

Молдабекова М.С.,
Әсембаева М.К.,
Мукамеденқызы В.,
Абдулаева Ә.Б.

**Құрамында пропаны
болатын үшкомпонентті газ
қоспасындағы механикалық
тепе-теңдіктің орнықсыздығын
Стефан-Максвелләдісімен
зерттеу**

Moldabekova M.S.,
Asembayeva M.K.,
Mukamedenkyzy V.,
Abdulayeva A.B.

**The study of instability of
mechanical equilibrium in
three-component gas mixture
containing propane by the
method of Stefan-Maxwell**

Молдабекова М.С.,
Асембаева М.К.,
Мукамеденқызы В.,
Абдулаева А.Б.

**Исследование неустойчивости
механического равновесия
в трехкомпонентной газовой
смеси, содержащей пропан,
методом Стефана-Максвелла**

Мақалада үшкомпонентті газ қоспасындағы механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығын зерттеудің эксперименттік мәліметтері мен Стефан-Максвелл әдісімен есептелгендердің салыстырылуы көрсетілген. Құрамында пропан, азот тотығы және көмірқышқыл газы болатын жүйе үшін анықталған эксперименттік мәліметтер екіколбалы әдіспен алынған. Эксперименттерде аппараттағы пропанның бастапқы концентрациясына байланысты екінші колбаға тасымалданған мөлшері қысымға тәуелді: пропанның максимал тасымалдауы қысымның белгілі бір мәнінде p_{\max} байқалатындығы анықталған. «Пропан – азот тотығы» бинарлы қоспасындағы пропанның бастапқы концентрациясының өсуі алдымен нақты жүйедегі пропанның максимал тасымалдауы байқалатын қысымның азаюына, одан кейін оның артуына алып келетіндігін теориялық зерттеу де дәлелдеді. Компоненттің мұндай тасымалдауы молекулалық диффузияға тән емес.

Түйін сөздер: диффузия, араласу, орнықсыздық, газ қоспасы, концентрация, қысым, температура, механикалық тепе-теңдік, әдіс, тасымалдау.

The article presents a comparison of the experimental data studies of the instability of mechanical equilibrium in isothermal three-component gas mixtures in the diffusive mixing is calculated with the method of the Stefan-Maxwell. Experimental data for systems containing propane, nitrous oxide and carbon dioxide were obtained in two bulb method. In experiments it was found that for predefinmessage propane depending on pressure and initial concentrations of propane in a diffusion device the maximum transfer is observed at p_{\max} certain pressure value. The measurements showed that the pressure value p_{\max} different for a binary mixture in a three-component system with different initial (starting) concentration of the components. Nature calculated based on the concentration of propane in predefinmessage bottom flask from its initial concentration and pressure is qualitatively consistent with experimental data. Theoretical study has shown that as experience increases the initial concentration of propane in the binary mixture propane – nitrous oxide leads to a decrease, and then increase the pressure at which there is maximum transfer of propane was investigated for a particular system. This shift component is not characteristic of molecular diffusion.

Key words: diffusion, mixing, instability, gas mixture, concentration, pressure, temperature, mechanical equilibrium, method, transfer.

В статье представлено сравнение экспериментальных данных исследования неустойчивости механического равновесия в изотермической трехкомпонентной газовой смеси при диффузионном смешении с рассчитанными методом Стефана-Максвелла. Представленные экспериментальные данные для системы, содержащей пропан, закись азота и углекислый газ были получены двухколбовым методом. В экспериментах было обнаружено, что для продиффундировавшего пропана в зависимости от давления и начальной концентрации пропана в диффузионном аппарате максимальный перенос наблюдается при определенном значении давления p_{\max} . Теоретическое исследование показало, что как и в опыте увеличение исходной концентрации пропана в бинарной смеси пропан – закись азота приводит к уменьшению, а затем к увеличению давления, при котором наблюдается максимальный перенос пропана для исследованной конкретной системы. Такой перенос компонента несвойствен молекулярной диффузии.

Ключевые слова: диффузия, смешение, неустойчивость, газовая смесь, концентрация, давление, температура, механическое равновесие, метод, перенос.

**ҚҰРАМЫНДА
ПРОПАНЫ БОЛАТЫН
ҮШКОМПОНЕНТТІ
ГАЗ ҚОСПАСЫНДАҒЫ
МЕХАНИКАЛЫҚ
ТЕПЕ-ТЕҢДІКТІҢ
ОРНЫҚСЫЗДЫҒЫН
СТЕФАН-
МАКСВЕЛЛӘДІСІМЕН
ЗЕРТТЕУ**

Кіріспе

Изотермдік үшкомпоненттік газдар жүйелерінің эксперименттік зерттеуі белгілі бір жағдайларда оларда құрымдыланған конвективтік ағындар пайда болатынын көрсетеді. Бұл ағындардың молекулалық тасымалдаумен үйлесуі диффузиялық орнықсыздықты, демек механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығын тудырады [1]. Диффузиялық орнықсыздық ұғымының ішіне диффузиялық процеспен бірге қоса макроскоптық ағындардың (диффузиялық бароэффект себебінен пайда болған гидродинамикалық ағынмен қоса) пайда болуы да кіреді. Тұйықталған аспаптағы (біздің жағдайда екі-колбалық аппарат) изотермдік диффузиямен қабаттас жүретін күшті конвективтік ағындар диффузиялық ағындардан ондаған есе басым болады. Көпкомпонентті газдар қоспаларындағы күтілінген диффузиялық процестің нәтижелерін компоненттердің молекулалық тасымалдауымен үйлескен конвективтік ағыстар едәуір бұрмаландырады. Сондықтан, бұл құбылыстарды массаалмасу процестерін ғылым мен өндірісте дайындау және жобалау кезінде ескеру қажет, мысалы табиғи газдан аммиакты құрастырып алу.

Диффузиялық орнықсыздықтың жаратылысын зерттеу күрделі болып шықты, өйткені оның пайда болуы жүйенің көптеген жағдайы және әртүрлі параметрлеріне: компоненттердің өзара диффузия коэффициенті, тұтқырлығы, қоспаның алғашқы құрамының айырмашылығы, диффузиялық каналға қатысты газдар қоспасының орналасуы, каналдың геометриялық өлшемдері мен вертикалға қатысты орналасуы және қысым мен температураның айырмашылығына тәуелді екені анықталды. Диффузиялық процесте конвекцияның дамыған кезінде келесі эффектілер тіркелген: қысымға тәуелді диффундирленген компоненттің концентрация интенсивтілігінің максимумдарының байқалуы; жүйенің бірнеше рет орнықтылық күйден орнықсыздық күйге ауысуы; газ қоспасының компонентінің біреуімен аномалді байытылуы.

Зерттеу нәтижесінде диффузиялық орнықсыздықтың пайда болуының келесі қажетті шарттары тағайындалған:

газдардың бинарлы қоспасы (1 + 2) жоғарыда, таза газ (3) – төменде орналасқан, $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$; $\rho_{(1+2)} < \rho_3$; $D_{12} > D_{23}$; мұндағы ρ_i – i компоненттің тығыздығы, D_{ij} – i компоненттің j компонентке тасымалдауының диффузия коэффициенті.

газдардың бинарлы қоспасы (1 + 2) төменде, таза газ (3) – жоғарыда орналасқан, $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$; $\rho_{(1+2)} > \rho_3$; $D_{13} > D_{23}$;

газдардың бинарлы қоспасы (1 + 2) жоғарыда, бинарлық қоспа (3 + 2) – төменде орналасқан, $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$; $\rho_{(3+2)} > \rho_{(1+2)}$; $D_{12} > D_{32}$;

газдардың бинарлы қоспасы (1+2) және таза газ (3) не жоғарыда, не төменде орналаса береді, $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$; $\rho_{(1+2)} = \rho_3$; $D_{13} > D_{23}$. Бұл жағдайда орнықсыз процесс қоспалардың диффузиялық каналға қатысты кез-келген орналасуы кезінде байқалуы мүмкін, бірақ ол тәжірибенің әртүрлі параметрлеріне тәуелді, сондай-аққысымға, i компоненттің тығыздығына, i компоненттің j компонентке тасымалдауының диффузия коэффициентіне тәуелді.

Жоғарыда келтірілген диффузиялық араласуда конвекцияның пайда болуының қажетті шарттары жеткілікті шарттармен толықтырылуы керек.

1 Газдар қоспасындағы компоненттердің таза газға тасымалдануының диффузия коэффициенті бір-бірінен бірнеше есе өзгешеленеді, мысалы He+Ar-N₂ қоспасындағы $D_{\text{He-Ar}}$ шамасы $D_{\text{Ar-N}_2}$ шамамен 3 есе үлкен.

2 Механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығы компоненттер концентрациясының белгілі бір аралығында ғана пайда болады.

3 Қысымның әсері едәуір.

4 Диффузиялық каналдың геометриялық сипаттары, сонымен қатар вертикалға қатысты орналасуы конвективті араласуды шектеуі мүмкін.

5 Механикалық тепе-теңдіктің орнықтылығының бұзылуына температура әсер етеді.

6 Кейбір үшкомпоненттік газ қоспаларында орнықсыздық компоненттердің диффузиялық каналға қатысты алғашқы орналасуына тәуелсіз байқалуы мүмкін.

7 Диффундирленген қоспаның тұтқырлығының кемуі орнықсыздық процестің пайда болуықтималдығын арттырады.

Орнықсыз процестің сараптамасы газ жүйесіндегі конвективті ағындар негізінен, қоспа компоненттерінің молекулалық массаларының бір-бірінен айырмашылығы едәуір болғанда туындайтындығын көрсетеді. Сонымен, диффузия кезіндегі орнықсыздық режимнің туындауы мен өтуіне әртүрлі параметрлер мен жағдайлар

әсер етеді, бірақ конвективті орнықсыздық режимінде көпкомпонентті газ қоспасының бөлінуі болатындығы – жалпы ақиқат.

Үшкомпонентті газ қоспасы екіколбалық әдіспен қоспадағы тығыздықтың градиенті нөлге тең болғанда экспериментте зерттелген [2]. Үшкомпонентті газ қоспасының құрамы: пропан, азот тотығы және көмірқышқыл газы. Бұл газдардың қалыпты жағдайдағы тығыздық мәндері бір-біріне жақын:

$$\begin{aligned} \rho_{C_3H_8} &= 1.8037 \text{ кг} / \text{ м}^3, \rho_{CO_2} = \\ &= 1.8003 \text{ кг} / \text{ м}^3, \rho_{N_2O} = 1.8004 \text{ кг} / \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Ал компоненттердің өзара диффузия коэффициенттері $T=298\text{K}$ температура мен атмосфералық қысымда шамалас болады, яғни:

$$\begin{aligned} D_{CO_2-C_3H_8} &= 0.0863 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{ с}, D_{N_2O-C_3H_8} = \\ &= 0.0860 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{ с}, D_{CO_2-N_2O} = \\ &= 0.117 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{ с} \end{aligned}$$

Олай болса, мұндай үшкомпонентті жүйелерде изотермдік диффузиялық процесс механикалық тепе-теңдіктің бұзылуынсыз өтуі керек.

Экспериментте пропан мен азот тотығының бинарлы қоспасы құрамының әртүрлі қатынасымен диффузиялық аппараттың жоғарғы бөлігінде, көмірқышқыл газы – төменгі колбада орналастырылды. Алынған мәліметтердің сараптамасы зерттелген $C_3H_8 + N_2O - CO_2$ изотермдік газ жүйесінде диффузиялық орнықсыздыққа тән интенсивтілігі өзгермелі конвекция (құрылымдық ағындар) байқалатынын көрсетті. Аппараттағы пропанның бастапқы концентрациясына байланысты екінші колбаға тасымалданған мөлшері қысымға тәуелді: пропанның максимал тасымалдауы қысымның белгілі бір мәнінде p_{max} байқалатындығы анықталды. Диффундирленген компоненттің концентрациясының осыған ұқсас өзгеруі изотермдік диффузиялық орнықсыздықты компоненттердің парциал тығыздықтарының және диффузиялық коэффициенттерінің едәуір айырмашылығы болатын изотермдік жүйелерде He + Ar – N₂ және H₂ + Ar – N₂ байқалған, бұл жүйелерде аргон ауыр компонент. Алайда бұл жүйелерде орнықсыздықтың пайда болуы кезінде аппараттың бір колбасынан екіншісіне тасымалданған компоненттің концентрациясының едәуір өзгерісі байқалатын қысым өзгермеген, тұрақты қалған [3].

Кестеде 298 К температурада жүргізілген зерттеудің нәтижелері келтірілген. Тәжірибедегі әртүрлі газдар жүйелері үшін тасымалданған пропанның максимал концентрациясына жетудегі қысым мәндері 2-бағанада келтірілген. 3- және 4- бағаналарда төменгі колбаға диффундирленген пропанның тәжірибедегі және Стефан-Максвелл әдісімен есептелген концентрация мәндері берілген. Зерттеу нәтижелерін теориялық сипаттау үшін Matcad ортасында осы әдіске негізделген бағдарлама құрастырылған.

Компоненттердің бастапқы концентрациясы әртүрлі бинарлы қоспалар үшін p_{max} қысым

мәні әртүрлі болатындығын өлшеулер көрсетті. Төменгі колбағатасымалданған пропанның концентрациясының өсуі оның бастапқы жүйедегі шамасының мәніне пропорционал. Бинарлы қоспадағы C_3H_8 бастапқы концентрациясының өсуі диффузиялық процестің аномалді өтуіне әсер ететіндігін тәжірибе көрсетті. Кестедегі мәліметтер бинарлы қоспадағы пропанның бастапқы концентрациясының өсуі алдымен p_{max} қысымның кемуіне, кейін оның өсуіне әкелетіндігін көрсетеді. Бұл жағдайда нақты жүйе үшін молекулалық диффузияға тән емес пропанның максимал тасымалдауы байқалады.

Кесте – Эксперимент пен Стефан-Максвелл әдісімен есептелген бинарлы қоспадағы пропанның бастапқы концентрациясы мен қысым мәндері

Газ жүйесі	Қысым $p_{max}, 10^5 Pa$	Төменгі колбадағы C_3H_8 концентрациясы, molefraction (эксперимент)	Төменгі колбадағы C_3H_8 концентрациясы, molefraction (теория)
0.188 $C_3H_8 + 0.812N_2O - CO_2$	8.77	0.072	0,088
0.220 $C_3H_8 + 0.780N_2O - CO_2$	6.81	0.094	0,115
0.250 $C_3H_8 + 0.750N_2O - CO_2$	5.54	0.108	0,141
0.360 $C_3H_8 + 0.640N_2O - CO_2$	5.83	0.143	0,200
0.570 $C_3H_8 + 0.430N_2O - CO_2$	6.81	0.221	0,297
0.810 $C_3H_8 + 0.190 N_2O - CO_2$	7.79	0.428	0,399

Компоненттердің бастапқы концентрациясы әртүрлі болатын үшкомпонентті газ жүйесіндегі диффузиялық процестің p_{max} қысымға байланысының осындай сипаты алғаш рет анықталған. Бұл қысымның өсуінде пропанның парциал тығыздығы, қалған екі компоненттің – көмірқышқыл газы мен азот тотығының, парциал қысымдарымен салыстырғанда жылдам өсетіндігін көрсетеді. Жоғарыда орналасқан бинарлы қоспа таза компонентпен салыстырғанда ауырлай түседі. Осыдан тығыздықтың оң градиенті туындайды, бұл бастапқы қоспадағы компоненттердің тығыздығының градиенті нөлге тең болған диффузиялық каналда конвективті массатасымалдаудың пайда болуына алып келеді.

Көпкомпонентті қоспалардың диффузиялық араласуын зерттеу үшін Стефан-Максвелл әдісін қолдану – бастапқыда гравитациялық орнықты газ қоспаларындағы молекулалық деңгейде де, конвекция режимінде де өте алатын массатасымалдаудың түрін анықтауға мүмкіндік береді [1, 4, 5]. Стефан-Максвелл теңдеулері қорытқы (тәжірибеде тікелей байқалатын) диффузиялық ағындардың қанағаттандырылғық си-

патын береді.

Суретте кестедегі берілгендерге сәйкес эксперименттік мәліметтер мен Стефан-Максвелл әдісімен есептелгендердің салыстырылуы көрсетілген. Суреттен, төменгі колбаға тасымалданған пропанның концентрациясының қысымға тәуелділігі сапалық жағынан эксперименттегі тәуелділікке сәйкес келеді. Теориялық зерттеу де тәжірибеден алынған нәтижемен сәйкес келді, пропанның максимал тасымалдауы қысымның p_{max} белгілі бір мәнінде байқалатындығы, яғни «пропан – азот тотығы» бинарлы қоспасындағы пропанның бастапқы концентрациясының өсуі зерттелетін нақты жүйедегі пропанның максимал тасымалдауы байқалатын қысымның азаюына, кейін оның артуына алып келеді. Жоғарыда айтылғандай, компоненттің мұндай тасымалдауы молекулалық диффузияға тән емес.

Сонымен, үшкомпонентті газ қоспасында диффузиялық каналдың ұштарында тығыздықтың айырымы жоқ болғанда, компоненттің біреуінің бастапқы концентрациясы өзгеретінде тек диффузиялық қана емес, сонымен қатар араласудың конвективті режимдері де байқалуы мүмкін. Біздің Стефан-Максвелл әдісімен

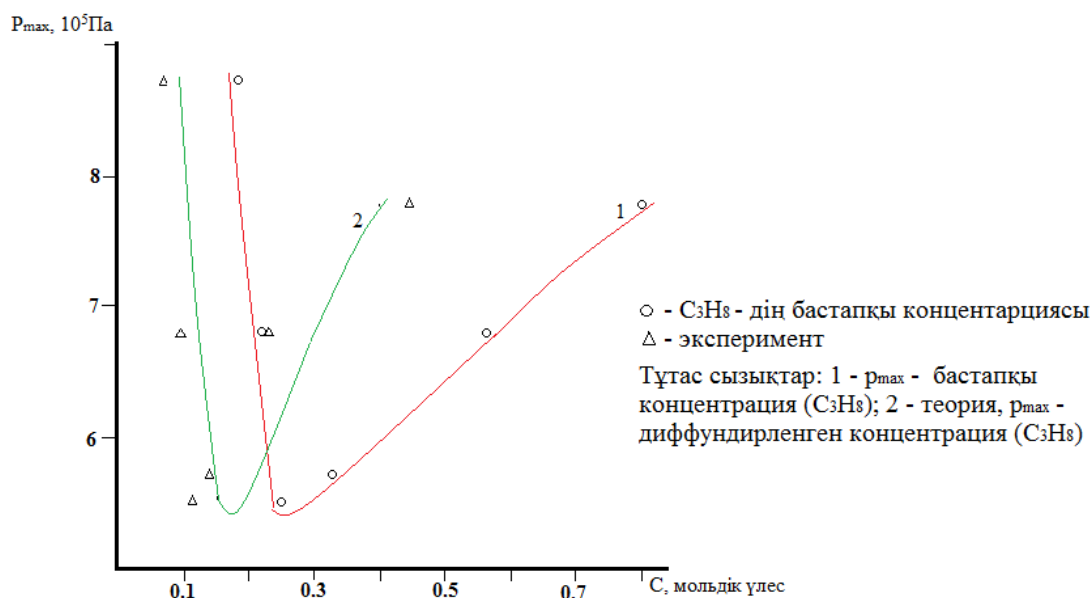
теориялық зерттеу сапалық жағынан эксперименттің нәтижелерін қанағаттандырады (сурет).

Жүргізілген зерттеу негізінде келесі қорытынды жасауға болады:

1 Үшкомпонентті газ жүйесіндегі изотермдік диффузия кезінде механикалық тепе-тең-

діктің орнықсыздығы, компоненттерінің бастапқы концентрациясы әртүрлі бинарлы қоспалар әртүрлі қысымда Стефан-Максвелл әдісімен сарапталды.

2 Стефан-Максвелл әдісі термодинамикалық параметрлерге тәуелді диффузиялық араласу процесінің сипатын анықтауға мүмкіндік береді.



Сурет – Масса тасымалдаудың максимал қарқындылығының пропанның бастапқы концентрациясы мен қысымға тәуелділігі

Үшкомпонентті газ жүйесіндегі диффузиялық орнықсыздықты теориялық зерттеу де компоненттердің араласуында, диффузиялық процесс молекулалық деңгейде де, конвекция режимінде де өтетіндігін дәлелдейді. Мұны

эксперимент арқылы да дәлелдеуге болады, алайда ол көп еңбекті және материалдық шығындарды қажет етеді. Зерттеу нәтижелері массатасымалдау теориясына белгілі-бір үлес қосуы мүмкін.

Әдебиеттер

- 1 Zhavrin J., Kosov V., Kulzhanov D., Fedorenko O. Experimental methods for studying the diffusion and concentration gravitational convection caused by instability of mechanical equilibrium in multicomponent gas mixtures: monograph / Zhavrin Y., Kosov V., Kulzhanov D., Fedorenko O. – Almaty: Kazakh University, 2015. – 172 p.
- 2 Zhavrin J., Moldabekova M., Poyarkov I., Mukamedenkyzy V. Experimental study of diffusion instability in ternary gas mixtures at zero density gradient // Technical Physics Letters. – 2011. – 37. – Vol.15. – P. 62-68.
- 3 Moldabekova M., Poyarkov I., Mukamedenkyzy V., Beketayeva M. The Maximum intensity of convective mass transfer in the system containing propane // Bulletin of Kazakh national Pedagogical University, series “Physical and mathematical Sciences”. – 2011, №1 (33). – P. 80-85.
- 4 Gershuni G., Zhukhovitskii E., Nepomnyashchy A. Stability of convective flows. – M.: Nauka, 1989. – 320 p.
- 5 Kosov V., Seleznev V. Abnormal appearance free of gravitational convection in isothermal ternary gas mixtures. – Ekaterinburg: Ural branch of RAS, 2004. – 149 p.

References

- 1 Zhavrin J., Kosov V., Kulzhanov D., Fedorenko O. Experimental methods for studying the diffusion and concentration gravitational convection caused by instability of mechanical equilibrium in multicomponent gas mixtures: monograph / Zhavrin Y., Kosov V., Kulzhanov D., Fedorenko O. – Almaty: Kazakh University, 2015. –172 p.
- 2 Zhavrin J., Moldabekova M., Poyarkov I., Mukamedenkyzy V. Technical physics Letters. 15. (2011). 62-68.
- 3 Moldabekova M., Poyarkov I., Mukamedenkyzy V., Beketayeva M. Bulletin of Kazakh national Pedagogical University, series “Physical and mathematical Sciences”. №1 (33). (2011).80-85.
- 4 Gershuni G., Zhukhovitskii E., Nepomnyashchy A. Stability of convective flows, Nauka, 1989. – P. 320.
- 5 Kosov V., Seleznev V. Abnormal appearance free of gravitational convection in isothermal ternary gas mixtures. – Ekaterinburg: Ural branch of RAS, 2004. – P. 149.