

ISSN 2518-1483 (Online),  
ISSN 2224-5227 (Print)

2016 • 6

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ  
**БАЯНДАМАЛАРЫ**

**ДОКЛАДЫ**

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**REPORTS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ЖУРНАЛ 1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1944 г.  
PUBLISHED SINCE 1944



Бас редакторы  
х.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі **М.Ж. Жұрынов**

Редакция алқасы:

**Адекенов С.М.** проф., академик (Қазақстан) (бас ред. орынбасары)  
**Боос Э.Г.** проф., академик (Қазақстан)  
**Величкин В.И.** проф., корр.-мүшесі (Ресей)  
**Вольдемар Вуйцик** проф. (Польша)  
**Гончарук В.В.** проф., академик (Украина)  
**Гордиенко А.И.** проф., академик (Белорус)  
**Дука Г.** проф., академик (Молдова)  
**Илолов М.И.** проф., академик (Тәжікстан),  
**Леска Богуслава** проф. (Польша),  
**Локшин В.Н.** проф. чл.-корр. (Қазақстан)  
**Нараев В.Н.** проф. (Ресей)  
**Неклюдов И.М.** проф., академик (Украина)  
**Нур Изура Удзир** проф. (Малайзия)  
**Перни Стефано** проф. (Ұлыбритания)  
**Потапов В.А.** проф. (Украина)  
**Прокопович Полина** проф. (Ұлыбритания)  
**Омбаев А.М.** проф. (Қазақстан)  
**Өтелбаев М.О.** проф., академик (Қазақстан)  
**Садыбеков М.А.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Сатаев М.И.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Северский И.В.** проф., академик (Қазақстан)  
**Сикорски Марек** проф., (Польша)  
**Рамазанов Т.С.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Такибаев Н.Ж.** проф., академик (Қазақстан), бас ред. орынбасары  
**Харин С.Н.** проф., академик (Қазақстан)  
**Чечин Л.М.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Харун Парлар** проф. (Германия)  
**Энджун Гао** проф. (Қытай)  
**Эркебаев А.Э.** проф., академик (Қырғыстан)

«Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының баяндамалары»

ISSN 2518-1483 (Online),

ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» Республикалық қоғамдық бірлестігі (Алматы қ.)  
Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде 01.06.2006 ж.  
берілген №5540-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 2000 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,  
<http://наука-нанрк.kz>, reports-science.kz

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2016

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Главный редактор  
д.х.н., проф., академик НАН РК **М. Ж. Журинов**

Редакционная коллегия:

**Адекенов С.М.** проф., академик (Казахстан) (зам. гл. ред.)  
**Боос Э.Г.** проф., академик (Казахстан)  
**Величкин В.И.** проф., чл.-корр. (Россия)  
**Вольдемар Вуйцик** проф. (Польша)  
**Гончарук В.В.** проф., академик (Украина)  
**Гордиенко А.И.** проф., академик (Беларусь)  
**Дука Г.** проф., академик (Молдова)  
**Илолов М.И.** проф., академик (Таджикистан),  
**Леска Богуслава** проф. (Польша),  
**Локшин В.Н.** проф. чл.-корр. (Казахстан)  
**Нараев В.Н.** проф. (Россия)  
**Неклюдов И.М.** проф., академик (Украина)  
**Нур Изура Удзир** проф. (Малайзия)  
**Перни Стефано** проф. (Великобритания)  
**Потапов В.А.** проф. (Украина)  
**Прокопович Полина** проф. (Великобритания)  
**Омбаев А.М.** проф. (Казахстан)  
**Отелбаев М.О.** проф., академик (Казахстан)  
**Садыбеков М.А.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Сатаев М.И.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Северский И.В.** проф., академик (Казахстан)  
**Сикорски Марек** проф., (Польша)  
**Рамазанов Т.С.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Такибаев Н.Ж.** проф., академик (Казахстан), зам. гл. ред.  
**Харин С.Н.** проф., академик (Казахстан)  
**Чечин Л.М.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Харун Парлар** проф. (Германия)  
**Энджун Гао** проф. (Китай)  
**Эркебаев А.Э.** проф., академик (Кыргызстан)

Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан»

ISSN 2518-1483 (Online),

ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5540-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г.Алматы, ул.Шевченко, 28, ком.218-220, тел. 272-13-19, 272-13-18

<http://nauka-nanrk.kz> [reports-science.kz](http://reports-science.kz)

---

©Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016 г.

Адрес типографии: ИП «Аруна», г.Алматы, ул.Муратбаева, 75

**E d i t o r i n c h i e f**doctor of chemistry, professor, academician of NAS RK **M.Zh. Zhurinov****E d i t o r i a l b o a r d :****Adekenov S.M.** prof., academician (Kazakhstan) (deputy editor in chief)**Boos E.G.** prof., academician (Kazakhstan)**Velichkin V.I.** prof., corr. member (Russia)**Voitsik Valdemar** prof. (Poland)**Goncharuk V.V.** prof., academician (Ukraine)**Gordiyenko A.I.** prof., academician (Belarus)**Duka G.** prof., academician (Moldova)**Ilov M.I.** prof., academician (Tadjikistan),**Leska Boguslava** prof. (Poland),**Lokshin V.N.** prof., corr. member. (Kazakhstan)**Narayev V.N.** prof. (Russia)**Nekludov I.M.** prof., academician (Ukraine)**Nur Izura Udzir** prof. (Malaysia)**Perni Stephano** prof. (Great Britain)**Potapov V.A.** prof. (Ukraine)**Prokopovich Polina** prof. (Great Britain)**Ombayev A.M.** prof. (Kazakhstan)**Otelbayv M.O.** prof., academician (Kazakhstan)**Sadybekov M.A.** prof., corr. member. (Kazakhstan)**Satayev M.I.** prof., corr. member. (Kazakhstan)**Severskyi I.V.** prof., academician (Kazakhstan)**Sikorski Marek** prof., (Poland)**Ramazanov T.S.** prof., corr. member. (Kazakhstan)**Takibayev N.Zh.** prof., academician (Kazakhstan), deputy editor in chief**Kharin S.N.** prof., academician (Kazakhstan)**Chechin L.M.** prof., corr. member. (Kazakhstan)**Kharun Parlar** prof. (Germany)**Endzhun Gao** prof. (China)**Erkebayev A.Ye.** prof., academician (Kyrgyzstan)**Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.****ISSN 2224-5227****ISSN 2518-1483 (Online),****ISSN 2224-5227 (Print)**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5540-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of.219-220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

<http://nauka-nanrk.kz/> [reports-science.kz](http://reports-science.kz)

**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. Ramazanov<sup>1</sup>, S.K. Kodanova<sup>1</sup>, M.K. Issanova<sup>1</sup>, A. Tikhonov<sup>2</sup>, M. Kaikanov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan<sup>2</sup>Astana 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. Рамазанов<sup>1</sup>, С.К. Коданова<sup>1</sup>, М.К. Исанова<sup>1</sup>, А.Тихонов<sup>2</sup>, М. Кайканов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан<sup>2</sup>Национальная лаборатория, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан**ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ  
ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

**Аннотация.** В данной работе исследованы транспортные свойства неизоотермической, плотной дейтерий-тритиевой плазмы. 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 переноса в неизоотермической 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 динамикой 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  $\theta_c$  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  $\alpha$  и  $\beta$  (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.

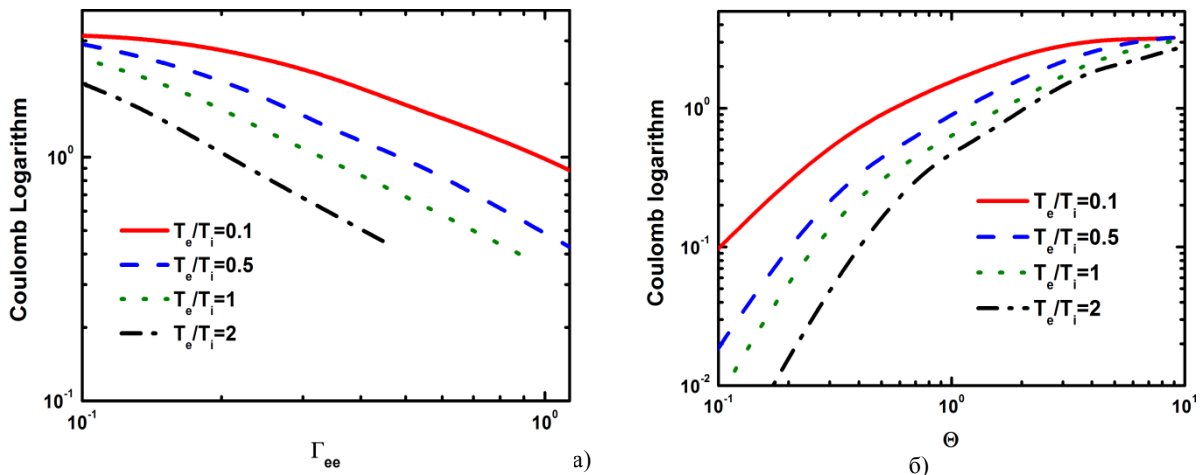


Рисунок 1 – Кулоновский логарифм двухтемпературной ДТ плазмы в зависимости (а) от параметра связи ( $\Gamma$ ) и (б) от параметра вырождения ( $\Theta$ )

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  $\Gamma$  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  $\Theta$  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:

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

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

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

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

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

эффективная частота столкновений прямо пропорциональна кулоновскому логарифму. Коэффициенты диффузии  $D$  и вязкости  $\eta$  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].

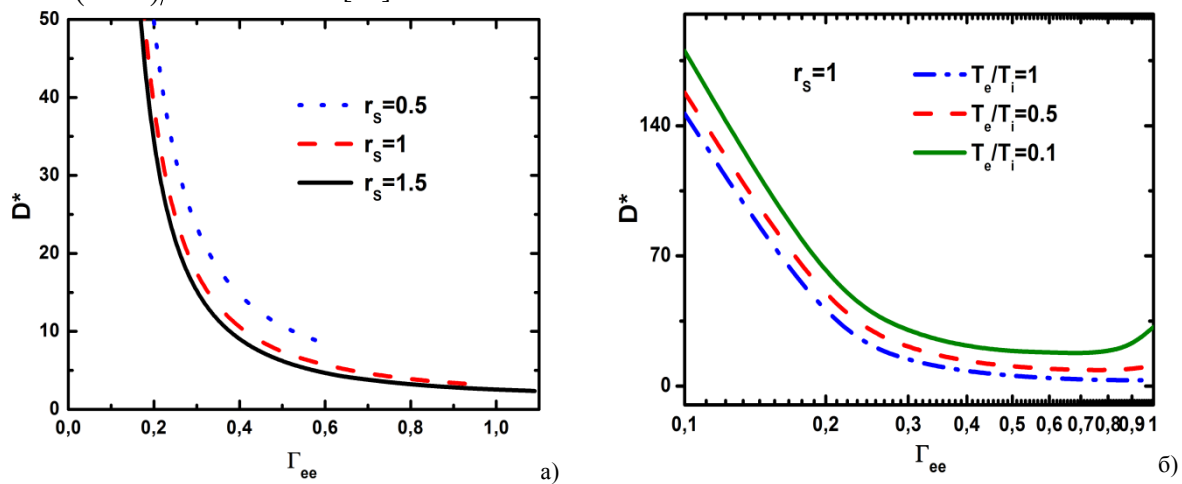


Рисунок 2 – Коэффициент диффузии в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ),  $T_e = T_i$ : (а) для различных значений параметра плотности ( $r_s$ ), (б) для различных соотношениях температур электронов и ионов при  $r_s = 1$



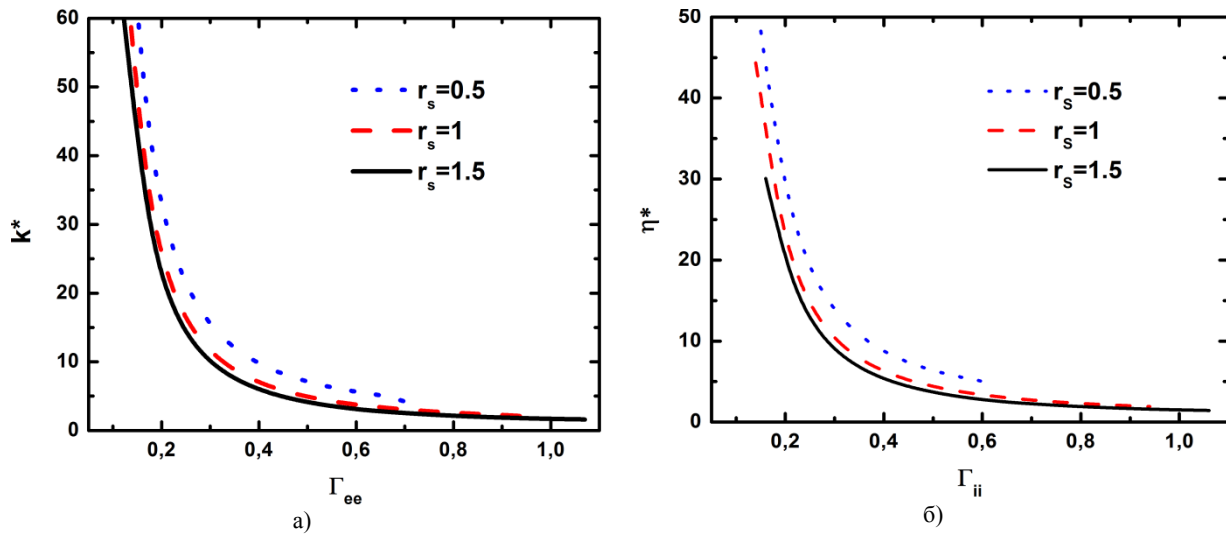


Рисунок 3 – Коэффициенты (а) теплопроводности и (б) вязкости в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ) для различных значений параметра плотности ( $r_s$ ),  $T_e = T_i$

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 ( $\Gamma$ ) 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.

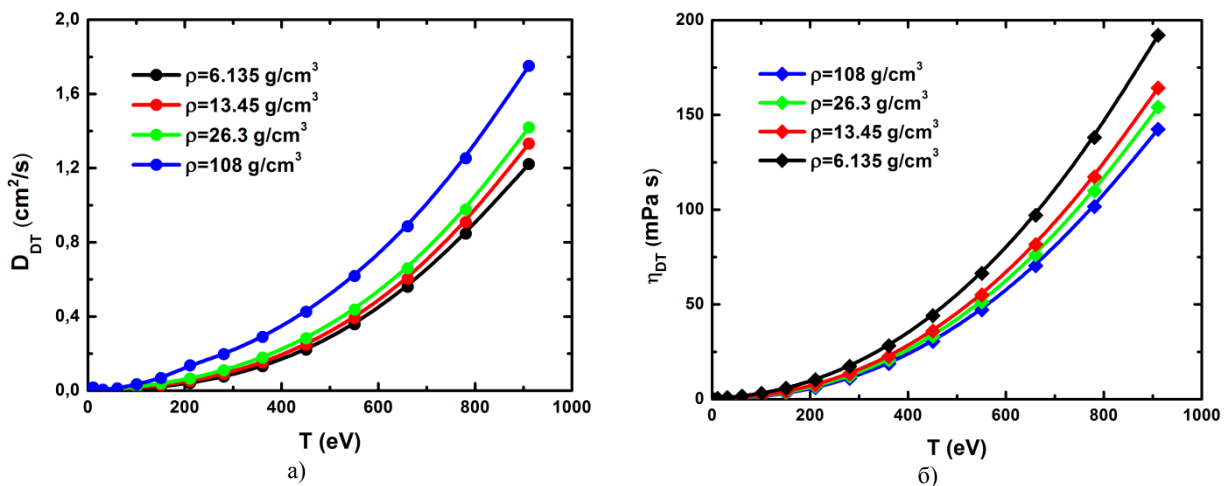


Рисунок 4 – Транспортные коэффициенты плотной ДТ плазмы в зависимости от температуры для различных значений плотностей: (а) диффузия, (б) вязкость

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 соответствует 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:

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

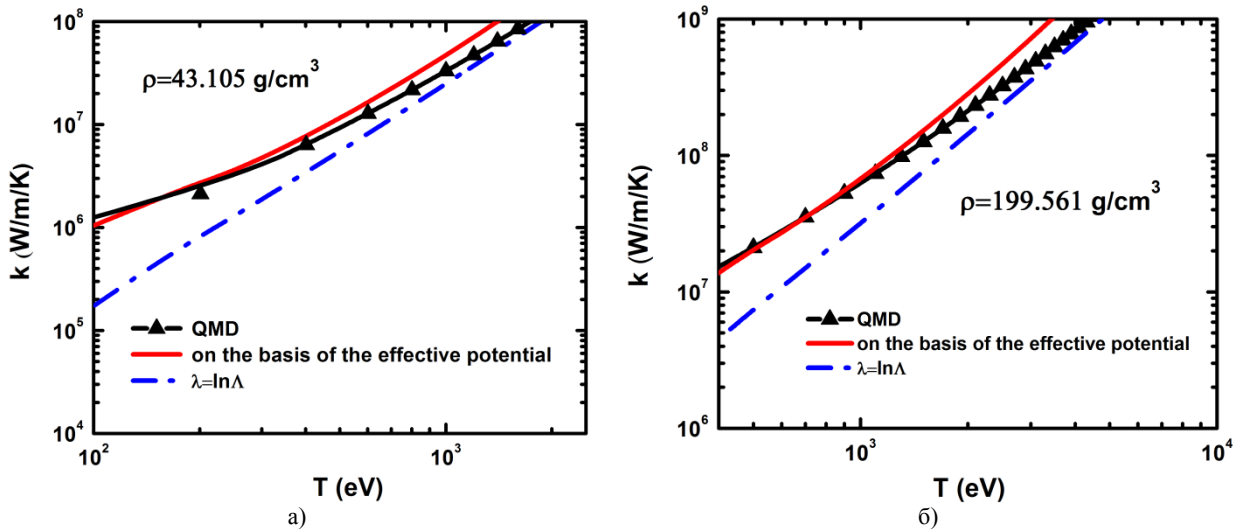


Рисунок 5 – Теплопроводности дейтериевой плазмы для эффективного потенциала взаимодействия (5) и КМД моделирования в зависимости от температуры при  $\rho = 43.105 \text{ g/cm}^3$  и  $\rho = 199.561 \text{ g/cm}^3$ .

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.

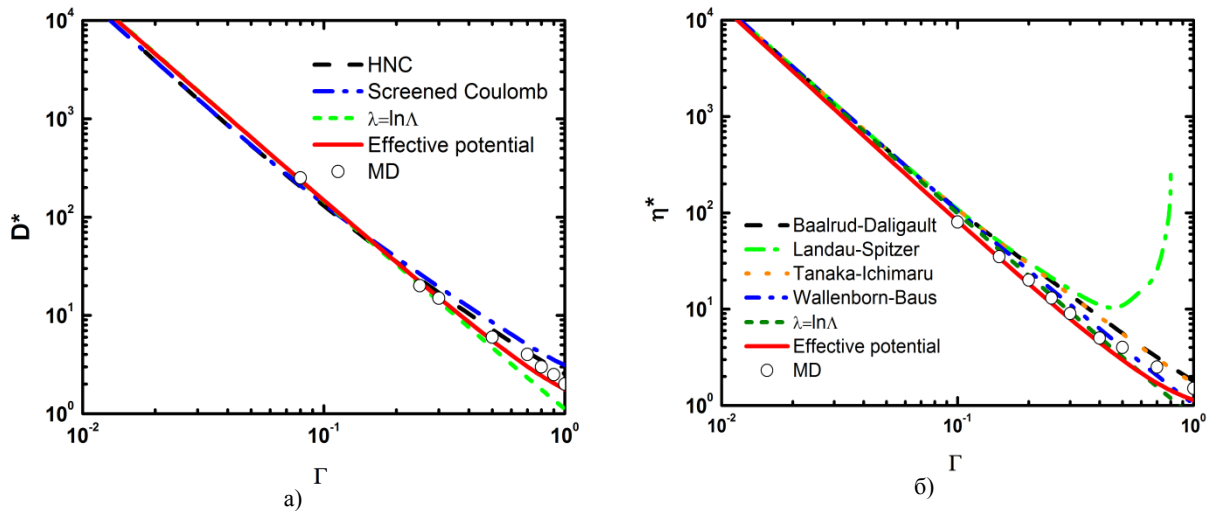


Рисунок 6 – Диффузия (а) и вязкость (б) плотной плазмы в зависимости от параметра связи ( $\Gamma$ ),  $T_e = T_i$ .

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.

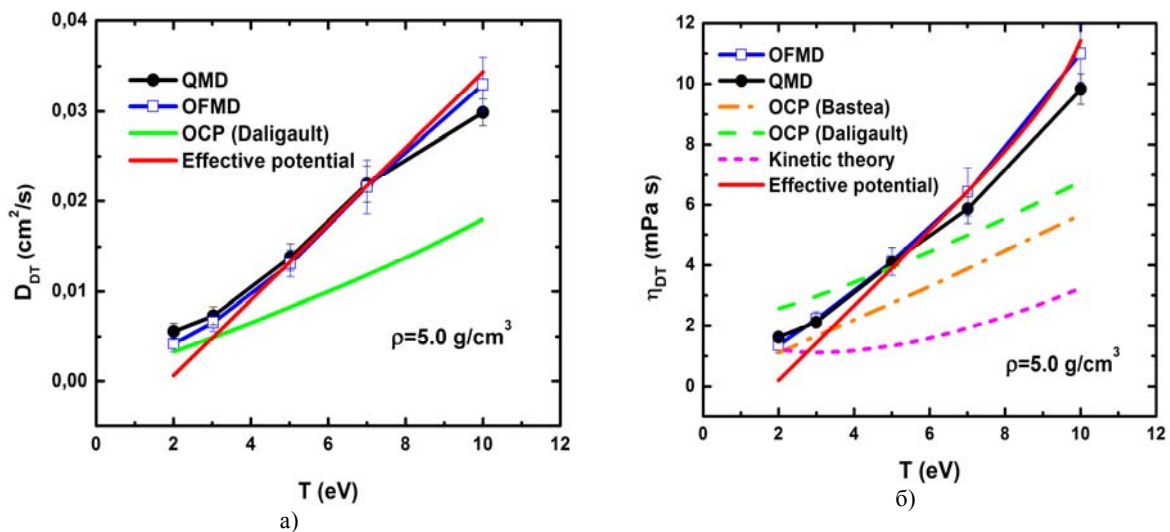


Рисунок 7 – Диффузия (а) и вязкость (б) ДТ плотной плазмы в зависимости от температуры при  $\rho = 5.0 \text{ g/cm}^3$

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. Schlanges (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. Рамазанов<sup>1</sup>, С.К. Коданова<sup>1</sup>, М.К. Исанова<sup>1</sup>, А. Тихонов<sup>2</sup>, М. Кайканов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ТФГЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> 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 квантты-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.

---



---

**МАЗМҰНЫ**
**Химия**

*Шадин Н.А., Anderson J. A., Закарина Н.А., Волкова Л.Д.* Ауыр вакуумдық газойль крекингіндегі монтмориллонитте алюминиймен пилларирленген цеолитқұрамды (HY+HZSM-5) катализатор..... 5

**Әлеуметтік ғылымдар**

*Құрманов Н.А., Сатбаева А.Ж., Рахимбекова А.Е., Махатова А.Б.* Адами потенциалының даму индексі: заманауи әлемдегі Қазақстанның орны..... 14

*Панзабекова А.Ж., Турабаев Г.К.* Система оплаты и стимулирования труда на предприятиях реального сектора Казахстана..... 20

*Турабаев Г.К., Несіпбеков Е.Н.* Білім беру ұйымдарының даму процесінің құрамдасы ретіндегі кадрлық резервпен жұмыс жасау..... 27

**Физика**

*Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Исанова М.К., Тихонов А., Кайканов М.* Инерциялық термоядролық синтез плазмасының транспорттық қасиеттері ..... 34

*Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Исанова М.К., Тихонов А., Кайканов М.* Инерциялық термоядролық синтез плазмасының транспорттық қасиеттері..... 43

**Химия**

*Мальшев В.П., Зубрина Ю.С., Макашева А.М.* Өзіндік ұйымдастыру үрдістерінің түсінігінде Больцман-Шеннон энтропиясының рөлі..... 53

*Комекова Н.М., Козлов В.А., Жұрынов М.Ж.* Қара сланецтен ванадийді күкүрт қышқылды атмосферлі-автоклавты шаймалау ..... 62

*Баешов А.Б., Адайбекова А.А., Абдувалиева У.А.* Молибден электродының натрий гидроксиді ерітіндісіндегі электрохимиялық қасиеті..... 70

**Жер туралы ғылымдар**

*Метакса Г.П., Чекушина Т.В., Молдабаева Г.Ж., Метакса А.С.* Байкал көлі – көмірсутектердің табиғи реакторы.. 77

**Биология**

*Хакімжанов А.А., Мамытова Н.С., Бескемпірова Ж.Д., Тілеген Б., Дәлелханқызы А., Кузовлев В.А., Айтхожина Н.Ө.* Бидайдың хитиназалық кешені және оның кейбір қасиеттері ..... 85

**Техникалық ғылымдар**

*Жирнова О.В., Тойгожинова А.Ж., Жакипов Ж., Туриканов Т.С., Оразалин А., Матенов Н.* Парниктік газдар шығарындыларын азайту автоматтандырылған басқару жүйесін жану процесі биогаз математикалық модельдерін әзірлеу..... 94

*Калдыбаева Б.М., Хусанов А.Е., Дмитриев Е.А., Сабырханов Д.С., Абильмағжанов А.З.* Хемосорбциялық аппаратта гидродинамикалық жағдайды және конструкциялық ерекшеліктерін ескере отырып ағындардың құрамын есептеу..... 106

**Қоғамдық ғылымдар**

*Аюпова З.К., Құсайынов Д.Ө.* Қазақ мәдениетіндегі білім беру жүйесінің бастаулары мәселесіне ..... 115

*Даулетбақов Б.Д., Примжарова К.К., Қонырбеков М.Ж.* Қазақстан республикасы өңірлерінде интеллектуалды әлеуетпен қамтамасыз ету саласындағы инновациялық қызмет деңгейін модельдеу және бағалау..... 122

*Қалдыбай Қ.Қ., Абдрасилов Т.Қ., Насимов М.Ө.* Заманауи қазақ ойшылдарының дінтанулық мұраларындағы адам мәселесі..... 131

*Магай Т.П.* Трансформация бизнес-білім беру: инновациялық тәсіл..... 141

*Мырзағалиева А.Б., Туктасинова А.А., Самарханова Т.Н., Акзамбек А.М.* Алтай қасқыржидегін (*Darphnealtaicarpall.*) *In vitro* мәдениетіне енгізу..... 151

*Ордабаева М.* Қазақстандағы емдік-сауықтыру туризм үрдістерінің мәселелер мен ағымдары..... 161

*Саткалиева Т.С.* Қазақстан энергетикалық секторының даму үрдістері ..... 167

*Берік А.Б.* Психикалық дамуы тежелген балаларды психологиялық қолдау..... 176

СОДЕРЖАНИЕ

**Химия**

*Шадин Н.А., Anderson J. A., Закарина Н.А., Волкова Л.Д.* Цеолитсодержащий (HY+HZSM-5) катализатор на пилларированном Al - монтмориллоните в крекинге утяжеленного вакуумного газойля..... 5

**Социальные науки**

*Курманов Н.А., Сатбаева А.Ж., Рахимбекова А.Е., Махатова А.Б.* Индекс развития человеческого потенциала: место Казахстана в современном мире..... 14

*Панзабекова А.Ж., Турабаев Г.К.* Система оплаты и стимулирования труда на предприятиях реального сектора Казахстана..... 20

*Турабаев Г.К., Несипбеков Е.Н.* Работа с кадровым резервом как составляющая процесса развития образовательных организаций..... 27

**Физика**

*Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Исанова М.К., Тихонов А., Кайканов М.* Транспортные свойства плазмы инерционного термоядерного синтеза..... 34

*Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Исанова М.К., Тихонов А., Кайканов М.* Транспортные свойства плазмы инерционного термоядерного синтеза..... 43

**Химия**

*Малышев В.П., Зубрина Ю.С., Макашева А.М.* Роль энтропии Больцмана-Шеннона в понимании процессов самоорганизации..... 53

*Комекова Н.М., Козлов В.А., Журинов М.Ж.* Серноокислотное атмосферно-автоклавное выщелачивание ванадия из черных сланцев..... 62

*Баешов А.Б., Адайбекова А.А., Абдувалиева У.А.* Электрохимическое поведение молибденового электрода в растворе гидроксида натрия..... 70

**Науки о Земле**

*Метакса Г.П., Чекушина Т.В., Молдабаева Г.Ж., Метакса А.С.* Озеро Байкал – природный реактор углеводородов..... 77

**Биология**

*Хакимжанов А.А., Мамытова Н.С., Бескемпирова Ж.Д., Тилеген Б., Далелханкызы А., Кузовлев В.А., Айтхожина Н.А.* Хитиновый комплекс пшеницы и некоторые его свойства..... 85

**Технические науки**

*Жирнова О.В., Тойгожинова А.Ж., Жакипов Ж., Туриканов Т.С., Оразалин А., Матенов Н.* Разработка математической модели для автоматизированной системы управления процессом сжигания биогаза для снижения выброса парниковых газов..... 94

*Калдыбаева Б.М., Хусанов А.Е., Дмитриев Е.А., Сабырханов Д.С., Абиьмагжанов А.З.* Расчет структуры потоков с учетом гидродинамической обстановки и конструктивных особенностей в хемосорбционном аппарате..... 106

**Общественные науки**

*Аюпова З.К., Кусаинов Д.У.* К вопросу об истоках системы образования в казахской культуре..... 115

*Даулетбаков Б.Д., Примжарова К.К., Конарбеков М.Ж.* Моделирование и оценка уровня инновационной деятельности в сфере обеспечения интеллектуальным потенциалом регионов республики Казахстан..... 122

*Калдыбай К. К., Абдрасилов Т.К., Насимов М.О.* Проблема человека в религиозном наследии современных казахских мыслителей..... 131

*Магай Т.П.* Трансформация бизнес-образования: инновационный подход..... 141

*Мырзагалиева А.Б., Туктасинова А.А., Самарханов Т.Н., Акзамбек А.М.* Введение в культуру *In vitro* волчегодника Алтайского (*Daphnealtaicapall*)..... 151

*Ордабаева М.* Современные проблемы и тенденции развития лечебно-оздоровительного туризма в Казахстане..... 161

*Саткалиева Т.С.* Тенденции развития энергетического сектора РК..... 167

*Берик А.Б.* Психологическое сопровождение детей с задержкой психического развития..... 176



## CONTENT

**Chemistry**

- Shadin N.A., Anderson J. A., Zakarina N. A., Volkova L.D.* Zeolite containing (HY+HZSM-5) catalyst on pillared Al-montmorillonite for cracking of weighted vacuum gas oil..... 5

**Social sciences**

- Kurmanov N., Satbayeva A., Rakhimbekova A., Makhatova A.* Human development index: place of Kazakhstan in the modern world..... 14
- Panzabekova A.Zh., Tyurabayev G.K.* The system of payment and stimulation of labor at real sector enterprises of Kazakhstan ..... 20
- Tyurabayev G.K., Nesipbekov Ye. N.* Work with personnel pool as a constituent of educational organizations development process .....27

**Physics**

- Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Issanova M.K., Tikhonov A., Kaikanov M.* Transport properties of inertial confinement fusion plasmas..... 34
- Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Issanova M.K., Tikhonov A., Kaikanov M.* Transport properties of inertial confinement fusion plasmas..... 43

**Chemistry**

- Malyshev V.P., Zubrina Y.S., Makasheva A.M.* The role of the boltzmann-Shannon entropy in understanding the processes of self-organization..... 53
- Komekova N.M., Kozlov V.A., Zhurinov M.Zh.* Sulfuric acid atmospheric pressure leaching of vanadium black shale..... 62
- Bayeshov A.B., Adaybekova A.A., Abduvaliyeva U.A.* Electrochemical behavior of electrodes of molybdenum in sodium hydroxide solution..... 70

**Earth sciences**

- Metaksa G.P., Chekushina T.V., Moldabaeva G.Zh., Metaksa A.S.* Lake Baikal - natural reactor of hydrocarbons..... 77

**Biologiya**

- Khakimzhanov A.A., Mamytova N.S., Beskempirova Zh.D., Tilegen B., Dalelhankhyzy A., Kuzovlev V.A., Aitkhozhina N.A.* Wheat chitinase complex and some of its properties..... 85

**Technical sciences**

- Zhirnova O.V., Toigozhinova A.Zh., Zhakipov Zh., Turikanov T.S., Orazalin A., Matenov N.* Development of mathematical models for automated control system combustion process biogas to reduce greenhouse gas emissions..... 94
- Kaldybaeva B.M., Khusanov A. E., Dmitriev E.A., Sabyrkhanov D.S., Abilmagzhanov A.Zh.* Calculation of the bubble diameter, taking into account the hydrodynamic conditions and structural features in the chemisorption apparatus..... 106

**Social Sciences**

- Ayupova Z.K., Kussainov D.U.* To the question about the sources of the system of education in kazakh culture..... 115
- Dauletbaev B.D., Primzharova K.K., Konyrbekov M. Zh.* Modeling and assessment of the level of innovative activity in the sphere of intellectual potential of regions of the republic of Kazakhstan.....122
- Kaldybay K.K., Abdrassilov T.K., Nassimov M.O.* The problem of human in the religious heritage of modern kazakh thinkers..... 131
- Magay T.P.* Transformation of business education: an innovative approach..... 141
- Myrzagaliev A.B., Tuktassinova A.A., Samarkhanov T.N., Akzambek A.M.* *In vitro* introduction of *daphne Altaica pall*..... 151
- Ordabayeva M.* Current issues and trends of the medical and health tourism in Kazakhstan ..... 161
- Satkalieva T.* Trends in energy sector of Kazakhstan..... 167
- Berik A.B.* Psychological support of children with mental retardation..... 176

### **Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

**ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)**

<http://www.reports-science.kz/index.php/ru/>

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов, Т.А. Апендиев*  
Верстка на компьютере *А.М. Кульгинбаевой*

Подписано в печать 09.12.2016.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
5,5 п.л. Тираж 2000. Заказ 6.