

УДК 539.23:621.793

М.Қ. Досболаев*, А.У. Утегенов, Т.С. Рамазанов

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Эксперименттік және теоретикалық физика ғылыми зерттеу институты, 050040, Алматы қ., Қазақстан

*E-mail: merlan@physics.kz

**Жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтағы
плазмалы тозанды құрылымның қасиеттерін
экспериментте зерттеу**

Берілген жұмыста жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтағы (ЖЖСР) плазмалы тозанды құрылымдардың гелий-аргон (3%) және сутегі-аргон (5%) газдары қоспаларында жасалған эксперименттер нәтижелері келтірілген. Тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциясы мен жылдамдықтарының таралуы секілді жүйенің макроскопиялық қасиеттерін талдау негізінде гелий (сутегі) плазмасында орналасқан тозанды құрылым, аз мөлшерде аргон газын (ауыр атомды газ) қосқан кезінде, елеулі түрде өзгертіні анықталды.

Түйін сөздер: жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд, газдар қоспасы, қос корреляциялық функция, тозанды бөлшектердің жылдамдық бойынша таралуы, диффузия коэффициенті.

M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov

**Experimental investigations of properties of plasma-dust
formations in rf capacitive discharge**

In paper the results of investigation of properties of dust formation in RF discharges of argon-helium and argon-hydrogen mixture were presented. In base of analysis of macroscopic properties of the system, such as pair correlation function and velocity distributions of dust particles, it was revealed that with addition of less argon to the system the structure of dust formation used to be in helium plasma noticeably changes.

Key words: radio-frequency capacitive discharge, mixture of gases, pair correlation function, velocity distribution of dust particles, diffusion coefficient.

М.К. Досболаев, А.У. Утегенов, Т.С. Рамазанов

**Экспериментальные исследования
свойств плазменно-пылевых образований в ВЧЕР**

В данной статье приведены результаты экспериментального исследования свойств плазменно-пылевых образований в высокочастотном емкостном разряде (ВЧЕР) в смеси газов гелий-аргон (3%) и водород-аргон (5%). На основе анализа макроскопических свойств системы, таких, как парная корреляционная функция распределения и распределения пылевых частиц по скоростям, выявлено, что с добавлением малого количества аргона структура пылевого образования ранее наблюдавшегося в гелиевой плазме заметно изменяется.

Ключевые слова: высокочастотный емкостной разряд, смесь газов, парная корреляционная функция, распределение пылевых частиц по скоростям, коэффициент диффузии.

Кіріспе

Плазмалы тозанды түзілімдердің қасиеттерін зерттеу мақсатында көптеген теориялық және эксперименттік жұмыстар жа-

салды [1-3], бірақ олардың түгелге дерлігі таза газдарда орындалады және соған байланысты газдар қоспасының тозанды құрылым қасиеттеріне әсері аз зерттелді. Алға

қойылып отырған мәселе алғаш рет [4] жұмыста теориялық тұрғыдан қарастырылды және эксперимент жүзінде бірнеше лабораторияларда (соның ішінде берілген жұмыс авторларымен) тұрақты ток разрядында зерттелді, нәтижелері келесі жұмыстарда келтірілген [5-7]. Плазмалы-тозанды түзілімдердің құрылымдық және динамикалық қасиеттері тозанды бөлшектердің параметрлеріне, буферлі плазманың қасиеттеріне және газдық разрядтың параметрлеріне тікелей байланысты. Сондай-ақ, тозанды құрылымның қасиеттері газдар қоспасы разрядында елеулі түрде өзгереді.

Берілген жұмыс ЖЖСР орындалды. Тозанды плазманың қасиеттерін ЖЖСР зерттеудің ерекшеліктері келесідей:

Зарядты бөлшектерінің концентрациясы жоғары плазмалы-тозанды құрылымның түзілуі.

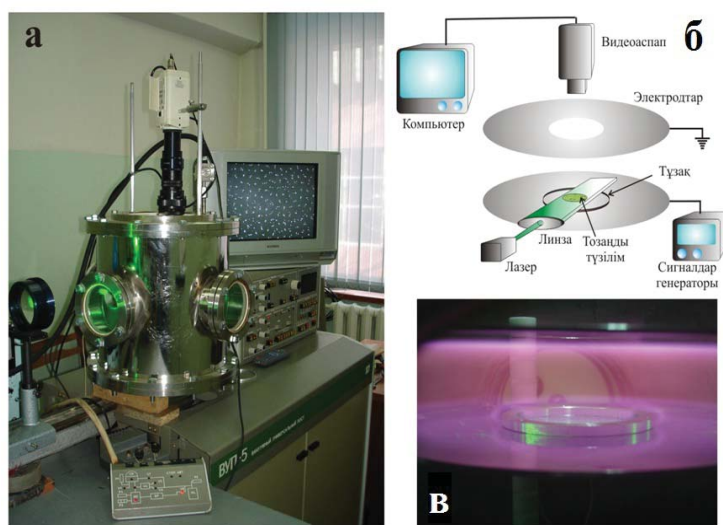
Жоғары жиілікті (ЖЖ) өрісте электрондар мен иондардың энергияны айрықша жинау механизмдерінің болуы және плазма параметрлерінің кеңістік бойынша таралуы.

Құрылымдағы тозанды бөлшектерге әсер ететін негізгі күштердің бірі болып табылатын иондық ағынның тербелмелі қозғалысы. Айтылған параметр разряд газының түрі мен мөлшеріне байланысты.

Көптеген ғылыми зерттеулерде сонымен қатар технологияда белгілі-бір жағдайларда шешім іздеуге бинарлы және көп компонентті газдар қоспасының ЖЖ разряды қолданылады (микроэлектроникада, нано қабықшалар алуда, газдық фазадан нанобөлшектерді өсіру және т.с.с.).

Эксперименттік қондырғы

Эксперименттер ВУП-5 қондырғысы көмегімен іске асты (1а-сурет). Экспериментте полидисперсті (өлшемдері әр-түрлі) бөлшектер қолданылды. Бірақ, эксперимент нәтижесінден ақты және айқын есептеулер алу үшін олардың дәл өлшемдерін білу қажет. Осыған орай эксперименттік қондырғының негізгі бөлігі ретінде жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд түзілетін электродтар жүйесі құрастырылды (2-сурет).



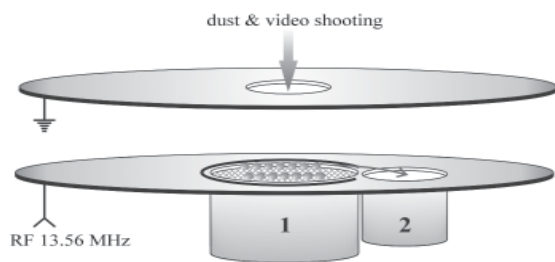
1-сурет – Плазмалы-тозанды құрылымдардың қасиеттерін ЖЖ сыйымдылықты разрядта зерттеуге арналған құрылым

Диаметрі 100 мм алюминий электродтар көлденең бағытта бір-біріне параллель орналасқан. Жоғарғы электрод жерге жалғанған және оның ортасында тозанды бөлшектерді плазмаға енгізуге және тозанды плазмадағы процестерді бақылауға арналған саңылауы бар. Тозанды

бөлшектердің қозғалыс траекториялары жиілігі 300 кадр/сек жоғары жылдамдықты бейнеаспап көмегімен түсірілді. Төменгі электрод жиілігі $f=13,56$ МГц болатын ЖЖ генераторға жалғанған. Электродтардың аралығы 30 мм-ге тең. Тозанды бөлшек ретінде қолданылғандиамет-

рі 25-35 мкм іші қуыс, шыны сфералық макро-бөлшектерді плазма көлеміне енгізу импульсті-электродинамикалық дозатор көмегімен жүзеге асты.

Полидисперсті микроөлшемді тозанды бөлшектерді іріктеу үшін төменгі электродта арнайы қондырғы жасалды (2-сурет). Суретте келтірілген жүйедегі жұмыс жүру барысы келесідей, плазмаға енгізілген тозанды бөлшектер электрондар мен иондар ағыны арқылы зарядталады, осылайша олар электростатикалық және гравитациялық күштердің балансы әсерінен, тік бағытта электр өрісі айтарлықтай жоғары болатын қабатта, қалықтап ілініп қалады. Ал көлденең бағытта плазма өрісінде тұйық тұзақ көмегімен потенциалдық шұңқыр жасау арқы-

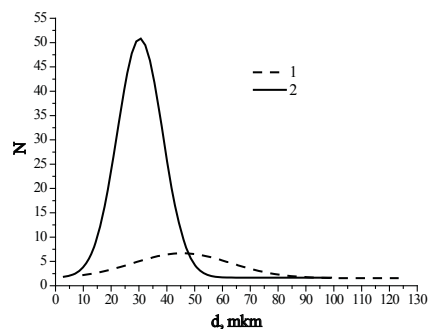


2-сурет – Полидисперсті тозанды бөлшектерді сепарациялауға арналған электродтар жүйесі

№1 және №2 контейнерге түскен бөлшектерге микроскопиялық талдау жасап, олардың өлшемдері бойынша таралуы тұрғызылды (3-сурет).

Графикте көрсетілгендей, жалпы макробөлшектердің өлшемі ~10-120 мкм аралығында жатыр. Плазмалы тозанды құрылымды экспериментте зерттеу мақсатында №2 контейнерге түскен

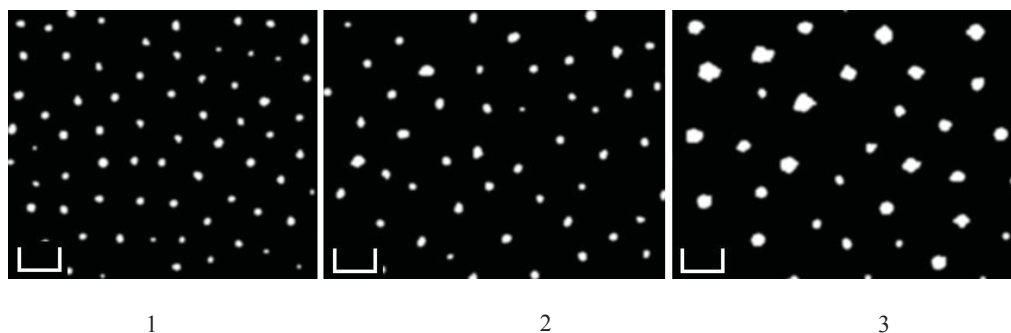
лы ұсталады. Егер тұзақ тұйықталмаған болса, онда сол бағытта сыртқа шығатын бөлшек ағынын алуға болады (2-сурет). Енді осы мүмкіндікті бөлшектерді іріктеуге қолданатын болсақ: астыңғы электродта тор орналасады, одан өтіп кеткен ірі (массасы үлкен) бөлшектер №1 контейнерге құлайды, ал плазмада ілініп қалған бөлшектер тұзақтың үзік жері арқылы ағып №2 контейнерге құлайды. Бөлшектердің бұлай іріктелу механизмі олардың массасы мен зарядына тәуелді, себебі плазма көлемінде электростатикалық және гравитациялық күштердің балансы әсерінен түзілетін тозанды құрылым бір өлшемді бөлшектерден тұратын қабаттарға бөлінеді, яғни әр қабатта массасы мен заряды тең болатын бөлшектер ғана жиылады (4-сурет).

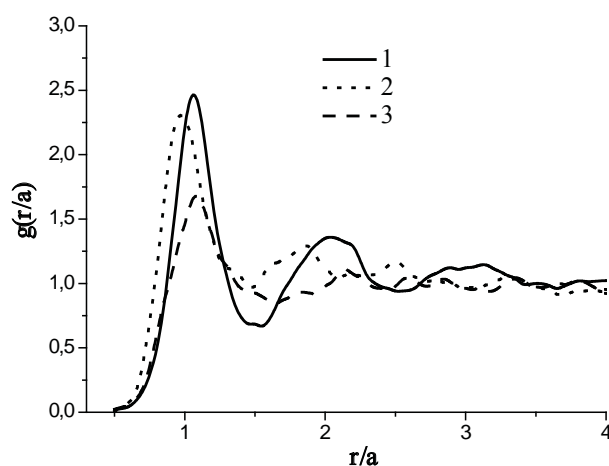


3-сурет – Сепарацияланған тозанды бөлшектердің өлшемдері бойынша таралуы

~25-50 мкм өлшемді микробөлшектер қолданылды.

Айтылған эксперимент құрылымдағы тозаңды бөлшектердің нақты өлшемдерін анықтау үшін қолданылды, сондықтан негізгі эксперименттер электродтағы торсыз және тұйық тұзақпен орындалған.





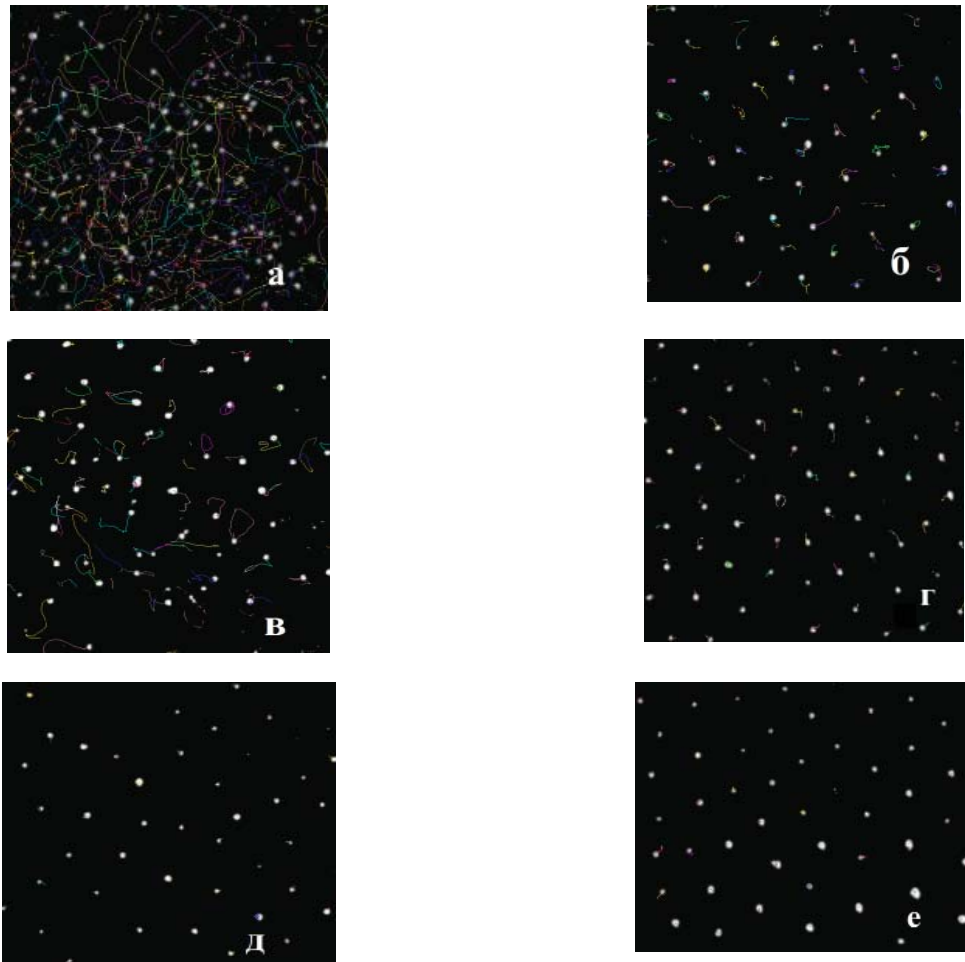
4

4-сурет – Тозаңды құрылымның 1) жоғарғы қабаты, 2) ортасы, 3) төменгі қабаты, 4) тозаңды бөлшектердің әрқабаттағы қоскорреляциялық таралу функциялары

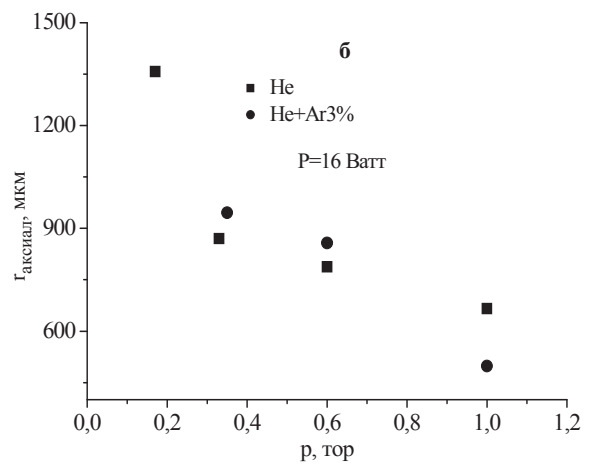
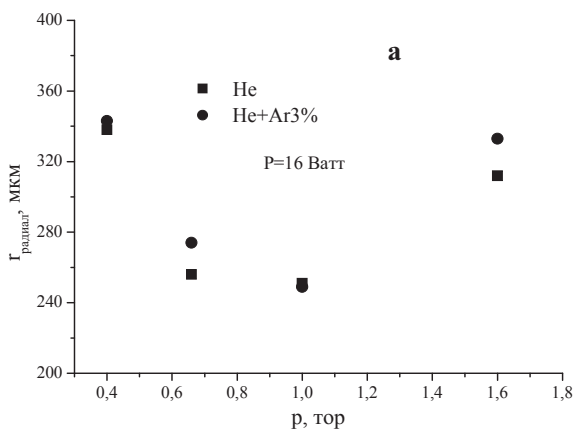
Эксперимент нәтижелері

Эксперименттер гелий (97%) және аргон (3%), сутегі (95%) және аргон (5%) газдар қоспаларында, 0,1 тор – 1 тор қысым шамасы аралығында жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядта жасалды. Осы алынған газ қысымдары аралығынан 3 аймақ ерекшеленеді, яғни бұл жерде плазмалы тозаңды құрылымдардың қасиеттері өзгермелі болып келеді (5 сурет). Берілген суреттерде тозаңды құрылымның қимасын «ImageJ» программалық пакеті көмегімен алынған әр бөлшектің жүйедегі тасымал қасиетін ыңғайлы бақылау мақсатында қозғалыс траекториялары келтірілген. 5а, 5в, 5д суреттерінен көріп тұрғанымыздай (таза гелий газында) газ қысымы артқан сайын құрылымдағы бөлшектердің өзара байланысы арта түсетінін байқаймыз, яғни тозаңды бөлшектердің құрылым бойынша бейберекет қозғалысы азаятыны байқалады. Осы құбылысты газдар қоспасында да байқауға болады, бірақ таза газ бен қоспа арасында айырмашылық айтарлықтай көп. 5а және 5б суреттерінде келтірілген бөлшектердің траекторияларын салыстырайық. 5а суретінде, яғни таза гелий газында тозаңды бөлшектер өзара байланысуы әлсіз, сондықтан олар газдық фазада немесе газдық күйде болады, бірақ

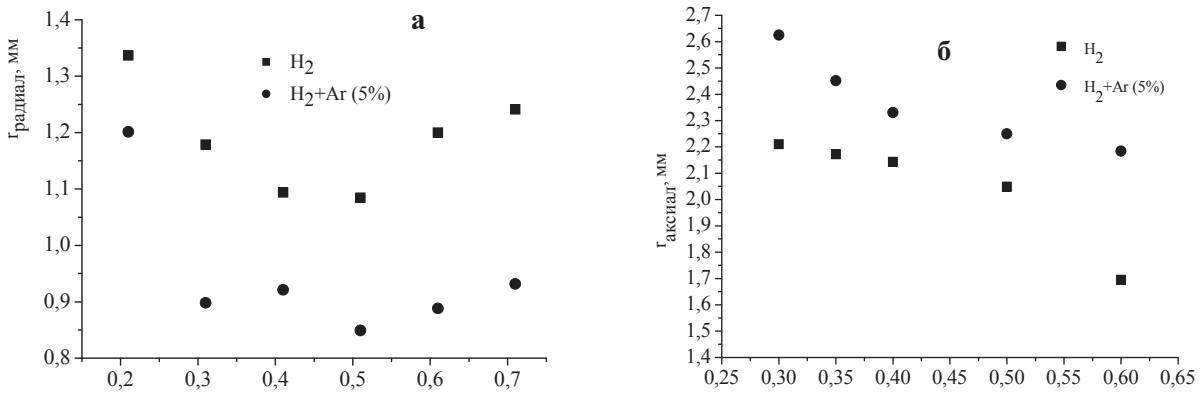
плазма параметрін сақтай отырып бөлшектерді газдар қоспасында зерттейтін болсақ, өзара балынысы күшті тозаңды бөлшектер түзілімін аламыз. Бұл бөлшектер арасындағы соқтығысу процестеріне байланысты (электрон-атом). Таза газдағы тозаңды бөлшектердің бұндай қозғалысы жүйедегі тығыздықтың (атомдар мен иондар) артуымен байланысты, яғни бөлшектердің кеңістіктегі еркін қозғалысы азаяды (6а-6б суреттері). Ал газдар қоспасы кезінде, яғни 3% аргон газын қосқан кездегі тозаңды бөлшектердің қозғалысы плазмалы-тозаңды түзілім бойымен өтетін орнықты тығыз иондық ағынның (дрейф) пайда болуымен байланысты болуы мүмкін. Немесе, тозаңды бөлшектерді айнала иондардың ерекше таралуы болуы мүмкін, яғни тозаң-иондық фокустың диполь-дипольдік әрекеттесуінен пайда болуымен түсіндіріледі. Жоғары қысымда бөлшекаралық ара қашықтықтың ұлғаюын айтатын болсақ (6а-суреті), бұл электрондардың еркін жүру жолының азаюымен, яғни иондалу мен тұзақтағы потенциалдық шұңқырдың енінің өзгеруімен байланысты. Соңғы айтылған потенциалдық шұңқыр плазмалы-тозаңды түзілімнің тозаңды бөлшектерінің радиал бағытта таралып кетпеуіне себепші болады.



а – 0.3 тор (He), б – 0.3 тор (He+Ar), в – 0.4 тор (He), г – 0.4 тор (He+Ar), д – 1 тор (He), е – 1 тор (He+Ar)
 5 – сурет. Әр түрлі газ қысымындағы тозаңды құрылым бөлшектерінің динамикасы



6-сурет – Бөлшек-аралық арақашықтықтың жүйенің газ қысымына тәуелділігі, (а) – көлденең бағытта, (б) – тік бағытта



7-сурет – Бөлшек-аралық арақашықтықтың жүйенің газ қысымына тәуелділігі, (а) – көлденең бағытта, (б) – тік бағытта.

Тозанды плазманың құрылымдық қасиеттері

Плазмалы-тозанды жүйенің құрылымдық қасиеттерін сипаттау үшін тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциялары алынды. Қос корреляциялық функция тозанды бөлшектің белгіленген бөлшекке қатысты r қашықтықта табылу ықтималдығын анықтайды:

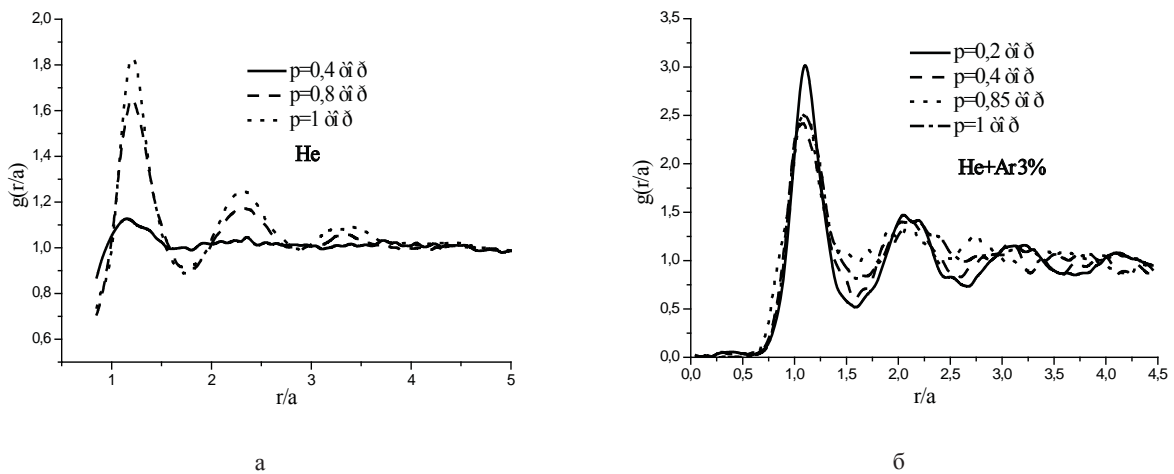
$$g(r) = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{\Delta \bar{N}(r)}{\pi dr(2R-dr)} \quad (1)$$

Мұндағы n_d – көлденең қимадағы тозанды бөлшектердің беттік концентрациясы,

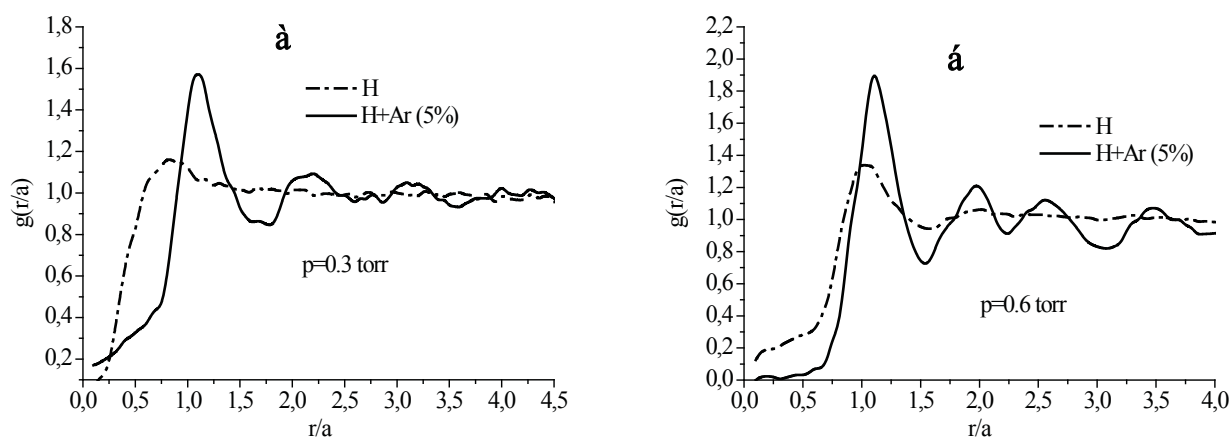
$\Delta \bar{N}$ – сақина қабатындағы бөлшектердің орташа саны.

Корреляциялық функцияны есептеу қателігі алынған статистика мәніне тәуелді, қарастырылып отырған экспериментте ол **15 %** құрайды. Осы шама бөлшектер санын анықтау қателігі бойынша $\delta_N = \sqrt{N}$ және $g(r)$ ауданды анықтау қателігімен анықталады. Соңғысы δ_r -ға тәуелді.

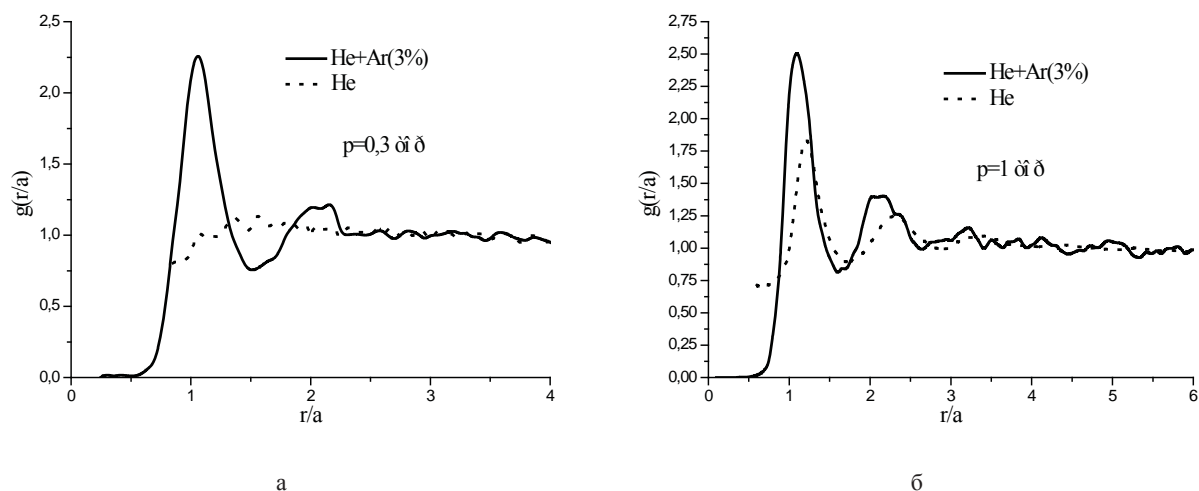
Эксперимент нәтижелерінен алынған тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциялары (7-10 суреттерде) келтірілген.



8-сурет – Тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциялары. (а) – таза гелий газында, (б) – гелий-аргон газдар қоспасында.



9-сурет – Тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциялары. (а) – таза сутегі газында, (б) – сутегі-аргон газдар қоспасында.



10-сурет – Таза гелий мен гелий-аргон газдар қоспасындағы тозанды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциялары. а– $p=0,3$ тор, (б) – $p=1$ тор.

Графиктерге талдау жасайтын болсақ, әр таза газ және газдар қоспасы кезінде, тозанды бөлшектердің құрылымы газ қысымы артқан сайын кристалл күйге жақындай түседі. Бірақ кіші қысымдарда таза газ бен қоспада орындалған нәтижелерді салыстырсақ, 0,3 тор газ қысымы кезінде газ қоспасындағы тозанды бөлшектердің құрылымы таза газда алынған тозанды бөлшектердің құрылымына қарағанда кристалл күйге жақынырақ (8, 9-сурет). Айтылған құбылысты келесідей түсіндіруге болады, жоғары жиілікті разрядта плазмадағы электрондардың қозғалғыштығы жоғары болғандықтан тозанды бөлшектердің заряды тұрақты токты солғын

разрядпен салыстырғанда үлкен болады, өйткені, жоғары жиілікті разрядта электрондардың екі бағытта (екі электрод арасында) қозғалысына байланысты тозанды бөлшектердің үлкен заряд жинау ықтималдығы өте көп болады. Тозанды бөлшектердің зарядтары көп болған сайын жүйедегі бөлшектердің арасындағы байланыс күштері арта түседі, осыған орай жүйеде тозанды бөлшектер кристалл түзеді. Енді осы плазмаға ауыр атомды газды, яғни аргон газын қосқан кезде, тозанды бөлшектердің аз қысымда кристалл түзу құбылысын қарыстырсақ. Бұл жағдайда плазмаға ауыр атомды газды қосқан кезде, яғни гелий газына аргон газын, плазма

бөлшектерімен (аргон және гелий иондарымен) тозаңды бөлшектердің соқтығысу тығыздығы артады. Аргон газы атомдарының массасы гелий газ атомдарынан 20 есеге ауыр, сол себепті тозаңды бөлшектердің кинетикалық энергиясы азаяды, ал тура сол параметрлерде (газ қысымы 0,3 тор мен қуат 16 Вт кезінде) гелий плазмасында тозаңды бөлшектердің кинетикалық энергиясы үлкен болады, яғни бұндай плазмада тозаңды бөлшектердің кристалл түзуі тек жоғары қысымдарда (плазма тығыздығы артқан кезде) байқалады. Тозаңды бөлшектердің динамикалық қасиеттері келесі бөлімде қарастырылған.

Тозаңды плазманың динамикалық қасиеттері

Тозаңды құрылымның динамикалық қасиеттерін сипаттау үшін тозаңды бөлшектердің жылдамдық бойынша таралуы есептелді:

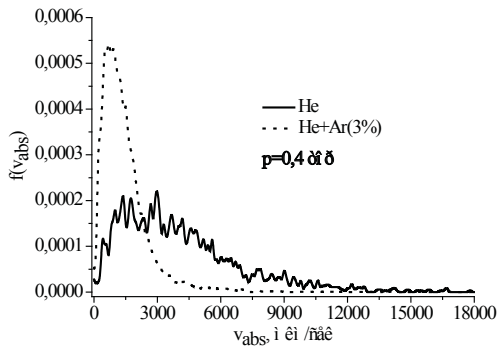
$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \tag{2}$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \tag{3}$$

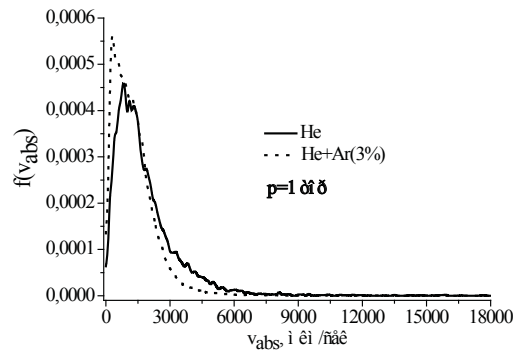
$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \tag{4}$$

Мұндағы v_x және v_y және v өстері бойынша жылдамдық компоненттері; Δx және Δy – x және y өстері бойынша қарастырылып отырған жазықтағы ығысу; Δt – әр кадр аралығындағы уақыт; v – жылдамдықтың абсолют шамасы.

Тозаңды бөлшектердің абсолют жылдамдықтары бойынша таралуы 11-суретте көрсетілген. Плазмалы жүйедегі қысым ұлғайған сайын тозаңды бөлшектердің қозғалысы баяуланып, олардың жылдамдықтары азаятыны, яғни тозаңды құрылымның орнықты күйге өтетіні аңғарылады.

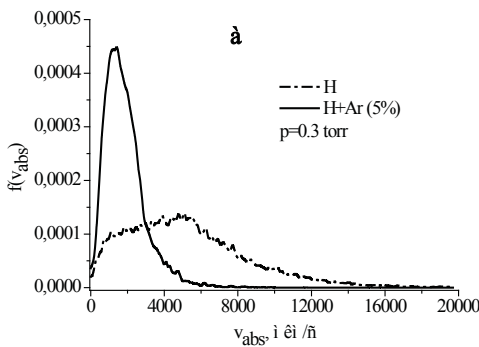


a

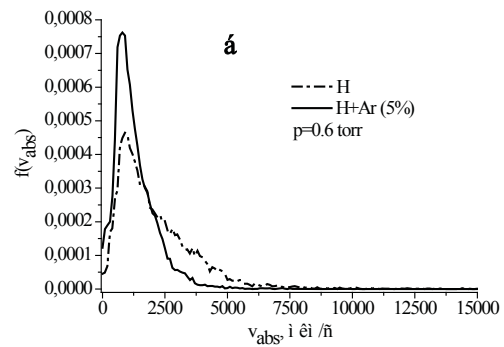


б

11-сурет – Гелий және гелий-аргон газдар коспасындағы тозаңды бөлшектердің жылдамдықтары бойынша таралуы. (a) – $p=0,4$ тор, (б) – $p=1$ тор



а



а

12-сурет – Сутегі және сутегі-аргон газдар коспасындағы тозаңды бөлшектердің жылдамдықтары бойынша таралуы. (a) – $p=0,3$ тор, (б) – $p=0,6$ тор

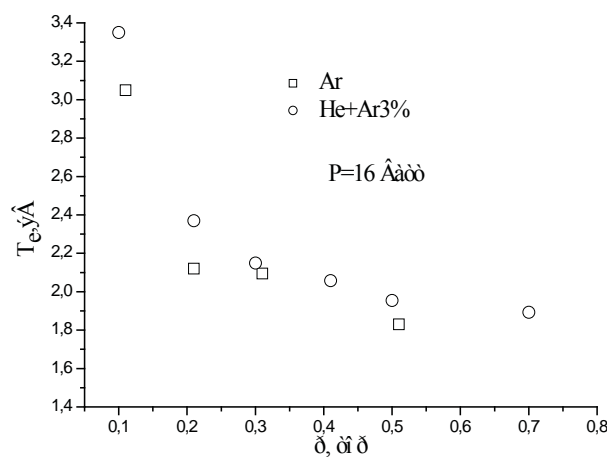
Тозаңды плазманың диагностикасы және оптикалық қасиеттері

Тозаңды плазманың оптикалық қасиеттерін зерттеу үшін S100 спектрометрі қолданылды. Айтылған спектрометрдің көмегімен әр түрлі қуатта және қысымда спектрлік анализдер жасай отырып, алынған нәтижелерді бірден дербес компьютер көмегімен өңдеуге және сақтауға болады. Эксперименттік жұмыстар жүргізу процесінде плазманың спектрі алынды (13-сурет). Алынған спектр плазма электрондарының

температурасын анықтауға қолданылды. Электрондар температурасы келесі формула арқылы анықталады:

$$T = \frac{5040 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{I_1 \frac{(gA)_1}{\lambda_1} - I_2 \frac{(gA)_2}{\lambda_2}} \quad (5)$$

Мұндағы λ_1, λ_2 – толқын ұзындығы, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – қозу энергиялары, $(gA)_1, (gA)_2$ – көшу ықтималдығы, I_1, I_2 – спектрлер интенсивтілігі.



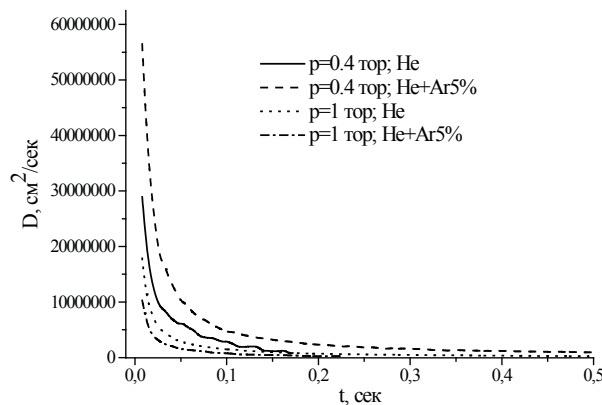
13-сурет – Газ қысымына байланысты электрон температурасының өзгеруі

Тозаңды бөлшектердің тасымал қасиетін зерттеу мақсатында диффузия коэффициенті есептелді.

$$D = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} A_v(t) dt, \quad (6)$$

мұндағы $A_v(t)$ – тозаңды бөлшектердің жылдамдықтарының автокорреляциялық функциясы.

Есептеу нәтижелері 14-суретте келтірілген.



14-сурет – Тозаңды бөлшектердің диффузия коэффициенті

Келтірілген графиктер бойынша, диффузия қисығы екі жағдайда стационар режимге өтетінін айтуға болады: біріншіден, жүйедегі газ қысымын арттыру арқылы, екіншісі, буферлі плазмаға ауыр атомды газ қосу арқылы (біздің жағдайымызда 3-5% аргон газы). Айтылған тұжырым келесідей түсінікке ие болады, $He+Ar3\%$ қоспасының қысымы 0,3 тор кезінде тозаңды бөлшектердің температурасы аргон атомдары мен иондарына соқтығысу әсеріне түседі, өйткені аргон атомдары гелиймен салыстырғанда 20 есеге ауыр.

Осылайша, тозаңды бөлшектердің кинетикалық температурасы азаяды, ал осындай газ қысымында гелий газындағы (жеңіл газда) тозаңды құрылымның тозаңды бөлшектері жоғары жылдамдыққа ие болады (11а, 12а-сурет), яғни кинетикалық энергиясы да басым, сондықтан осы жағдайда құрылымдағы реттілік (кристаллдық күй) байқалмайды.

Қорытынды

Берілген жұмыста жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядта (ЖЖСР) плазмалы тозаңды түзілімнің инертті газдар қоспасындағы құрылымдық, динамикалық және оптикалық қасиеттері экспериментте зерттелді. Жүйенің макроскопиялық қасиеттерін талдау негізінде, жеңіл газ құрамына аз мөлшерлі ауыр газ енгізген кезде плазмалы тозаңды құрылымның қасиеттері елеулі түрде әсері бар екені байқалды.

Тозаңды бөлшектердің қос корреляциялық таралу функциясының нәтижелерін талдау негізінде таза газ бен гелий-аргон және сутегі-аргон газдар қоспаларында алынған тозаңды түзілімдерді салыстыра отырып, аз мөлшерлі газ қысымында қоспадағы тозаңды түзілімдердің орнықтылығы, бөлшектер арасындағы өзара күшті байланысы байқалды. Және де осы тұжырымды растау ретінде тозаңды бөлшектердің жылдамдықтары бойынша таралуы есептелді.

References

- 1 Shukla P.K. and Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. Series in Plasma Physics // Institute of Physics Publishing. 2002.
- 2 Thomas H.M. and Morfill G.E. // Nature (London). - 1996. - Vol. 379. - P. 806.
- 3 Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. - 2004. - № 174. - С. 495.
- 4 Майоров // Кр. сообщ. по физ. ФИАН. - 2007. - № 7. - С. 44.
- 5 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., and Dosbolayev M.K. // Phys. Plasmas. - 2008. - Vol. 15. - P. 053704.
- 6 Ramazanov T.S., Daniyarov T.T., Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K. and Zhankarashev E.B. // Contrib. Plasma Phys. - 2011. - Vol. 51, Issue 6. - P. 505-508.
- 7 Popova D.V., Maiorov S.A., Antipov S.N., Petrov O.F., and Fortov V.E. // In Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Physics of Dusty Plasmas, Ponta Delgada, Azores, May 18-23, 2008. - P. 139.