

УДК 533.9

М. М. МУРАТОВ¹, Т. С. РАМАЗАНОВ¹, К. Н. ДЖУМАГУЛОВА¹, ДЖ. А. ГОРИ²¹ НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
² Университет штата Айова, Айова, США)

ДАВЛЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ СЛОЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Исследование свойств пылевой плазмы является стремительно развивающимся научным направлением. Пылевая плазма встречается в природе (хвосты комет, кольца планет, космические туманности и др.), также пылевая плазма активно исследуется в лабораторных условиях (тероядерные установки, плазменные технологии, газовые разряды). На сегодняшний день термодинамика пылевой плазмы вызывает большой интерес у многих ученых. Но, несмотря на это, экспериментальных работ, связанных с определением уравнения состояния пылевой плазмы, не много. В свою очередь, давление пылевой плазмы, являясь макроскопическим параметром системы, зависит от микроскопических характеристик системы. В связи с этим развитие экспериментальных и теоретических методов исследования в области термодинамики пылевой плазмы является актуальной задачей.

Ключевые слова: эффективный потенциал, пылевая плазма, уравнение состояния, радиальная функция распределения.

Тірек сөздер: нәтижелі элеует, тозанды плазма, күй теңдеуі, радиалды таралу функциясы.

Keywords: effective potential, dusty plasma, equation of state, radial distribution function.

В работе рассчитывается поправка, обусловленная взаимодействием заряженных частиц, к термодинамической функции, такой как давление пылевой плазмы, с помощью радиальных функций распределения пылевых частиц.

Радиальные функции распределения определяются следующим выражением:

$$g_{\alpha\beta}(r) = \exp(-\Phi_{\alpha\beta}(r)/k_B T), \quad (1)$$

где $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ – эффективный потенциал взаимодействия частиц сортов α и β .

В качестве потенциала взаимодействия пылинок использовался эффективный потенциал взаимодействия частиц, полученный в работах [1, 2]:

$$\Phi(r) = \frac{1}{r} [Ah(K_1 r) + Bh(K_2 r)] + \frac{eZm_{ij}}{r^2}, \quad (2)$$

где h , A , B , K_1 и K_2 коэффициенты, которые определяются следующими выражениями:

$$A = 2\pi^2 e^2 Z^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - 4 \frac{\mu^2}{r_D^2}}} \right) + \frac{eZm_{ij}}{\mu} \left(1 + \frac{1 - \frac{\mu^2}{r_D^2}}{\sqrt{1 - 4 \frac{\mu^2}{r_D^2}}} \right),$$

$$B = 2\pi^2 e^2 Z^2 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - 4 \frac{\mu^2}{r_D^2}}} \right) + \frac{eZm_{ij}}{\mu} \left(1 + \frac{1 - \frac{\mu^2}{r_D^2}}{\sqrt{1 - 4 \frac{\mu^2}{r_D^2}}} \right),$$

$$K_{1/2} = \frac{1}{2\mu} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{\mu^2}{r_D^2}} \right),$$

$$h(ar) = \cos(ar) (\pi + Si(ar)) - Ci(ar) \sin(ar).$$

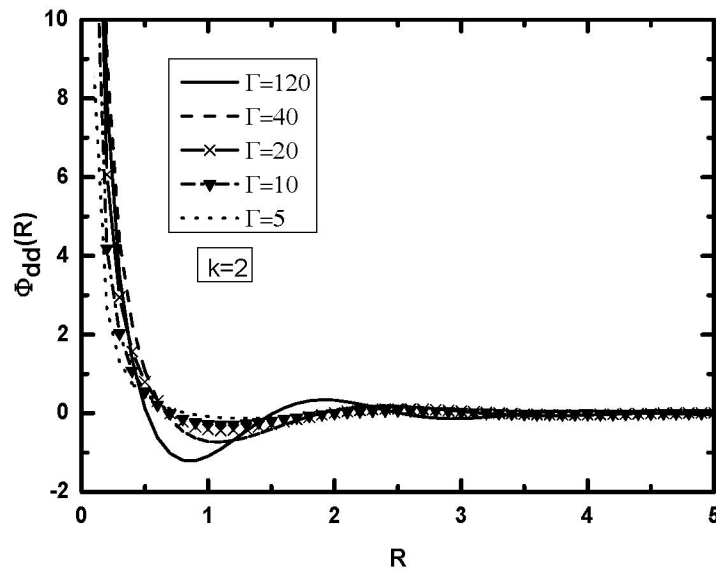


Рисунок 1 – Эффективный потенциал взаимодействия пылевых частиц

Данный потенциал взаимодействия был получен на основе теории линейного диэлектрического отклика в приближении случайных фаз. Он описывает взаимодействие заряженных частиц, имеющих дипольный момент, с учетом эффекта экранировки на больших расстояниях.

Радиальные функции распределения получаются двумя путями: аналитическим (на основе эффективного потенциала взаимодействия (2), рисунок 2) и экспериментальным (рисунок 3).

Уравнение состояния плазмы определялось с помощью радиальных функции распределения посредством следующего выражения [3]:

$$P = P_{id} - \frac{2\pi}{3} \int_0^{\infty} \sum_{\alpha, \beta} n_{\alpha} n_{\beta} g^{\alpha\beta}(r) \frac{\partial \Phi_{\alpha\beta}(r)}{\partial r} r^3 dr, \quad (3)$$

где $P_{id} = \sum_{\alpha} n_{\alpha} k_B T$ – давление идеального газа. Для нахождения давления, обусловленной взаимодействием заряженных частиц, сначала использовались радиальные функции распределения, полученные аналитическим путем на основе формулы (1) с помощью эффективного потенциала взаимо-

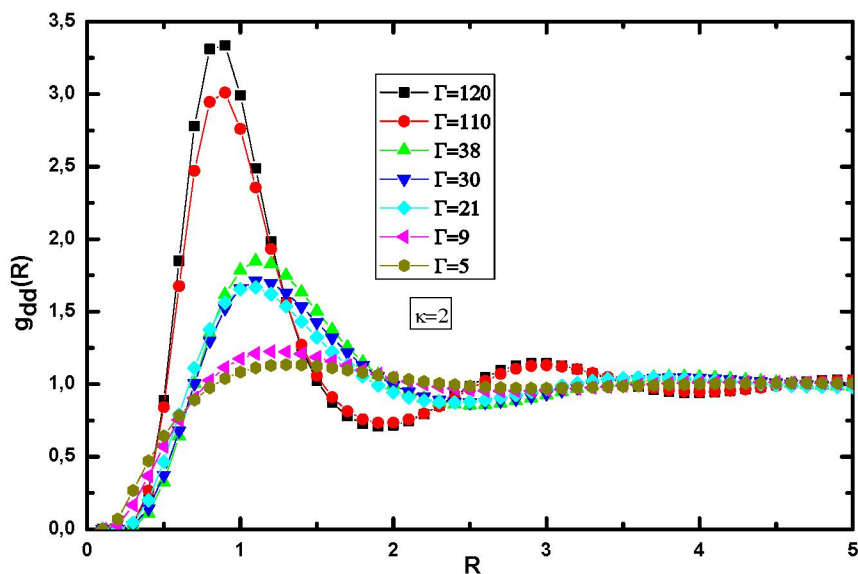


Рисунок 2 – Радиальные функции распределения при различных значениях параметра связи, полученные по формуле (1) на основе потенциала (2)

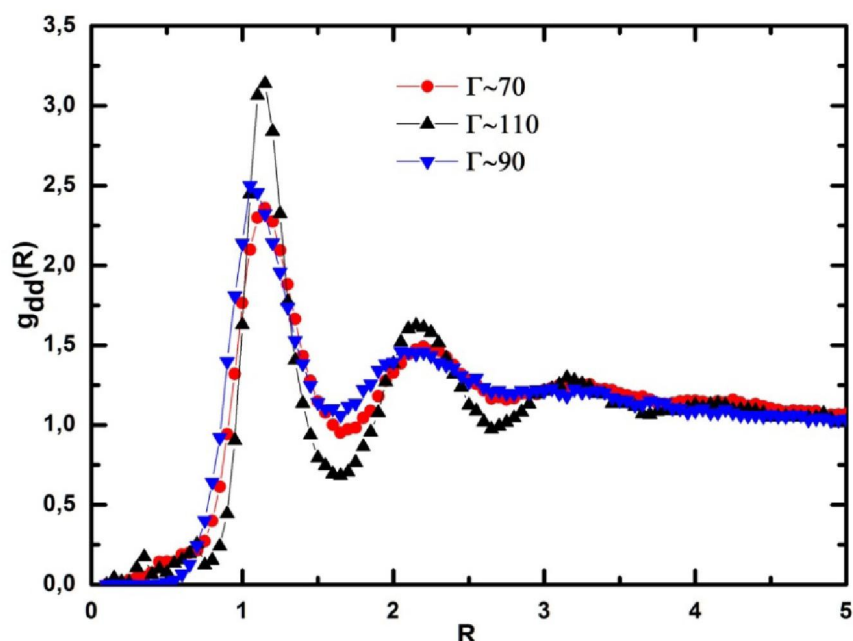


Рисунок 3 – Радиальные функции распределения пылевых частиц, полученные по экспериментальным данным [4, 5]

действия пылевых частиц (2) с дипольным моментом. Далее для сравнения использовались радиальные функции распределения, полученные на основе экспериментальных данных, а также результаты других работ с иным эффективным потенциалом взаимодействия. На рисунке 4 приведены результаты численного моделирования и сравнения.

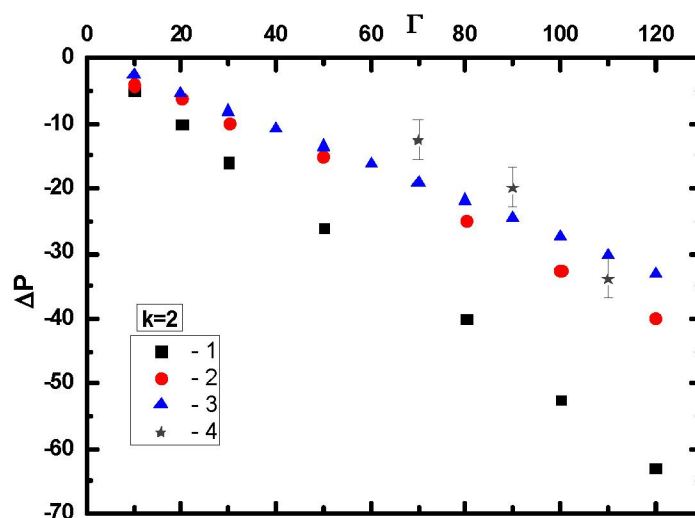


Рисунок 4 – Давление пылевой компоненты, обусловленной взаимодействием заряженных частиц:
1 – результаты работы [6], 2 - результаты работы [3], 3 – результаты на основе потенциала (2),
4 – результаты на основе экспериментальных данных

Как видно из рисунка, результаты представленной работы в целом качественно согласуются с результатами компьютерного моделирования в работах [3, 6], особенно с результатами [3]. В работе [3] были также использованы экспериментальные данные по радиальным функциям.

Заключение. Таким образом, показана возможность адекватного описания термодинамических свойств пылевой плазмы как с помощью аналитически найденной парной корреляционной функции на основе эффективного потенциала взаимодействия пылевых частиц с дипольным моментом, учитывающего экранировку на больших расстояниях, так и с помощью парной корреляционной функции, полученной на основе экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 T. S. Ramazanov and K. N. Dzhumagulova, Effective screened potentials of strongly coupled semiclassical plasma, Phys. Plasmas 9, 3758 (2002).
- 2 T.S.Ramazanov, Zh.A. Moldabekov, K.N.Dzhumagulova and M.M.Muratov, Pseudopotentials of the particles interactions in complex plasmas, Physics of plasmas, Vol.18, 103705 (2011).
- 3 T.S.Ramazanov, K.N.Dzhumagulova et al., Contrib. Plasma Phys. 49, No.1-2, 15-20 (2009)
- 4 O.S. Vaulina, O.F. Petrov, V.E. Fortov, A.V. Chernyshev, A.V. Gavrikov, I.A. Shakhanova, and Yu.P. Semenov, Plasma physics reports, Vol.29, No.8, pp. 698-713 (2003)
- 5 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N., Phys. Plasmas. 2008. Vol.15. P. 053704-053709.
- 6 P.Hartman, G.J.Kalman, Z.Donko, K.Kutasi, Phys.Rev E 72, 026409 (2005)

REFERENCES

- 1 T. S. Ramazanov and K. N. Dzhumagulova, Effective screened potentials of strongly coupled semiclassical plasma, Phys. Plasmas 9, 3758 (2002).
- 2 T.S.Ramazanov, Zh.A. Moldabekov, K.N.Dzhumagulova and M.M.Muratov, Pseudopotentials of the particles interactions in complex plasmas, Physics of plasmas, Vol.18, 103705 (2011).
- 3 T.S.Ramazanov, K.N.Dzhumagulova et al., Contrib. Plasma Phys. 49, No.1-2, 15-20 (2009)
- 4 O.S. Vaulina, O.F. Petrov, V.E. Fortov, A.V. Chernyshev, A.V. Gavrikov, I.A. Shakhanova, and Yu.P. Semenov, Plasma physics reports, Vol.29, No.8, pp. 698-713 (2003)
- 5 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N., Phys. Plasmas. 2008. Vol.15. P. 053704-053709.
- 6 P.Hartman, G.J.Kalman, Z.Donko, K.Kutasi, Phys.Rev E 72, 026409 (2005)

Резюме

М. М. Мұратов¹, Т. С. Рамазанов¹, Қ. Н. Жұмағұлова¹, Дж. А. Гори²

¹ ЭТФФЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
² Айова штатының университеті, Айова, АҚШ

КҮРДЕЛІ ҚҰРАМДЫ ПЛАЗМАНЫҢ ТОЗАҢДЫ ҚҰРАУШЫСЫНЫҢ ҚЫСЫМЫ

Тозаңды плазманың қасиеттерін зерттеу ғылымның қарқынды дамып келе жатқан саласы болып табылады. Тозаңды плазма табиғатта (кометалардың құйрықтарында, планеталардың сакиналарында, ғарыштық тұмандықтарда) кездеседі, сондай-ақ тозаңды плазма лабораториялық жағдайларда (термодрольқ кондырғылар, плазмалық технологиялар, газдық разрядтар) белсенді зерттелуде. Қазіргі заманда тозаңды плазманың термодинамикасы көптеген ғалымдардың қызығушылығын тудырады. Бірақ, осыған қарамастан, тозаңды плазманың күй теңдеуін анықтайтын эксперименттік жұмыстар көп емес. Тозаңды плазманың қысымы, өз алдына жүйенің макроскопиялық параметрі бола отырып, жүйенің микроскопиялық сипаттамаларынан тәуелді. Осыған орай тозаңды плазманың термодинамикасы саласындағы эксперименттік және теориялық зерттеу әдістерінің дамуы өзекті болып табылады.

Тірек сөздер: нәтижелі әлеует, тозаңды плазма, күй теңдеуі, радиалды таралу функциясы.

Summary

M. M. Muratov¹, T. S. Ramazanov¹, K. N. Dzhumagulova¹, Jh. A. Gore²

¹ IETP, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
² The University of Iowa, Iowa city, USA)

PRESSURE OF THE DUST COMPONENT OF COMPLEX PLASMA

Investigation of the dusty plasma properties is becoming a quickly developing scientific branch. Dusty plasma can be found in nature (comet tails, rings of the planets, space nebula and etc.), at the same time dusty plasma is under active investigation in laboratory conditions (thermonuclear facility, plasma technologies, gas discharges). Nowadays thermodynamics of dusty plasma is of great interest for many scientists. In spite of that fact, there are not many experiments related with finding dusty plasmas' equation of state. Pressure of dusty plasma being a macroscopic parameter of the system depends on the microscopic characteristics of the system. That is why the development of experimental and theoretical investigation methods of dusty plasmas' thermodynamics is an actual task.

Keywords: effective potential, dusty plasma, equation of state, radial distribution function.

Поступила 14.01.2014 г.