

М.К. Исанова<sup>1,\*</sup> , С.К. Коданова<sup>1</sup> , Д.Е. Елубаев<sup>1</sup>, Д. Хоффманн<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики,  
Германия, г. Дармштадт

\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

## ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

**Аннотация.** В данной работе исследованы транспортные свойства неизоотермической, плотной дейтерий-тритиевой плазмы инерционного термоядерного синтеза. На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц для двухтемпературной, неизоотермической, 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 неизоотермической 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.

### Введение

В последние годы значительное внимание исследователей привлекает изучение состояния вещества при высоких давлениях и температурах. Особое место среди работ посвященных различным аспектам данной проблемы занимают исследования в области инерционного термоядерного синтеза на пучках тяжелых ионов. Причина такого особого интереса заключается в том, что при сокращении запасов природного топлива термоядерный синтез становится одним из возможных вариантов решения энергетических проблем. Необходимые для этого ускорители действуют в ряде лабораторий мира и хорошо известны как основной экспериментальный инструмент в исследованиях по ядерной физике, физике элементарных частиц, физике плотной плазмы [1-3]. Сейчас проводится большое количество теоретических и эксперимен-

тальных работ по изучению физических процессов, определяющих конструкцию термоядерной мишени и необходимых параметров будущего драйвера. Расчет параметров драйвера тяжелоионного инерционного синтеза требует адекватного и точного количественного описания процесса взаимодействия тяжелоионного пучка с плотной плазмой в широком диапазоне параметров мишени. Потребность в новых теоретических и экспериментальных данных по торможению тяжелых ионов в плазме с электронной плотностью выше  $n_e > 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , необходимых для адекватного качественного описания процессов взаимодействия тяжелоионных пучков с плотной плазмой в широком диапазоне параметров, является принципиальным обоснованием актуальности исследований в области ИТС. Транспортные свойства плотной неидеальной плазмы могут быть определены, используя моделирование методом молекулярной динамики (МД) [4-5].

Однако, расчеты на основе метода МД требуют больших вычислительных мощностей и занимают долгое время. Метод эффективных потенциалов при корректном выборе модели взаимодействия частиц позволяет производить расчеты транспортных свойств напрямую, решая задачу классического рассеяния при парном столкновении без привлечения громоздких и долгих расчетов [6-9].

Отсутствие достаточно точных экспериментальных данных о коэффициентах переноса сверхплотной дейтерий-третиевой (ДТ) плазмы требует адекватного теоретического описания транспортных свойств плотной плазмы в широком диапазоне параметров. Точное знание коэффициентов переноса плотной ДТ плазмы имеет важное значение для правильного описания процессов, происходящих при ИТС.

### Коэффициенты переноса плотной дейтерий-третиевой плазмы

Рассмотрим частицы плотной ДТ плазмы, взаимодействующие посредством эффективного потенциала [10-12]. Коэффициенты диффузии и вязкости плотной плазмы связаны с эффективной частотой столкновений:

$$D = \frac{k_B T}{m_e v_{eff}}, \quad (1)$$

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

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

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

эффективная частота столкновений прямо пропорциональна кулоновскому логарифму. Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [13-14]:

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{b_{max}} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) b db, \quad (4)$$

Угол рассеяния в системе центра масс определяется как [13]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2}\right)^{1/2}, \quad (5)$$

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  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $b_{\perp} = Z_{\alpha} Z_{\beta} / (m_{\alpha\beta} v^2)$ . В качестве минимального прицельного параметра принято брать  $b_{min} = \max\{b_{\perp}, \lambda_{\alpha\beta}\}$ , где  $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$  - тепловая длина волны де-Бройля. В формуле (5)  $\Phi_{\alpha\beta}(r)$  - потенциал взаимодействия частиц и  $r_0$  определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (6)$$

Введем следующие безразмерные значения коэффициентов диффузии  $D$  и вязкости  $\eta$ :

$$D^* = D / \omega_p a^2, \quad (7)$$

$$\eta^* = \eta / n_i M \omega_p a^2, \quad (8)$$

где

$$\omega_p = (4\pi n_i / M)^{1/2} Z e, \quad (9)$$

плазменная частота ионов с массой  $M$ . В данной работе для рассматриваемой ДТ смеси используется [15]:

$$M = (2 + 3)/2 = 2.5 \text{ amu} \quad (10)$$

Вычислена диффузия и вязкость дейтерий-третиевой 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 рисунках 1 и 2 показаны сравнения расчетных данных по диффузии и вязкости в ДТ плазме с теоретическими результатами других авторов [16], 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 (ТФТМД). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами квантовой молекулярной динамики (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.

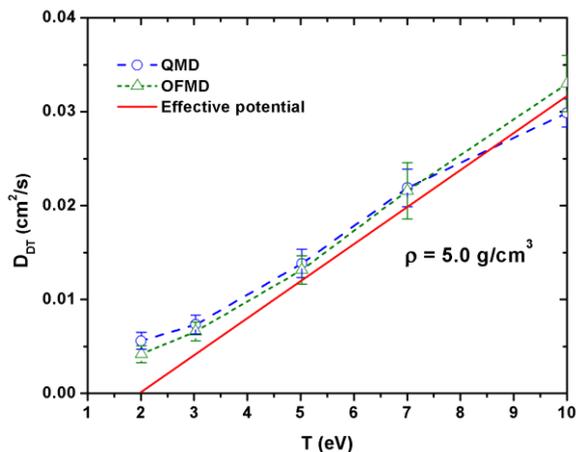


Рисунок 1 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от температуры при  $\rho = 5.0 \text{ г/см}^3$

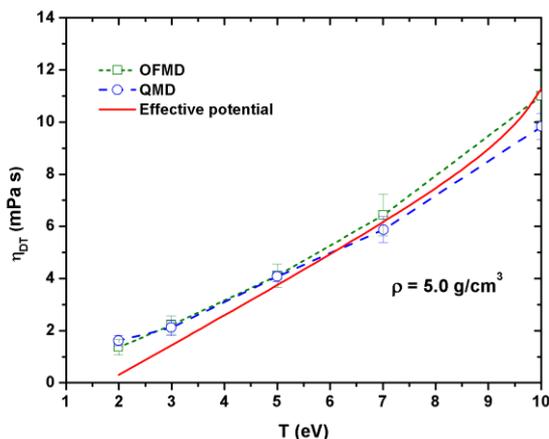


Рисунок 2 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от температуры при  $\rho = 5.0 \text{ г/см}^3$

На рисунках 3 - 4 приведены коэффициенты диффузии и вязкости для плотной ДТ плазмы, вычисленные с использованием кулоновского логарифма на основе эффективного потенциала с учетом квантового эффекта дифракции на малых расстояниях и эффекта экранирования на

больших расстояниях в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ) при плотности плазмы  $\rho = 300 \text{ г/см}^3$ .

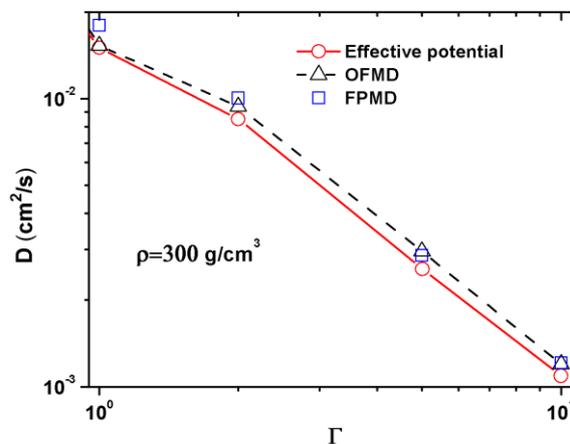


Рисунок 3 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ) при  $\rho = 300 \text{ г/см}^3$

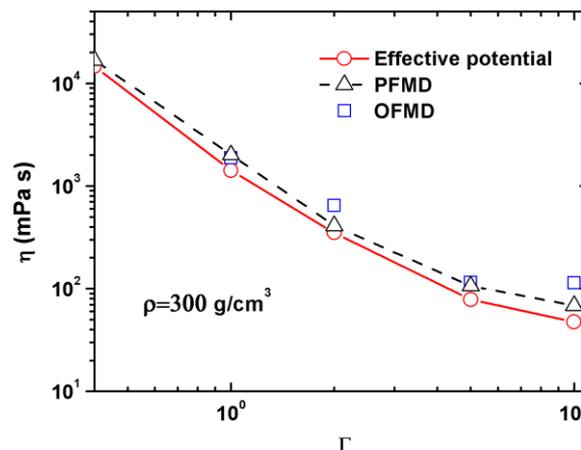


Рисунок 4 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ) при  $\rho = 300 \text{ г/см}^3$

На рисунках показаны сравнения расчетных данных по диффузии и вязкости в зависимости от параметра связи в ДТ плазме с теоретическими результатами других авторов [15], рассчитанных на основе молекулярной динамики и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы (ТФТМД) с использованием пакета AVINIG [17]. В МД электроны квантово-механический обрабатываются с помощью теории функционала плотности без обменного члена после введения приближения Борна-Оппенгеймера. Что касается ТФТМД моделирования, то орби-

тальный функционал получается из квазиклассического развития функционала Мермина [18], что приводит к конечному выражению температуры Томаса-Ферми для кинетической части. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами КМД и ТФТМД моделирования при значении  $\Gamma \sim 1$ , и, следовательно, мы приходим к выводу, что наш метод может быть использован в этом режиме. Рисунки 3-4 показывают, что результаты, полученные на основе эффективного потенциала находятся в хорошем согласии с результатами других работ в слабосвязанном пределе  $\Gamma \leq 1$ , но различается при  $\Gamma \geq 1$ . Различие в случае  $\Gamma \geq 1$  вызвана неидеальностью и квантовыми эффектами.

Рассмотрим теплопроводность плотной ДТ плазмы, где частицы взаимодействуют согласно эффективному потенциалу [10]. Коэффициент теплопроводности определяется по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{5n_e k_B^2 T}{m_e v_{eff}}. \quad (11)$$

Для удобства расчетов и сравнения обезразмерим коэффициент теплопроводности (11):

$$\kappa^* = \kappa / (m_e \omega_p / a). \quad (12)$$

Одним из наиболее важных механизмов передачи энергии в высокотемпературной плазме является электронная теплопроводность. Поскольку масса электрона мала, а температура плазменной короны мишени, представляющей собой разлетающееся облако плазмы, достаточно высока, то и теплопроводность плазмы оказывается достаточно большой. Хотя процесс обычной теплопроводности в плазме исследован достаточно хорошо; в плазме, получаемой при инерционном синтезе, происходят новые явления, которые приводят к существенному усложнению процесса теплопроводности. При поглощении энергии нагревающего излучения в плазме происходит образование электронов с очень большими энергиями. Так как электроны обладают достаточно большой подвижностью, обусловленной их малой массой, плазма оказывается очень хорошим проводником теплоты.

На рисунках 5-6 показаны зависимости теплопроводности от температуры по сравнению с результатами, полученными на ос-

нове модели Хаббарда-Спитцера [20-21], Ли-Мора [22], Ишимару [23-24] и метода МД [25].

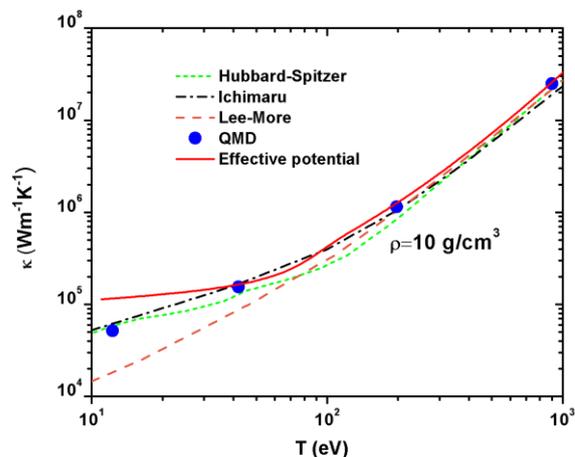


Рисунок 5 - Теплопроводность плотной плазмы в зависимости от температуры в сравнении с результатами различных теоретических подходов при  $\rho=10 \text{ г/см}^3$

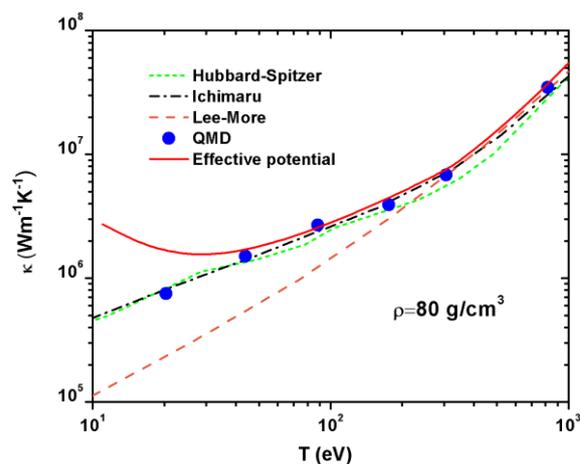


Рисунок 6 - Теплопроводность плотной плазмы в зависимости от температуры в сравнении с результатами различных теоретических подходов при  $\rho=80 \text{ г/см}^3$

Полученные результаты показывают при очень высоких температурах, за пределами температуры Ферми, все модели плавно сливаются с теплопроводностью Хаббарда-Спитцера, которая пропорциональна  $T^{-5/2}$ . Результаты с использованием эффективного потенциала хорошо согласуются с результатами КМД и с моделью Хаббарда-Спитцера до температуры Ферми.

Теперь оценим некоторые характерные величины, обусловленные распространением волны теплопроводности. Рассмотрим нагрев

топлива до температуры синтеза в несжатом состоянии. Необходимо попытаться нагреть топливо до термоядерных температур так быстро, чтобы ДТ реакция успела произойти до разлета топлива. Основой этой проблемы служит то, что энергия излучения драйвера может поглощаться только во внешних слоях мишени, например, лазерное излучение, может проникать только до критической плотности. Таким образом, внутренняя область мишени должна нагреваться до термоядерных температур за счет других механизмов. В качестве основного механизма нагрева можно использовать так называемый комбинированный метод синтеза, в этом случае необходимый уровень достигается сначала лазерным излучением, поджиг происходит вторичным ударом тяжелыми ионами. В этом случае время разлета определяется параметром проникновения тепловой волны, которая порождается лазерным излучением.

Используя полученные результаты по теплопроводности плотной ДТ, можно определить на какое расстояние  $d_{hw}$  тепловая волна распространиться в мишени за время  $t$ :

$$d_{hw} = \left( \frac{\kappa_e t}{k_B n} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

Так как электроны обладают подвижностью, плазма является хорошим проводником теплоты. Этот процесс приведет к распространению тепловой волны, нагревающей топливо и направленной внутрь мишени. На рисунке 7 приведена глубина проникновения тепловой волны в мишени на основе кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала на основе: обобщенного логарифма и кулоновского логарифма КМД моделирования [19]. Зная значения глубины проникновения тепловой волны, можно определить интервал времени, в течение которого происходит реакция, так называемое время разлета:

$$\tau_R = \frac{d_{hw}}{c_S}. \quad (14)$$

где  $c_S$  - скорость ионного звука.

В целом для любой схемы реализации ИТС очень важным является то обстоятельство каким образом, как время удержания зависит от температуры сжимающейся части таблетки. Полученные результаты показы-

вают (рисунок 8), что чем больше неидеальность сжимающейся части топлива на начальных этапах, тем больше время удержания. В рамках использованной модели, эффект неидеальности учитывается посредством эффективного потенциала. Таким образом, можно заключить, что если сжимающаяся плазма, которая появляется на начальных этапах сжатия, называемая плазмой аблятора неидеальна, то время удержания увеличивается.

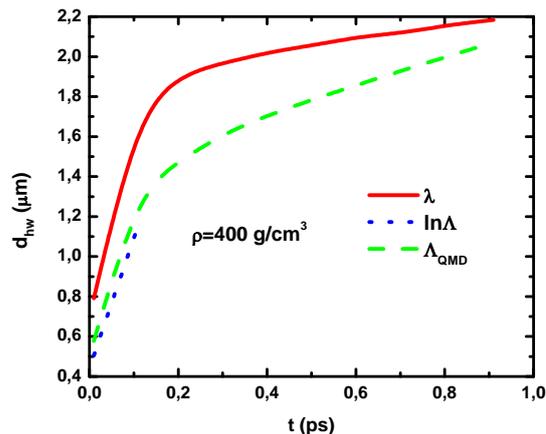


Рисунок 7 – Глубина проникновения тепловой волны в мишени

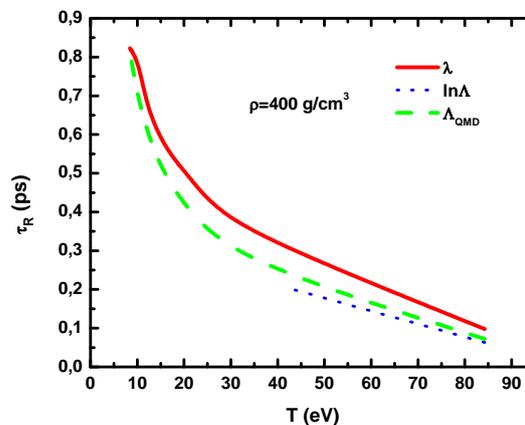


Рисунок 8 – Время разлета иона в ДТ плазме

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 авто-

ров, также результатами МД, КМД моделирования. По полученным результатам 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 Министрства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта AP05134366 (2020).*

### Список литературы

- 1 Фортвов В.Е. Экстремальные состояния вещества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 345.
- 2 Cuneo M.E., Vesey R.A., Bennet G.R. et al. Progress in symmetric ICF capsule implosions and wire-array Z-pinch source physics for double-pinch-driven hohlraums // Plasma Phys. and Contr. Fusion. – 2006. – Vol. 48, № 12. – P. R1.
- 3 Tahir N.A., Deutch C., Fortov V. et al. Proposal for the Study of Thermophysical Properties of High-Energy-Density Matter Using Current and Future Heavy-Ion Accelerator Facilities at GSI Darmstadt // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 95, № 3. – P. 035001.
- 4 Baus M. and Hansen J.-P. Statistical mechanics of simple Coulomb systems // Phys. Rep. - 1980. - Vol. - 59. - P. 1.
- 5 Desjarlais M.P., Kress J.D., and Collins L.A. Electrical conductivity for warm, dense aluminum plasmas and liquids // Phys. Rev. E. - 2002. - Vol. 66. - P. 025401.
- 6 Donko Z. Molecular dynamics simulations of strongly coupled plasmas // J. Phys. A - 2009. - Vol. 42. - P. 214029.
- 7 Rosenfeld Y., Nardi E. and Zinamon Z. Corresponding States Hard-Sphere Model for the Diffusion Coefficients of Binary Dense-Plasma Mixtures // Phys. Rev. Lett. - 1995. - Vol. 75. - P. 2490.
- 8 Faussurier G. Description of strongly coupled Yukawa fluids using the variational modified hypernetted chain approach // Phys. Rev. E. - 2004. - Vol. 69. - P. 066402.
- 9 Reinholz H., Redmer R., and Nagel S. Thermodynamic and transport properties of dense hydrogen plasmas // Phys. Rev. E. - 1995. - Vol. 52. - P. 5368.
- 10 Ramazanov T.S., Moldabekov Zh.A., Gabdullin M.T. Interaction between ions in hot dense plasma via screened Cornell potential // Phys. Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – P. 042703.
- 11 Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., and Hoffmann D.H.H. Transport Properties of Inertial Confinement Fusion Dense Plasmas // Contrib. Plasma Phys. – 2016. – Vol. 56, № 5. – P. 425-431.
- 12 Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Moldabekov Zh.A., Meister C.-V. Classical scattering and stopping power in dense plasmas: the effect of diffraction and dynamic screening // Laser and Particle Beams. – 2016. – Vol. 34. – P. 457-466.
- 13 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // Phys. Plasmas. - 1994. - Vol. 1. - P. 2515.
- 14 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // Phys. Plasmas. - 2001. - Vol. 8. - P. 5049.
- 15 Wang C., Long Y., He X.-T., Wu J.-F., Ye W.-H. and Zhang P. Transport properties of dense deuterium-tritium plasmas // Phys. Rev. E. – 2013. – Vol. 88. – P. 013106.
- 16 Kress J.D., Cohen J.S., Horner D.A., Lambert F., Collins L.A. Viscosity and mutual diffusion of deuterium-tritium mixtures in the warm-dense-matter regime // Phys. Rev. E. – 2010. – Vol. 82. – P. 036404.
- 17 <http://www.abinit.org>
- 18 Brack M. and Bhaduri R.K., Semi-classical Physics. - Westview, Boulder, CO, 2003.
- 19 S.X. Hu, L.A. Collins, T.R. Boehly, J.D. Kress et al. First-principles thermal conductivity of warm-dense deuterium plasmas for inertial confinement fusion applications // Phys. Rev. E. – 2014. – Vol. 89. P. 043105.
- 20 Ichimaru S. and Tanaka S. Theory of interparticle correlations in dense, high-temperature plasmas. V. Electric and thermal conductivities // Phys.Rev.A. - 1985. - Vol. 32. P. 1790.
- 21 Faussurier G., Blancard C., Cosser P., and Renaudin P. Equation of state, transport coefficients, and stopping power of dense plasmas

from the average-atom model self-consistent approach for astrophysical and laboratory plasmas // Phys. Plasmas. - 2010. - Vol. 17. P. 052707.

22 Glenzer S.H., MacGowan B.J., Michel P., Meezan N.B. et al., Symmetric Inertial Confinement Fusion Implosions at Ultra-High Laser Energies // Science. - 2010. - Vol. 327. P. 1228.

23 Lambert F., Recoules V., Decoster A., Clerrouin J., and Desjarlais M. On the transport coefficients of hydrogen in the inertial

confinement fusion regime // Phys. Plasmas. - 2011. - Vol. 18. P. 056306.

24 Zeldovich Y.B. and Raizer Y.P., Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena. - Academic, New York, 1998.

25 Clerrouin J.G. and Bernard S. Dense hydrogen plasma: Comparison between models // Phys.Rev.E. - 1997. - Vol. 56. P. 3534.

*Принято к печати 12.10.2020г.*

**М.К. Исанова<sup>1,\*</sup>** , **С.К. Коданова<sup>1</sup>** , **Д.Е. Елубаев<sup>1</sup>**, **Д. Хоффманн<sup>2</sup>** 

<sup>1</sup>НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики, Германия, г. Дармштадт

\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

## ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

**Аннотация.** 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.

М.К. Исанова<sup>1,\*</sup> , С.К. Коданова<sup>1</sup> , Д.Е. Елубаев<sup>1</sup>, Д. Хоффманн<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Экспериментальды және теориялық физика ғылымы зерттеу институты,  
0500400, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Ядролық физика институты, Дармштадт Техникалық Университеті, Германия  
\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

## ТЫҒЫЗ ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЙ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ТРАНСПОРТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

**Аннотация.** Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтез изотермиялық емес, тығыз дейтерий-триций 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 арақашықтықта квантты-механикалық дифракция эффектісін, үлкен арақашықтықта 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.

M.K. Issanova<sup>1,\*</sup> , S.K. Kodanova<sup>1</sup> , D.Ye. Yelubayev<sup>1</sup>, D. Hoffmann<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Institute of Experimental and Theoretical Physics, 050040, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics Technical University Darmstadt, Germany

\*e-mail: [issanova@physics.kz](mailto:issanova@physics.kz)

## TRANSPORT PROPERTIES OF DENSE DEUTERIUM-TRITIUM PLASMA

**Abstract.** 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.

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