

FTAMP 30.17.33

С.Ш. Егембердиева<sup>1</sup> – негізгі автор, ©  
Р.Ж. Наметкулова<sup>2</sup>, Б.Ж. Кушкимбаева<sup>3</sup>,  
Ә. Шымбай<sup>4</sup>



<sup>1,3</sup>Физ.-мат. ғылым. канд., доцент, <sup>2</sup>Аға оқытушы, <sup>4</sup>Магистрант

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0005-2418-2544> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1658-152X>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-0572-0800> <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0002-2714-6352>



М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті,



Тараз қ., Қазақстан Республикасы



<sup>2</sup>[s.egemberdieva@bk.ru](mailto:s.egemberdieva@bk.ru)

<https://doi.org/10.55956/DUFX3652>

## ГАЗДАРДЫҢ ИЗОТЕРМИЯЛЫҚ ДИФФУЗИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

**Андатпа.** Жұмыста орташа тығыздықтағы газдардың изотермиялық диффузия құбылысы кинетикалық теория тұрғысынан қарастылып, өзара диффузия коэффициенті лазерлік интерферометрия әдісіне негізделген қондырғының көмегімен анықталды. Не – Аг жүйесінің диффузия және сығылғыштық коэффициенттерінің концентрацияға тәуелділігі теориялық зерттеліп, эксперимент нәтижесімен сәйкестігі көрсетілді.

**Тірек сөздер:** диффузия, өзара диффузия коэффициенті, сығылғыштық коэффициенті, концентрация, бинарлық газ қоспасы.



Егембердиева, С.Ш. Газдардың изотермиялық диффузиясын зерттеу [Мәтін] / С.Ш. Егембердиева, Р.Ж. Наметкулова, Б.Ж. Кушкимбаева, Ә. Шымбай // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №1(83). – Б.261-272.  
<https://doi.org/10.55956/DUFX3652>

**Кіріспе.** Диффузия маңызды орын алатын үрдістерді тереңірек игеру қажеттігі химиялық және мұнайхимиялық, сонымен бірге газ өндірісінің дамуына байланысты туындады. Көптеген технологиялық үрдістердің: абсорбция, ректификация, булану, сонымен қатар конденсация және т.б. үдерістердің негізі диффузия құбылысы болып табылады.

Диффузия процесіне қатысатын газ молекулаларының өзара әсерлесу потенциалдарының параметрлерін алу және диффузия механизмін анықтау диффузия құбылысын зерттеу мақсатында маңызды рөл атқарады. Кинетикалық теорияны және молекулалардың өзара әсерлесу потенциалдарының үлгісін таңдаудың дұрыстығын тексеру диффузия коэффициентін эксперимент жүзінде анықтауға мүмкіндік береді. Больцман теңдеуінің көмегімен анықталатын таралудың тепе-тең емес функциясын қатаң кинетикалық теорияда қолданады. Осы теория бізде бинарлық соқтығысулары ғана ескерілетін және молекулаларының өлшемі молекулаларының арасындағы орташа қашықтықпен салыстырғанда кіші болатын жеткілікті сиретілген газдарға қолданылады. Тығыз газдарды зерттеген кезде бұл шарттар орындалмауына байланысты Больцман теңдеулерінде түзетулер жүргізіледі.

Сонымен қатар, тек қана газ жылулық тепе-теңдік күйінде болған жағдай үшін Больцман теңдеуінің қатаң шешімін аламыз. Тек алғашқы қадамдар жасалып жатқан тығыз газдар үшін Больцман теңдеуінің қатаң кинетикалық теориясын қолдану мүмкін емес. Диффузия зат алмасу процесінде маңызды рөл атқарады, атап айтсақ: аммиакты табиғи газдан синтездеу, газ тәрзіді отындардың жануы. Бинарлық қоспа жағдайына арналған зат тасымалдау тұрақтысы туралы білімдер жеткіліксіз, оған қазіргі таңдағы химиялық технологиялардың, ракеталық және авиакосмостық техникалардың өнеркәсіптік аппараттарын жасау және есептеулері арқылы көзіміз жетеді.

Газдың таза бинарлық қасиеті, сонымен қатар көпкомпонентті қоспаларының термодинамикалық қасиеттері туралы сенімді ақпараттар бір қатар газды және химиялық өндірісте инженерлік есептеулер үшін қажет. Қажетті қысым мен температураның интервалдары әртүрлі болған жағдайда ғана нақты технологиялық процестің барысында анықталады. Бірақ, диффузияның заңдылықтары мен есептеулер әдісін игере білу керек.

Әртүрлі көпкомпонентті қоспалармен байланысты табиғи және технологиялық процестерді қарастыру барысында, біз оның негізгі масса тасымалдауының ерекшеліктерін көрсететін параметрлерді білуге тиіспіз. Өте кең зерттеулерді кері диффузия, диффузиялық бөгет сияқты эффектілерге нақты кездесетін заттар мен құбылыстардың алуан түрлі болуына байланысты олардың масса тасымалдауын анықтайтын коэффициенттер мәндерінің әртүрлі болуы алып келеді, тұйықталған екі колбалық жүйе әдісімен осы эффектілер тәжірибе жүзінде зерттеледі [1].

Жабық ыдысқа немесе зертханалық аппаратқа толтырылған газ қоспасындағы газ молекулаларының бір-біріне өту жылдамдығы, лездігі диффузияның эффективті коэффициенті (ДЭК) деп аталады. Газ қоспаларындағы зат алмасу процесін есептеу ДЭК анықталса қатты қиынға түспейді. Сонымен қатар, іздік диффузия коэффициенттерін есептеу газдар мен булардың идеал еместігімен байланысты енгізілген түзетулерді нөлге айналдыруға, жоғары қысымдар мен төменгі температурада ескеруге болатындай мүмкіндік береді.

Диффузия құбылысының кинетикалық теориясын қарастыру және газдардың өзара диффузия коэффициенттерін анықтау әдістерін жан-жақты қарастыру, өзара диффузия коэффициентін лазерлік интерферометрия әдісіне негізделген қондырғының көмегімен өлшеп зерттеуге болады.

Кейбір газдардың жұптарына арналған өзара диффузия коэффициенттерінің нақты өлшеулер нәтижелерін Энског – Торнның [2] қатаң кинетикалық теориясы бойынша өзара диффузия коэффициенттерінің есептеулерінен көруге болады. Мұндайда теория мен эксперименттің ауытқуы ондаған пайызды құрайды.

Қазіргі кезде сиретілген газдардағы диффузияны суреттеуде екі кинетикалық теорияны қолданады – қатаң (Чепменнің [2,3], Энског – Торнның [4]) және элементар (Максвелл – Больцман – Джинстың [5,6]), олар сиретілген газдардағы диффузияны жақсы суреттейді.

Қатаң кинетикалық теорияның шеңберінде өзара диффузияның қысымына тәуелді болғанын суреттей алмаймыз. Осы теориялардың аясында, диффузия коэффициенттерінің өзара газдарының қысымдық тәуелділігін сипаттап, нақты қасиеттерін көрсете алатын формулаларды алу мүмкіндігін қарастырамыз.

Бұл жұмыста бірқатар көмірсутек жүйелері үшін әртүрлі қысымдардағы өзара диффузия коэффициенттерінің концентрациялық тәуелділігіне талдау

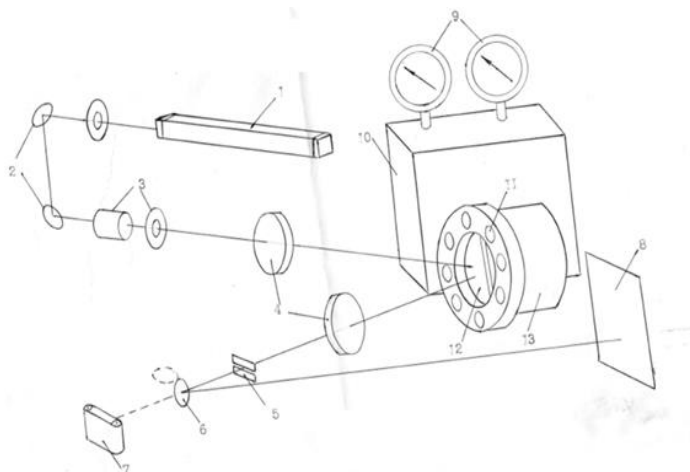
жасалды. 1-кестеде келтірілген өлшеу нәтижелері сутегі-көмірқышқыл газы жүйесіне жатады. Кестедегі деректерді талдау біздің формуламыз берілген жүйедегі газдардың өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігін сәтті сипаттайтынын көрсетеді. Бұл тұжырым әртүрлі көмірсутек жүйелерінің нәтижелерін салыстырмалы талдау арқылы расталады, мұнда теориялық және эксперименттік деректер арасында тамаша сәйкестік бар.

Кесте 1

Түрлі қысым мен концентрациядағы сутегі-көмір қышқыл газ жүйесіндегі өзара диффузия коэффициенттері ( $T = 297 \text{ K}$ )

P, МПа	Өзара диффузия коэффициенттері, $D_{12}$ , $\text{cm}^2/\text{c}$					
	100 % , 100 % $\text{CO}_2$		73 % $\text{H}_2$ + 27 % $\text{CO}_2$ , 100 % $\text{H}_2$		13 % $\text{H}_2$ + 87 % $\text{CO}_2$ , 100 % $\text{CO}_2$	
	Эксперимент	Теория (6)	Эксперимент	Теория (6)	Эксперимент	Теория (6)
0,1	0,645	0,644	0,574	0,572	0,706	0,708
1,0	0,0615	0,0615	0,0580	0,0573	0,0672	0,0674
3,0	0,0186	0,0187	0,0185	0,0182	0,0202	0,0201
5,0	0,0093	0,0092	0,0120	0,0119	0,0101	0,0099
Орташа ауытқу шамасы, $\epsilon\%$		0,44		1,00		0,76

**Зерттеу шарттары мен әдістері.** Эксперименттік қондырғы қысымды өлшеу жүйесін, диффузия үшін шекаралық немесе бастапқы жағдайларды құруды және интерферограмма алу жүйесін қамтиды. 1-суретте осы қондырғының сұлбасы көрсетілген.



Сурет 1. Эксперименттік қондырғы

Эксперименттік қондырғының негізгі бөлігі – жоғары беріктігі бар материалдан жасалған қалың қабырғалы цилиндрлік ыдыс болып табылатын барокамера. Барокамера бірнеше функцияларды орындайды, мысалы, барокамераның ішіндегі диффузиялық кюветті босату, кюветтің оптикалық туралануын орындау және диффузия процесінің шекаралық немесе бастапқы жағдайларын жасау. Барокамера қақпағы кюветтегі диффузиялық қабаттың екі

сәулелік интерференциясын және диффузиялық кюветтің ішкі көлемін жарықтандыруды суретке түсіруге мүмкіндік беретін етіп жасалған.

Түтіктер таза газбен толтырар алдында жүйені тазартуға (ішіндегі қалған газды сорып алуға) және газ ағынын басқаруға арналған арнайы тот баспайтын болаттан жасалған клапандармен жабдықталған. *11* вакуумдық сорғы газды сору үшін қолданылады. Эксперимент кезінде жүйедегі қысым *12* және *13* манометрлермен бақыланады.

Қондырғыдағы өзара диффузия коэффициентін өлшеу үшін келесі операциялар орындалды. Экспериментке дейін *5* вентильдің көмегімен барокамера мен кювета *1* газбен *P* қысымға дейін толтырылды, ал *3* вентильдің көмегімен қосымша көлем *2* газбен *P+ΔP* қысымға дейін толтырылды, мұндағы  $\Delta P/P=0,01$ . Бұл жерде *4*, *6* және *9* вентильдер жабық, ал *7* және *8* вентильдер ашық болды. Содан кейін *6* вентиль ашылды, нәтижесінде *2* газ *16* қосымша көлемнен кювета, барокамера және жалғастырушы түтікшелерден тұратын көлемге ұлғаяды.

Қосымша көлемнен диффузиялық кюветаға түсетін екінші газдың  $\delta$  көлемі келесі өрнектен анықталады:

$$\delta = \frac{\Delta P \cdot V_c \cdot V_\delta}{(P + \Delta P)V_c + P \cdot V_\delta}. \quad (1)$$

Бірінші рет жіберілгеннен кейінгі кюветадағы *2* газдың тепе-тең көлемдік концентрациясын, *18* капиллярдың *V* көлемін ескере отырып табуға болады:

$$c_1 = \frac{\delta - V}{V_K}. \quad (2)$$

Бұл қондырғыдағы капиллярлар, кювета және барокамера, осы амалдарды орындау кезіндегі қысым үшін релаксация уақыты концентрацияның релаксация уақытынан әлдеқайда кіші болатындай етіп таңдап алынған.  $V_c$  және  $V_\delta$  көлемдеріндегі қысымдар *2* газды жібергеннен кейін шамамен *5* секундтан кейін теңеседі.

Газ *2*-кюветке жібермес бұрын нөлдік интерферограмманы суретке түсіру жүргізіледі. Содан кейін әр *15-20* секунд сайын жұмыс істейтін интерферограммалар алынады.

Кюветте газдың бірінші шығарылуынан және одан кейінгі диффузиядан кейін тепе-теңдік концентрациясы белгіленеді. Бұл процестің интерферограммасын талдау тепе-теңдік концентрациясына қатысты өзара диффузия коэффициентін анықтауға мүмкіндік береді.

Дәл реттеу клапандары мен түтіктерінде дроссельдеу кезінде барокамера мен кюветтерді зерттеу ерекшеленеді. Есептеулерге сәйкес, барокамераның жылусыйымдылығы оның ішіндегі газдың жылусыйымдылығынан мың еседен де жоғары болады, ал Био критерийі  $Bi > 100$ . Ендеше, есепте қарапайым түрдегі бірінші текті шекаралық шарт берілген жылулық жүзеге асырылады. Келесі өрнекті осыған ұқсас есептердің белгілі шешімін пайдаланып аламыз:

$$F_0 = \frac{a \cdot t}{r^2} = 1, \quad (3)$$

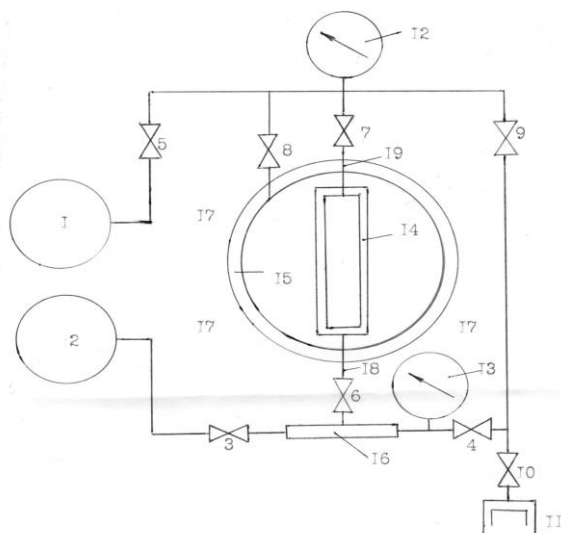
мұндағы  $F_0$  – Фурье саны;  $a$  – барокамера ішіндегі газдың температура өткізгіштігі;  $r$  – барокамераның ішкі радиусы;  $t$  – барокамера ішіндегі температура біртекті болып қалыптасатын және қабырға температурасына теңесетін уақыт аралығы.

(3) өрнектен табылған шама уақыт бойынша бір сағаттан аспайды. Ендеше, газдың температурасы оның қабырғаларының температурасына барокамераны толтырғаннан бір сағаттан кейін тең болады, және жылулық ағындар ескермейтіндей аз болады.

Диффузия процесінде қоспалардың концентрация өрісін бақылау лазерлік интерферометрия әдісін қолдану арқылы жүзеге асырылады. 1-суретте көрсетілген орнату сұлбасында оптикалық диффузиялық кювет негізгі элемент ретінде әрекет етеді. Лазер сәулелері 1 оптикалық кеңейткіш 3 арқылы өтіп, параллель сәулелер шоғырын құрайды. Бұл сәуле диффузиялық кюветтің жазық жақтарынан шағылысқаннан кейін 7 камера орамында тіркелген интерференция үлгісін жасайды.

Қондырғы стационарлық емес концентрация өрістерін зерттеуге арналған және интерферограммалар жоғары қысымдағы диффузия коэффициентін анықтау үшін қолданылады. Диффузиялық кювет барокамерада орнатылған.

ЛГ-79 лазер сәулесінің кеңістіктік когеренттілігі сәуле сәулелерінің интерференциясын бөлуге және басқаруға мүмкіндік береді. Лазер сәулесінің бұл қасиеті зерттеу жүргізу үшін қажетті интерференциялық үлгіні қалыптастыру және бөлу үшін қолданылады. Барлық оптикалық элементтерді бір ось бойымен туралау үшін сәуленің басқа сипаттамалары қолданылады, мысалы, оның толықтығы мен жоғары жарықтығы.



1,2 – таза газдары бар баллондар; 3-10 – дәл реттеу вентилдері; 11- вакуумдық сорғы; 12-13 – манометрлер; 14 – оптикалық диффузиялық кювета; 15 – барокамера; 16 – қосымша көлем; 17 – кюветаны юстировкау вентилі; 18-19 – капиллярлар.

Сурет 2. Қондырғының негізгі түйіндерін жалғау сұлбасы

Өзара диффузия коэффициентін өлшеу әдістемесі. Барокамера кюветамен бірге тазартудың бірнеше кезеңдерін жүргізеді, оны зерттелетін газбен жуады, нәтижесінде диффузия процесін көрсететін интерферограммалар пайда болады. Содан кейін оптикалық жүйеде туралау жүргізіледі және олардың ені талаптарға сай болатындай етіп интерференциялық жолақтар алынып тасталады. Осыдан кейін нөлдік интерферограмма ашылады.

Біртекті емес құрамы бар қоспаны жасау үшін екінші реттік зерттелетін газдың белгілі бір мөлшері жоғарғы (егер газ жеңіл болса) немесе төменгі (егер газ ауыр болса) бөлікке жіберіледі. Камера алынған оптикалық гетерогенді кедергі жолақтарын түсіреді және талдайды. Диффузия процесінде гетерогенділіктің төмендеуімен әр 15-20 секунд сайын фотоленкаға мәліметтер жазылады.

Өзара диффузия коэффициентін анықтау диффузия теңдеуін шешуге негізделген интерферограмманы өңдеу арқылы мүмкін болады. Фиктің екінші заңы көмегімен стационар емес диффузия процесі қысым мен температураның белгілі интервалы сипатталады:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{12} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Біздің экспериментке сәйкес келетін бастапқы және шекаралық шарттар:

$$\frac{\partial c(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial c(l, t)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$c(x, 0) = f(x) \quad (6)$$

бойынша (4) теңдеуінің шешімі келесі түрде жазылады:

$$c(x, t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{12} k^2 t}{l^2}\right) \cos\left(\frac{k\pi x}{l}\right), \quad (7)$$

мұндағы

$$a_k = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cos\left(\frac{\pi k x}{l}\right) dx, \quad (8)$$

$0 < x < l$ ,  $0 < t < \infty$ ,  $l$  - кюветаның ұзындығы.

Мүшенің номері артқан сайын қатардағы мүшелердің сандық мәндері өте жылдам кемиді. Сол себепті тек алдыңғы бірнеше, мысалы, алты мүшесімен ғана шектелу қажет. 2- кестедегі мысал арқылы қатар мүшелерінің кемуі көрсетілген.

Кесте 2

Қатар мүшелерінің кемуі

$n$	1	2	3	4	5	6
$\frac{a_n}{a_0}$	0,660	0,194	0,047	0,017	0,006	0,001

Егер  $x_1 = x$ , ал  $x_2 = l - x$  болса, онда (1) формуласын қолданып, келесі өрнекті аламыз:

$$\begin{aligned} \Delta c &= c(x_1, t) - c(x_2, t) = c(x, t) - c(l - x, t) \\ &= 2a_1 \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{12} t}{l^2}\right) + \\ &+ 2a_3 \cos\left(\frac{3\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{9\pi^2 D_{12} t}{l^2}\right) + 2a_5 \cos\left(\frac{5\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{25\pi^2 D_{12} t}{l^2}\right) + \dots (9) \end{aligned}$$

Сонымен, қатардың тек тақ мүшелері ғана қалады екен. (9)-формуладағы біріншісіне қарағанда екінші мүше көп кіші болуы мүмкін, егер біз  $x_1 = \frac{l}{6}$ ,  $x_2 = \frac{5l}{6}$  нүктелеріндегі концентрациялар айырымын өлшесек.

Сонда алатынымыз:

$$\Delta c = 2a_1 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{12} t}{l^2}\right) \quad (10)$$

$$\ln \Delta c = \text{const} - \frac{\pi^2 D_{12} t}{l^2}. \quad (11)$$

Әр түрлі уақыт мезеттерінде:

$$\ln \Delta c_1(t_1) = \text{const} - \frac{\pi^2 D_{12} t_1}{l^2} \quad (12)$$

$$\ln \Delta c_2(t_2) = \text{const} - \frac{\pi^2 D_{12} t_2}{l^2}. \quad (13)$$

Бұл өрнектерден шығатыны:

$$D_{12} = a' \frac{l^2}{\pi^2}, \quad (14)$$

$$a' = \frac{d \ln \Delta c}{dt}. \quad (15)$$

$\ln \Delta c = f(t)$  сызықтық тәуелділігіндегі түзудің көлбеулік бұрышының тангенсі (15) өрнегі болып табылады. (12) және (15) формулаларды қолданып, алатынымыз:

$$D_{12} = a \frac{l^2}{\pi^2}, \quad (16)$$

$$a = \frac{d \ln N}{dt}$$

мұндағы  $N$  - интерференциялық жолақтардың саны.

Микроскоп интерферограмманы расшифровкалау үшін қолданылды.  $x_1 = \frac{l}{6}$ ,  $x_2 = \frac{5l}{6}$  нүктелеріне сәйкес келетін расшифровкалау шектері интерферограммаға қойылды. Осы шектегі микроскоп крестігімен

қиылысатын жолақтарды саны анықталды.  $\ln N = f(t)$  тәуелділігінің графигі  $D_{12}$  коэффициентін есептеу үшін тұрғызылды.  $a$ -н мәні ең кіші квадраттар әдісімен анықталды. Содан соң өзара диффузия коэффициенті (16) формула бойынша есептелді.

**Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау.** He–Ar жүйесінің әртүрлі қысымдар мен температуралардағы өзара диффузия коэффициенттері ( $T=295$  К) жоғарыда сипатталған қондырғының көмегімен өлшенді. Өлшеу нәтижелері 3-6 суреттерде келтірілген.

Өзара диффузия коэффициенттерін есептеу идеалды емес газдардың кинетикалық теориясының формулалары бойынша жүргізілді. Графиктерде теориялық мәндер қатты сызықтар түрінде ұсынылған, ал эксперименттік нүктелер өлшеу нәтижелерін көрсетеді.

Орташа диффузия коэффициентінің мәні стационарлық емес әдістермен анықталады. Нақты концентрацияны өлшенген өзара диффузия коэффициентіне қатысты дәл алу мүмкін емес. Әрбір экспериментте тепе-теңдік концентрациясына қатысты мәндер алынды. Өлшенген өзара диффузия коэффициенттері бұл жағдайда тепе-теңдік концентрациясына қатысты есептелді.

Өзара диффузия коэффициентінің теориялық мәндері эксперименттік мәндерден өзгеше екендігі атап өтілді. Мұндай ауытқу сфералық молекулалар мен олардың диаметрлерін таңдаумен байланысты деп болжанады. Өйткені, тұтқырлық коэффициенттерінен  $\sigma_{11}$  және  $\sigma_{22}$  диаметрлері алынған еді. Есептеулерде соқтығысу диаметрлерінің келесі мәндері He – Ar жүйесі үшін қолданылды:  $\sigma_{11} = 1,495 \cdot 10^{-10}$  м,  $\sigma_{22} = 3,304 \cdot 10^{-10}$  м, ал He – Ne үшін:  $\sigma_{11} = 2,006 \cdot 10^{-10}$  м,  $\sigma_{22} = 2,651 \cdot 10^{-10}$  м.

(16) формуладағы  $a$  коэффициентін өлшеудің  $\frac{\Delta a}{a}$  қателігі мен кюветаның ұзындығын өлшеудің  $\frac{\Delta l}{l}$  қателігінің қосындысы диффузия коэффициентін өлшеу қателіктерін талдау бойынша, қорытынды қателікке тең:

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta l}{l}\right)^2}.$$

Кюветада тәжірибелер ұзындығы  $l = 9,09 \cdot 10^{-2}$  м, өлшеудің салыстырмалы қателігі  $\frac{\Delta l}{l} = 1,09 \cdot 10^{-2}\%$ , жүргізілді.  $\frac{\Delta a}{a}$  салыстырмалы қателігі ең кіші квадраттар әдісімен, барлық алынған мәндерді ескере отырып анықталды.

Қателікті бағалау үшін He – Ne жүйесі үшін  $T=295$  К және  $P=8$  МПа болғандағы өзара диффузия коэффициентін өлшеуді мысалға аламыз.

$$\Delta a = S_a \cdot t_s = 9,96 \cdot 10^{-6},$$

$$\frac{\Delta a}{a} = 0,78 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{(0,78 \cdot 10^{-2})^2 + (2 \cdot 1,09 \cdot 10^{-2})^2} = 9,52 \cdot 10^{-2}$$



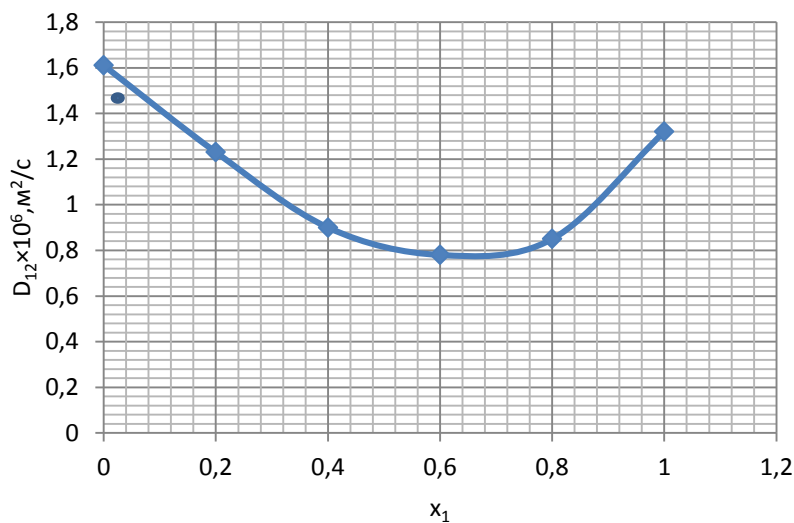
$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} \cdot 100\% = 0,95\%.$$

Сонымен, өзара диффузия коэффициентін өлшеудің эксперименттік қателігі 1%-дан аспайды. Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының және өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=4МПа, T=295K ( $\sigma_{11} = 1,495 \cdot 10^{-10}$ М,  $\sigma_{22} = 3,304 \cdot 10^{-10}$ М) 3-кестеде көрсетілген. Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының және өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=5МПа, T=295K ( $\sigma_{11} = 1,495 \cdot 10^{-10}$ М,  $\sigma_{22} = 3,304 \cdot 10^{-10}$ М) 4-кестеде көрсетілген.

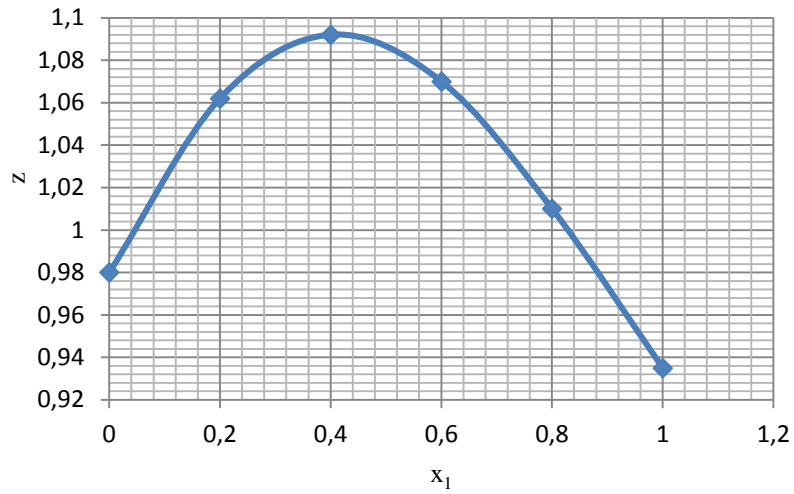
Кесте 3

Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының және өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=4МПа, T=295K ( $\sigma_{11} = 1,495 \cdot 10^{-10}$ М,  $\sigma_{22} = 3,304 \cdot 10^{-10}$ М)

x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	z	D <sub>12</sub> ×10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с
0	1	1,0857	1,26	1,17	0,98	1,61
0,2	0,8	1,0774	1,21	1,14	1,062	1,23
0,4	0,6	1,0692	1,16	1,11	1,092	0,9
0,6	0,4	1,0609	1,11	1,08	1,07	0,78
0,8	0,2	1,0527	1,07	1,05	1,01	0,85
1	0	1,0444	1,02	1,02	0,935	1,32



Сурет 3. Гелий-аргон жүйесінің өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=4МПа, T=295K

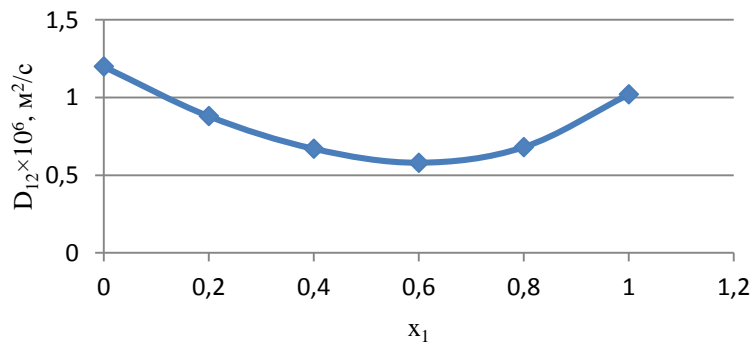


Сурет 4. Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының концентрацияға тәуелділігі, P=4 МПа, T=295К

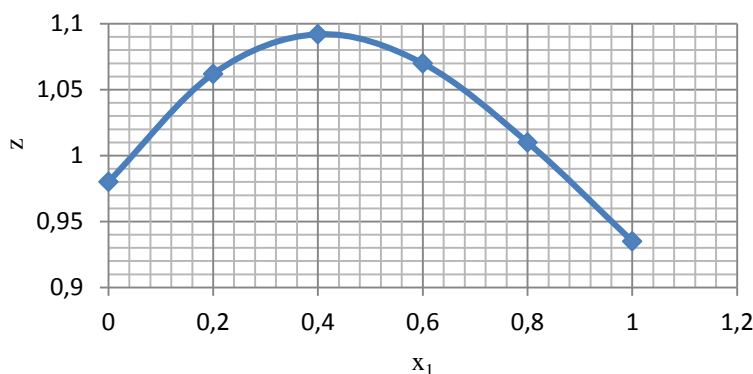
Кесте 4

Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының және өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=5МПа, T=295К  
( $\sigma_{11} = 1,495 \cdot 10^{-10} \text{М}$ ,  $\sigma_{22} = 3,304 \cdot 10^{-10} \text{М}$ )

$x_1$	$x_2$	$z$	$D_{12} \times 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
0	1	0,932	1,2
0,2	0,8	1,05	0,88
0,4	0,6	1,082	0,67
0,6	0,4	1,063	0,58
0,8	0,2	1,003	0,68
1	0	0,919	1,02



Сурет 5. Гелий-аргон жүйесінің өзара диффузия коэффициентінің концентрацияға тәуелділігі, P=5МПа, T=295К



Сурет 6. Гелий-аргон жүйесінің сығылғыштық факторының концентрацияға тәуелділігі,  $P=5$  МПа,  $T=295$  К

**Қорытынды.** Нақты концентрацияны өлшенген өзара диффузия коэффициентіне қатысты дәл алу мүмкін емес. Сондықтан әрбір экспериментте тепе-теңдік концентрациясына қатысты мәндер алынды. Өлшенген өзара диффузия коэффициенттері бұл жағдайда тепе-теңдік концентрациясына қатысты есептелді.

Өзара диффузия коэффициентінің теориялық мәндері эксперименттік мәндерден өзгеше екендігі атап өтілді. Мұндай ауытқу сфералық молекулалар мен олардың диаметрлерін таңдаумен байланысты деп болжанады. Өзара диффузия коэффициентін өлшеудің эксперименттік қателігі 1%-дан аспайды.

#### Әдебиеттер тізімі

1. Асқарова, А.С. Молекулалық физика [Мәтін] / А.С. Асқарова, М.С. Молдабекова. – Алматы: Қаз. университеті, 2006. – 944 б.
2. Чепмен, С. Математическая теория неоднородных газов [Текст] / С.Чепмен, Т. Каулинг. – М.: ИЛ, 1980. – 510 с.
3. Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей [Текст] / Дж.Гиршфельдер, И.Кертис, Р.Берд. – М.: ИЛ, 1991. – 929 с.
4. Де Гроот, С. Неравновесная термодинамика [Текст] / С.Де Гроот, П.М. Мазур. – М.: Мир, 1994. – 456 с.
5. Ферцигер Дж. Математическая теория процессов переноса в газах [Текст] / Дж. Ферцигер, Г. Капер. – М.: Мир, 1976. – 554 с.
6. Климонтович, Ю.Л. Кинетическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы [Текст] / Ю.Л. Климонтович. – М.: Наука, 1975. – 351 с.

Материал редакцияға 20.02.24 түсті.

С.Ш. Егембердиева<sup>1</sup>, Р.Ж. Наметкулова<sup>1</sup>, Б.Ж. Кушкимбаева<sup>1</sup>, А. Шымбай<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, г.Тараз, Казахстан

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФфуЗИИ ГАЗОВ

**Аннотация.** В работе явление изотермической диффузии газов средней плотности рассмотрено с точки зрения кинетической теории, а коэффициент взаимной диффузии определен с помощью устройства, основанного на методе лазерной интерферометрии. Теоретически исследована концентрационная зависимость

коэффициентов диффузии и сжимаемости системы He–Ar и показано соответствие с экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** диффузия, коэффициент взаимной диффузии, коэффициент сжимаемости, концентрация, бинарная газовая смесь.

S.Sh. Egemberdiyeva<sup>1</sup>, R.Zh. Nametkulova<sup>1</sup>, B.Zh. Kushkimbayeva<sup>1</sup>, A. Shymbay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan

#### RESEARCH OF ISOTHERMAL DIFFUSION OF GASES

**Abstract.** In the article, the phenomenon of isothermal diffusion of medium-density gases was considered from the point of view of kinetic theory, and the mutual diffusion coefficient was determined using a device based on the laser interferometry method. The concentration dependence of the diffusion and compressibility coefficients of the He - Ar system was studied theoretically and the agreement with the experimental results was shown.

**Keywords:** diffusion, mutual diffusion coefficient, compressibility coefficient, concentration, binary gas mixture.

#### References

1. Askarova, A.S., Moldabekova, M.S. Molekwlalıq fizika [Molecular physics]. – Almaty: University of Kaz, 2006. – 944 p. [in Kazakh]
2. Chapman, S., Cowling, T. Matematicheskaya teoriya geterogennykh gazov [Mathematical theory of heterogeneous gases]. – Moscow: IL, 1980. – 510 p. [in Russian]
3. Hirschfelder, J., Curtis, I., Bird, R. Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey [Molecular theory of gases and liquids]. – Moscow: IL, 1991. – 929 p. [in Russian]
4. De Groot, S., Mazur, P.M. Neravnovesnaya termodinamika [Nonequilibrium thermodynamics]. – Moscow: Mir, 1994. – 456 p. [in Russian]
5. Ferziger, J., Caper, G. Matematicheskaya teoriya perenosa protsessov v gazakh [Mathematical theory of process transfer in gases]. – Moscow: Mir, 1976. – 554 p. [in Russian]
6. Klimontovich, Yu.L. Kineticheskaya teoriya neideal'nogo gaza i neideal'noy plazmy [Kinetic theory of non-ideal gas and non-ideal plasma]. – Moscow: Nauka, 1975. – 351 p. [in Russian].