

ӘОЖ 53.072+533.9:51-73

К.Н. Джумагулова*, Т.С. Рамазанов,
Р.У. Машеева, Г.Л. Габдуллина, З. Донко¹

ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

¹Вигнер ат. ғылыми-зерттеу физика орталығының қатты дене және оптика институты Будапешт қ., Венгрия

*E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.com

Күрделі құрамды тозаңды плазма бөлшектерінің спектрлік функциясын зерттеу

Жұмыста тозаңды бөлшек жылдамдықтарының автокорреляциялық функциясын Фурье түрлендіру арқылы тербеліс спектрлерін теориялық зерттеудің нәтижелері келтірілген. Осы мақсатта тозаңды плазма бөлшектерінің қозғалыс теңдеуін шешу үшін Ланжевендік динамика әдісі қолданылды. Юкава потенциалы бөлшектердің өзара әсерлесу потенциалы ретінде қолданылды. Спектрлік функцияның нақты және жорамал бөлігі байланыс параметрінің үлкен мәндері мен үйкеліс коэффициентінің кіші мәндері кезінде тозаңды бөлшектердің плазма жиіліктер мәнінің максимумына сәйкес келетіндігі көрсетілген.

Түйін сөздер: тозаңды плазма, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы, спектрлік функция.

K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, R.U. Masheeva, G.L. Gabdullina
Investigation of spectral function of dust particles

In this paper, the results of theoretical investigations of dust particles fluctuations using Fourier analysis of the velocity autocorrelation function were presented. The Langevin dynamics method was used to solve the dust particles equations of motion. The Yukawa potential was used as an interaction potential. It was presented, that the real and imaginary parts of the spectral function has a maximum near the plasma frequency of dust particles at large values of the coupling parameter and low values of the coefficient of friction.

Key words: dusty plasma, velocity autocorrelation functions, spectral function.

К.Н. Джумагулова, Т.С. Рамазанов, Р.У. Машеева, Г.Л. Габдуллина
Исследование спектральной функции пылевых частиц

В данной работе показаны результаты теоретических исследований колебаний пылевых частиц с помощью Фурье-анализа автокорреляционных функций скоростей. В работе был использован метод Ланжевенной динамики для решения уравнения движения пылевых частиц. В качестве потенциала взаимодействия был использован потенциал Юкава. Показано, что действительные и мнимые части спектральной функции имеют максимум вблизи плазменной частоты пылевых частиц при больших значениях параметра связи и малых значениях коэффициента трения.

Ключевые слова: пылевая плазма, автокорреляционная функция скоростей, спектральная функция.

Кіріспе

Тозаңды плазма конденсирленген заттың микроскопиялық бөлшектерден тұратын иондалған газ болып табылады. Мұндай плазма табиғатта әсіресе, планеталық сақиналар, коме-

талық құйрық сияқты астрофизикалық объектілерде жиі кездеседі. Сонымен қатар, жергілікті шарттарда тозаңды плазма плазмалық технологияларды қолданатын көптеген қондырғыларда түзіледі.

Тозанды плазманың физикалық қасиеттері заманауи физика мен жаңа техниканың, мысалы, лазерлік техника, термоядролық энергетика, астрофизика, жоғары атмосфера физикасы, нанотехнология және тағы басқа әр түрлі бағыттар даму үшін маңызды болып табылады.

Осындай жүйенің қасиеттерін зерттеу кезінде жүйеде тығыз байланыстың болу салдарынан қолайсыздықтар пайда болады, осының нәтижесінде теориялық физиканың дәстүрлі әдістері эффективті емес. Бұл мәселе, идеал емес физикалық жүйелерді заманауи компьютерлік моделдеу әдістерін (Монте-Карло, молекулалық динамика, броундық (ланжевендік) динамика және т.б.) қолдану арқылы шешіледі.

Жұмыс барысында тозанды бөлшектердің микроскопиялық және динамикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік беретін Ланжевендік динамика компьютерлік моделдеу әдісі қолданылды. Осы әдістің көмегімен Юкава потенциалының көмегімен әсерлесетін тозаңшалардың тербеліс жиіліктері зерттеледі.

Ланжевендік динамика әдісінің қысқаша сипаттамасы және жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясын Фурье-түрлендіру негізінде тозанды бөлшектердің спектрлік функциясы бойынша нәтижелер жұмыстың екінші бөлігінде келтірілген.

Тұжырымдар мен қорытындылар «Қорытынды» тарауында келтірілген. Қолданылған әдебиеттер тізімі мақаланың соңында келтірілген.

Моделдеу әдісі мен жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясының Фурье-түрлендіруі

Тозанды плазма қасиеттерін зерттеу барысында Ланжевендік динамика әдісі кең қолданылады [1,2]. Тозанды бөлшектердің қозғалысын моделдеу келесі теңдеудің негізінде орындалды:

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_j F_{\text{int}}(r) \Big|_{r=|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} .$$

$$\frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - m_d v_{fr} \frac{d\vec{r}_i}{dt} + \vec{F}_{br}(t) , \quad (1)$$

мұнда - $F_{\text{int}}(r) = -\partial\Phi(r)/\partial r$ - таңдалған i - бөлшектің j - бөлшекпен әсерлесу нәтижесінде пайда болатын күш, $r = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ - екі тозаңша арасындағы ара қашықтық, $F_{br}(t)$ - қоршаған плазмалық бөлшектердің кездейсоқ

соқтығыстарын немесе басқа да кездейсоқ процестерді ескеретін кездейсоқ күш, v_{fr} - буферлік плазма қысымынан тәуелді және олардың қоршаған плазманың нейтрал бөлшектерімен соқтығысу жиілігін анықтайды, m_d - тозанды бөлшектің массасы, $\Phi(r)$ - макробөлшектердің жұптық әсерлесу потенциалы.

Бөлшекаралық әсерлесу потенциалы ретінде Юкава потенциалы қолданылды, өлшемсіз түрде потенциал келесідей жазылады:

$$\Phi(R) = \frac{\Gamma}{R} e^{-\kappa R} , \quad (2)$$

мұнда $\kappa = a/r_D$ - тозаңша заряды өрісінің экрандалу коэффициенті, r_D - тозаңша заряды өрісінің Дебай экрандалу радиусы, $\Gamma = (Z_d e)^2 / (ak_B T_d)$ - тозанды компонентаның байланыс параметрі, $a = (3/4\pi n_d)^{1/3}$ -

тозаңша арасындағы орташа қашықтық, Z_d және n_d - тозанды бөлшектің заряды және концентрациясы, T_d - тозанды компонентаның температурасы. 1024 тозанды бөлшектердің жиынтығы периодты шекаралық шарттармен кеңейтілген үш өлшемді куб торында кездейсоқ таралған. Уақыт тозанды компонентаның плазмалық жиілігіне кері бірлікте $\omega_d = \left(\frac{4\pi n_d Z_d^2 e^2}{m_d} \right)^{1/2}$ алынған. Уақыт қадамының саны $N_t = 30000$. Өлшемсіз үйкеліс па-

раметр $\theta = \frac{v_{fr}}{\omega_d}$. Тозанды бөлшектер жүйесі үшін моделдеу [3-7] схемаға сәйкес жүргізілді.

Компьютерлік моделдеу көмегімен алынған мәліметтердің негізінде тозанды бөлшектердің жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясын [8,9] келесі теңдеу көмегімен зерттеуге болады:

$$A_{vv}(t) = \langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle , \quad (3)$$

мұнда жақшалар ансамбль бойынша және әр түрлі бастапқы уақыт мезеттері бойынша орташалауды білдіреді. Жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы сөнуді білдіре-

ді, ол жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы е есе кішірейетін τ сөну уақытымен сипатталады. Жүйе параметрлерінің өзгерісінің кең аумағында жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясын есептеу нәтижелері [9] жұмыста көрсетілген. Жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясын есептеу мәліметтерін алып, жылдамдықтардың автокорреляторын Фурье-түрлендіру негізінде тозанды бөлшектердің спектрлік функциясын зерттеуге болады.

[10] жұмысына сәйкес $f(\omega)$ спектрлік функциясы берліген күштің әсерінен жүйенің тәртібін толықтай анықтайды:

$$f(\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (4)$$

мұнда $f(t)$ - жүйенің микроскопиялық қасиеттерінен тәуелді қандай да бір функ-

ция. Осы жағдайда, компьютерлік моделдеу негізінде есептелген ЖАФ жүйенің микроскопиялық күйін сипаттайтын шама ретінде қарастырыла алады және спектрлік функция келесідей анықталады [10]:

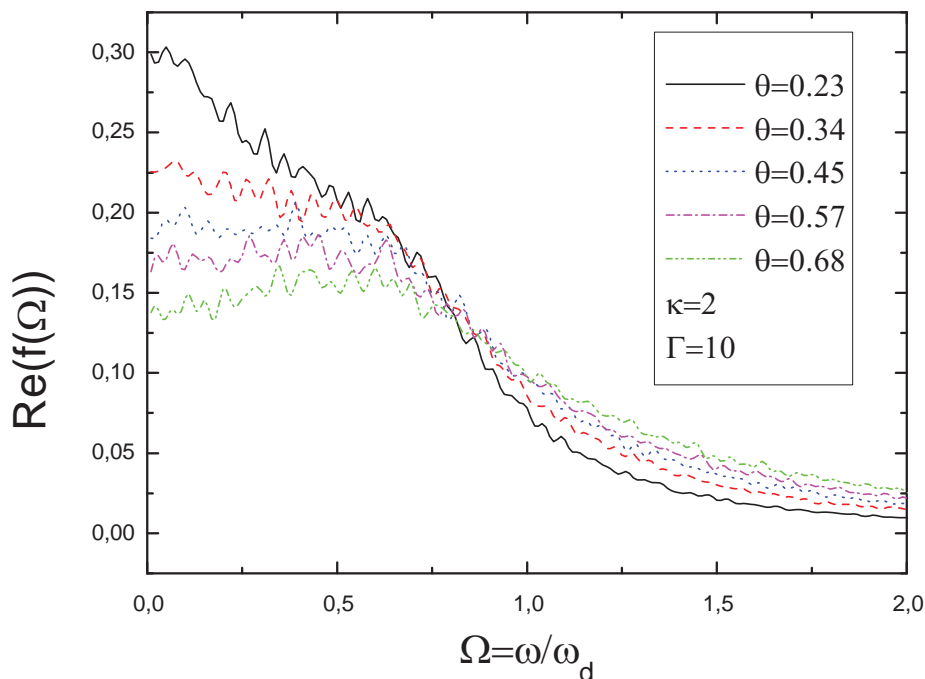
$$f(\omega) = 1/2\pi \int_0^{\infty} A(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (5)$$

Жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясының спектрлік функциясының нақты бөлігі, динамикалық құрылымдық фактор секілді бөлшектердің тербелу жиілігін анықтауға мүмкіндік береді, бұл олардың қисығында максимумның пайда болуымен анықталады. [11] жұмыста ескерілгендей, осы функциялар арасында байланыс бар, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы динамикалық құрылымдық фактордың автокорреляциялық бөлігімен байланысты. Жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясының көмегімен бөлшектердің диффузия коэффициентін орташа квадраттық ығысу немесе Грин-Кубо қатынасы арқылы анықталады:

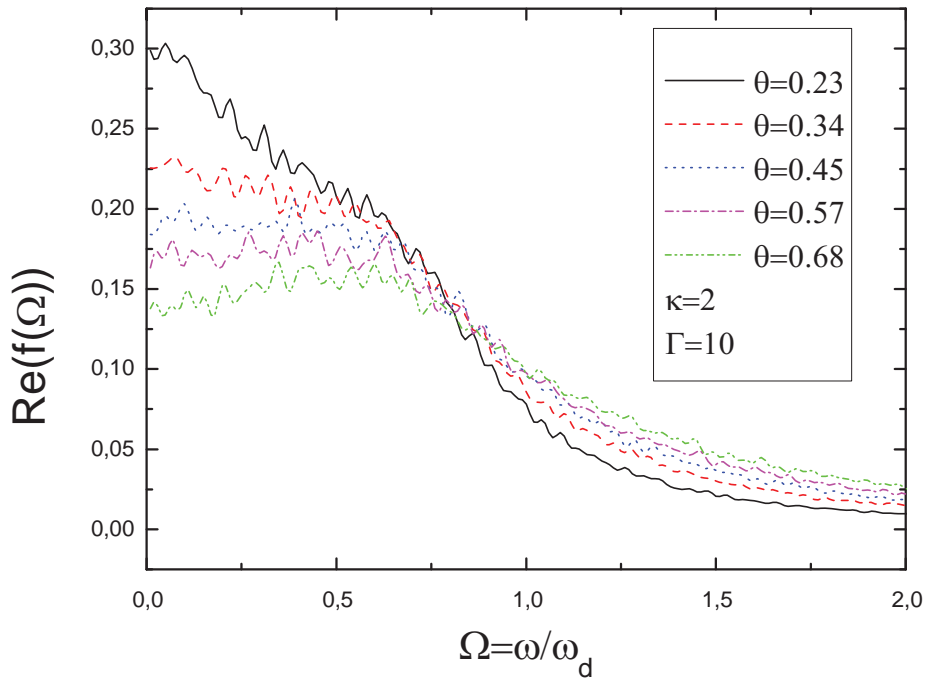
$$D = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} A(t) dt. \quad (6)$$

Осы өрнектен $\lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}(f(\omega))$ сандық факторының шегіндегі дәлдікпен диффузия коэффициентіне тең.

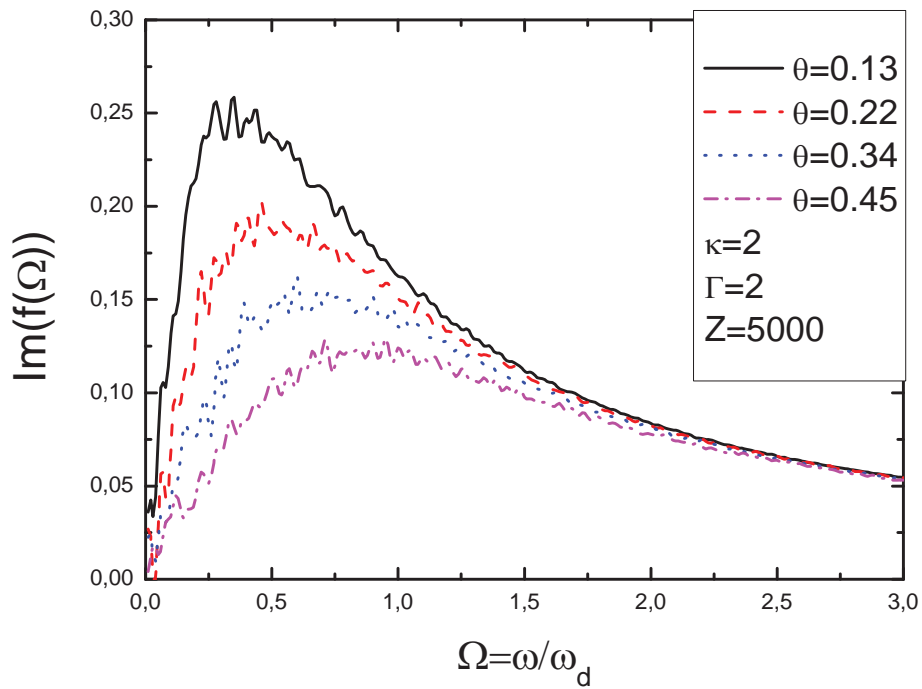
Спектрлік функцияның жорамал бөлігі жүйедегі энергия жоғалтуын сипаттайды.



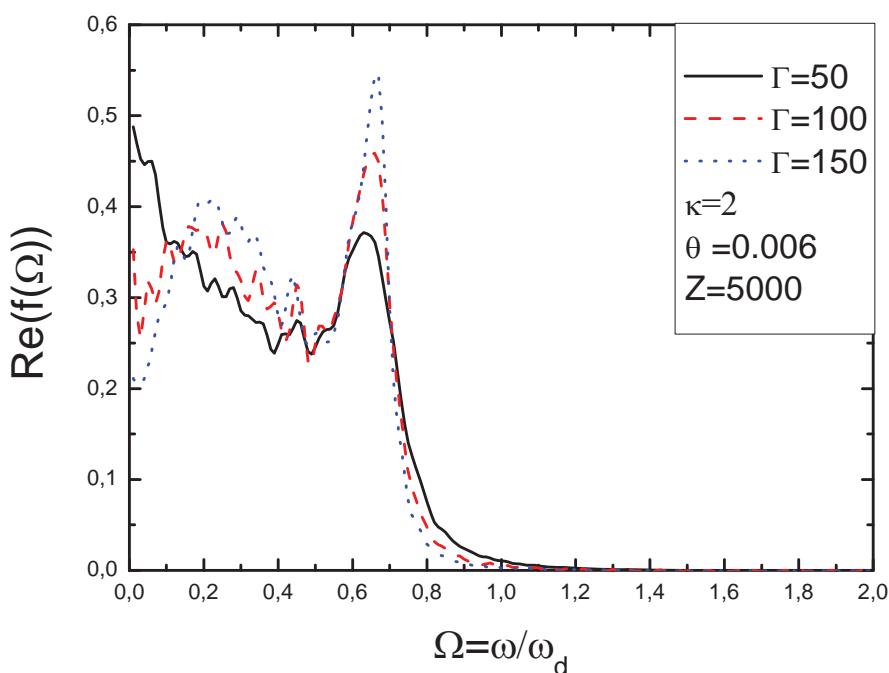
1-сурет – Үйкеліс коэффициентінің әр түрлі мәндері үшін спектрлік функцияның нақты бөлігі



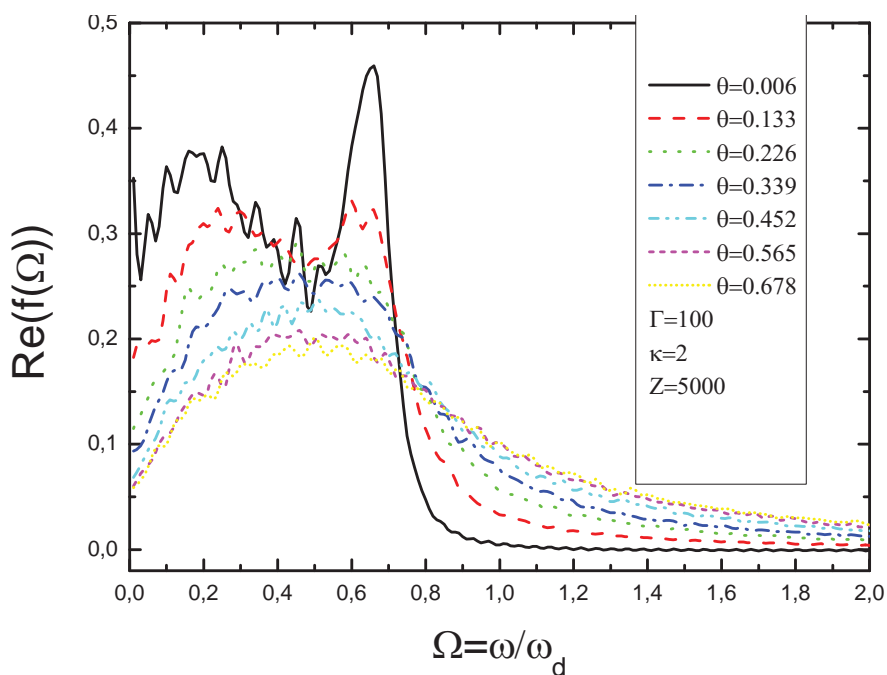
2-сурет – Үйкеліс коэффициентінің әр түрлі мәндері үшін спектрлік функцияның жорамал бөлігі



3-сурет – Байланыс параметрінің әр түрлі мәндері үшін спектрлік функцияның нақты бөлігі



4-сурет – Үйкеліс коэффициентінің әр түрлі мәндері үшін спектрлік функцияның нақты бөлігі



5-сурет – Үйкеліс коэффициентінің әр түрлі мәндері үшін спектрлік функцияның жорамал бөлігі

Спектрлік функцияның нақты және жорамал бөлігі $\Gamma=10$ және $\Gamma=2$ кезінде 1, 2 суреттерде көрсетілген. Байланыс параметрінің кіші мәндерінде спектрлік функцияның нақты бөлігі біркелкі және жүйеде ешқандай

тербелістер байқалмайды. 2 суреттен көрініп тұрғандай, $\lim_{\omega \rightarrow \infty} \text{Re}(f(\omega))$ шамасы үйкеліс коэффициенті өскен сайын қысқарады. Үйкеліс коэффициенті өскен сайын диффузия коэффициентінің кішіреюі [3] жұмыста

көрсетілген. Байланыс параметрінің үлкен мәндері үшін 3, 4 суреттерде спектрлік функцияның нақты бөлігі көрсетілген. 3 суретте байланыс параметрі өсу барысында диффузия коэффициентінің, теориялық тұрғыдан нөлге (кристалдық күй) дейін қысқаруын көрсетеді. Осы суретте байланыс параметрі өскен сайын спектрлік функцияның қисығының максимумы өсетіндігі көрініп тұр. Бұл максимум жуық түрде тозаңды компонентаның ω_d плазмалық жиілігіне жуық жиілікте орналасқан. Алайда, 4 суретте тіпті байланыс параметрінің үлкен мәндерінде үйкеліс параметрі өскен сайын максимумның жойылатыны байқалады. Байланыс параметрінің үлкен мәндері үшін спектрлік функцияның жорамал бөлігі 5 суретте көрсетілген. Бұл суреттен энергетикалық абсорбцияның

максимумы тозаңды бөлшектердің плазмалық жиілігіне жақын жиіліктерде орналасқандығын байқауға болады.

Қорытынды

Осы жұмыста келтірілген тозаңды бөлшектерді компьютерлік моделдеудің негізгі нәтижесі тозаңшалардың жылдамдықтарының автокорреляциялық функциясының спектрлік функциясын зерттеу нәтижелері болып табылады. Тозаңды жүйеде байланыс параметрінің үлкен мәндерінде және үйкеліс коэффициентінің кіші мәндерінде тозаңды бөлшектердің тербеліс жиілігіне жуық жиіліктерде тербелестер байқалатындығы көрсетілген. Сонымен қатар, энергетикалық абсорбцияның максимумы тозаңды бөлшектердің плазмалық жиілігіне жақын жиіліктерде орналасқандығын байқауға болады.

References

- 1 Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., and Masheeva R. U. // Phys. Plasmas. – 2013. – Vol.20. – P. 113702.
- 2 Donkro Z. and Hartmann P. // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69. – P. 016405.
- 3 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., and Masheeva R.U. // Contrib. Plasma Phys. – 2012. – Vol. 52. – P.182.
- 4 Ramazanov T.S. and Dzhumagulova K.N. // Contr. Plasma Phys. – 2008. – Vol.48. – P.357.
- 5 Vaulina O.S. and Khrapak S. // JETP. – 2001. – Vol. 92. –P. 228.
- 6 Vaulina O.S., Khrapak S., and Morfill G. // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 66. – P. 016404.
- 7 Hartmann P., Kalman G.K., Donko Z., and Kutasi K. // Phys. Rev. E. – 2005.– Vol.72. – P. 026409.
- 8 Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., Masheeva R. U. // Book of Abstracts, PNP-2012, Germany: Rostock, (2012)
- 9 Джумагулова К.Н., Машеева Р.У. Известия НАН РК. Серия физико-математическая. - №2(288). - 2013.
- 10 LandauandEL.D., LipschitzM. // Statisticalphysics. –Mosow:Nauka, 1976.
- 11 Match N.H. and TosiM.P. // Atomic Dynamics in Liquids.- Dover Publications, INC. - New York, 1991.