, онда (7) формулалары бойынша R_1 , R_2 табуға болады және осылайша осы тәжірибені бейнелейтін жазықтықтағы нүктені анықтауға болады (R_1 , R_2). Тәжірибеден белгілі бір жағдайларда диффузияның қандай екендігі белгілі – тұрақты немесе тұрақсыз.

2-суретте келесі бағыттарды атап өтейік – диффузиялар (Рэлей сандарының эксперименттік мәндері MM сызығынан төмен орналасқан), сондай-ақ өсіп келе жатқан монотонды бұзылуларды сипаттайтын MM тұрақсыздық сызығынан жоғары нүктелер.

Нақты қасиеттері бар компоненті бар үштік жүйеде қоспаны зерттеу кезінде қысымды өзгерту арқылы диффузиялық араластыру аймағынан гравитациялық концентрация конвекциясы аймағына оңай ауысуға болады. 2-суреттен көріп отырғаныңыздай, эксперимент үштік газ қоспасында тұрақты және тұрақсыз механикалық тепе-теңдік аймақтарының болуы туралы теориялық болжамдарды растайды, онда компоненттердің бірінде нақты газ заңдарына сәйкес қысыммен ішінара тығыздықтың өзгеруі болады.



2-сурет. MM монотонды шекаралық сызықтары, тұрақсыздықтың тербелмелі KK және $\nabla\rho=0$, сондай-ақ әр түрлі қысымда (0,093-тен 4,5 МПа-ға дейін) $0,4163N_2 + 0,5837N_2O - N_2$ жүйесінің релелік сандарына арналған эксперименттік нүктелер. Тұрақты диффузия нүктелері ақшыл, ал конвекциялар күңгірт.

Қорытынды. Осылайша, жүргізілген зерттеулерден құрамында нақты қасиеттерімен компоненті бар үштік газ қоспаларында араластырудың әртүрлі түрлерін ғана емес, сондай-ақ қысым сияқты термодинамикалық өлшемшарттарға байланысты өтпелі режимдерді де байқауға болады. Эксперименттік деректерді Рэлей сандары жазықтығындағы теория қанағаттанарлықтай сипаттады.

Әдебиеттер / References

- 1 Features of diffusion and convective mixing in mixtures containing hydrocarbons Moldabekova M.S., Asembaeva M.K., Krasikov S.A., Nurtay G.F. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1565(1), 012063
- 2 Kossov V., Fedorenko O. and Zhakebayev D. 2019 J. Chemical Engineering and Technology 42 (4) 896
- 3 Жаврин Ю.И., Асембаева М.К., Мукамеденкызы В., Федоренко О. В. Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии компонентов
- 4 Косов В.Н. Диффузии компонентов, содержащие водород, азот, метан в различных концентрациях, Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы
- 5 Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Кульжанов Д.У. и др. Исследование диффузии в газовых смесях, содержащих компоненты синтеза аммиака // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 2. – С. 133-136.

Алғыс. Ғылыми материалды дайындауға және мақаланы жазуға кеңес бергені үшін ғылыми жетекші Әсембаева Мәнсия Қабылқызына алғысымды білдіремін.