

М.К. Исанова<sup>1,2\*</sup>, Н.А. Турекул<sup>1</sup>, Н.Э. Джиенбеков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт прикладных наук и информационных технологий, г. Алматы, Казахстан  
\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПЛОТНОГО РАЗОГРЕТОГО БЕРИЛЛИЯ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

В данной работе исследованы транспортные свойства неизотермической, плотной дейтерий-тритиевой плазмы инерционного термоядерного синтеза. На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц для двухтемпературной, неизотермической, плотной плазмы был получен кулоновский логарифм. Данный потенциал учитывает квантово-механические эффекты дифракции на малых расстояниях и эффекты экранировки – на больших в двухтемпературной плазме. С помощью кулоновского логарифма исследованы коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности в неизотермической плотной плазме. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами с теоретическими результатами других авторов, рассчитанных на основе теории функционала плотности при конечных температурах с применением теоремы Кона-Шэма в комбинации с молекулярной динамикой и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы и квантовой молекулярной динамики при значении  $\Gamma \sim 1$ , и, следовательно, метод эффективных потенциалов может быть использован в этом режиме. По полученным результатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов.

**Ключевые слова:** плотная плазма, инерционный термоядерный синтез, кулоновский логарифм, эффективный потенциал, транспортные свойства.

M. Issanova<sup>1,2\*</sup>, N. Turekul<sup>1</sup>, N. Djienbekov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Applied Sciences and Information Technology, Almaty, Kazakhstan  
\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

### Transport properties of dense deuterium-tritium plasma

In this paper the transport properties of inertial confinement fusion non-isothermal dense deuterium-tritium plasmas were studied. Based on the effective interaction potentials between particles, the Coulomb logarithm for a two-temperature nonisothermal dense plasma was obtained. These potentials take into consideration long-range multi-particle screening effects and short-range quantum-mechanical effects in two-temperature plasmas. Diffusion, viscosity and thermal conductivity coefficients in such plasmas were studied using the Coulomb logarithm. The obtained results are in good agreement with the results of molecular dynamics with the density functional theory used to describe the electron component of the plasma and quantum molecular dynamics simulation at a value  $\Gamma \sim 1$ , and therefore the effective potential method can be used in this regime. The obtained data show that the transport properties of dense plasma can be adequately expressed in terms of the Coulomb logarithm based on the effective potentials.

**Key words:** Dense plasma, inertial confinement fusion, Coulomb logarithm, effective potential, transport properties.

М.К. Исанова<sup>1,2\*</sup>, Н.А. Турекул<sup>1</sup>, Н.Э. Джиенбеков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты,  
әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан

\*e-mail: issanova@physics.kz

### Тығыз дейтерий-третий плазмасының транспорттық қасиеттері

Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтез изотермиялық емес, тығыз дейтерий-третий плазмасының транспорттық қасиеттері зерттелді. Бөлшектердің әсерлесуінің эффективті потенциалы негізінде екі температуралы, изотермиялық емес, тығыз плазма үшін Кулон логарифмі алынды. Бұл потенциал екі температуралы плазмада кіші ара-қашықтықта квантты-механикалық дифракция эффектісін, үлкен ара-қашықтықта экрандалу эффектісін ескереді. Кулон логарифмі көмегімен изотермиялық емес тығыз плазманың тұтқырлық, диффузия және жылуөткізгіштік коэффициенттері зерттелді. Алынған нәтижелер плазманың электрондық компонентін сипаттауға арналған тығыздық функционалы теориясын қолданатын молекулалық динамика және кванттық молекулалық динамика модельдеу нәтижелерімен  $\Gamma \sim 1$  мәнінде жақсы сәйкес келеді, демек, эффективті потенциалдар әдісі бұл режимде жақсы жұмыс істейді. Алынған нәтижелер бойынша тығыз плазманың транспорттық қасиеттері эффективті потенциал негізіндегі Кулон логарифмі арқылы толық анықтала алады.

**Түйін сөздер:** тығыз плазма, инерциялық термоядролық синтез, кулон логарифмы, эффективті потенциал, транспорттық қасиеттер.

### Введение

Разогретое плотное вещество (warm dense matter) усиленно изучается во всем мире как экспериментально, так и теоретически. При высоких температурах и давлениях существующие теоретические модели жидкости, газа, твердого тела и плазмы оказываются неприменимыми для экстремального состояния вещества. Основным препятствием для применения этих моделей является сильная неидеальность среды, то есть существенная роль взаимодействий частиц и квантовых эффектов.

Разогретое плотное вещество образуется при электровзрыве проводников [1], на стенках ускорителей под воздействием сильных электромагнитных полей, в твердых телах и металлических кластерах под действием лазерных импульсов или мощных пучков частиц [3–5] в ударно-волновых экспериментах [6–9] и др. Транспортные параметры неидеальной плазмы также необходимы для построения моделей инерционного термоядерного синтеза, поведения астрофизических объектов (белые карлики, внутреннее строение гигантских планет), диагностики вещества посредством рентгеновского томсоновского рассеяния [10–11].

Бериллий является одним из наиболее хорошо изученных материалов в нормальных условиях, а также усиленно изучается в условиях экстремального давления и температуры. Случай бериллия в экстремальных условиях

представляет первостепенный интерес для понимания процессов в ядрах планет, как в жидком состоянии, так и в твердом состоянии при высокой температуре и давлении [12]. Следовательно, знание транспортных характеристик разогретого плотного бериллия имеет решающее значение для определения свойств других материалов в экспериментах. В целом экстремальные условия представляют собой серьезную и актуальную проблему физики высоких плотностей энергии. С теоретической точки зрения ионы демонстрируют жидкофазное и твердое состояние, тогда как электронная компонента вещества требует квантово-механического описания [16].

Для экспериментального исследования свойств разогретого плотного вещества были созданы установки мирового масштаба. К примеру, National Ignition Facility (NIF, Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций) – научный комплекс для осуществления инерциального термоядерного синтеза (ICF) с помощью лазеров [17], Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах, находящийся в Германии [18], Национальная ускорительная лаборатория SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory) [19]. Программа исследований в SLAC концентрируется на экспериментальных и теоретических исследованиях в физике элементарных частиц с использованием электронных пучков и включает исследования в области разогретого плотного

вещества и физики твёрдого тела, с использованием синхротронного излучения.

В связи с этим, экспериментальные результаты в режиме разогретого плотного вещества являются крайне актуальными. Теоретические подходы для разогретого плотного вещества требуют учета сильного межчастичного взаимодействия и квантового вырождения в рамках квантовой теории многих частиц. В работе исследованы коэффициенты диффузии разогретого плотного бериллия с помощью методов, основанных на теории функционала плотности (DFT-моделирования). Эти результаты анализированы в сочетании с доступными экспериментальными данными.

Большое количество результатов для разогретого плотного вещества было получено методом классической молекулярной динамики (МД), основанной на численном решении уравнений движения электронов и ионов с заданным потенциалом взаимодействия [20–25]. Наиболее распространенными методами моделирования, позволяющими с большей точностью учитывать квантовые эффекты, возникающие при высоких плотностях, являются методы квантовой молекулярной динамики (Quantum molecular dynamics, QMD) [26], метод Монте-Карло в терминах интегралов по траекториям (Path integral Monte-Carlo, PIMC) [27].

На сегодняшний день теория функционала плотности (DFT – density functional theory) является наиболее мощным инструментарием для моделирования электронной структуры и связанных с ней физических свойств разогретого плотного вещества. С помощью DFT-расчетов находится распределение электронной плотности квантовой системы в равновесном состоянии (с наименьшей свободной энергией). Далее могут быть определены такие физические свойства разогретого плотного вещества, как плотность электронных состояний, модуль все-стороннего сжатия, диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость и многие другие.

## Результаты и обсуждение

### *Диффузия плотного разогретого бериллия*

В инерциальном удержании бериллий используется в качестве материала для капсул, содержащих топливо, благодаря его высокой плотности, низкой оптической плотности и

отличным теплопроводным свойствам. Для разработки точных моделей таких систем необходимы данные о его свойствах при высоких давлениях и температурах, до 105 Мбар и  $10^8$  К. Однако экспериментальные данные ограничены из-за трудностей при создании шоков с такими параметрами и их точного измерения. Поэтому моделирование уравнения состояния бериллия в широком диапазоне условий важно для получения данных, которые можно будет использовать для разработки надежных моделей и конструкций.

Жидкий бериллий требует особого внимания, так как его свойства при экстремальных давлениях и температурах являются важной составляющей в расчетах для управляемого термоядерного синтеза и других применений, где точные данные о поведении материалов критически важны для успеха проектов.

Параметры исследуемого горячего плотного бериллия следующие: плотность и температура электронов  $\rho=1.85 \text{ g/cm}^3$  и  $T_e = 5000 \div 32000 \text{ K}$ ,  $Z = 2$  и среднее расстояние между частицами  $a = (3/4\pi n_i)^{1/3}$ . Исследование структурных свойств системы при различных значениях температуры проводилось с помощью DFT-моделирования. Динамика  $N = 10^3$  одинаковых частиц была получена путем решения уравнения движения по алгоритму Бимана. Чтобы устранить граничные эффекты, использовались периодические граничные условия для основной ячейки с длиной стороны  $L = (4\pi N/3)^{1/3} a$ .

Для изучения влияния связанных электронов на ионную структуру, были рассчитаны радиальные функции распределения (РФР). Из рисунка 1 видно, что с увеличением температуры радиальная функция распределения показывает появление ближнего порядка, на что указывают отчетливые пики РФР. При повышении температуры пики  $g(r)$  становятся более сглаженными, что связано с тепловыми колебаниями атомов.

Для расчета коэффициента диффузии были получены значения среднеквадратичного смещения (MSD, Mean Squared Displacement) ионов и автокорреляционной функции (VACF) ионов методом DFT моделирования. Среднеквадратичное смещение является важным инструментом для анализа диффузионных свойств атомов в материалах, включая бериллий. MSD позволяет количественно оценить, как далеко

атомы перемещаются за заданный период времени в ходе моделирования. Это особенно актуально для изучения динамики атомов в кристаллических или аморфных фазах бериллия при различных температурах и давлениях.

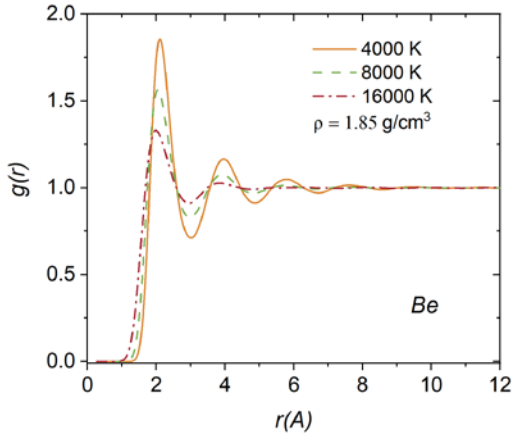


Рисунок 1 – Функция радиального распределения, вычисленная с помощью DFT моделирования

Среднеквадратичное смещение  $u(t)$  ионов рассчитывается по следующей формуле:

$$u(t) = \langle |r(t) - r(0)|^2 \rangle, \quad (1)$$

где  $\langle \dots \rangle$  обозначает среднее значение по ансамблю.

Коэффициент диффузии можно получить, используя соотношение Эйнштейна:

$$D_u = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{u(t)}{6t}. \quad (2)$$

Результаты моделирования для различных значений температуры представлены на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что, увеличение температуры увеличивает значения средне-

квадратичного смещения из-за усиления теплового движения.

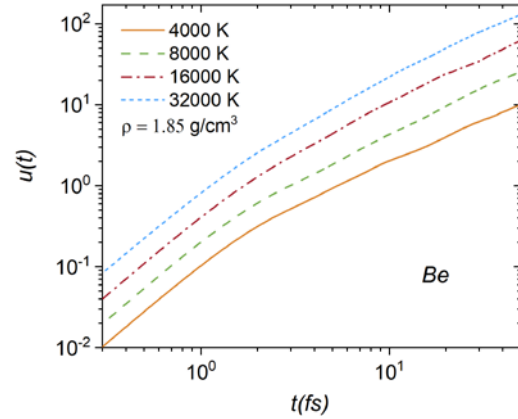
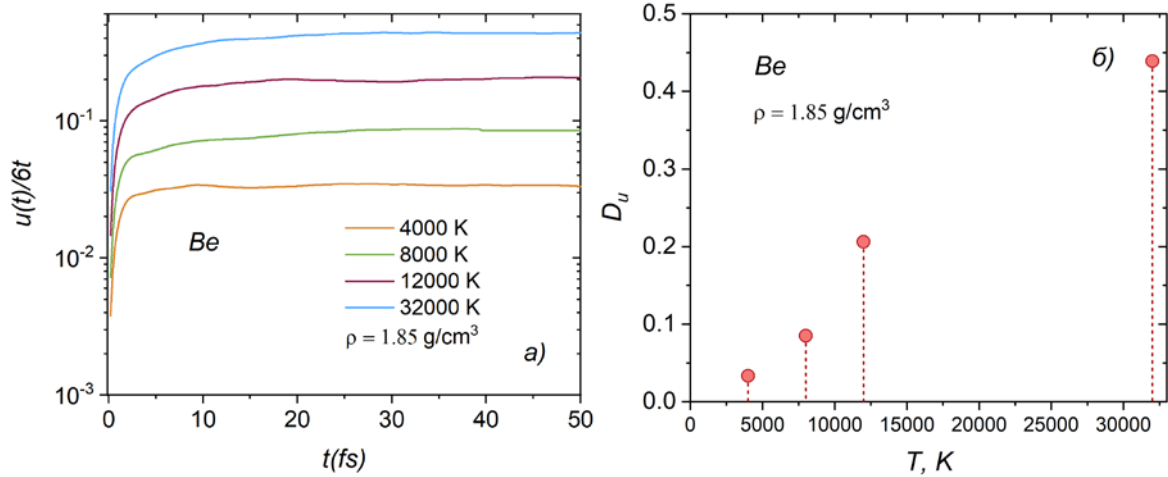


Рисунок 2 – Среднеквадратичное смещение ионов при различных значениях параметра связи

На рисунке 3 (а) показано соотношение  $\hat{u}(t)/6t$ . Как видно из рисунка 3 (а) в случае нормальной диффузии среднеквадратичное смещение должно быть линейной функцией от времени  $u(t) \propto t$ , которое имеет место при длительных временах  $t > 100fs$ . Из рисунка 3 (а) видно, что  $\hat{u}(t)/6t$  приближается к постоянному значению при  $t > 100fs$ . В более короткие промежутки времени происходит отклонение от нормальной диффузии. Для точного расчета коэффициента диффузии значения среднеквадратичного смещения следует использовать в масштабах времени, где хорошо установлен нормальный режим диффузии.

На рисунке 3 (б) представлены результаты моделирования коэффициента диффузии, вычисляемая по соотношению Эйнштейна. Как видно из рисунка 3, с ростом температуры коэффициент диффузии увеличивается, а пики радиальной функции распределения  $g(r)$  становятся менее выраженными.



**Рисунок 3** – (а) Отношение  $\hat{u}(t) / 6t$  как функция времени, (б) значения коэффициента диффузии, вычисляемая по соотношению Эйнштейна

Автокорреляционная функция (АКФ) скорости определяется как:

$$Z(t) = \langle v(t) \cdot v(0) \rangle. \quad (3)$$

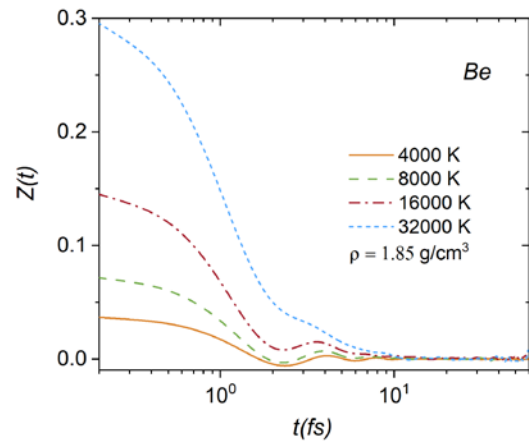
Результаты для АКФ ионов при различных значениях параметра связи показаны на рисунке 4 (а). При  $\Gamma = 1$  АКФ монотонно затухает со временем. Это поведение меняется с увеличением  $\Gamma$ , и наблюдается появление колебания. На рисунке 4 (б) приведены АКФ в логарифмическом масштабе, чтобы лучше проиллюстрировать поведение АКФ на больших временах. При всех рассмотренных значениях  $\Gamma$  АКФ затухает быстрее, чем  $t^{-1}$ , что обеспечивает сходимость интеграла в уравнении. Однако из рисунка 4 (б) видно, что увеличение  $\Gamma$  приводит к более медленному спаду значений АКФ на больших временах. При  $\Gamma \geq 10$  необходимо генерировать данные в моменты времени  $t \gg 10^2 \omega_p$ . По мере увеличения времени появляются значительные колебания данных из-за конечного числа частиц в моделировании МД. Таким образом, для расчета коэффициента диффузии важно, чтобы эти флуктуации начинались после того, как значение АКФ достаточно уменьшилось, чтобы они не влияли на точность интегрирования в уравнении.

Коэффициент диффузии может быть рассчитан путем интегрирования автокорреляционной функции скорости по времени.

Данный метод известен как отношение Грина-Кубо, согласно которой:

$$D_Z = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} Z(t) dt, \quad (4)$$

где введено обозначение  $D_Z$ , чтобы отличить его от коэффициента диффузии  $D_u$ , вычисленного с использованием среднеквадратичного смещения частиц.



**Рисунок 4** – (а) Автокорреляционная функция скорости ионов при различных значениях параметра связи, (б) АКФ скорости в логарифмическом масштабе, где пунктирная линия представляет спад  $t^{-1}$

Из-за большого количества ионов в основной ячейке в моделировании сходимость интеграла  $\int_0^\tau Z(t)dt$  не зависит от флуктуаций, как это показано на рисунке 5 (а). Результаты для коэффициента диффузии  $D_Z$ , представлены на рисунке 5 (б), где проведено сравнение с результатами, рассчитанными с использованием потенциала Юкавы. Из рисунка 5 (б) видно похожее поведение коэффициента диффузии  $D_Z$ , как и у  $D_u$ .

Из-за большого количества ионов в основной ячейке в моделировании сходимость интеграла  $\int_0^\tau Z(t)dt$  не зависит от флуктуаций, как это показано на рисунке 5 (а). Результаты для коэффициента диффузии  $D_Z$ , представлены на рисунке 5 (б), где проведено сравнение с результатами, рассчитанными с использованием потенциала Юкавы. Из рисунка 5 (б) видно похожее поведение коэффициента диффузии  $D_Z$ , как и у  $D_u$ .

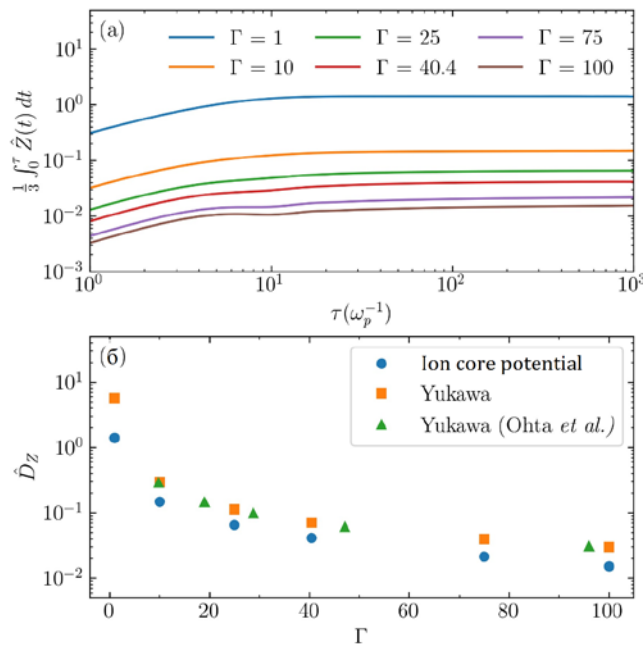


Рисунок 5 – (а) АКФ скорости как функция времени, (б) Значения коэффициента диффузии (в единицах  $\omega_p a^2$ ) рассчитанные с использованием соотношения Грина-Кубо

## Заключение

Таким образом, проведено исследование транспортных характеристик в плотной ДТ плазме на основе двухтемпературного эффективного потенциала взаимодействия, который учитывает квантовые эффекты дифракции на малых расстояниях и экранировку на больших расстояниях. Полученные результаты по коэффициентам переноса для различных параметров плазмы согласуются с теоретическими результатами других авторов, также результатами МД, КМД моделирования. По полученным ре-

зультатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Таким образом, знание коэффициентов переноса позволяет дать рекомендации по оценке времени разлета иона в ДТ плазме.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта AP19579511 «Исследование свойств разогретого плотного вещества на основе теории функционала плотности».*

## Литература

1. R. P. Drake, Phys. Today. – 2010. – V. 63(6). P. 28.
2. Korobenko V.N., Rakhel A.D., Savvatimskiy A.I., Fortov V.E. Plasma Physics Reports. — 2002. — Vol. 28, no. 12. — Pp. 1008–1016.
3. Juttner B. J. Phys. D. — 2001. — Vol. 34, no. 17. — P. R103.
4. Taccetti JM, Shurter RP, Roberts JP et al. J. Phys. A. — 2006. — Vol. 39, no. 17. — P. 4347.
5. Fennel Th., Doppner T., Passig J. et al. // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Vol. 98. — P. 143401.
6. Sitnikov D. S. J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1421. — P. 012001.
7. Fortov V. E., Ilkaev R. I., Arinin V. A. et al. // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Vol. 99, no. 18. — P. 185001.
8. Knudson M. D., Desjarlais M. P. // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Vol. 118, no. 3. — P. 035501.
9. Fernandez-Panella A., Millot M., Fratanduono D.E. et al. // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 122, no. 25. — P. 255702.
10. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. – Физматлит, 2010.
11. Gryaznov V. K., Iosilevskiy I. L., Fortov V. E // Plasma Phys. Controlled Fusion. – 2015. – Vol. 58, no. 1. – P. 014012.
12. Sjöström T. and Crockett Sc., Rudin S. PHYSICAL REVIEW B. – 2016. – V. 94. – P. 144101.
13. Sjöström T. and Crockett Sc. PHYSICAL REVIEW B. – 2015. – V. 92. – P. 115104.
14. M. Millot, N. Dubrovinskaia, A. Cernok, S. Blaha, L. Dubrovinsky, D. G. Braun, P. M. Celliers, G. W. Collins, J.H. Eggert, and R. Jeanloz, Science 23, 418 (2015).
15. M. D. Knudson and M. P. Desjarlais, Phys. Rev. Lett. 103, 225501 (2009).
16. In Frontiers and Challenges in Warm Dense Matter, edited by F. Graziani, M. P. Desjarlais, R. Redmer, and S. B. Trickey, Lecture Notes in Computational Science and Engineering Vol. 96 (Springer, Heidelberg, 2014).
17. Gomez M.R., Slutz S.A., Sefkow A.B., Sinars D.B., Hahn K.D., Hansen S.B., Harding E.C., Knapp P.F., Schmit P.F., Jennings C.A., Awe T.J., Geissel M., Rovang D.C., Chandler G.A., Cooper G.W., Cuneo M.E., Harvey-Thompson A.J., Herrmann M.C., Hess M.H., Johns O., Lamppa D.C., Martin M.R., McBride R.D., Peterson K.J., Porter J.L., Robertson G.K., Rochau G.A., Ruiz C.L., Savage M.E., Smith I.C., Stygar W.A., Vesey R.A. Experimental demonstration of fusion-relevant conditions in magnetized liner inertial fusion // Phys.Rev.Lett. – 2014. – Vol. 113. – P. 155003.
18. Hoffmann D.H.H., Blazevic A., Ni P., Rosmej O., Roth M., Tahir N.A., Tauschwitz A., Udrea S., Varentsov D., Weyrich K., and Maron Y. Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams // Laser and Particle Beams. – 2005. – Vol. 23. – P. 47–53.
19. U.S. Department of Energy Office of Science. Review of the Stanford Linear Accelerator Center Integrated Safety Management System: Final Report. Washington: GPO, October 2005. p. 1.
20. H.Y. Suna, Dongdong Kang, Yong Hou, and J.Y. Dai, Transport properties of warm and hot dense iron from orbital free and corrected Yukawa potential molecular dynamics. Matter and Radiation at Extremes 2, 287 (2017).
21. Z. Donko and P. Hartmann, Phys.Rev.E 78,026408 (2008).
22. H. Dong, Zh. Fan, Libin Shi, A.Harju, and T.Ala-Nissila. Equivalence of the equilibrium and the nonequilibrium molecular dynamics methods for thermal conductivity calculations: From bulk to nanowire silicon. Phys. Rev. B 97, 094305 (2018).
23. V. Recoules, F. Lambert, A. Decoster, B. Canaud, and J. Clérouin. Ab Initio Determination of Thermal Conductivity of Dense Hydrogen Plasmas. Phys. Rev. Lett. 102, 075002 (2009).
24. J. P. Hansen, I. R. McDonald, and E. L. Pollock, Statistical mechanics of dense ionized matter. III. Dynamical properties of the classical one-component plasma, Phys. Rev. A 11, 1025 (1975).
25. Ye. K. Aldakul and Zh. A. Moldabekov, T. S. Ramazanov. Melting, freezing, and dynamics of two-dimensional dipole systems in screening bulk media. Phys. Rev. E 102, 033205 (2020).
26. Holst B., Redmer R., Michael P. Desjarlais // Phys. Rev. B. — 2008. — May. — Vol. 77. — P. 184201.
27. B. Militzer, D. M. Ceperley // Phys. Rev. E. — 2001. — Vol. 63, no. 6. — P. 066404

### **Авторлар туралы мәлімет:**

*Исанова Мәлдір Кеңесқызы (корреспонденция авторы) – PhD доктор, әл-Фараби ҚазҰУ плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасы доценті, Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты аға ғылыми қызметкері (Алматы қ-сы, Қазақстан, әл.почта: issanova@physics.kz);*

*Турекул Нұрсалам Ардақұлы – Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты ғылыми қызметкері (Алматы қ-сы, Қазақстан, әл.почта: nturukul@gmail.com);*

*Джиенбеков Насриддин Эркинович – Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты ғылыми қызметкері (Алматы қ-сы, Қазақстан, әл.почта: nasriddin.djienbekov@gmail.com).*

### **Сведения об авторах:**

*Исанова Молдір Кенесовна (корреспондентный автор) – PhD доктор, профессор кафедры физики плазмы, нанотехнологий и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби, старший научный сотрудник Институт прикладных наук и информационных технологий (г. Алматы Казахстан, әл.почта: issanova@physics.kz);*

*Турекул Нұрсалам Ардақұлы – научный сотрудник Институт прикладных наук и информационных технологий (Алматы қ-сы, Қазақстан, әл.почта: nturukul@gmail.com);*

*Джиенбеков Насриддин Эркинович – научный сотрудник Институт прикладных наук и информационных технологий (Алматы қ-сы, Қазақстан, әл.почта: nasriddin.djienbekov@gmail.com).*

**Information about authors:**

*Issanova Moldir (corresponding author) – Doctor PhD, Associate Professor of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University, Senior researcher of Institute of Applied Sciences and Information Technology (Almaty, Kazakhstan, email: issanova@physics.kz);*

*Turekul Nurgalam – Researcher of Institute of Applied Sciences and Information Technology (Almaty, Kazakhstan, email: nturukul@gmail.com);*

*Nasriddin Djienbekov – Researcher of Institute of Applied Sciences and Information Technology (Almaty, Kazakhstan, email: nasriddin.djienbekov@gmail.com).*

*Принято к печати 8 декабря 2024*