







К.Н. Джумагулова , Т.С. Рамазанов , Р.У. Машеева* ,
М. Мырзалы , Е.О. Шаленов , Н. Атаканов,
М.Н. Джумагулов 

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахстан, г. Алматы
*e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В работе описывается алгоритм метода молекулярной (ланжевеновой) динамики, моделируемая система и основные параметры, характеризующие систему. Представленная математическая модель построена для магнитоактивной пылевой плазмы с учетом влияния силы трения, обусловленной наличием окружающей среды (буферной плазмы). Для решения уравнений движения пылевых частиц была использована модифицированная численная схема Верле, полученная авторами работы. Математическая модель построена для двумерной системы, частицы которой взаимодействуют с помощью потенциала Юкава. Проведен анализ автокорреляционных функций скоростей пылевых частиц и их Фурье-преобразований для разных значений параметров магнитного поля, связи и трения. Обнаружено, что увеличение трения вызывает уменьшение доминирующего пика при фиксированном значении параметра магнитного поля. Данный пик соответствует комбинированному эффекту магнитного поля и сильных корреляций в системе. Полное исчезновение пика, соответствующего циклотронным колебаниям, обнаружено, когда сила трения равна нулю. Показано, что при небольшом трении усиление магнитного поля приводит к монотонному увеличению высоты доминирующего пика, а при большом значении трения – к его уменьшению. Это может быть объяснено тем, что затухание ультразвуковых волн в среде увеличивается с увеличением частоты, однако более подробное описание этого эффекта может быть темой дальнейших исследований.

Ключевые слова: метод молекулярной динамики, алгоритм Верле, автокорреляционная функция скоростей, Фурье-преобразование, внешнее однородное магнитное поле, сила трения.

K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, R.U. Masheyeva*,
M. Myrzaly, Ye.O. Shalenov, N. Atakanov, M.N. Jumagulov

Al-Farabi Kazakh National University, Institute of Experimental and
Theoretical Physics, Kazakhstan, Almaty,
*e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

Effect of an external magnetic field and friction force on the dynamic properties of a system of charged particles

The paper describes the algorithm of the method of molecular (Langevin) dynamics, the modeled system and the main parameters characterizing the system. The presented mathematical model is built for a magnetically active dusty plasma taking into account the influence of the friction force due to the presence of the environment (buffer plasma). To solve the equation of motion of dust particles, a modified numerical Verlet scheme obtained by the authors of the work was used. The mathematical model is built for a two-dimensional system, the particles of which interact using the Yukawa potential. A detailed analysis of the autocorrelation functions of velocities and their Fourier transforms of dust particles for different values of the parameters of the magnetic field, coupling and friction is carried out. It was found that an increase in friction causes a decrease in the dominant peak at a fixed value of the magnetic field parameter. This peak corresponds to the combined effect of the magnetic field and strong correlations in the system; the complete disappearance of the peak corresponding to cyclotron oscillations was found when the friction force is not taking into account. It is shown that, with low friction, an increase in the magnetic field leads to a monotonic increase in the amplitude of the dominant peak and with a large value of friction, in contrast to its decrease, which is explained by us that the de-

сay of ultrasonic waves in the medium increases with increasing frequency, however, a more detailed description of this effect may be a topic for further research.

Key words: molecular dynamic method, Verlet algorithm velocity autocorrelation functions, external magnetic field, friction force.

Қ.Н. Жұмағұлова, Т.С. Рамазанов, Р.У. Машеева*,
М. Мырзалы, Е.О. Шаленов, Н. Атаканов, М.Н. Жұмағұлов
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Эксперименттік және
теориялық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.
*e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

Сыртқы магнит өрісі мен үйкеліс күшінің зарядталған бөлшектер жүйесінің динамикалық қасиеттеріне әсері

Мақалада молекулалық (Ланжевен) динамика әдісінің алгоритмі, модельденетін жүйе және жүйені сипаттайтын негізгі параметрлер сипатталған. Ұсынылған математикалық модель қоршаған ортаның (буферлік плазма) болуына байланысты үйкеліс күшінің әсерін ескере отырып, магниттік белсенді тозаңды плазмаға арналған. Тозаңды бөлшектерінің қозғалыс теңдеулерін шешу үшін жұмыс авторлары алған Верле модификацияланған сандық схемасы қолданылды. Математикалық модель екі өлшемді жүйеге арналған, бөлшектер Юкава потенциалының көмегімен өзара әрекеттеседі. Тозаңды бөлшектердің автокорреляциялық функциясы және фурье түрлендірулерінің анализі магнит өрісінің, байланыс және үйкеліс параметрлерінің әр түрлі параметрлері үшін жасалған. Магнит өрісінің нақты бір мәнінде үйкелістің жоғарылауы доминантты пиктің төмендеуіне әкелетіні анықталды. Бұл пик магнит өрісімен тығыз байланыстың бірлескен әсеріне сәйкес келеді. Циклотрондық тербелістерге сәйкес келетін пиктің толық жоғалуы үйкеліс күшінің нөлдік мәніне сәйкес келеді. Үйкеліс аз болған уақытта магнит өрісінің күшеюі пиктің биіктігінің біркелкі өсуіне, ал үйкеліс күшінің өсуі оның төмендеуіне әкелетіндігі анықталды. Мұны ультрадыбыстық толқындардың әлсіреуі ортада жиіліктің жоғарылауымен жоғарылайтындығымен түсіндіруге болады, алайда бұл эффект туралы толық сипаттама әрі қарайғы зерттеу тақырыбы бола алады.

Түйін сөздер: молекула динамика әдісі, Верле алгоритмі, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы, біртекті магнит өрісі, үйкеліс күші.

Введение

Сильно связанная плазма – это класс физических систем, где потенциальная энергия парного взаимодействия доминирует над средней кинетической энергией частиц [1]. Для описания свойств таких систем часто используется модель «однокомпонентной плазмы» (ОСР), которая учитывает динамику только одного типа заряженных частиц, погруженных в фоновую среду. При исследованиях таких систем основным моментом является выбор потенциала взаимодействия. Поляризационной формой потенциала взаимодействия является экранированный потенциал Дебая – Хьюкеля или как его часто называют потенциал Юкавы [2,3]. Данный потенциал широко используется в качестве потенциала взаимодействия частиц пыли микронного размера в пылевой плазме. Пылевая плазма [4-6] представляет собой примечательный вид много частичной сильно связанной (неидеальной) системы, которая часто встречается в астрофизических средах, а также может быть реализована в лабораторных условиях.

Пылинки, имеющие относительно большую поверхность, попадая в плазму, заряжаются потоками плазменных электронов и ионов до очень больших значений электрического заряда, в земных условиях заряд чаще всего отрицательный из-за большей подвижности электронов. Большой заряд обуславливает сильное электростатическое взаимодействие пылевых частиц между собой, что позволяет рассматривать пылевую плазму как жидкость Юкавы.

Во многих лабораторных условиях можно наблюдать плоские двумерные слои частиц пыли. В связи с этим большой интерес представляет исследование свойств двумерных систем Юкавы [7,8] на основе компьютерного моделирования.

В последние годы интерес к изучению влияния магнитного поля на свойства сильно связанной неидеальной пылевой плазмы значительно вырос. Теоретические и экспериментальные исследования выявили многие особенности изменения структурных и динамических свойств под действием внешнего магнитного

поля. Было обнаружено, что увеличение магнитного поля увеличивает время локализации частиц [9,10]. В лабораторной пылевой плазме сильное магнитное поле приводит к разрушению упорядоченных структур [11,12], что происходит за счет влияния магнитного поля на важные параметры системы, например, на заряд пылевых частиц. Влияние магнитного поля на диффузию пылевых частиц было темой многих работ [13,14]. В работе [15] было показано, что в двумерных жидкостях Юкавы движение частиц становится сверхдиффузионным при сильном однородном перпендикулярном магнитном поле. Для нормальной диффузии можно использовать автокорреляционную функцию скоростей (АФС) для расчета коэффициента диффузии. Однако для двумерных систем соотношение Грина-Кубо может не сходиться из-за медленного затухания АФС. Кроме того, с помощью АФС можно выявить частоты колебаний пылевых частиц на основе Фурье преобразования АФС, что проделано в работе [16,17]. Результатом работы является обнаружение двух коллективных мод в намагниченной двумерной Юкава жидкости без учета силы трения. Первая мода соответствует циклотронной частоте, тогда как доминирующая вторая мода соответствует частоте, превышающей значение циклотронной частоты, что обусловлено комбинированным эффектом магнитного поля и взаимодействия в системе. Только доминирующая частота была обнаружена в работе [13], где автокорреляционная функция была получена на основе метода компьютерного моделирования ланжевеновой динамики. Настоящая работа мотивирована недавними результатами, полученными при исследовании одновременного воздействия внешнего магнитного поля и силы трения [18] на локализацию пылевых частиц [19, 20]. Было показано, что, хотя магнитное поле и трение, действуя в одиночку, увеличивают время локализации, при одновременном учете их влияния их эффекты комбинируются нетривиальным образом и действуют друг против друга в некоторой области значений параметров. Целью данной статьи является изучение одновременного влияния силы магнитного поля и силы трения, обусловленной наличием окружающей среды, на АФС и на их Фурье преобразование в широком диапазоне изменения параметров. В работе используется недавно нами разработанная модифицированная схема Верле [19], которая учитывает как трение, так и силу Лоренца.

Особенностью схемы является независимость временного шага от напряженности магнитного поля.

Схема Верле для моделирования заряженных частиц с учетом внешнего магнитного поля и влияния окружающей среды

В работе было выполнено компьютерное моделирование магнитоактивной пылевой плазмы с учетом влияния силы трения, обусловленной наличием окружающей среды (буферной плазмы). В качестве метода компьютерного моделирования был использован метод молекулярной динамики, в котором динамика системы взаимодействующих частиц определяется интегрированием их уравнений движения. Для описания движения частиц применяется классическая механика. Классический метод молекулярной динамики при учете дополнительно силы трения и броуновской силы называется методом ланжевеновой динамики [21-23].

Для реализации метода ланжевеновой динамики все трехмерное пространство разбивается на равные ячейки объемом V (для простоты кубические) с N частицами в каждой. В двумерном случае рассматривается квадрат с площадью S . Одна из ячеек считается базовой, остальные – копии (реплики). Конфигурации частиц базовой ячейки повторяются во всех остальных ячейках. Длина ребра базовой ячейки $L^3=V$. На базовую ячейку и на реплики были наложены периодические граничные условия (ПГУ). Начальное распределение компонент координат и скоростей частиц берется случайным, компоненты скоростей можно брать любыми в процессе термализации они примут значения, распределенные по гауссовскому закону с заданной температурой. На первом этапе моделирования система должна перейти в равновесное состояние, что происходит достаточно быстро. Так как моделирование проводится для канонического ансамбля, используется термостат для поддержания постоянной температуры. После того, как в системе достигается равновесие, начинается сбор данных о скоростях и координатах частиц, эти данные необходимы для дальнейших вычислений.

Так как в настоящей работе исследуемой системой является пылевая плазма, в качестве потенциала межчастичного взаимодействия пылевых частиц берется экранированный потен-

циал Дебая-Хюккеля или как его часто называют потенциал Юкава. Это обусловлено тем, что пылевые частицы двигаются в плазме, состоящей из ионов, электронов и атомов, и так как в земных условиях пылевые частицы заряжаются до очень больших значений электрического заряда, то частицы сильно электростатически взаимодействуют друг с другом, но это взаимодействие экранируется окружающей фоновой плазмой, состоящей из ионов и электронов. Поэтому в пылевой плазме потенциалом взаимодействия является экранированный потенциал Дебая-Хюккеля:

$$\Phi(r) = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\exp(-\frac{r}{\lambda_D})}{r}, \quad (1)$$

здесь Q – заряд частиц и $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 n}}$ – длина

Дебая, которая характеризует пространственный масштаб экранировки поля выбранной частицы в плазме, ϵ_0 – электрическая постоянная, e – элементарный заряд электрона, k_B – постоянная Больцмана. Отношение между межчастичной потенциальной энергией и тепловой энергией выражается через безразмерный параметр связи:

$$\Gamma = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 a k_B T}, \quad (2)$$

где T – температура, $\kappa = a / \lambda_D$ – параметр экранировки, $a = (1 / \pi n)^{1/2}$ – радиус Вигнера-Зейтца для двумерной системы (среднее расстояние между частицами), n – числовая плотность пылевых частиц.

Далее мы рассматриваем силу внешнего однородного магнитного поля, направленного вдоль оси z ($\vec{B} = B_z \vec{k}$) и определяемой следующим образом:

$$\vec{F}_{mag} = Q \dot{\vec{r}}_i \times \vec{B}. \quad (3)$$

Так как пылевые частицы испытывают трение со стороны внешней буферной плазмы, учитывается сила трения, которая пропорциональна частоте колебаний и скорости частиц:

$$\vec{F}_{fr} = -m\nu \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (4)$$

А случайная «броуновская» сила, учитывающая случайные толчки со стороны окружающих плазменных частиц или другие стохастические процессы, например, случайные флуктуации заряда частиц, приводящие к росту их кинетической энергии, определяется как:

$$F_{br}(t) = A\xi(t). \quad (5)$$

где $\xi(\tau)$ – дельта-коррелированный гауссов белый шум, значение множителя A определяется флуктуационно-диссипативной теоремой.

Таким образом, основной идеей метода МД является решение уравнений движения Ньютона для системы многих тел. Данные уравнения без учета внешних дополнительных сил записываются как:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{v}_i, \quad (6)$$

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}_i,$$

где \vec{r}_i , \vec{v}_i – координата, скорость i – той частицы, и m – масса частиц, $i = 1, \dots, N$, а \vec{F}_i – сила, действующая на частицу i со стороны остальных частиц.

И таким образом, полная сила, действующая на пылевую частицу в методе компьютерного моделирования ЛД с учетом влияния силы магнитного поля, представляется в виде:

$$m\ddot{\vec{r}}_i = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}(t) + Q\dot{\vec{r}}_i \times \vec{B} - m\nu\dot{\vec{r}}_i + \vec{F}_{br}(t), \quad (7)$$

Влияние силы магнитного поля выражается с помощью безразмерного параметра:

$$\beta = \frac{\omega_c}{\omega_p}, \quad (8)$$

где $\omega_c = QB / m$ – циклотронная и $\omega_p = \sqrt{nQ^2 / 2\epsilon m a}$ – двухмерная плазменная

частота, m – масса частицы. Влияние силы трения учитывается с помощью безразмерного параметра трения:

$$\theta = \frac{v}{\omega_d}, \quad (9)$$

где \mathcal{V} – коэффициент трения пылевых частиц, который определяет частоту их столкновений с нейтральными частицами окружающей плазмы.

Время берется в единицах, обратных ленгмюровской пылевой частоте, а скорость в единицах тепловой скорости частиц $v_{T_d} = (k_B T_d / m_d)^{-1/2}$. Таким образом, поведение системы определяется следующими безразмерными параметрами: $\Gamma, \kappa, \beta, \theta$. В нашем случае, задача решается для двумерного случая и рассматривается квадратная ячейка, число частиц в ячейке $N = 1024$. Уравнение движения решается с помощью модифицированной схемы, полученной авторами данной работы.

Автокорреляционные функции скоростей и колебания в системе

Полученные данные по микроскопическим характеристикам системы могут быть использованы для дальнейшего анализа физических свойств Юкава системы. Полученные данные мы использовали для расчета автокорреляционных функций скоростей пылевых частиц в широком диапазоне изменения различных параметров (параметр связи Γ , параметр магнитного поля β , параметр экранировки κ и параметр трения θ).

Автокорреляционная функция скоростей – одна из важных динамических характеристик системы, которая определяется как:

$$A_{vv}(t) = \langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle, \quad (10)$$

тогда как ее нормированное значение ($\bar{A}_{vv}(0) = 1$) выражается как:

$$\bar{A}_{vv}(t) = \frac{\langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle}{\langle \vec{v}(0) \vec{v}(0) \rangle}, \quad (11)$$

где скобки означают усреднение по ансамблю и по различным начальным моментам времени.

С помощью данных АФС можно вычислить спектральную функцию пылевых частиц на основе Фурье – преобразования автокорреляторов скоростей с помощью следующего уравнения:

$$A_{vv}(\omega) = \int_0^{\infty} A_{vv}(t) e^{i\omega t} dt, \quad (12)$$

где $A_{vv}(t)$ – автокорреляционная функция скоростей. Данный интеграл вычислен при замене верхнего предела интеграла на t_{\max} , когда $A_{vv}(t) \cong 0$ при $t > t_{\max}$.

Результаты

Результаты вычисления автокорреляционных функций скоростей под действием одновременного действия, как силы внешнего магнитного поля, так и силы трения редставлены ниже. Рисунок 1а показывает результаты вычисления автокорреляционных функций для фиксированных значений параметров системы $\Gamma=80$, $\kappa=2$, $\theta=0.1$ для разных значений параметра магнитного поля β . На рисунке 1б представлен аналогичный результат, в данном случае, значение коэффициента трения $\theta=0.5$. Увеличение доминирующей частоты под действием влияния внешнего однородного магнитного поля, было показано в работе [13,16,24]. Приведенные результаты в работе дают дополнительную информацию о затухании колебаний в магнитоактивной плазме за счет силы трения.

Детальное исследование влияния силы трения на автокорреляционные функции скоростей представлены на рисунке 2 для $\Gamma=80$, $\kappa=2$ при коэффициенте магнитного поля $\beta=0.5$ (а) и $\beta=1.5$ (б) для разных значений коэффициента трения θ . В обоих случаях, с увеличением коэффициента трения амплитуда колебаний автокорреляционных функций скоростей уменьшается, но частота остается неизменной.

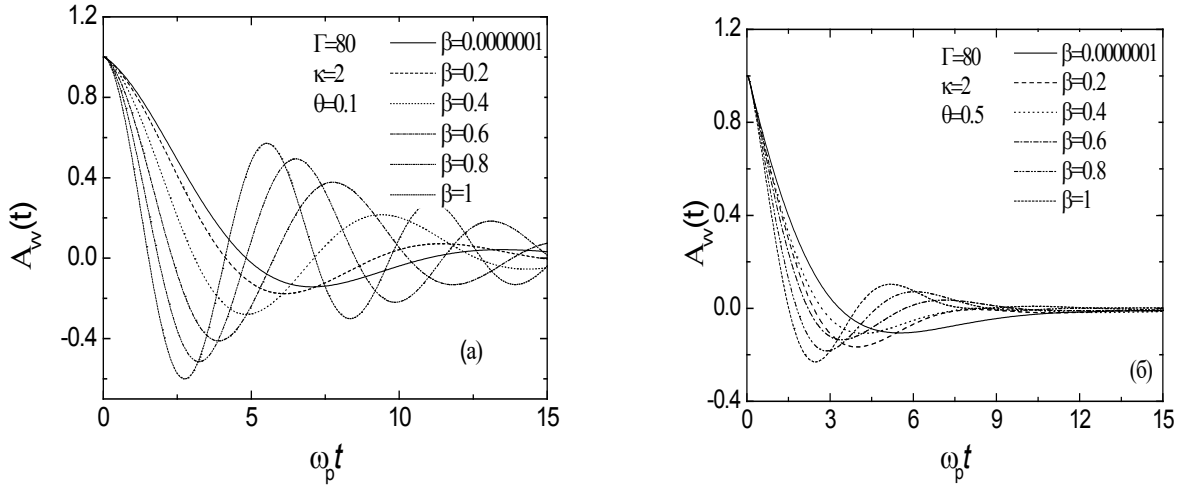


Рисунок 1 – Автокорреляционная функция скоростей для разных значений параметра магнитного поля при $\Gamma = 80$, $\kappa = 2$ для (а) $\theta = 0.1$ и (б) $\theta = 0.5$

В работе [23] было показано, что в пределе исчезающих корреляций в системе ($\Gamma \rightarrow 0$) частота, которая возникает в результате гибридной моды в магнитоактивной плазме, превращается в значение, соответствующее аппроксимации случайных фаз (подробности см. в [23]), а при высокой связи принимает значение:

$$\omega_1^2 = \omega^2 + 2\omega_E^2 = \beta^2 \omega_p^2 + 2\omega_E^2, \quad (13)$$

где ω_E – частота Эйнштейна, определяемая как частота колебаний пробной частицы в замороженной среде. При $\kappa = 2$ и $\Gamma = 120$, мы имеем $\omega_E \cong 0.338\omega_p$ (см. уравнение (3) в ссылке [25]), согласно фазовой диаграмме двумерной комплексной плазмы рассматриваемая система при $\kappa = 2$ и $\Gamma = 120$ находится в жидком состоянии. Здесь отметим лишь, что наши наблюдения верны для широкого диапазона значений параметров связи и экранировки.

На рисунке 3 показано Фурье преобразование $A_{vv}(\omega)$ автокорреляционных функций скоростей для $\beta = 0.5$ (а) и $\beta = 1.5$ (б). Как видно из рисунка, при $\theta > 0,01$ небольшой пик при $\omega/\omega_p = \beta$, соответствующий циклотронной частоте, исчезает. На рисунке 4 приведены $A_{vv}(\omega)$ для $\theta = 0.1$ (а), $\theta = 0.5$ (а), и для разных значений параметра магнитного поля. Можно отметить, что на рисунке 4(а) преобразование

Фурье автокорреляционных функций скоростей демонстрирует увеличение величины доминирующего пика с увеличением магнитного поля, тогда как на панели (б) можно увидеть противоположное поведение. Данные показывают, что увеличение трения, вызванное окружающей газовой средой сильно подавляет колебания с более высокой частотой, чем колебания с более низкой частотой. Это находится в согласии с известным фактом, что затухание ультразвуковых волн в вязких средах увеличивается с увеличением частоты. Известно, что затухание волн в жидкостях обусловлено вязкостью и броуновским движением, посредством обмена энергией между волновым движением и внутренним движением частиц (перемещение, вибрация и вращение).

На рисунке 5 (а,б) представлены результаты исследования фурье -преобразования АФС для фиксированных значений параметра связи $\Gamma = 100$, $\Gamma = 80$ при $\kappa = 2$ и при разных значениях параметра магнитного поля. Из данного графика можно определить значение параметра трения $\theta_{кр}$, при котором высота доминирующего пика остается неизменным при разных величинах магнитного поля. Таким образом, зависимость коэффициента трения $\theta_{кр}$ от параметра связи, при котором значение амплитуды колебания остается неизменным, представлена на рисунке 6.

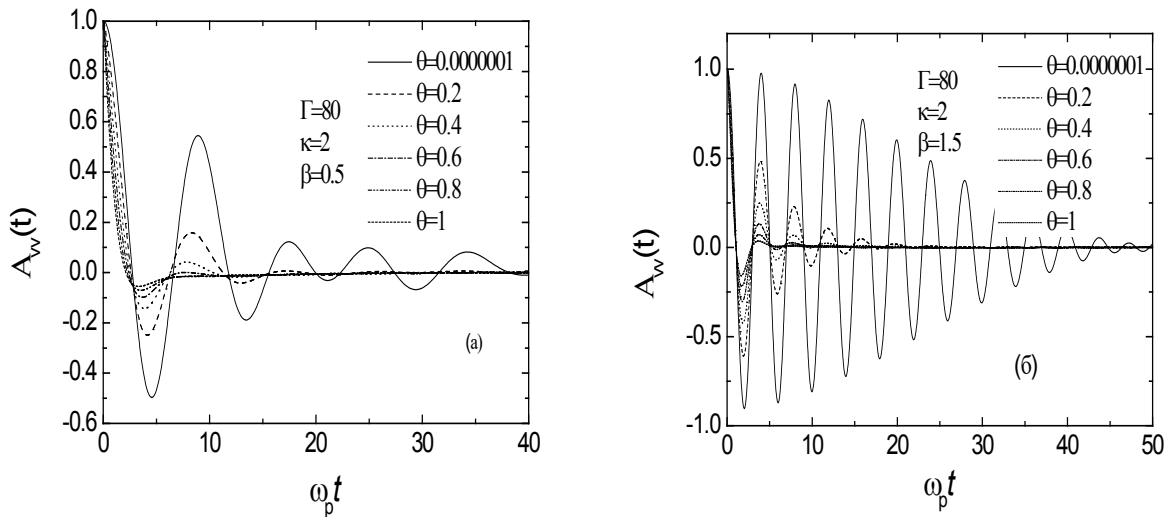


Рисунок 2 – Автокорреляционная функция скоростей для разных значений коэффициента трения при $\Gamma = 80$, $\kappa = 2$ для (а) $\beta = 0.5$ и $\beta = 1.5$ (б)

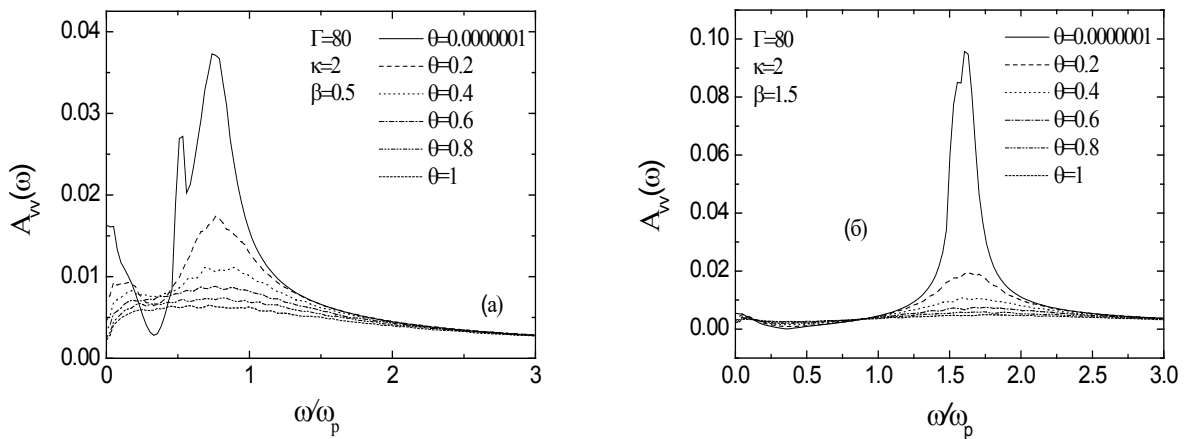


Рисунок 3 – Фурье преобразование $A_{vv}(\omega)$ автокорреляционных функций скоростей для $\beta = 0.5$ (а) и $\beta = 1.5$ (б) при разных значения коэффициента трения

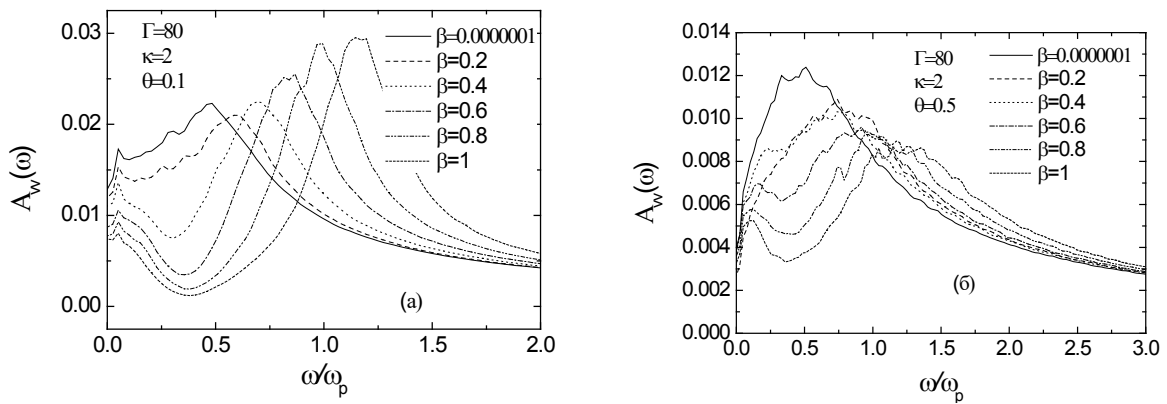


Рисунок 4 – Фурье преобразование $A_{vv}(\omega)$ автокорреляционных функций скоростей для $\theta = 0.1$ (а), $\theta = 0.5$ (а), и для разных значений параметра магнитного поля

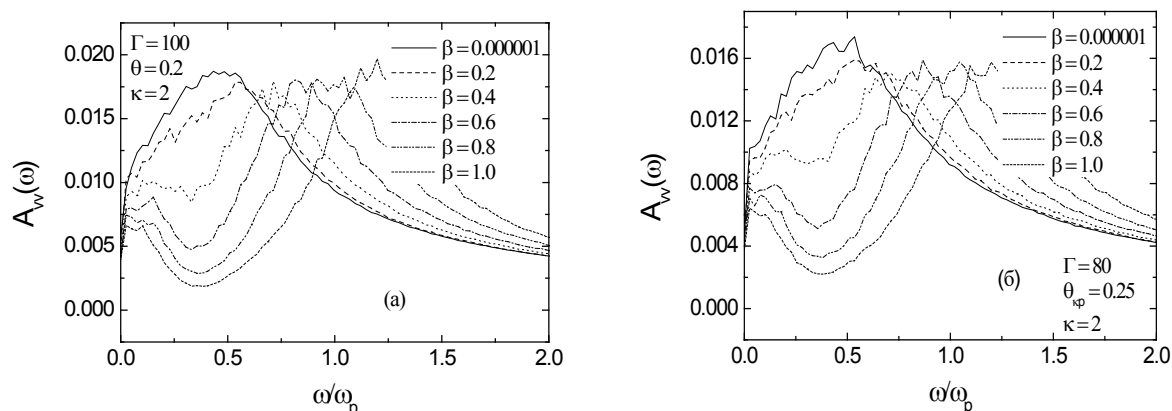


Рисунок 5 – Фурье преобразование $A_w(\omega)$ для $\Gamma = 100$ (а), $\Gamma = 80$ (а), и для разных значений параметра магнитного поля

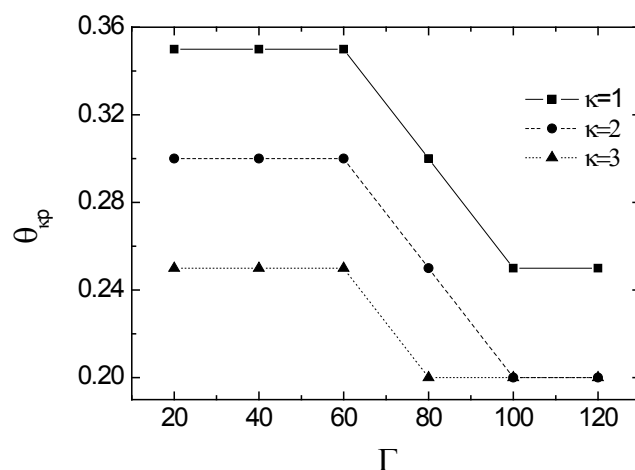


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения $\theta_{кр}$ от параметра связи

Заключение

Было исследовано одновременное влияние силы трения, вызванной газовой средой, а также однородного внешнего магнитного поля на автокорреляционную функцию скоростей и Фурье-преобразование с помощью метода компьютерного моделирования ланжевеновой динамики. Было обнаружено, что для фиксированного значения параметра магнитного поля увеличение трения вызывает уменьшение доминирующего пика, который соответствует комбинированному эффекту магнитного поля и сильных корреляций в системе, и полное исчезновение пика, соответствующего циклотронным колебаниям, обнаруженный при $\theta = 0$.

Было показано, что при небольшом трении усиление магнитного поля приводит к монотонному увеличению высоты доминирующего пика, а при большом значении трения в отличие к его падению. Мы объясняем эти наблюдения тем фактом, что затухание ультразвуковых волн в среде увеличивается с увеличением частоты, однако более подробное описание этого эффекта может быть темой дальнейших исследований.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках Гранта AP09058005 Министерства Образования и Науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Rogers F.J. Activity expansion calculations for dense hydrogen // In *Strongly Coupled Coulomb Systems* / ed. G.J. Kalman, J.M. Rommel, K. Blagoev. – NY.: Plenum Press, 1999. – P. 15.
- 2 Nunomura S., Samsonov D., Zhdanov S., and Morfill G. Self-Diffusion in a Liquid Complex Plasma // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96. – Art. No 015003.
- 3 Shahzad A., He M.G. Structural order and disorder in strongly coupled Yukawa liquids // *Physics of Plasmas*. – 2016. – Vol. 23. – Art. No 093708
- 4 Tsyтович V.N. Dust plasma crystals, drops, and clouds // *Phys. Usp.* – 1997. – Vol. 40. – P.53-94.
- 5 Фортов В. Кристаллы в пылевой плазме // *Наука и жизнь*. – 2005. – № 7. – С.42-46.
- 6 Semyonov V.P., Timofeev A.V. Energy transfer between degrees of freedom of a dusty plasma system // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 774. – Art. No 012171.
- 7 Rabani E., Gezelter J.D. and Berne B.J. Calculating the hopping rate for self-diffusion on rough potential energy surfaces: Cage correlations // *J. Chem. Phys.* – 1997. – Vol. 107. – P.6867.
- 8 Dzhumagulova K.N., Masheyeva R.U., Ott T., Hartmann P., Ramazanov T.S., Bonitz M., and Donko Z. Cage correlation and diffusion in strongly coupled three-dimensional Yukawa systems in magnetic fields // *Physical Review E*. – 2016. – Vol. 93. – Art. No 063209.
- 9 Ott T., Bonitz M., Hartmann P. and Donko Z. Higher harmonics of the magnetoplasmon in strongly coupled Coulomb and Yukawa systems // *Phys. Rev. E*. – 2011. – Vol. 83. – Art. No 046403
- 10 Bonitz M., Donkó Z., Ott T., Köhlert H. and Hartmann P. Nonlinear magnetoplasmons in strongly coupled Yukawa plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – Art. No 055002.
- 11 Bouchoule A. and Boufendi L. Particulate formation and dusty plasma behaviour in argon-silane RF discharge // *Plasma sources Sci. Technol.* – 1993. – Vol. 2. – P.204.
- 12 Feng Y., Goree J., Liu B., Intrator T.P. and Murillo M.S. Superdiffusion of two-dimensional Yukawa liquids due to a perpendicular magnetic field // *Phys. Rev. E*. – 2014. – Vol. 90. – Art. No 013105.
- 13 Rosenberg M., Kalman G.J., Hartmann P., and Donkó Z. Waves in a quasi-two-dimensional superparamagnetic dusty plasma liquid in a trap // *Physical Review E*. – 2016. – Vol. 94. – Art. No 033203.
- 14 Ott T. and Bonitz M. Diffusion in a Strongly Coupled Magnetized Plasma // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – Vol. 107. – Art. No 135003.
- 15 Ott T., Löwen H., and Bonitz M. Dynamics of two-dimensional one-component and binary Yukawa systems in a magnetic field // *Phys. Rev. E*. – 2014. – Vol. 89. – Art. No 013105.
- 16 Dzhumagulova K.N., Masheeva R.U., Ramazanov T.S. and Donkó Z. Effect of magnetic field on the velocity autocorrelation and the caging of particles in two-dimensional Yukawa liquids // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 89. Art. No 033104.
- 17 Dzhumagulova K.N., Masheyeva R.U., Ramazanov T.S., Xia G., Kalimoldayev M.N., and Donko Z. Simultaneous effect of an external magnetic field and gas-induced friction on the caging of particles in two-dimensional Yukawa systems // *Contrib. Plasma Phys.* – 2018. – Vol. 58. – P.217.
- 18 Джумагулова К.Н., Машеева Р.У., Рамазанов Т.С., Донко З., Калимолдаев М.Н. Математическая модель для исследования локализации заряженных частиц при наличии внешнего магнитного поля // *Математическое моделирование*. – 2018. – Т. 30, №3. – С. 135-146.
- 19 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S. Sustainable numerical scheme for molecular dynamics simulation of the dusty plasmas in an external magnetic field // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 905. – Art. No 012022.
- 20 Kong W., Yang F., Liu S., Shi F. Study on two-dimensional equilibrium structure of magnetized complex plasmas based on a Langevin dynamics simulation // *Physics of Plasmas*. – 2016. – Vol. 23. – Art. No 103705
- 21 Beraudo A., De Pace A., Alberico W.M., Molinari A. Transport properties and Langevin dynamics of heavy quarks and quarkonia in the Quark Gluon Plasma // *Nuclear Physics A*. – 2009. Vol. 831 (1–2). – P. 59-90.
- 22 Hou L.-J., Shukla P.K., Piel A. and Miković Z.L. Wave spectra of two-dimensional Yukawa solids and liquids in the presence of a magnetic field // *Phys. Plasmas*. – 2009. – Vol. 16. – Art. No 073704.
- 23 Chun-Shang Wong, Goree J., and Haralson Z. Statistical physics principles tested using dusty plasma and aerosol experiments // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2018. – Vol. 46. – P.763.
- 24 Charan H., Ganesh R. Strongly correlated classical plasmas under external forcing and dissipation – An example using Molecular Dynamics // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 759. – Art. No 012061
- 25 Dzhumagulova K.N., Masheeva R.U., Ramazanov T.S. and Donkó Z. Effect of magnetic field on the velocity autocorrelation and the caging of particles in two-dimensional Yukawa liquids // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 89. – Art. No 033104.

References

- 1 F.J. Rogers *Activity expansion calculations for dense hydrogen* // In *Strongly Coupled Coulomb Systems* / ed. G.J. Kalman, J.M. Rommel, K. Blagoev (NY.: Plenum Press, 1999), p. 15.
- 2 S. Nunomura, D. Samsonov, S. Zhdanov and G. Morfill, *Phys. Rev. Lett.* 96, 015003 (2006).
- 3 A. Shahzad, M.G. He, *Physics of Plasmas* 23, 093708 (2016).
- 4 V.N. Tsyтович, *Phys. Usp.* 40, 53-94 (1997).
- 5 V. Fortov, *Nauka i zhizn* 7, 42-46 (2005). (in Russ)
- 6 V.P. Semyonov, A.V. Timofeev, *Journal of Physics: Conference Series* 774, 012171 (2016).
- 7 E. Rabani, J.D. Gezelter and B.J. Berne, *J. Chem. Phys.* 107, 6867 (1997).

- 8 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheyeva, T. Ott, P. Hartmann, T.S. Ramazanov, M. Bonitz and Z. Donko, *Physical Review E* 93, 063209 (2016).
- 9 T. Ott, M. Bonitz, P. Hartmann and Z. Donko, *Phys. Rev. E* 83, 046403 (2011).
- 10 M. Bonitz, Z. Donkó, T. Ott, H. Kählert and P. Hartmann, *Phys. Rev. Lett.* 105, 055002 (2010).
- 11 A. Bouchoule, L. Boufendi, *Plasma sources Sci. Technol.* 2, 204 (1993).
- 12 Y. Feng, J. Goree, B. Liu, T.P. Intrator and M.S. Murillo, *Phys. Rev. E* 90, 013105 (2014).
- 13 M. Rosenberg, G.J. Kalman, P. Hartmann and Z. Donkó, *Physical Review E* 94, 033203 (2016).
- 14 T. Ott, M. Bonitz, *Phys. Rev. Lett.* 107, 135003 (2011).
- 15 T. Ott, H. Löwen and M. Bonitz, *Phys. Rev. E* 89, 013105 (2014).
- 16 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheeva, T.S. Ramazanov and Z. Donkó, *Physical Review E* 89, 033104 (2014).
- 17 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheyeva, T.S. Ramazanov, G. Xia, M.N. Kalimoldayev, and Z. Donko, *Contrib. Plasma Phys.* 58 217 (2018).
- 18 N. Dzhumagulova, R.U. Masheyeva, T.S. Ramazanov, G. Xia, M.N. Kalimoldayev and Z. Donko, *Matematicheskoe modelirovanie* 30 (3), 135-146 (2018) (in Russ)
- 19 K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, *J. Phys.: Conf. Ser.* 905, 012022 (2017).
- 20 W. Kong, F. Yang, S. Liu, F. Shi, *Physics of Plasmas* 23, 103705 (2016).
- 21 A. Beraudo, A. De Pace, W.M. Alberico and A. Molinari, *Nuclear Physics A* 831, 59-90 (2009).
- 22 L.-J. Hou, P.K. Shukla, A. Piel and Z.L. Mikovi, *Phys. Plasmas* 16, 073704 (2009).
- 23 W. Chun-Shang, J. Goree and Z. Haralson, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 46, 763 (2018).
- 24 H. Charan, *R. Journal of Physics: Conference Series* 759, 012061 (2016).
- 25 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheeva, T.S. Ramazanov and Z. Donkó, *Physical Review E* 89, 033104 (2014).