

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 6, Number 310 (2016), 43 – 52

UDC 533.93

T.S. Ramazanov¹, S.K. Kodanova¹, M.K. Issanova¹, A. Tikhonov², M. Kaikanov²¹IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan²Astana National Laboratory, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

e-mail: isanova_moldir@mail.ru

**TRANSPORT PROPERTIES OF INERTIAL
CONFINEMENT FUSION PLASMAS**

Abstract. This paper studies the transport properties of non-isothermal dense deuterium-tritium plasmas. Based on the effective interaction potentials between particles, the Coulomb logarithm for a two-temperature non-isothermal dense plasma was obtained. This potential takes into consideration long-range multi-particle screening effects and short-range quantum-mechanical effects in two-temperature plasmas. Transport processes in such plasmas were studied using the Coulomb logarithm. The obtained results were compared with the theoretical researches of other authors and with the results of molecular dynamics simulations.

Keywords: dense plasma, Coulomb logarithm, inertial confinement fusion, transport properties.

УДК 533.93

Т.С. Рамазанов¹, С.К. Коданова¹, М.К. Исанова¹, А.Тихонов², М. Кайканов²¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан²Национальная лаборатория, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан**ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ
ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

Аннотация. В данной работе исследованы транспортные свойства неизотермической, плотной дейтерий-тритиевой плазмы. 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 переноса в неизотермической плотной плазме. Полученные результаты сравнены с теоретическими работами других авторов и результатами моделирования молекулярной динамики.

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

Введение. В последнее время большое внимание уделяется изучению высокой плотности энергии вещества и, как следствие, материи при высоких давлениях и температурах. Исследования в области УТС с инерционным удержанием (ИТС) на пучках тяжелых ионов занимают особое место среди работ, посвященных различным аспектам данной проблемы. В основном, такие ускорители тяжелых ионов, хорошо известны как основной инструмент в экспериментальных исследованиях ядерной физики, физики элементарных частиц и физики плотной плазмы [1-3]. Однако в настоящее время отсутствие новых теоретических и экспериментальных данных о транспортных свойствах дейтерий-тритиевой (ДТ) плазмы, возникающей при сжатии мишени пучком тяжелых ионов, требует адекватного качественного описания взаимодействия тяжелых ионов с плотной плазмой в широком диапазоне параметров и дает дополнительный импульс для исследований в этой области. Понимание и контроль поведения высокого давления ДТ топлива имеют решающий интерес для успеха экспериментов с зажиганием. Точное знание коэффициентов переноса в плотной ДТ плазме имеет важное значение для правильного описания процессов,

происходящих в ИТС. Эта проблема была предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [4-7]. В работе [8] транспортные свойства плотной плазмы, такие как диффузия и вязкость были изучены на основе моделирования молекулярной динамики (МД) с использованием теории функционала плотности для описания электронной компоненты плазмы (ТФТМД). Кресс и др. [9] получили значения вязкости и диффузии ДТ плазмы с использованием как теории функционала плотности при конечных температурах на основе теоремы Кона-Шэма молекулярной динамики, так и ТФТМД.

Одним из перспективных подходов для исследования транспортных свойств плотной ДТ плазмы является приближение парного столкновения и можно использовать два подхода. Один из них состоит в вычислении транспортных коэффициентов, определяемых на основе сечений рассеяния частиц взаимодействующих посредством потенциала. Во втором подходе выводится кинетическое уравнение, в интеграле столкновений которого содержится логарифмически расходящийся интеграл по прицельным параметрам, заменяемый кулоновским логарифмом.

В данной работе модель, предложенная ранее в [17, 18, 19] для описания свойств плотной плазмы на основе эффективных потенциалов взаимодействия [20, 21], расширен для расчета ионных транспортных свойств и теплопроводности для дейтериевой и дейтерий-третиевой плазмы ИТС. Ниже мы приводим краткое описание модели и результаты расчета транспортных свойств плазмы для того, чтобы показать корректность модели, ее результаты сравниваются с результатами квантовой молекулярной динамики КМД и ТФТМД моделирования.

Кулоновский логарифм на основе эффективного потенциала. Транспортные свойства получены на основе кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала для плазмы ИТС. Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [15-17]:

$$\lambda_{ei} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{b_{\max}} \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) b db, \quad (1)$$

Угол рассеяния в системе центра масс θ_c определяется как [15]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ – энергия в системе центра масс, $m_{\alpha\beta} = m_{\alpha} m_{\beta} / (m_{\alpha} + m_{\beta})$ – приведенная масса частиц сорта α и β (ион или электрон); $b_{\perp} = Z_{\alpha} Z_{\beta} / (m_{\alpha\beta} v^2)$. В качестве минимального прицельного параметра принят $b_{\min} = \max \{ b_{\perp}, \lambda_{\alpha\beta} \}$, где $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ – тепловая длина волны де-Бройля.

Используются следующие безразмерные переменные, такие как параметр связи:

$$\Gamma_{ee} = \frac{e^2}{ak_B T_e}, \quad \Gamma_{ii} = \frac{Z_i^2 e^2}{ak_B T_i} \left(\frac{n_i}{n_e} \right)^{1/3}, \quad \Gamma_{ei} = \frac{Z_i e^2}{ak_B T_{ei}}, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, $a = (3/4\pi n_e)^{1/3}$ – среднее межчастичное расстояние между частицами, k_B – постоянная Больцмана. В формуле (2) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ – потенциал взаимодействия частиц и расстояние наибольшего сближения r_0 для заданного прицельного параметра b определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (4)$$

Как известно, учет коллективных эффектов экранирования во взаимодействии частиц плазмы необходим для корректного описания статических и динамических свойств плазмы. В данной

работе рассматривается плотная плазма, для которой также важен учет квантовых эффектов на малых межчастичных расстояниях. Кроме того, будет использоваться электрон-ионный эффективный потенциал, который учитывает как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования - на больших [18-19]:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta}{r} \frac{1}{\gamma^2 \sqrt{1 - (2k_D / \lambda_{ee} \gamma^2)^2}} \left(\left(\frac{1/\lambda_{ee}^2 - B^2}{1 - B^2 \lambda_{\alpha\beta}^2} \right) \exp(-Br) - \left(\frac{1/\lambda_{ee}^2 - A^2}{1 - A^2 \lambda_{\alpha\beta}^2} \right) \exp(-Ar) \right) - \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2 (1 - \delta_{\alpha\beta})}{r (1 + C_{\alpha\beta})} \exp(-r/\lambda_{\alpha\beta}), \quad (5)$$

здесь

$$A^2 = \frac{\gamma^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee} \gamma^2} \right)^2} \right), \quad B^2 = \frac{\gamma^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee} \gamma^2} \right)^2} \right), \quad C_{\alpha\beta} = \frac{k_D^2 \lambda_{\alpha\beta}^2 - k_i^2 \lambda_{ee}^2}{\lambda_{ee}^2 / \lambda_{\alpha\beta}^2 - 1},$$

где $2k_D / (\lambda_{ee} \gamma^2) < 1$, $k_D^2 = k_e^2 + k_i^2$ - параметр экранирования, который учитывает как вклад электронов, так и ионов, $\gamma^2 = k_i^2 + 1/\lambda_{ee}^2$. Для неизотермической плазмы используется электрон-ионная характеристическая температура T_{ei} [22-23]. В работе [22] показано, что для корректного описания свойств плазмы электрон-ионная температура должна быть выражена в виде: $T_{ei} = \sqrt{T_e T_i}$. Эти эффективные потенциалы могут быть использованы для неизотермической и изотермической плазмы.

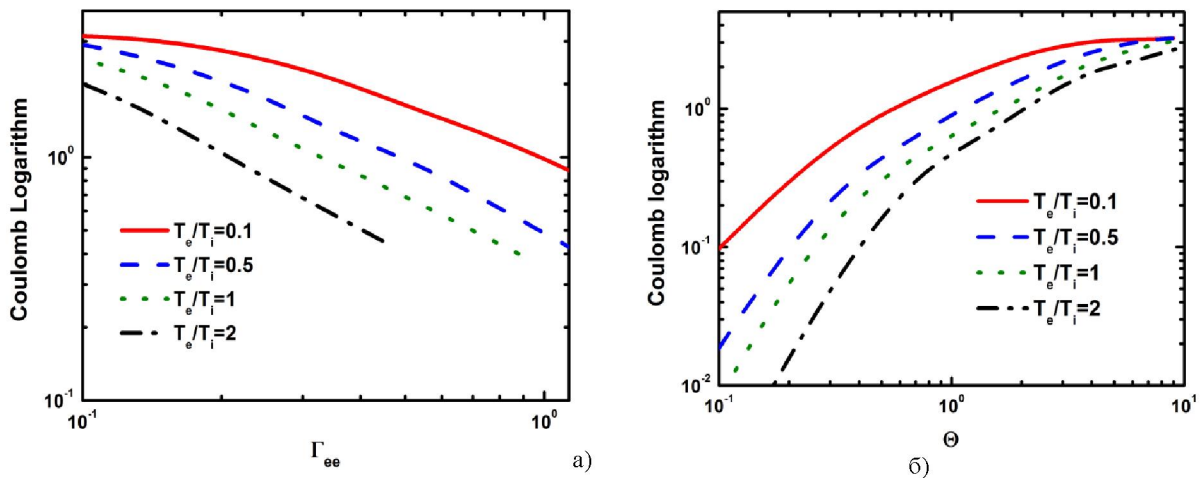


Рисунок 1 – Кулоновский логарифм двухтемпературной ДТ плазмы в зависимости (а) от параметра связи (Γ) и (б) от параметра вырождения (Θ)

При исследовании транспортных свойств плотной высокотемпературной плазмы важную роль играют значения кулоновского логарифма. В данной работе представлены исследования транспортных свойств плотной плазмы на основе кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала [5].

На рисунке 1 показаны вычисленные значения кулоновского логарифма в зависимости от параметра связи Γ и параметра вырождения $\Theta = k_B T / E_F$ (E_F энергия Ферми) при различных соотношениях температур электронов и ионов в плотной двухтемпературной ДТ плазме. Рассмотрена слабосвязанная плазма, на рис. 1 а) показаны значения кулоновского логарифма для $\Gamma_{ee} < 1$ и $\Gamma_{ii} < 1$. Значения кулоновского логарифма уменьшается с увеличением отношения T_e / T_i . При заданной температуре электронов T_e низкие значения кулоновского логарифма при более

высоких значениях T_e/T_i является результатом сильного экранирования ионной компоненты плазмы. Рис. 1 б) показывает, что увеличение параметра вырождения Θ приводит к увеличению значений кулоновского логарифма. При постоянной плотности мы имеем низкие значения длины экранирования для более высоких температур. Это приводит к более высоким значениям кулоновского логарифма.

Транспортные свойства плотной плазмы ИТС. Явление переноса в плотной плазме представляет значительный интерес в различных областях науки и техники (физики плазмы, ИТС, физики горячего плотного вещества и т.д.) [24-25]. В частности, интенсивные исследования термоядерного синтеза требуют более надежной информации о коэффициентах переноса, т.е. коэффициентах теплопроводности, диффузии и вязкости. Рассмотрим частицы плотной ДТ плазмы, взаимодействующих через эффективный потенциал (5).

Коэффициент диффузии, вязкости и теплопроводности плазмы связаны с эффективной частотой столкновений с помощью уравнений:

$$D = \frac{k_B T}{m_e \nu_{eff}}, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{5}{4} \sqrt{\frac{m}{\pi}} \frac{(k_B T)^{5/2}}{e^4 \lambda}, \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{5n_e k_B^2 T}{m_e \nu_{eff}}, \quad (8)$$

где e - заряд электрона, m_e - масса электрона, n - плотность частиц плазмы, и

$$\nu_{eff} = (4/3) \sqrt{2\pi} e^4 \lambda / \sqrt{m_e} (k_B T)^{3/2} \quad (9)$$

эффективная частота столкновений прямо пропорциональна кулоновскому логарифму. Коэффициенты диффузии D и вязкости η приведены к безразмерной форме: $D^* = D/\omega_p a^2$ и $\eta^* = \eta/n_i M \omega_p a^2$, $\kappa^* = \kappa/(m_e \omega_p/a)$, где $\omega_p = (4\pi n_i/M)^{1/2} Z e$ - плазменная частота для массы ионов M . В данной работе для рассматриваемой ДТ смеси используются $M = (2 + 3)/2 = 2.5 \text{ amu}$ [26].

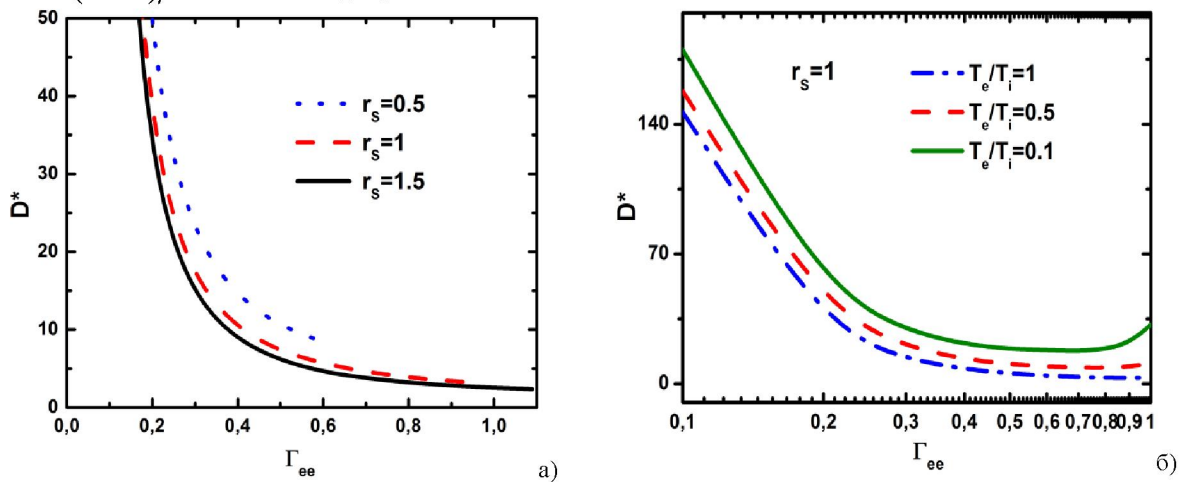


Рисунок 2 – Коэффициент диффузии в зависимости от параметра связи (Γ), $T_e = T_i$: (а) для различных значений параметра плотности (r_s), (б) для различных соотношениях температур электронов и ионов при $r_s = 1$

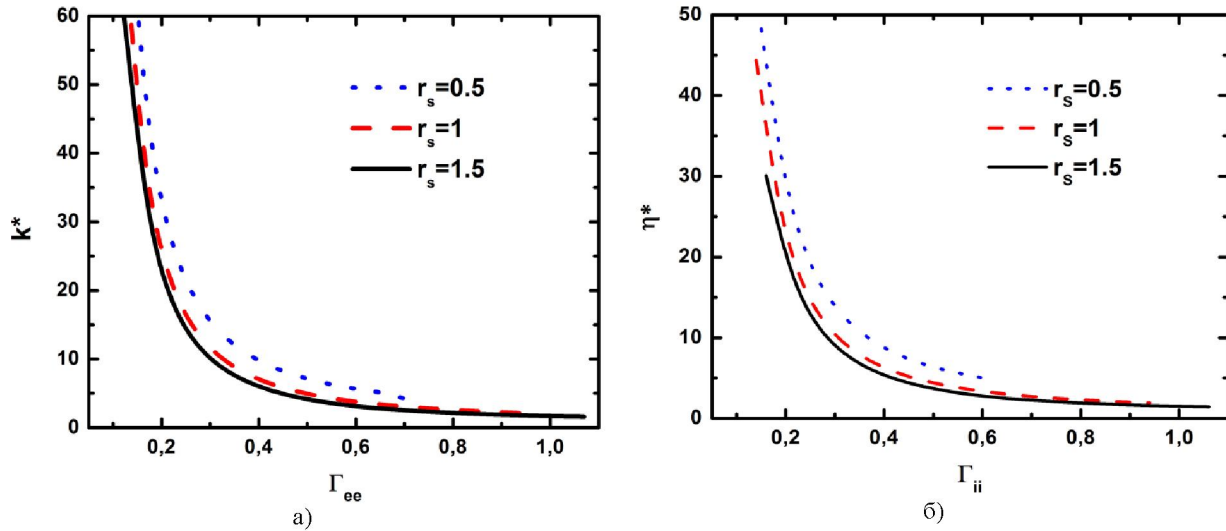


Рисунок 3 – Коэффициенты (а) теплопроводности и (б) вязкости в зависимости от параметра связи (Γ) для различных значений параметра плотности (r_s), $T_e = T_i$

На рис. 2 а), 2 б) и 3 а), 3 б) показаны результаты диффузии, теплопроводности и коэффициентов вязкости плотной плазмы в зависимости от параметра связи при $r_s = 0.5$, $r_s = 1$ и $r_s = 1.5$. Для того, чтобы получить более подробное физическое описание процессов, полученные численными методами результаты рассчитываются на основе эффективного потенциала взаимодействия (5), который учитывает как квантовые, так и коллективные эффекты. Из рис. 2а) и 3 а), 3 б) видно, что при более низких значениях параметра связи коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии имеют более высокие значения. Для больших плотностей коэффициенты переноса имеют более низкие значения.

Получены коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости при различных значениях температур и плотностей на основе кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала (5). На рис. 4 а) и 4 б) приведены коэффициенты диффузии и вязкости для плотной ДТ плазмы, вычисленные на основе кулоновского логарифма в зависимости от параметра связи (Γ) при плотности плазмы $\rho = 6.135 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 13.45 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 26.3 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 108 \text{ g/cm}^3$, соответственно. Видно, что значения коэффициентов диффузии и вязкости увеличиваются при повышении температуры.

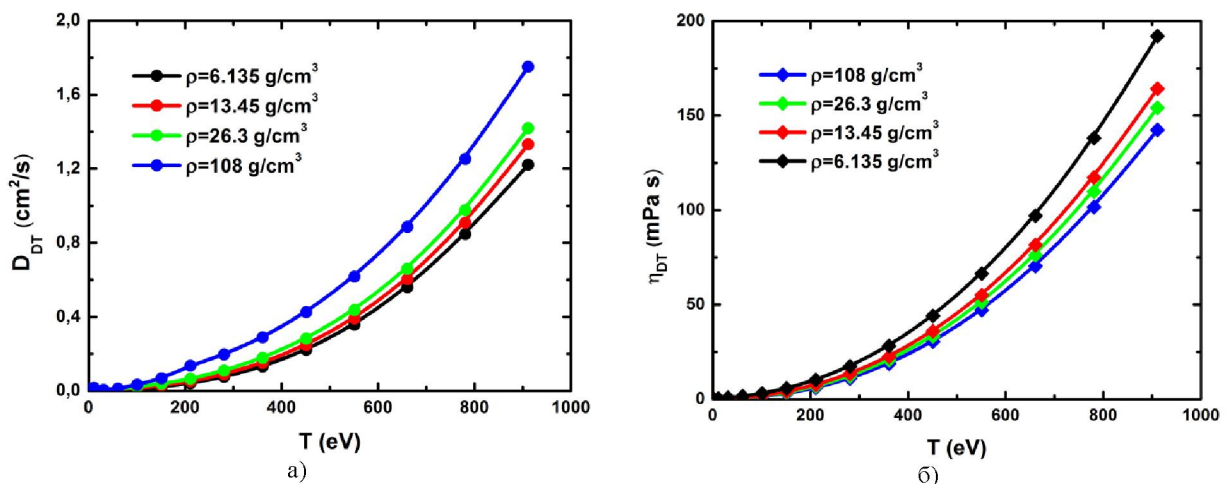


Рисунок 4 – Транспортные коэффициенты плотной ДТ плазмы в зависимости от температуры для различных значений плотностей: (а) диффузия, (б) вязкость

Рис. 5 а) и 5 б) приведены результаты по теплопроводности дейтериевой плазмы от температуры для различных значений плотности $\rho = 43.105 \text{ g/cm}^3$ и $\rho = 199.561 \text{ g/cm}^3$. Красная сплошная линия соответствует теплопроводности, полученной на основе эффективного потенциала взаимодействия (5), черные треугольники соответствуют результатам КМД моделирования [27]. Синяя точечно-пунктирная линия соответствует общему кулоновскому логарифму $\lambda = \ln \Lambda$. В работе [27] были сделаны расчеты КМД моделирования теплопроводности дейтериевой плазмы в широком диапазоне плотностей и температур, Ху и др. [27] использовали следующую функцию, чтобы описать результаты расчетов КМД моделирования дейтериевой теплопроводности на ИТС взрывах:

$$\kappa_{QMD} = \frac{20(2/\pi)^{3/2} k_B^{7/2} T^{5/2} \cdot 0.095(Z_{eff} + 0.24)}{\sqrt{m_e} Z_{eff} e^4} \frac{1}{1 + 0.24 Z_{eff}} \frac{1}{\ln \Lambda_{QMD}}. \quad (10)$$

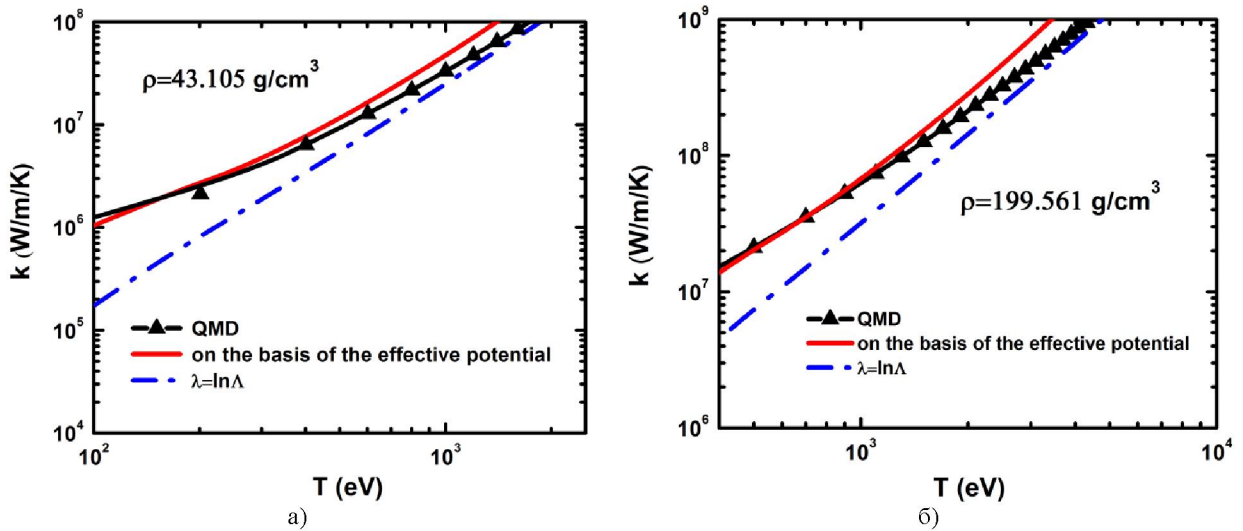


Рисунок 5 – Теплопроводности дейтериевой плазмы для эффективного потенциала взаимодействия (5) и КМД моделирования в зависимости от температуры при $\rho = 43.105 \text{ g/cm}^3$ и $\rho = 199.561 \text{ g/cm}^3$.

Из рис. 5 а) и 5 б) видно, что с увеличением температуры значение теплопроводности увеличивается. Отметим, что при высоких значениях плотности результат, полученный на основе эффективного потенциала при низких температурах, стремится к результату метода квантовой молекулярной динамики.

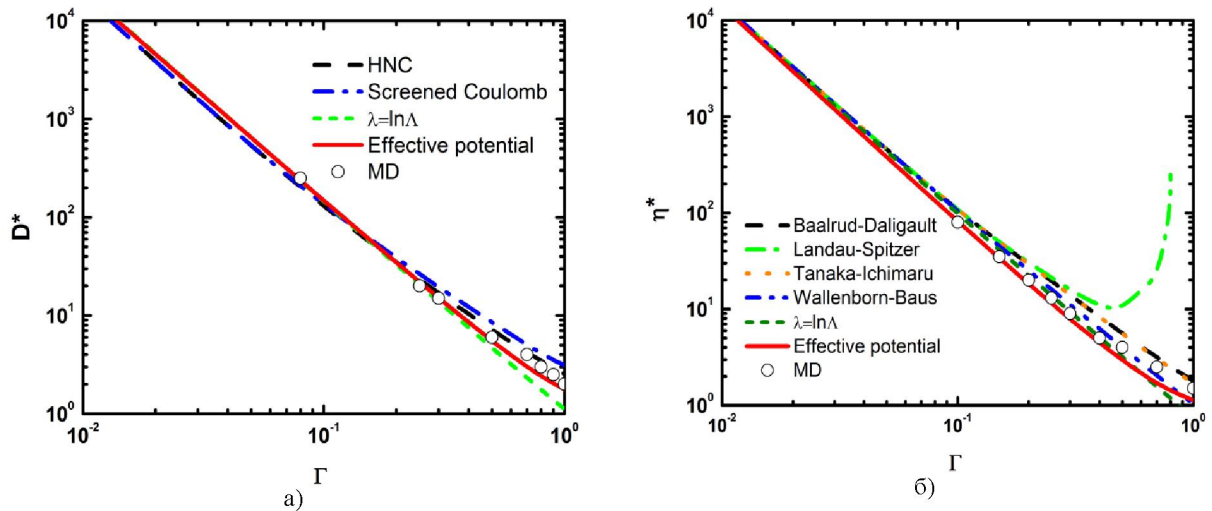


Рисунок 6 – Диффузия (а) и вязкость (б) плотной плазмы в зависимости от параметра связи (Γ), $T_e = T_i$.

На рис. 6 а) и 6 б) показаны зависимости коэффициентов диффузии и вязкости от параметра связи в сравнении с результатами, полученными на основе гиперцепного приближения (ГПЦ) [28], метода молекулярной динамики (MD) [28-30], в рамках кинетической теории [33-34], а также теории Ландау-Спитцер [31]. Теория Далигалта-Балруда основана на приближении парного рассеяния с учетом корреляционных эффектов на основе использования эффективного потенциала взаимодействия [28-30, 32]. Эффективный потенциал Далигалта-Балруда связан с потенциалом среднего поля, который включен в парный потенциал взаимодействия. Валленборн-Баус применили перенормированную кинетическую теорию и обобщенную кинетическую теорию корреляционных функций в фазовом пространстве [34]. Рис. 6 а) и 6 б) показывают, что результаты, полученные на основе эффективного потенциала (5) находятся в хорошем согласии с результатами других работ в слабосвязанном пределе $\Gamma_{ee} < 1$, но различается при для $\Gamma_{ee} \geq 1$. Различие в слабосвязанном случае $\Gamma_{ee} \sim 1$ вызвана неидеальностью и квантовыми эффектами.

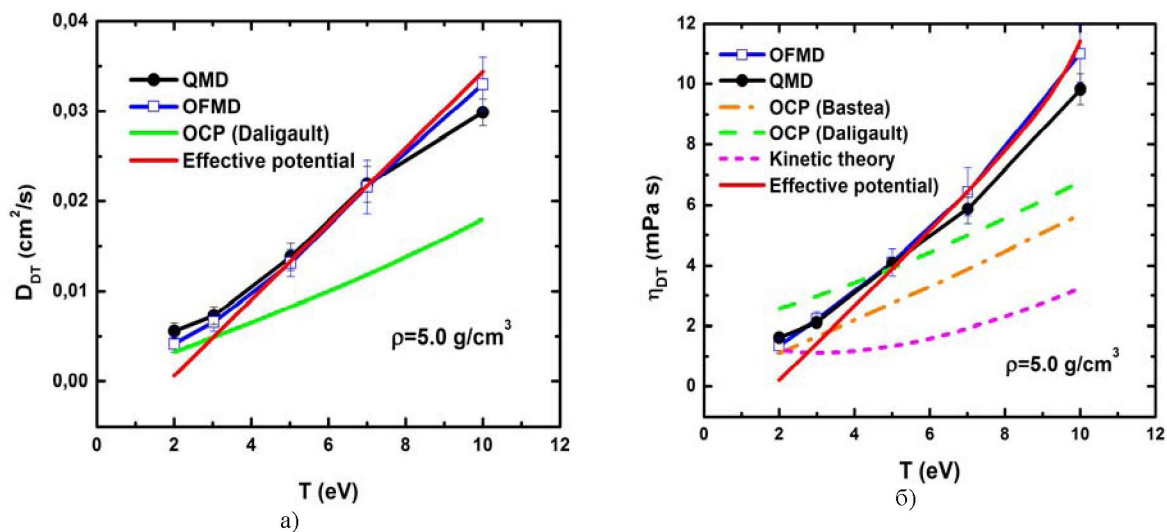


Рисунок 7 – Диффузия (а) и вязкость (б) ДТ плотной плазмы в зависимости от температуры при $\rho = 5.0 \text{ g/cm}^3$

Вычислена диффузия и вязкость ДТ плазмы для плотности $\rho = 5 \text{ g/cm}^3$ и температуры в диапазоне от 2 до 10 эВ с использованием кулоновского логарифма на основе эффективного потенциала с учетом квантового эффекта дифракции на малых расстояниях и эффекта экранирования на больших расстояниях. На рис. 7 а) и 7 б) показаны сравнения расчетных данных по диффузии и вязкости в ДТ плазме с теоретическими результатами других авторов [9], рассчитанные на основе теории функционала плотности при конечных температурах с применением теоремы Кона-Шэма в комбинации с молекулярной динамикой и теории функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы (ТФТМД). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами КМД и ТФТМД моделирования при более высоких температурах, и, следовательно, мы приходим к выводу, что наш метод может быть использован в этом режиме. При низких температурах ниже 3 эВ сравнение с КМД и ТФТМД результатами показывает ухудшение согласия, так как при этих температурах эффект неидеальности становится важным. По сравнению с результатами КМД, полученные данные по вязкости не так хороши, как для диффузии, где температурная зависимость существенно отличается, в то время как результаты, полученные для вязкости на основе эффективного потенциала, согласуются с результатами моделирования ТФТМД.

Заключение. 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 кулоновскому логарифму и коэффициентам переноса для различных

параметров плазмы согласуются с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов, также результатами МД моделирования. По полученным результатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Таким образом, знание величин коэффициентов переноса тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно рассчитать конструкцию термоядерной мишени.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта №0115PK03029 (2016).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.E. Fortov (2009) Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos. Springer. Germany. ISBN: 978-3-642-16463-7
- [2] V.E. Fortov, O.F. Petrov, O.S. Vaulina, R.A. Timirkhanov (2012) Viscosity of a Strongly Coupled Dust Component in a Weakly Ionized Plasma, Phys. Rev. Lett. 109: 055002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.055002
- [3] V. E. Fortov, A.V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak and G. E. Morfill (2005) Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives. Phys. Rep. 1: 424. DOI: 10.1016/j.physrep.2005.08.007
- [4] D. H. H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni et al (2005) Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams. Laser and Particle beams. 23: 47. DOI: 10.1017/S026303460505010X
- [5] D. H. H. Hoffmann, K. Weyrich, H. Wahl et al (1990) Energy loss of heavy ions in a plasma target. Phys. Rev. A. 42: 2313. DOI: 10.1103/PhysRevA.42.2313
- [6] D. H. H. Hoffmann, J. Jacoby, W. Laux et al (1995) Stopping of Heavy Ions in a Hydrogen Plasma. Phys. Rev. Lett. 74: 1550. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.1550
- [7] C.-V. Meister, G. Ropke (1982) Electrical conductivity of non-ideal plasmas and the ion distribution function. Annalen der Physik. 39: 133. DOI: 10.1002/andp.19824940208
- [8] L. Burakovsky, C. Ticknor, J.D. Kress, L.A. Collins, F. Lambert (2013) Transport properties of lithium hydride at extreme conditions from orbital-free molecular dynamics. Phys. Rev. E. 87: 023104. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.023104
- [9] J.D. Kress, J.S.Cohen, D.A. Horner, F. Lambert, L.A. Collins (2010) Viscosity and mutual diffusion of deuterium-tritium mixtures in the warm-dense-matter regime. Phys. Rev. E. 82: 036404. DOI: 10.1103/PhysRevE.82.036404
- [10] R. E. Phillips and C. A. Ordonez (2013) Accelerator-based neutron source using a cold deuterium target with degenerate electrons. AIP Advances. 3: 072115. DOI: 10.1063/1.4816407
- [11] Y. Chang, C. A. Ordonez (2000) Velocity space scattering coefficients with applications in antihydrogen recombination studies. Physical Review E. 62: 8564. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.8564
- [12] D.O. Gericke, M.S. Murillo, M. Schlanges (2002) Dense plasma temperature equilibration in the binary collision approximation. Phys. Rev. E. 65: 036418. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.036418
- [13] K.Chen, S. T. Sullivan, W.G. Rellergert, E.R. Hudson (2013) Measurement of the Coulomb Logarithm in a Radio-Frequency Paul Trap. Phys. Rev. Lett. 110: 173003. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.173003
- [14] J. Vorberger, D.O. Gericke (2014) Comparison of electron-ion energy transfer in dense plasmas obtained from numerical simulations and quantum kinetic theory. High Energy Density Physics. 10: 1. DOI: 10.1016/j.hedp.2013.10.006
- [15] C.A. Ordonez, M.I. Molina (1994) Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb interaction potentials. Phys. Plasmas. 1: 2515. DOI: 10.1063/1.870578
- [16] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova (2001) Coulomb logarithm of a nonideal plasma. Phys. Plasmas. 8: 5049. DOI: 10.1063/1.1407820
- [17] T. S. Ramazanov, S. K. Kodanova, Zh. A. Moldabekov, M. K. Issanova (2013) Dynamical properties of non-ideal plasma on the basis of effective potentials. Phys. Plasmas. 20:112702. DOI: 10.1063/1.4829042
- [18] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin (2015) Effective potentials of interactions and thermodynamic properties of a nonideal two-temperature dense plasma. Phys.Rev. E. 92: 023104. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.023104
- [19] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova (2015) Investigation of Coulomb Logarithm and Relaxation Processes in Dense Plasma on the Basis of Effective Potentials. Contrib. Plasma Phys.55, 2-3: 271 – 276. DOI: 10.1002/ctpp.201400094
- [20] Zhandos Moldabekov, Tim Schoof, Patrick Ludwig, Michael Bonitz, and Tlekkabul Ramazanov (2015) Statically screened ion potential and Bohm potential in a quantum plasma. Phys. Plasmas. 22:102104. DOI: 10.1063/1.4932051
- [21] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin (2016) Interaction between ions in hot dense plasma via screened Cornell potential. Phys. Plasmas. 23: 042703. DOI: 10.1063/1.4945648
- [22] P. Seufferling, J. Vogel, and C. Toepffer (1989) Correlations in a two-temperature plasma. Phys. Rev. A. 40: 323-329. DOI: 10.1103/PhysRevA.40.323
- [23] R. Bredow, Th. Bornath, W.D. Kraeft, R. Redmer (2013) Hypernetted Chain Calculations for Multi-Component and NonEquilibrium Plasmas. Contrib. Plasma Phys.53: 276-284. DOI: 10.1002/ctpp.201200117
- [24] S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn (2004) The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics. Clarendon, Oxford. ISBN: 978-0-19-956801-7
- [25] J. D. Lindl (1998) Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive. Springer, Verlag, New York. ISBN: 978-3-642-16463-7

- [26] C. Wang, Y. Long, X.-T. He, J.-F. Wu, W.-H. Ye, and P. Zhang (2013) Transport properties of dense deuterium-tritium plasmas. *Phys. Rev. E.* 88: 013106. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.013106
- [27] S.X. Hu, L.A. Collins, T.R. Boehly, J.D. Kress et al (2014) First-principles thermal conductivity of warm-dense deuterium plasmas for inertial confinement fusion applications. *Phys. Rev. E.* 89:043105. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.043105
- [28] J. Daligault and S.D. Baalrud (2013) Effective Potential Theory for Transport Coefficients across Coupling Regimes. *Phys. Rev. Lett.* 110:235001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.235001
- [29] J. Daligault (2012) Diffusion in Ionic Mixtures across Coupling Regimes. *Phys. Rev. Lett.* 108:225004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.225004
- [30] J. Daligault (2012) Practical model for the self-diffusion coefficient in Yukawa one-component plasmas. *Phys. Rev. E.* 86: 047401. DOI: 10.1103/PhysRevE.86.047401
- [31] L. Spitzer, Jr. (1962) *Physics of Fully Ionized Gases*, 2nd ed. Interscience, New York. ISBN: 978-0-486-44982-1
- [32] J. Daligault and K. Rasmussen, S.D. Baalrud (2014) Determination of the shear viscosity of the one-component plasma. *Phys. Rev. E.* 90: 033105. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.033105
- [33] S. Tanaka and S. Ichimaru (1986) Theory of interparticle correlations in dense, high-temperature plasmas. VIII. Shear viscosity. *Phys. Rev. A.* 34: 4163. DOI: 10.1103/PhysRevA.34.4163
- [34] J. Wallenborn and M. Baus (1978) Kinetic theory of the shear viscosity of a strongly coupled classical one-component plasma. *Phys. Rev. A.* 18: 1737. DOI: 10.1103/PhysRevA.18.1737

REFERENCES

- [35] V.E. Fortov (2009) *Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos*. Springer. Germany. ISBN: 978-3-642-16463-7 (in English)
- [36] V.E. Fortov, O.F. Petrov, O.S. Vaulina, R.A. Timirkhanov (2012) Viscosity of a Strongly Coupled Dust Component in a Weakly Ionized Plasma, *Phys. Rev. Lett.* 109: 055002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.055002 (in English)
- [37] V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak and G. E. Morfill (2005) Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives. *Phys. Rep.* 1: 424. DOI: 10.1016/j.physrep.2005.08.007 (in English)
- [38] D. H. H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni et al (2005) Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams. *Laser and Particle beams.* 23: 47. DOI: 10.1017/S026303460505010X (in English)
- [39] D. H. H. Hoffmann, K. Weyrich, H. Wahl et al (1990) Energy loss of heavy ions in a plasma target. *Phys. Rev. A.* 42: 2313. DOI: 10.1103/PhysRevA.42.2313 (in English)
- [40] D. H. H. Hoffmann, J. Jacoby, W. Laux et al (1995) Stopping of Heavy Ions in a Hydrogen Plasma. *Phys. Rev. Lett.* 74: 1550. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.1550 (in English)
- [41] C.-V. Meister, G. Ropke (1982) Electrical conductivity of non-ideal plasmas and the ion distribution function. *Annalen der Physik.* 39: 133. DOI: 10.1002/andp.19824940208 (in English)
- [42] L. Burakovsky, C. Ticknor, J.D. Kress, L.A. Collins, F. Lambert (2013) Transport properties of lithium hydride at extreme conditions from orbital-free molecular dynamics. *Phys. Rev. E.* 87: 023104. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.023104 (in English)
- [43] J.D. Kress, J.S. Cohen, D.A. Horner, F. Lambert, L.A. Collins (2010) Viscosity and mutual diffusion of deuterium-tritium mixtures in the warm-dense-matter regime. *Phys. Rev. E.* 82: 036404. DOI: 10.1103/PhysRevE.82.036404 (in English)
- [44] R. E. Phillips and C. A. Ordonez (2013) Accelerator-based neutron source using a cold deuterium target with degenerate electrons. *AIP Advances.* 3: 072115. DOI: 10.1063/1.4816407 (in English)
- [45] Y. Chang, C. A. Ordonez (2000) Velocity space scattering coefficients with applications in antihydrogen recombination studies. *Physical Review E.* 62: 8564. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.8564 (in English)
- [46] D.O. Gericke, M.S. Murillo, M. Schlages (2002) Dense plasma temperature equilibration in the binary collision approximation. *Phys. Rev. E.* 65: 036418. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.036418 (in English)
- [47] K. Chen, S. T. Sullivan, W.G. Rellergert, E.R. Hudson (2013) Measurement of the Coulomb Logarithm in a Radio-Frequency Paul Trap. *Phys. Rev. Lett.* 110: 173003. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.173003 (in English)
- [48] J. Vorberger, D.O. Gericke (2014) Comparison of electron-ion energy transfer in dense plasmas obtained from numerical simulations and quantum kinetic theory. *High Energy Density Physics.* 10: 1. DOI: 10.1016/j.hedp.2013.10.006 (in English)
- [49] C.A. Ordonez, M.I. Molina (1994) Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb interaction potentials. *Phys. Plasmas.* 1: 2515. DOI: 10.1063/1.870578 (in English)
- [50] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova (2001) Coulomb logarithm of a nonideal plasma. *Phys. Plasmas.* 8: 5049. DOI: 10.1063/1.1407820 (in English)
- [51] T. S. Ramazanov, S. K. Kodanova, Zh. A. Moldabekov, M. K. Issanova (2013) Dynamical properties of non-ideal plasma on the basis of effective potentials. *Phys. Plasmas.* 20: 112702. DOI: 10.1063/1.4829042 (in English)
- [52] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin (2015) Effective potentials of interactions and thermodynamic properties of a nonideal two-temperature dense plasma. *Phys. Rev. E.* 92: 023104. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.023104 (in English)
- [53] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova (2015) Investigation of Coulomb Logarithm and Relaxation Processes in Dense Plasma on the Basis of Effective Potentials. *Contrib. Plasma Phys.* 55, 2-3: 271 – 276. DOI: 10.1002/ctpp.201400094 (in English)
- [54] Zhandos Moldabekov, Tim Schoof, Patrick Ludwig, Michael Bonitz, and Tlekkabul Ramazanov (2015) Statically screened ion potential and Bohm potential in a quantum plasma. *Phys. Plasmas.* 22: 102104. DOI: 10.1063/1.4932051 (in English)
- [55] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin (2016) Interaction between ions in hot dense plasma via

screened Cornell potential. Phys. Plasmas. 23: 042703. DOI: 10.1063/1.4945648 (in English)

[56] P. Seufferling, J. Vogel, and C. Toepffer (1989) Correlations in a two-temperature plasma. Phys. Rev. A. 40: 323-329. DOI: 10.1103/PhysRevA.40.323 (in English)

[57] R. Bredow, Th. Bornath, W.D. Kraeft, R. Redmer (2013) Hypernetted Chain Calculations for Multi-Component and NonEquilibrium Plasmas. Contrib. Plasma Phys.53: 276-284. DOI: 10.1002/ctpp.201200117 (in English)

[58] S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn (2004) The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics. Clarendon, Oxford. ISBN: 978-0-19-956801-7 (in English)

[59] J. D. Lindl (1998) Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive. Springer, Verlag, New York. ISBN: 978-3-642-16463-7 (in English)

[60] C. Wang, Y. Long, X.-T. He, J.-F. Wu, W.-H. Ye, and P. Zhang (2013) Transport properties of dense deuterium-tritium plasmas. Phys. Rev. E. 88: 013106. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.013106 (in English)

[61] S.X. Hu, L.A. Collins, T.R. Boehly, J.D. Kress et al (2014) First-principles thermal conductivity of warm-dense deuterium plasmas for inertial confinement fusion applications. Phys. Rev. E. 89:043105. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.043105 (in English)

[62] J. Daligault and S.D. Baalrud (2013) Effective Potential Theory for Transport Coefficients across Coupling Regimes. Phys. Rev. Lett. 110:235001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.235001 (in English)

[63] J. Daligault (2012) Diffusion in Ionic Mixtures across Coupling Regimes. Phys. Rev. Lett.108:225004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.225004 (in English)

[64] J. Daligault (2012) Practical model for the self-diffusion coefficient in Yukawa one-component plasmas. Phys. Rev. E. 86: 047401. DOI: 10.1103/PhysRevE.86.047401 (in English)

[65] L. Spitzer, Jr. (1962) Physics of Fully Ionized Gases, 2nd ed. Interscience, New York. ISBN: 978-0-486-44982-1 (in English)

[66] J. Daligault and K. Rasmussen, S.D. Baalrud (2014) Determination of the shear viscosity of the one-component plasma. Phys. Rev. E. 90: 033105. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.033105 (in English)

[67] S. Tanaka and S. Ichimaru (1986) Theory of interparticle correlations in dense, high-temperature plasmas. VIII. Shear viscosity. Phys. Rev. A. 34: 4163. DOI: 10.1103/PhysRevA.34.4163 (in English)

[68] J. Wallenborn and M. Baus (1978) Kinetic theory of the shear viscosity of a strongly coupled classical one-component plasma. Phys. Rev. A. 18: 1737. DOI: 10.1103/PhysRevA.18.1737 (in English)

Т.С. Рамазанов¹, С.К. Коданова¹, М.К. Исанова¹, А. Тихонов², М. Кайканов²

¹ ТФГЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

² Астана Ұлттық зертханасы, Назарбаев университеті, Астана, Қазақстан

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ТРАНСПОРТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аннотация. Бұл жұмыста 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 кванты-механикалық дифракция эффектісін, үлкен ара-қашықтықта экрандалу эффектісін ескереді. Кулон логарифмі көмегімен изотермиялық емес тығыз плазманың тасымалдау коэффициенттері зерттелді. Алынған нәтижелер басқа авторлардың теориялық жұмыстарымен, молекулалық динамика модельдеу нәтижелерімен салыстырылған.

Тірек сөздер: тығыз плазма, Кулон логарифмы, инерциялық термоядролық синтез, транспорттық қасиеттер.