

МРНТИ 30.17.35  
УДК 533.15:536.25

<https://doi.org/10.51889/2021-1.1728-7901.15>

В.Н. Косов<sup>1</sup>, В. Мукамеденкызы<sup>2\*</sup>, З.З. Юлдашева<sup>3</sup>, А. Хасеинова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Алматы қ., Қазақстан

<sup>3</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің физика-техникалық факультеті, Алматы қ., Қазақстан

\*e-mail: mukameden@inbox.ru

## ҮШКОМПОНЕНТТІ ГАЗ ҚОСПАЛАРЫНДАҒЫ КОНВЕКТИВТІ АҒЫСТАРДЫ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ӘДІСІМЕН ЗЕРТТЕУ

*Аңдатпа*

Үш компонентті газ қоспаларында пайда болатын конвективті ағындардың сипаттамалары зерттелді. Конвективті ағындардың сипаттамасы ретінде қоспаның ауыр компонентінің изоконцентрациялық таралуы және орташа жылдамдықтың уақыт бойынша өзгерісі қарастырылады. Вертикалды цилиндрлік каналда пайда болатын конвективті ағындардың сипаттамаларын есептеу үшін физикалық параметрлер бойынша бөлу схемасына негізделген сандық модель қолданылды. Үш компонентті газ қоспаларында пайда болатын ерекше диффузиялық режимдерде компоненттер концентрациясының және орташа жылдамдықтың монотонды емес таралуы мүмкін болатындығы көрсетілді. Механикалық тепе-теңдіктің орнықтылығын жоғалту уақыты және дамыған конвективті ағындардың пайда болу уақыты анықталды.

**Түйін сөздер:** диффузия, конвекция, концентрация, тығыздық, қоспалар.

*Аннотация*

В.Н. Косов<sup>1</sup>, В. Мукамеденкызы<sup>2</sup>, З.З. Юлдашева<sup>3</sup>, А. Хасеинова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики при Казахском национальном университете имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

## ИЗУЧЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследованы характеристики конвективных течений, возникающих в трехкомпонентных газовых смесях методом численного моделирования. В качестве характеристик конвективных течений рассматривается изменение во времени изоконцентрационных линий тяжелого компонента смеси и средней скорости. Для расчета характеристик конвективных течений, возникающих в вертикальном цилиндрическом канале, использована численная модель, основанная на схеме расщепления по физическим параметрам. Показано, что в трехкомпонентных газовых смесях, где проявляются особые диффузионные режимы, возможно возникновение немонотонных распределений концентраций компонентов и скорости. Определены время потери устойчивости механического равновесия и время развитых конвективных течений.

**Ключевые слова:** диффузия, конвекция, концентрация, плотность, смеси.

*Abstract*

## STUDY OF CONVECTIVE FLOWS IN THREE-COMPONENT GAS MIXTURES BY THE METHOD OF NUMERICAL SIMULATION

Kossov V.N.<sup>1</sup>, Mukamedenkyzy V.<sup>2</sup>, Yuldasheva Z.Z.<sup>3</sup>, Khasseinova A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan, 050100, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Experimental and Theoretical Physics, al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

<sup>3</sup>Physics and technology department at al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The characteristics of convective flows arising in three-component gas mixtures are investigated by the method of numerical simulation. The time variation of the isoconcentration lines of the heavy component of the mixture and the average velocity are considered as characteristics of convective flows. To calculate the characteristics of convective flows arising in a vertical cylindrical channel, we used a numerical model based on the splitting scheme according to physical parameters. It was shown that in three-component gas mixtures, where special diffusion regimes are manifested, non-

monotonic distributions of component concentrations and velocities are possible. The time of loss of stability of mechanical equilibrium and the time of developed convective flows are determined.

**Keywords:** diffusion, convection, concentration, density, mixtures.

Көпкомпонентті газ қоспаларында араласу режимінің алуан түрі кездеседі [1]. Олардағы массаалмасудың қарқындылығы молекулалық, конвективті және көбінесе бірлескен режимдер арқылы анықталады. Бұл жағдайда молекулалық диффузия табиғи конвекцияның пайда болуымен қоспаның механикалық тепе-теңдігінің орнықсыздығына әкелуі мүмкін, бұл жалпы массаалмасуды айтарлықтай күшейтеді, бірақ бұл іс жүзінде ескерілмейді [2]. Сонымен қатар, концентрациялық конвекциясының пайда болуы мен дамуы Рэлейдің жылу есептеріндегі дәстүрлі көріністер шеңберінде ғана емес [3], изотермдік қоспада орнықты стратификация кезіндегі пайда болатын қозғалыстарда да байқалады [4]. Көпкомпонентті газ қоспаларында «диффузия - конвекция» режимдерін өзгерту механизмін анықтауға байланысты мәселелерді шешу, конвективті режимнің пайда болуын анықтайтын параметрлер конвективті массаалмасу мәселелері үшін маңызды. Диффузиялық араласу кезінде конвективті ағындардың пайда болу себептерін неғұрлым егжей-тегжейлі қарастыру үшін ағын компонентінің концентрациясының таралуы мен жылдамдығы сияқты сипаттамаларын зерттеу қажет.

Бұл жұмыста вертикальды каналдағы үш компонентті газ қоспаларындағы диффузиялық араласуды зерттеу нәтижелері келтірілген және әртүрлі араласу уақыттарындағы каналдағы компоненттер концентрациясының таралуы мен жылдамдықтары талданған.

### Математикалық модель

Изотермдік үшкомпонентті газ қоспасының конвективті араласуы гидродинамикалық теңдеулердің жалпы жүйесі арқылы сипатталады, оған Буссинесктің жуықтауы арқылы жазылған Навье-Стокс, қоспаның бөлшектері мен компоненттерінің сақталуы теңдеулері жатады.

Газ қоспасы үшін болатын тәуелсіз диффузия жағдайын ескере отырып;  $\sum_{i=1}^3 \vec{j}_i = 0$ ,  $\sum_{i=1}^3 c_i = 1$ , бұл теңдеулер жүйесі келесі түрге ие [5-7]:

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

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n \vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{v} \nabla c_i = -\operatorname{div} \vec{j}_i,$$

$$\vec{j}_1 = -(D_{11}^* \nabla c_1 + D_{12}^* \nabla c_2),$$

$$\vec{j}_2 = -(D_{21}^* \nabla c_1 + D_{22}^* \nabla c_2).$$
(1)

Мұнда  $\vec{u}$  - орташа массаның жылдамдығының векторы;  $\vec{u}$  - орташа жылдамдық векторы;  $\rho$  - тығыздық;  $p$  - қысым;  $\eta$  және  $\xi$  - ығысу және көлемдік тұтқырлық коэффициенттері;  $\vec{g}$  - еркін түсу үдеуінің векторы;  $n$  - сандық тығыздық;  $t$  уақыт;  $c_i$  -  $i$  құраушысының концентрациясы;  $\vec{j}_i$  -  $i$  құраушысының диффузиялық ағын тығыздығының векторы;  $D_{ij}^*$  - практикалық диффузия коэффициенттері.

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

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

$$D = c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}.$$

$\mathbf{j}$ ;  $\mathbf{u}$  мен  $\mathbf{v}$  арасындағы байланыс мына қатынаспен анықталады

$$\vec{v} = \sum \vec{j}_i / c_0 \quad \vec{u} = \sum m_i \vec{j}_i / \rho$$

мұндағы  $m_i$  -  $i$ -ші компоненттің молекулалық салмағы,

$$\rho = \sum m_i c_i, \quad c_0 = \sum_{i=1}^n c_i$$

(1) теңдеулер жүйесін ортаның күй теңдеуімен толықтырылса

$$\rho = \rho(c_1, c_2, p) \quad T = \text{const} \quad (2)$$

(1), (2) аз ұйытқуларды қолдана отырып жеңілдетсек [8, 9], онда  $i$  компонентінің концентрациясы  $c_i$  мен  $p$  қысымының санақ басы ретінде қабылданған тұрақты орташа мәндерінің суперпозициясы ретінде ұсынылуы мүмкін. Санау және кіші ауытқулар  $c_i'$ ,  $p'$  келесідей:

$$c_i = \langle c_i \rangle + c_i', \quad p = \langle p \rangle + p'$$

$c_i'$ ,  $p'$  ұйытқулары аз және  $\rho'$  тығыздығының  $\rho_0 = \rho(\langle c_i \rangle, \langle p \rangle)$  орташа мәнінен ауытқуы  $\rho_0$ , -мен салыстырғанда аз, сонымен қатар жылдамдықтардың ұйытқу мәндерінің айырмашылықтары шамалы [10], (1) теңдеулер жүйесін келесі түрдегі ұйытқу теңдеулеріне келтіруге болады (штрихтар алынып тасталды).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + g(\beta_1 c_1 + \beta_2 c_2) \vec{\gamma} \\ \frac{\partial c_1}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_1 &= D_{11}^* \nabla^2 c_1 + D_{12}^* \nabla^2 c_2 \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_2 &= D_{21}^* \nabla^2 c_1 + D_{22}^* \nabla^2 c_2 \\ \text{div} \vec{u} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(3) теңдеулер жүйесіндегі  $\nu = \eta / \rho$  - қоспаның кинематикалық тұтқырлығы,  $\beta_i$  - жылулық ұлғаю коэффициентінің изотерімдік аналогы,  $\vec{\gamma}$  - бірлік вектор.

Берілген масштаб бірліктеріне қатысты (3) теңдеулер жүйесін өлшемсіз түрге келтіреміз:

$$\begin{aligned} x_1^* = \frac{x}{H}, \quad x_2^* = \frac{z}{H}, \quad \tau = \frac{tv}{H^2}, \quad u_1^* = \frac{uH}{D_{22}^*}, \quad u_2^* = \frac{wH}{D_{22}^*} \end{aligned}$$

ұзындықты - , уақытты - , жылдамдықты - , қысымды -

$$p^* = p \frac{H^2}{\rho_0 \nu D_{22}^*}, \quad c_1^* = \frac{c_1}{A_1 H}, \quad c_2^* = \frac{c_2}{A_2 H}$$

$i$  -ші компоненттің концентрациясын . Өлшемсіз түрге келген теңдеулер жүйесі келесі түрде болады (бұдан әрі «\*» белгісі алынып тасталады):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} &= -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} &= -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + R_1 c_1 + R_2 c_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_1}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial c_1}{\partial x_1} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial c_1}{\partial x_2} &= \frac{1}{P_{11}} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x_1^2} + \frac{1}{P_{11}} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x_2^2} + \frac{1}{P_{12}} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x_1^2} + \frac{1}{P_{12}} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x_2^2} \\ \frac{\partial c_2}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial c_2}{\partial x_1} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial c_2}{\partial x_2} &= \frac{1}{P_{21}} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x_1^2} + \frac{1}{P_{21}} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x_2^2} + \frac{1}{P_{22}} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x_1^2} + \frac{1}{P_{22}} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x_2^2} \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Ұқастық критерийінің параметрлері:  $P_{ii} = \frac{\nu}{D_{ii}^*}$  - диффузиялық Прандтль саны,  $R_1 = \frac{g\beta_1 A_1 H^4}{D_{22}^* \nu}$ ,  $R_2 = \frac{g\beta_2 A_2 H^4}{D_{22}^* \nu}$  - парциалды Рэлей саны,  $A_1 = c_1/d$ ,  $A_2 = c_2/d$ .

Тәжірибелік мәліметтерден [10] көріп отырғанымыздай, араласу цилиндрлік каналда жүзеге асырылады. Тығыздығы ауыр және жеңіл бинарлы қоспа компоненттері каналдың жоғарғы бөлігінде, ал орташа тығыздықтағы газ каналдың төменгі бөлігінде орналасады.

Есепті жеңілдету үшін  $(x, y)$  декарттық координаталар жүйесінде цилиндрлік қиманың  $H \times d$  екі өлшемді аймағы қарастырылады, мұндағы  $H$  - цилиндрлік канал биіктігінің ұзындығы, ал  $d = 2r$  - диаметр. Конвекцияның басталуы мен дамуын сипаттайтын изоконцентрация сызықтарын тіркеу үшін екі өлшемді аймақтың қалған бөлігін ескермей компоненттердің диффузиясы пайда болатын осы аймақтың бөлігін ( $H/d \gg 1$ ) қарастыру жеткілікті болады.

(3) теңдеулер жүйесін сандық шешу үшін физикалық параметрлерді бөліну схемасы қолданылады. Кеңістіктік туындылар  $64 \times 64$  түйіні бар біркелкі тікбұрышты торда жуықталған. Уақыт туындылары бірінші ретті айырмашылықтармен жуықталады.

Бірінші кезеңде қозғалыс мөлшерінің тасымалы тек конвекция және диффузия арқылы жүзеге асырылады.

Аралық жылдамдық өрісі айқын Адамс-Бэшфорт схемасын пайдаланып үш нүктелі қуалау әдісі негізінде және конвективтік және диффузиялық мүшелер үшін сәйкесінше кеңістік бойынша екінші ретті дәлдік арқылы табылатын Кранк-Николсон айқын емес схемасын қолдана отырып табылады [9]:

$$\frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}^n}{\tau} = -\bar{u}^n \nabla \bar{u}^n + Ra \bar{C}_1 + \frac{1}{Pr_{11}} Ra \bar{C}_1 + \frac{1}{Pr_{12}} Ra \bar{C}_2 \quad (5)$$

Екінші кезеңде табылған аралық жылдамдық өрісі бойынша Фурье әдісі арқылы қысым өрісі табылады [11]:

$$\Delta p = \frac{\nabla \bar{u}}{\tau} \quad (6)$$

Үшінші кезеңде тасымалдау жылдамдықтың соңғы өрісі қайта есептелетін қысым градиенті есебінен ғана жүзеге асырылады деп есептеледі:

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} \right) \quad (7)$$

Төртінші кезеңде табылған жылдамдық өрістерін ескере отырып, Адамс-Башфорт схемасы бойынша бес нүктелі қуалау әдісі негізінде қоспаның компоненттерінің концентрациясы есептеледі.

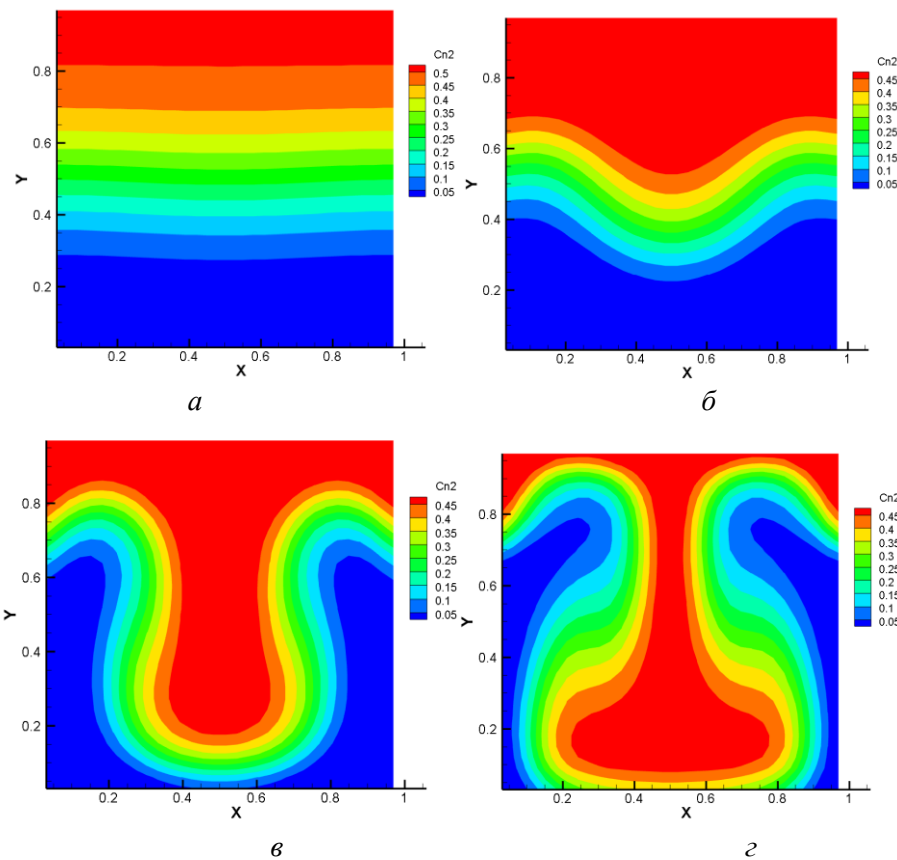
$$\frac{\bar{C}_1^{n+1} - \bar{C}_1^n}{\tau} = -\left( \bar{u}^n \nabla \right) \bar{C}_1^n + A \bar{C}_1^n - \frac{1}{Pr_{11}} \bar{C}_1^n + \frac{1}{Pr_{12}} \bar{C}_2^n \quad (8)$$

$$\frac{\bar{C}_2^{n+1} - \bar{C}_2^n}{\tau} = -(\bar{u} \bar{C}_2 \nabla) \bar{C}_2^* + A \frac{I}{Pr_{21}} - \frac{I}{Pr_{22}} \quad (9)$$

### Сандық модельдеу нәтижелері

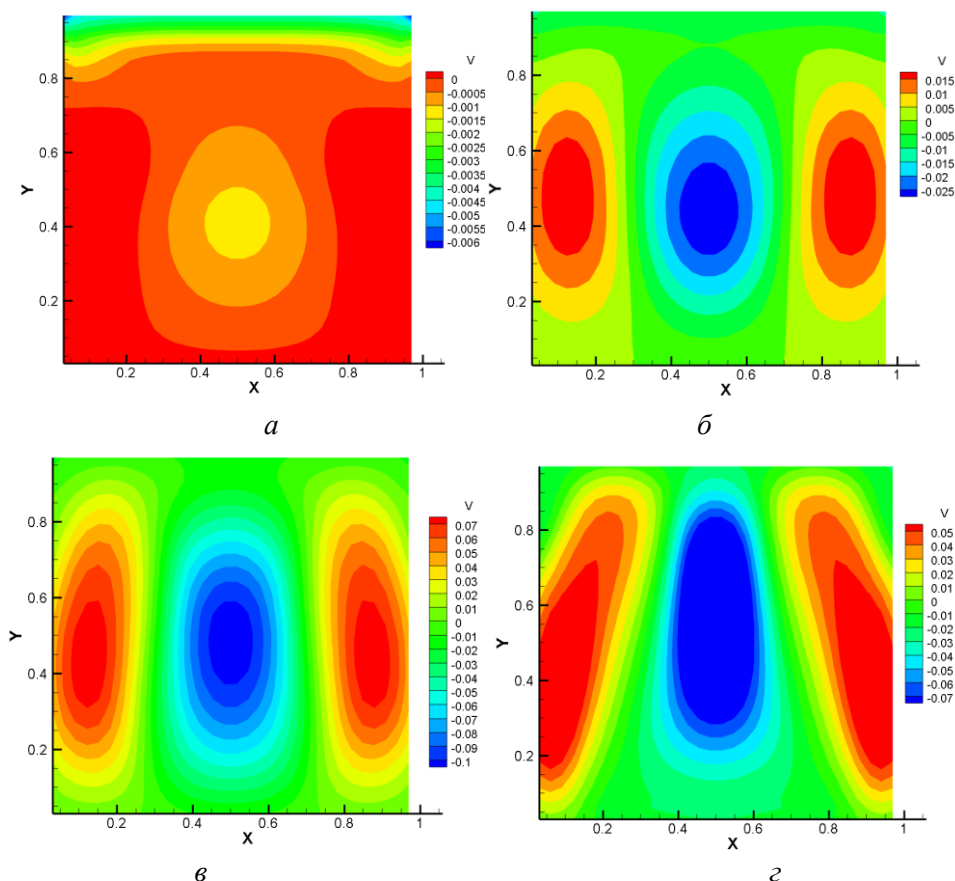
1 (а-г) – суретте әртүрлі уақыт мезетінде және  $p=0,5-2,0$  МПа қысым интервалында  $0,5He + 0,5Ar - CH_4$  жүйесі үшін диффузия мен конвективті араластыруды сипаттайтын сандық нәтижелер көрсетілген.

Сандық зерттеу нәтижелерін талдау барысында  $p=1,0$  МПа қысым кезінде изоконцентрация сызықтарының бейнесі қисық болатынын көрсетеді. Қысымның одан әрі артуы аргон концентрациясы сызықтарының қисаюына әкеледі, олар уақыт бойынша айтарлықтай сызықты емес болады. Уақыт өте келе конвективті құрылымдық түзілімдерге жағдайлар жасалады және диффузиялық режимнен конвективтіге ауысу жүреді. Режимдердің өзгеру уақыты бірнеше секунд, бұл [10] келтірілген нәтижелерге сәйкес келеді.



Сурет 1. Аргон концентрациясының уақыт бойынша өзгеру динамикасы  $T = 298,0$  К,  $t=19,26$  с,  $L = 165 \cdot 10^{-3}$  м,  $r = 3 \cdot 10^{-3}$  м: а)  $p = 0,5$  МПа; б)  $p = 1,0$  МПа; в)  $p = 1,5$  МПа; г)  $p = 2,0$  МПа

2-суретте есептеу нәтижелері көрсеткендей, бастапқы кезеңде аз жылдамдықпен ағындар пайда болады. Содан кейін неғұрлым қарқынды ағыстардың дамуы изоконцентрация сызықтарының айтарлықтай қисаюына және тасымалдау жылдамдығының жоғарылауына әкеледі.



Сурет 2.  $0,5\text{He}+0,5\text{Ar}-\text{CH}_4$  жүйесіндегі жылдамдықтың үлестірілуі,  $T = 298,0 \text{ K}$ ,  $t=19,26\text{c}$ ,  
 $L = 165 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ,  $r = 3 \cdot 10^{-3}\text{м}$ : а)  $p=0,5\text{МПа}$ ; б)  $p= 1,0\text{МПа}$ ; в)  $p= 1,5\text{МПа}$ ; г)  $p= 2,0\text{МПа}$

Зерттеліп отырған жүйедегі қоспаның механикалық тепе-теңдігінің бұзылу уақыты ондаған секундты құрайды, оны [10] -де келтірілген тәжірибелік мәліметтермен салыстыруға болады. Содан кейін конвективті ағыстардың қарқынды дамуы байқалады. Конвективті ағындар ауқымды құрылым түрінде жүзеге асырылады.

Сонымен, есептеу нәтижелері көрсеткендей, қолданылған модель мен есептеу әдісі «диффузия - концентрация конвекциясы» режимдерінің өзгеру параметрлерін анықтауға, изотермиялық үшкомпонентті газ қоспалары үшін конвективті тұрақсыздық режиміндегі концентрация өрістері туралы сенімді мәліметтерді алуға мүмкіндік береді.

Жұмыс ҚР ғылым және білім Министрлігінің ғылым Комитетінің №AP08955418 «Компоненттердің диффузия коэффициенттері айырмашылығы есебінен вертикаль каналда пайда болатын төрт компонентті газ қоспаларындағы массатасымалдау ерекшеліктерін сандық зерттеу» жобасы аясында жасалды.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

- 1 Taylor R., Krishna R. *Multicomponent mass transfer*. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993. – 616 p.
- 2 Kaminskii V.A., Obvintseva N. Yu. *Evaporation Regimes of Binary Solutions // Theor. Found. Chem. Engin.* – 2007. – Vol. 41. – P. 512-518.
- 3 Джозеф Д. *Устойчивость движений жидкости*. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 639 с.
- 4 Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin Yu.I. *Separation of Components during Isothermal Mixing of Ternary Gas Systems under Free Convection Conditions // Tech. Phys.* – 1997. – Vol. 42. – P. 1236-1237.
- 5 Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Fedorenko O. V., Akholova A. A. *Some Features of the Multicomponent Gas Transfer in the Convective Instability of Gas Mixture // Theor. Found. Chem. Engin.* – 2016. – Vol. 50. – P. 171-177.
- 6 Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V. *Instability of mechanical equilibrium during diffusion in a three-component gas mixture in a vertical cylinder with a circular cross section // Tech. Phys.* – 2014. – Vol. 59. – P. 482-486.

- 7 Dil'man V.V., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. *Instability in unsteady-state evaporation of binary solutions into an inert gas // Theor. Found. Chem. Engin.* – 2005. – Vol. 39. – P. 566-572.
- 8 Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости.* – М.: Наука, 1972. – 392 с.
- 9 Abdibekova A.U., Zhakebayev D.B., Zhumagulov B.T. *The Decay of MHD Turbulence Depending on the Conducting Properties of Environment // Magnetohydrodynamics.* – 2014. – Vol. 50, No. 2, – P. 121-138.
- 10 Косов В.Н., Селезнев В.Д. *Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции и изотермических тройных газовых смесях.* – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 149 с.
- 11 Косов В.Н., Жакебаев Д.Б., Федоренко О.В. *Численный анализ конвективных движений, возникающих при изотермической диффузии в вертикальных каналах в трехкомпонентных газовых смесях // Известия НАН РК.* – 2017. – Т. 315, Выпуск 5. – С. 134-142.

#### References

1. Taylor R., Krishna R. (1993) *Multicomponent mass transfer.* – New York: John Wiley & Sons, Inc., 616
2. Kaminskii V.A., Obvintseva N. Yu. (2007). *Evaporation Regimes of Binary Solutions // Theor. Found. Chem. Engin.* – Vol. 41. – P. 512-518.
3. Dzhozef D. (1981) *Ustojchivost' dvizhenij zhidkosti. Per. s angl.[Stability of fluid movements.]* М.: Mir, 639 (In Russian)
4. Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin Yu.I. (1997) *Separation of Components during Isothermal Mixing of Ternary Gas Systems under Free Convection Conditions // Tech. Phys.* Vol. 42. – P. 1236-1237.
5. Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Fedorenko O. V., Akzholova A. A. (2016) *Some Features of the Multicomponent Gas Transfer in the Convective Instability of Gas Mixture // Theor. Found. Chem. Engin.* Vol. 50. P. 171-177.
6. Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V. (2014) *Instability of mechanical equilibrium during diffusion in a three-component gas mixture in a vertical cylinder with a circular cross section // Tech. Phys.* – Vol. 59. – P. 482-486.
7. Dil'man V.V., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. (2005) *Instability in unsteady-state evaporation of binary solutions into an inert gas // Theor. Found. Chem. Engin.* – Vol. 39. – P. 566-572.
8. Gershuni G.Z., Zhuhovickij E.M (1972). *Konvektivnaja ustojchivost' neshzhimaemoj zhidkosti. [Convective stability of an incompressible fluid]–* М.: Nauka, 392. (In Russian)
9. Abdibekova A.U., Zhakebayev D.B., Zhumagulov B.T. (2014) *The Decay of MHD Turbulence Depending on the Conducting Properties of Environment // Magnetohydrodynamics..* – Vol. 50, No. 2, – P. 121-138.
10. Kosov V.N., Seleznev V.D. (2004) *Anomal'noe vzniknovenie svobodnoj gravitacionnoj konvekcii i izotermicheskikh trojnyh gazovyh smesjah [Abnormal occurrence of free gravitational convection and isothermal ternary gas mixtures].* Ekaterinburg: UrO RAN, 149 (In Russian)
11. Kosov V.N., Zhakebaev D.B., Fedorenko O.V. (2017) *Chislennyj analiz konvektivnyh dvizhenij, vznikajushhih pri izotermicheskoj diffuzii v vertikal'nyh kanalakh v trehkomponentnyh gazovyh smesjah [ Numerical analysis of convective motions arising from isothermal diffusion in vertical channels in three -component gas mixtures] // Izvestija NAN RK.* T. 315, Vypusk 5. 134-142. (In Russian)