

УДК 533.9

С.К. Коданова*, Т.С. Рамазанов, К.Н. Джумагулова, М.К. Исанова, Г.К. Омиралиева
Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
**E-mail: kodanova@mail.ru*

Разработка системы визуализации движения частиц пылевой плазмы с использованием графической библиотеки OpenGL

Аннотация. В работе описывается программа, позволяющая в гибком диалоговом режиме исследовать структурные, динамические свойства пылевой плазмы на основе компьютерного метода ланжевенной динамики, а также визуально следить за возникновением упорядоченных структур в пылевой плазме. Программа разработана на языке объектно-ориентированного программирования Delphi7 с использованием графической библиотеки OpenGL. Рассматривается периодическая решетка с кубической ячейкой, заполненная частицами. Анимация визуально показывает, что частица, покидающая ячейку через одну из граней с определенной скоростью, попадает в другую ячейку, но при этом такая же частица с той же скоростью поступает в эту ячейку через противоположную грань. Пользователь в интерактивном режиме наблюдает движения частиц в базовой ячейке, тем самым, получая возможность визуально оценить ее траекторию и вид потенциальной энергии системы в зависимости от времени. Также, в программу включена настройка, которая используя операторы сдвига, поворота, полноэкранный режим, масштабирования преобразовывает изображения.

Ключевые слова: пылевая плазма, ланжевенная динамика, кристаллическое состояние, визуализация

Введение

Изучение свойств пылевой плазмы представляет не только фундаментальный интерес, но и имеет важное технологическое приложение. На сегодняшний день физика пылевой (комплексной) плазмы представляет собой достаточно новую и бурно развивающуюся область знаний. Большой интерес в последнее время вызывает вопрос применения комплексной газоразрядной плазмы в таких областях, как микроэлектроника (создание квантовых точек, устранение отрицательного воздействия пыли и др.), создание высококачественных субмикронных композиционных порошков с заданными свойствами (химический катализ, медицина, механическая обработка поверхностей и др.); при пайке и сварке керамических материалов с металлами; в производстве солнечных батарей и т.д. В настоящее время компьютерные средства математического моделирования и визуализации научных расчетов получили широкое распространение и составляют неотъемлемую часть современных систем автоматизированного моделирования и проектирования. Разработка таких систем, сочетающих широкую предметную функциональность с развитыми графическими интерактивными вычислительными средствами, обычно требует чрезвычайно высоких затрат и сопряжена с решением целого круга проблем, включающего архитектурное проектирование, интеграцию функционально разнородных компонентов, организацию дружественного пользовательского интерфейса, обеспечение открытости, переносимости, эффективное использование на параллельных вычислительных системах.

Краткие сведения о методе ланжевенной динамики

Пылевая плазма – это система, состоящая из заряженных макрочастиц, окруженных буферной плазмой. Взаимодействие пылевых частиц хорошо описывается потенциалом Юкава:

$$\Phi(R) = \frac{\Gamma}{R} e^{-\kappa R}, \quad (1)$$

где $\Gamma = Z_p^2 e^2 / a k_B T$ - параметр связи ($Z_p e$ - заряд пылевой частицы), $\kappa = a / r_D$ - параметр экранировки, a - среднее расстояние между частицами, $r_D = \sqrt{k_B T / (4\pi \sum_{\alpha} n_{\alpha} Z_{\alpha}^2 e^2)}$ - радиус Дебая плазменных частиц (электронов и ионов, сорт частиц указывается α).

Так как размер макрочастицы намного больше размера иона или атома, естественно предположить, что ее движение может быть описано в гидродинамическом приближении, в котором окружающая среда описывается как континуум. Удобным и хорошо зарекомендовавшим себя методом исследования свойств систем частиц, находящихся на однородном фоне, является компьютерное моделирование этих систем методом ланжевеновой динамики [1,2]. В связи с этим, представим полную силу, действующую на пылевую частицу, как сумму следующих сил: 1) сила, появляющаяся в результате взаимодействия с соседними окружающими пылевыми частицами, $\vec{F}_{\text{int}}(r)$; 2) сила трения, возникающая при движении пылевой частицы в плазменном окружении, она равна произведению коэффициента трения на скорость частицы и наконец, 3) случайная сила $\vec{F}_{br}(t)$, учитывающая случайные толчки окружающих плазменных частиц или другие стохастические процессы, например, случайные флуктуации заряда частиц, приводящие к росту их кинетической энергии. Уравнение движения примет следующий вид [3]

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_j F_{\text{int}}(r) \Big|_{r=|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - m_d \eta \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{F}_{br}(t), \quad (2)$$

где $F_{\text{int}}(r) = -e Z_d \partial \Phi / \partial r$, η - коэффициент трения пылевых частиц, который определяет частоту их столкновений с частицами окружающей плазмы, m_d - масса пылевой частицы. Безразмерная стохастическая сила равна

$$F_{br}(\tau) = A \sqrt{2\theta} \xi(\tau), \quad (3)$$

где $\theta = \frac{\eta}{\omega_d}$ - отношение коэффициента трения к частоте ленгмюровских

плазменных колебаний пылинок $\omega_d = \left(\frac{4\pi n e^2}{m_d} \right)^{1/2}$, $\xi(\tau)$ - дельта-коррелированный гауссов белый шум, A - коэффициент, зависящий от шага по времени. Время берется в единицах ленгмюровской пылевой частоты, а скорость в единицах тепловой скорости частиц

$$v_{T_d} = (k_B T_d / m_d)^{-1/2} \quad (4)$$

Таким образом, поведение системы определяется тремя безразмерными параметрами Γ , κ , θ . Решение системы (2) позволило получить наборы координат и скоростей частиц в разные моменты времени, соответствующая статистическая обработка этих данных позволяет получить сведения о структурных, динамических, термодинамических свойствах систем.

Инструментальная среда визуализации движения пылевых частиц

На основе описанного алгоритма разработана инструментальная среда, позволяющая моделировать образование плазменно-пылевых структур, снабженная средствами динамической визуализации и анализа полученных результатов. Создана программа, разработанная в среде Delphi7, а для визуального наблюдения за движением частиц использующая растровый графический редактор OpenGL. OpenGL – это мощный программный интерфейс, применяемый для получения высококачественных, программно генерируемых изображений и интерактивных приложений, использующих двух- и трехмерные объекты, а также растровые изображения.

Технологии двумерной и трехмерной визуализации в современной науке и технике являются неотъемлемым и весьма важным элементом обработки сложной информации о пространственном строении объектов. Технологии уровня OpenGL или Direct3D позволяют не только наглядно представлять пространственный объект, но и преобразовывать изображение, используя операторы сдвига, поворота, изменения масштаба и т.п. На сегодняшний день разработано множество алгоритмов и методов визуализации (растеризация, рейкастинг, трассировка лучей, трассировка путей), которые обычно совмещаются в передовом программном обеспечении, чтобы получить достаточно качественное и фотореалистичное изображение при оптимальных затратах вычислительных ресурсов [11].

С помощью инструментальных средств среды объектно-ориентированного программирования Delphi представлена визуальная демонстрация движения частиц в базовой ячейке. Рассматривается периодическая решетка с кубической ячейкой, заполненная N частицами. Анимация визуально показывает, что частица, покидающая ячейку через одну из граней со скоростью v_i , попадает в другую ячейку, но при этом такая же частица с той же скоростью поступает в эту ячейку через противоположную грань. Пользователь в интерактивном режиме наблюдает движения частиц в базовой ячейке, тем самым, получая возможность визуально оценить ее траекторию и вид потенциальной энергии системы в зависимости от времени.

На рисунке 1.1 представлен интерфейс программы. Она предоставляет пользователю возможность задавать значения параметров задачи нажатием на кнопку



и вести наблюдение за ходом выполнения расчетов. Кнопка



переводит программу в режим визуализации движения частиц пылевой плазмы и дает пользователю возможность прервать выполнение программы с



помощью кнопки при обнаружении каких-либо отклонений.

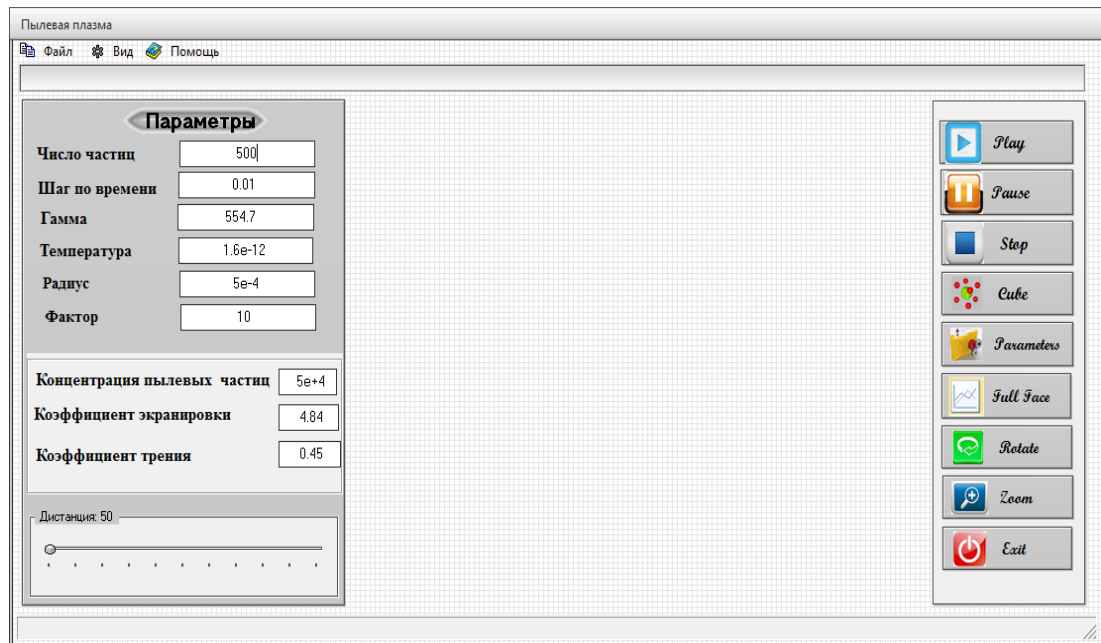


Рисунок 1.1 – Окно параметров пылевой плазмы в режиме визуализации

При запуске программы частицы располагаются без какого-либо порядка в системе (рисунок 1.2), при параметрах, соответствующих кристаллизации, частицы выстраиваются в плазменный кристалл (рисунок 1.3). В программном обеспечении наблюдаются такие важные процессы, как кристаллизации, фазовых переходов и образования упорядоченных структур.

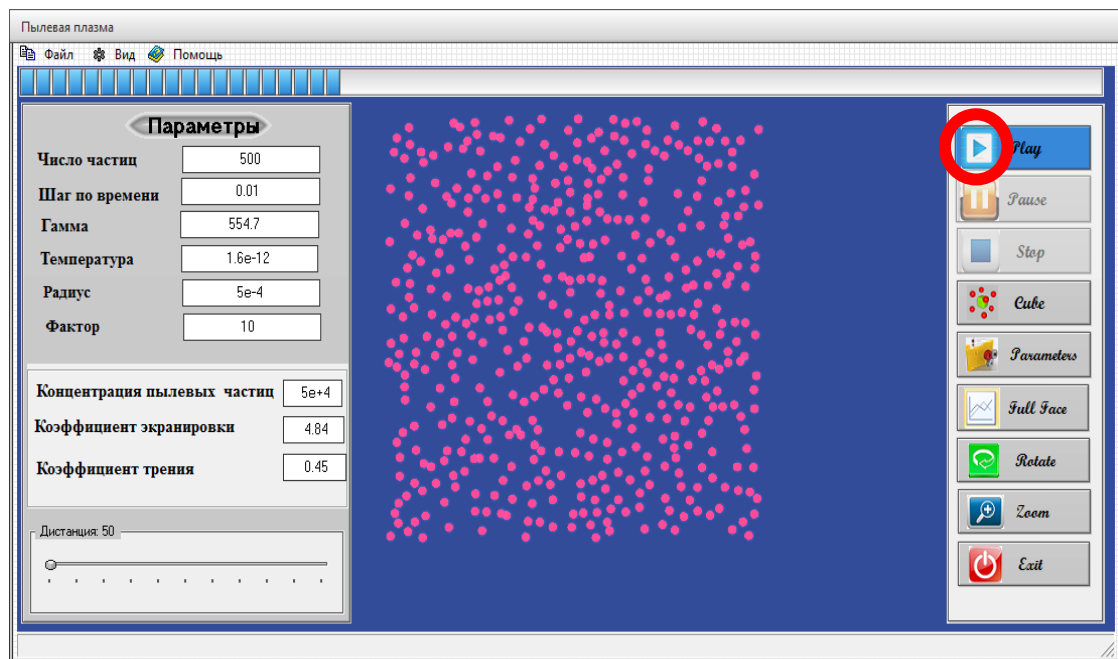


Рисунок 1.2 – Беспорядочное расположение частиц

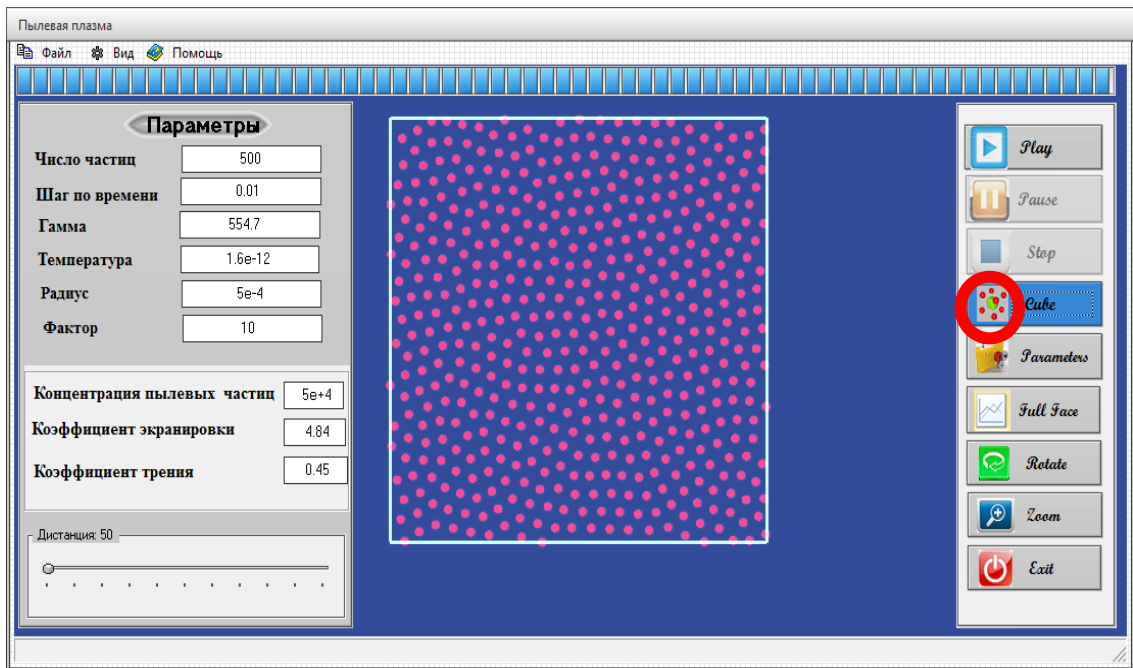

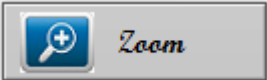



Рисунок 1.3 – Расположение частиц базовой ячейки в кристаллическом состоянии

В программе также встроена система полноэкрannого режима, которая осуществляется с помощью кнопки . Программа позволяет не только наглядно представлять пространственный объект, но и преобразовывать изображение, используя операторы сдвига, поворота, изменения масштаба и т.п. Кнопка  позволяет менять масштаб выделенных участков визуализации.

Кнопка  служит для сдвига и поворота кубической ячейки. На рисунках 1.4-1.5 представлены скриншоты программы при различных сдвигах и поворотах трехмерной кубической ячейки.

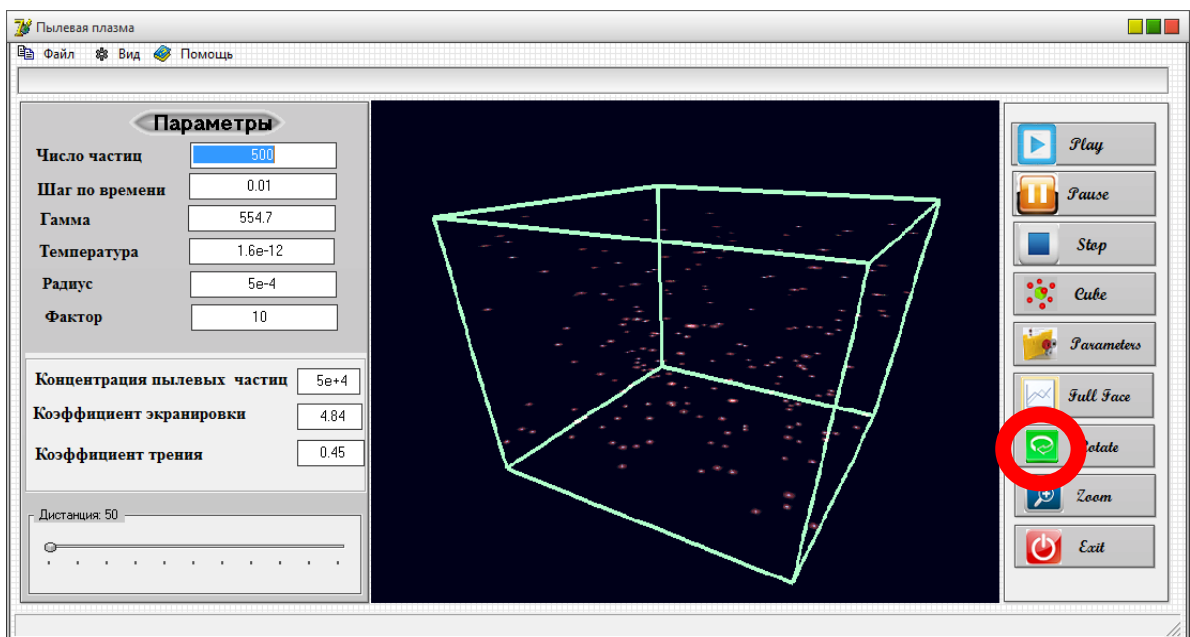


Рисунок 1.4 – Поворот кубической ячейки

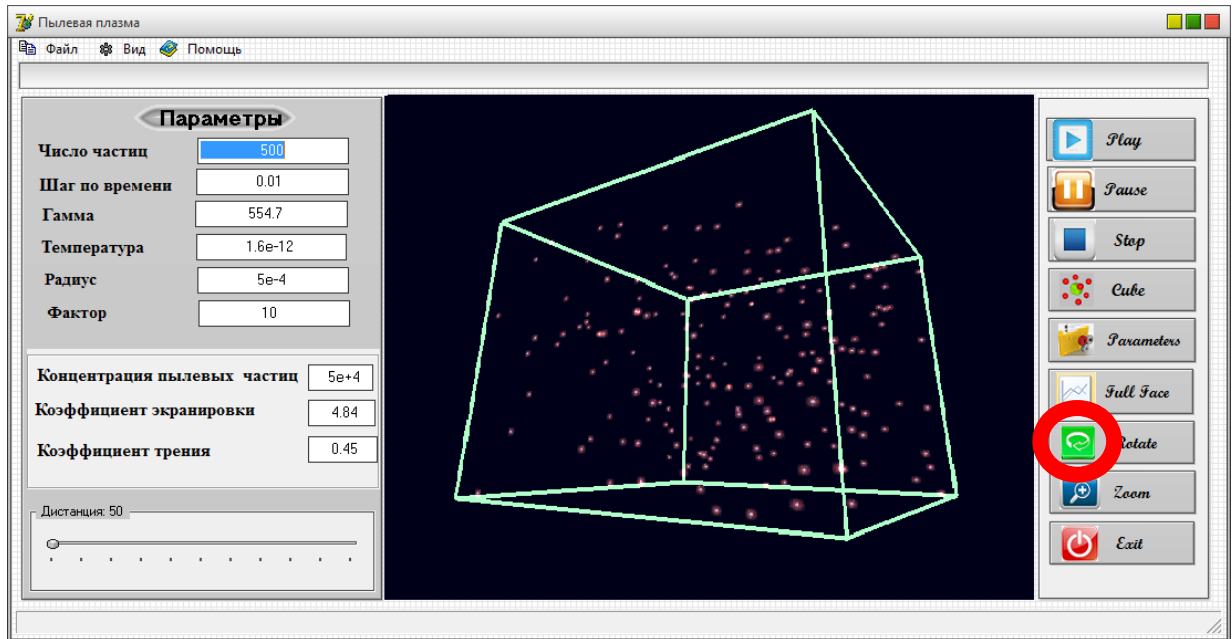


Рисунок 1.5 – Сдвиг кубической ячейки

Заключение

Таким образом, на основе ланжевеновой динамики разработана инструментальная среда визуализации движения частиц пылевой плазмы с использованием графического редактора OpenGL. Разработанная программа является удобным и надежным средством для исследования свойств неидеальной пылевой плазмы. Программа позволяет не только наглядно представлять пространственный объект, но и преобразовывать изображение, используя операторы сдвига, поворота, изменения масштаба и т.п. Созданные программы являются удобным и надежным средством для исследования свойств неидеальной пылевой плазмы.

Литература

1. О.С. Ваулина, С.А. Храпак. Моделирование динамики сильновозмущающихся макрочастиц в слабоионизованной плазме. // ЖЭТФ, 2001, т.119, вып. 2, с.264.
2. О.С. Ваулина, О.Ф. Петров, В.Е. Фортгов, А.В. Чернышев, А.В. Гавриков и др. Экспериментальные исследования динамики макрочастиц в плазме газовых разрядов. // Физика плазмы, 2003, т.29, N8, с.698.
3. Т.С. Рамазанов, К.Н. Джумагулова. Плазменный кристалл: Новое поле деятельности на стыке физики конденсированного состояния и физики плазмы. // Вестник КазНУ, серия физическая. 2004, № 2(17), с. 139-146.
4. K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, V.E. Messerle, S.F. Osadchy. Composition of air plasma with coal dusty particles. // PLTP. 2004. P. 9-5-103. – 5 p.
5. B. Alder, T.E. Wainwright, Phase transition for a hard sphere system // J. Chem. Phys.- 1957.- Vol. 27, No. 5.- P. 1208-1209.
6. J. D. Anderson, Computational Fluid Dynamics: the basics with applications.-New York, 1995.- 563p.
7. Peter Deuffhard, Jan Hermans, Benedict Leimkuhler, Alan E. Mark, Sebastian Reich, Robert, D. Skeel. Computational Molecular Dynamics: Challenges, Methods, Ideas.- Berlin, 1997.-504p.
8. Е. Хокни, Дж. Иствуд Численное моделирование методом частиц.- Москва: Мир,1987.- 638 p.
9. Олдер Б, Фернбах С, Ротенберг М. Вычислительные методы в физике плазмы.- Москва: Мир, 1974.-111p.

10. Hansen J.P., Computer simulation of basic plasma phenomena.- Paris, 1979. 433-470p.
 11. А.В. Литвинович, Язык описания графических объектов GRASP : Журнал «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» №10 за 2012 г.: — Москва, 2012. с. 26-30.

С.К. Коданова, Т.С. Рамазанов, К.Н. Жұмағұлова, М.К. Исанова, Г.К. Өміралиева

OpenGL графикалық ортасын пайдаланып тозаңды плазма бөлшектерінің қозғалысын визуалдау жүйесін құру

Жұмыста ланжевенді динамика компьютерлік әдісі негізінде диалогті режимде тозаңды плазманың құрылымдық, динамикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік беретін және де тозаңды плазмада бөлшектің қозғалысы мен жүйеде пайда болатын реттелген құрылымдарды визуалды бақылайтын бағдарлама сипатталады. Бағдарлама Delphi7 объектілі-бағыттылған бағдарламалау тілінде OpenGL графикалық кітапханасын пайдаланып құрылған. Бөлшектермен толтырылған куб ұяшықты периодты тор қарастырылады. Анимация бөлшектің қандай да бір жылдамдықпен ұяшықтың бір қырынан шығып, екінші ұяшыққа кіретіндігін, бірақ дәл осындай бөлшек ұяшыққа тура сондай жылдамдықпен қарама-қарсы қырдан кіретіндігін визуалды көрсетеді. Бағдарлама қолданушыға негізгі ұяшықтағы бөлшектердің қозғалысын интерактивті режимде бақылап, оның траекториясы мен жүйенің уақытқа тәуелді потенциалды энергия түрін визуалды бағалауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бағдарламаға ығысу, айналу, толық эуранты режим, масштабтау операторларын пайдаланып, кескінді өзгертетін қондырғылар енгізілген.

Түйін сөздер: тозаңды плазма, ланжевенді динамика, кристалды күй, визуалдау

S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, M.K. Issanova,
G.K. Omiraliyeva

The creation of visualization system for dynamics of dusty plasma particles on the basis of OpenGL

In work the program allowing in a flexible dialogue mode to investigate structural, dynamic properties of dusty plasma on the basis of a computer method of langevin dynamics is described, and also visually to watch emergence of ordered structures in dust plasma. The program is developed in language of object-oriented programming of Delphi7 with use of graphic library OpenGL. The periodic grid with the cubic cell, filled with particles is considered. Animation visually shows that the particle leaving a cell through one of sides with a particular speed, gets to other cell, but thus the same particle with the same speed enters in this cell through a counter side. The user in an interactive mode observes driving of particles in a basic cell, thereby, having an opportunity visually to estimate its trajectory and a type of a potential energy of system depending on time. Also, control which using is included in the program, shift operators, turn, a full-screen mode, scaling transforms images.

Keywords: dusty plasma, langevin dynamics, crystalline state, visualization