

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ**



**СЕРИЯ**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ**



**PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES**

**5 (303)**

**ҚЫРКҮЙЕК – ҚАЗАН 2015 ж.  
СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2015 г.  
SEPTEMBER – OCTOBER 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчекөв Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к е ң е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «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 №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

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

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

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

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

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 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

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

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

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 303 (2015), 165 – 171

**ENERGETIC CHARACTERISTICS OF IONS  
IN INERTIAL CONFINEMENT FUSION DENSE PLASMA****S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, M. K. Issanov**

IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: isanova\_moldir@mail.ru

**Key words:** stopping power, coulomb logarithm, effective potential, deposition time, energy loss.

**Abstract.** In this work energetic characteristics of ions in inertial confinement fusion dense plasma are investigated. The study is performed on the basis of the Coulomb logarithm using the effective interaction potential. The effective interaction potential which including both charge screening at large distance and quantum effects at short distance will be used. The Coulomb logarithm on the basis of the effective interaction potential of the particles is determined by the centre-of-mass scattering angle of the pair Coulomb collisions. The reaction involving the hydrogen isotopes deuterium and tritium (DT-cycle) are investigated. Calculations of the mean deflection angle of the ions, of the stopping time, as well as the range and penetration depth in DT plasma were carried out. The values of the stopping power and slowing down of the initial energy of the  $\alpha$ -particles under real conditions in the ICF target are calculated. A wide spectrum of species of heavy ions  $^{40}\text{Ca}^{13+}$ ,  $^{74}\text{Ge}^{18+}$ ,  $^{110}\text{Pd}^{26+}$ ,  $^{208}\text{Pb}^{30+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ,  $^{238}\text{U}^{33+}$  is investigated. The comparison of the calculated data for the ion stopping power with experimental and theoretical results of other authors is done.

УДК 533.93

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОВ В ПЛОТНОЙ  
ПЛАЗМЕ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА****С. К. Коданова, Т. С. Рамазанов, М. К. Исанова**

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

**Ключевые слова:** тормозная способность, кулоновский логарифм, эффективный потенциал, время торможения, потеря энергий.

**Аннотация.** В работе исследованы энергетические характеристики ионов в плотной плазме инерционного термоядерного синтеза. Исследование проведено на основе кулоновского логарифма с помощью эффективного потенциала взаимодействия частиц. При расчете кулоновского логарифма использован эффективный потенциал, который учитывает как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования на больших расстояниях. Кулоновский логарифм на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц определяется с помощью угла рассеяния центра масс при парном кулоновском столкновении. Исследована реакция с участием изотопов водорода: дейтерия и трития (DT-цикл). Выполнены вычисления среднего угла рассеяния, времени торможения, длины пробега и глубины проникновения иона в DT плазме. Вычислены значения тормозной способности и энергии торможения для альфа-частицы при реальных условиях в мишенях ИТС. Проведено исследование широкого спектра тяжелых ионов вида  $^{40}\text{Ca}^{13+}$ ,  $^{74}\text{Ge}^{18+}$ ,  $^{110}\text{Pd}^{26+}$ ,  $^{208}\text{Pb}^{30+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ,  $^{238}\text{U}^{33+}$ . Было проведено сравнение с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов по потере энергии ионов.

**Введение.** В последние годы значительное внимание исследователей привлекает изучение состояния вещества с высокими концентрациями энергии и, как следствие, с высокими давлениями и температурами. Особое место среди работ посвященных различным аспектам данной проблемы занимают исследования в области инерционного термоядерного синтеза (ИТС) 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 [1-2].

Потребность в новых теоретических и экспериментальных данных по торможению тяжелых ионов в плазме с электронной плотностью выше, необходимых для адекватного качественного описания процессов взаимодействия тяжелоионных пучков с плотной плазмой в широком диапазоне параметров, является принципиальным обоснованием актуальности исследований в области ИТС. Этой проблеме было посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ [3, 4]. Действительно, прохождение заряженных частиц через вещество мишени сопровождается разнообразными процессами взаимодействия с элементарными частицами, атомами. Поэтому моделирование тяжелых многозарядных ионов для инерциального термоядерного синтеза требует как качественного, так и количественного описания процессов взаимодействия тяжелых частиц с веществом в широком диапазоне параметров плотностей и температур.

**Тормозная способность и кулоновский логарифм.** Определяющим параметром при описании взаимодействия ионов с веществом является энергия налетающих частиц. Тормозная способность – параметр, характеризующий скорость потери средней энергии для быстро движущихся электронов или ионов плазмы. Следовательно, тормозная способность [5-6]:

$$\frac{dE}{dx} = 8\pi n \left( \frac{\mu_{\alpha\beta}}{m_{\beta}} \right) \cdot E_c \cdot b_{\perp}^2 \cdot \lambda_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

здесь  $E_c = \frac{1}{2} \mu_{\alpha\beta} v^2$  – энергия центра масс,  $v$  – относительная скорость пробной частицы,

$b_{\perp} = \frac{Z_{\alpha} Z_{\beta} e^2}{2E_c}$ ,  $\lambda_{\alpha\beta}$  – кулоновский логарифм (2).

При оценке энергетических характеристик ионов в плазме необходимо найти значения кулоновского логарифма. Кулоновский логарифм на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц определяется с помощью угла рассеяния центра масс при парном кулоновском столкновении [7-8]:

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

Угол рассеяния центра масс определяется как [7]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left( 1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$  - приведенная масса частиц сорта  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $b_\perp = Z_\alpha Z_\beta / (m_{\alpha\beta} v^2)$ . В качестве минимального прицельного параметра 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.

Использованы следующие безразмерные параметры:  $\Gamma = Z_\alpha Z_\beta e^2 / a k_B T$  - параметр связи, где  $Z_\alpha e, Z_\beta e$  - заряды частиц сорта  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $a = (3/4\pi n)^{1/3}$  - среднее межчастичное расстояние между частицами,  $r_s = a/a_B$  - параметр плотности,  $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e}$  - плазменная частота. В формуле (3)  $\Phi_{\alpha\beta}(r)$  - потенциал взаимодействия частиц и  $r_0$  определяется из уравнения:

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

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. Далее при расчете кулоновского логарифма будем использовать эффективный потенциал, учитывает как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования на больших расстояниях [9]:

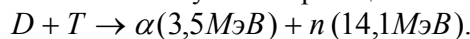
$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta}{r \sqrt{1 - (2\lambda_{\alpha\beta} / r_D)^2}} (\exp(-rB) - \exp(-rA)), \quad (5)$$

$$B^2 = \frac{1}{2\lambda_{\alpha\beta}^2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{2\lambda_{\alpha\beta}}{r_D} \right)^2} \right), \quad A^2 = \frac{1}{2\lambda_{\alpha\beta}^2} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{2\lambda_{\alpha\beta}}{r_D} \right)^2} \right),$$

где  $r_D$  - радиус экранирования Дебая,  $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$  - тепловая длина волны частиц,  $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$  - приведенная масса частиц. Для неизотермической плазмы появляется электрон-ионная характеристическая температура  $T_{ei}$  [10-11]. В работе [11] показано, что для корректного описания свойств плазмы электрон-ионная температура должна быть выражена в виде:  $T_{ei} = \sqrt{T_e T_i}$ .

**Энергетические характеристики ионов в плотной плазме.** Исследование процессов по торможению тяжелых ионов в плотной плазме инерционного термоядерного синтеза особо актуально [12].

Основой управляемого термоядерного синтеза является обеспечение протекания реакции слияния легких ядер. Наибольший интерес с этой точки зрения представляют реакции с участием изотопов водорода: дейтерия и трития (DT-цикл). Для термоядерного горения часть энергии синтеза должна быть вложена в топливо. В случае DT реакции



В этой реакции общая энергия равная 17.6 МэВ распределяется между  $\alpha$ -частицей с энергией 3.5 МэВ и нейтроном с энергией 14.1 МэВ. Чтобы поглотить энергию  $\alpha$ -частицы (3.5 МэВ), размеры топлива должны превышать длину ее пробега  $\rho r$ . Под пробегом ионов в веществе обычно понимают глубины их проникновения в вещество. Пробег частицы определяется следующим образом:

$$\rho r = \int_E^{E_0} \left( \frac{dE}{\rho dx} \right)^{-1} dE, \quad (6)$$

где значение тормозной способности  $\frac{dE}{dx}$  вычисляется согласно (1),  $E_0$  - начальная энергия частицы. Для более точного расчета конструкций термоядерной мишени необходимо также определить такие параметры, как средний угол рассеяния, время торможения, глубина проникновения иона. Время торможения иона в DT плазме определяется следующей формулой:

$$t_{dep} = \int_E^{E_0} \left( \frac{dE}{dt} \right)^{-1} dE, \quad (7)$$

Глубина проникновения иона с начальной энергии  $E_0$  можно вычислить следующим уравнением:

$$\rho x = \int_E^{E_0} \langle \cos \theta \rangle \left( \frac{dE}{\rho dx} \right)^{-1} dE. \quad (8)$$

В работе оценены время торможения, средний угол рассеяния, глубина проникновения, эффективный пробег частиц с различной энергией, образующихся в DT плазме. Время торможения иона в DT плазме с начальной энергией  $E_0 = 12 \text{ МэВ}$  приведено на рисунке 1. Результаты на графике показывают, что на время торможения влияют значение начальной энергии, плотность и температура топлива, но основной проблемой является процесс торможения иона до  $t_{dep} \leq 3 \text{ нс}$  при энергиях до 12 МэВ.

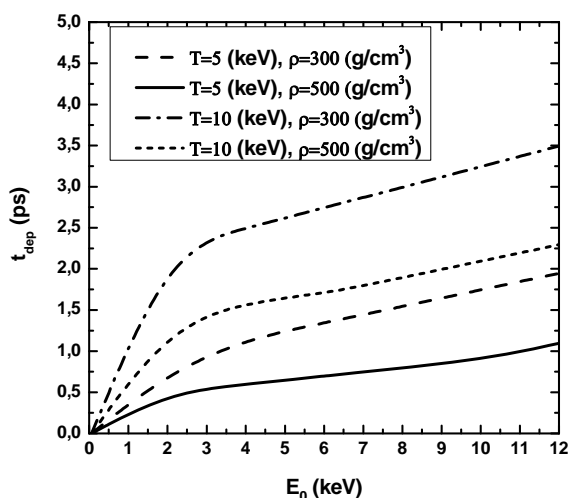


Рисунок 1 – Время торможения иона в DT плазме с начальной энергией  $E_0 = 12 \text{ МэВ}$

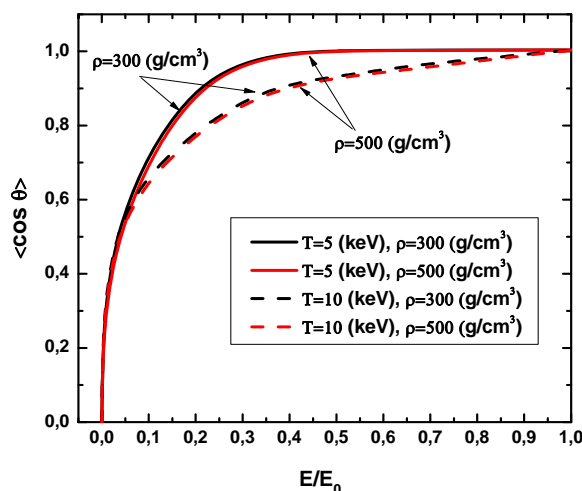


Рисунок 2 – Средний угол рассеяния иона в DT плазме с энергией  $E_0 = 12 \text{ МэВ}$

На рисунке 2 приведены значения среднего угла рассеяния иона с энергией  $E_0 = 12 \text{ МэВ}$ . Показано что, проходящий через мишень ион с начальной энергией  $E_0 = 12 \text{ МэВ}$  постоянно меняет направление, пока теряет свою энергию. Как видно из рисунка, плотность мишени не влияет на средний угол рассеяния, в отличие от температуры.

На рисунках 3, 4 приведены значения тормозной способности и энергии торможения для альфа-частицы при реальных условиях в мишенях ИТС.



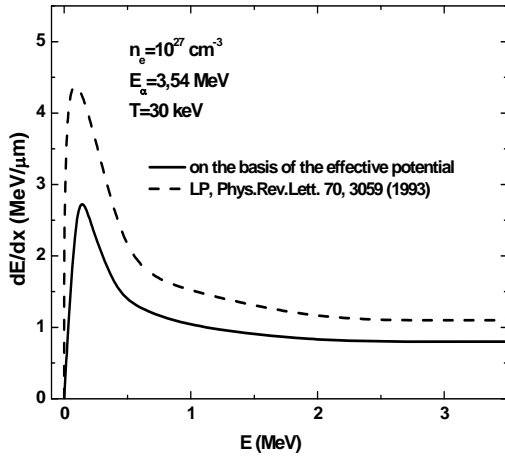


Рисунок 3 – Тормозная способность альфа- частицы в DT плазме с начальной энергией  $E_0 = 3.54 \text{ MeV}$

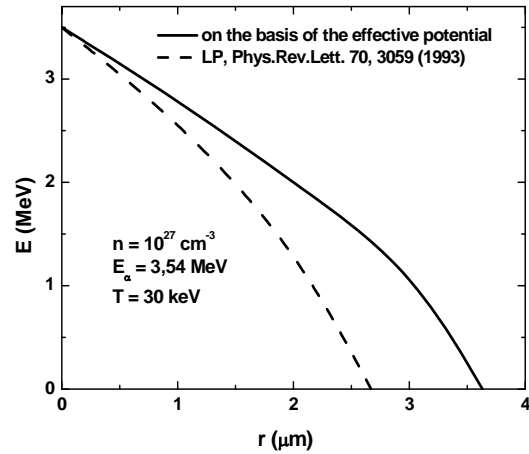


Рисунок 4 – Энергия торможения альфа-частицы с начальной энергией  $E_0 = 3.54 \text{ MeV}$  в реакции  $D + T \rightarrow \alpha + n$

Пробег  $\alpha$ -частицы с энергией 3.5 МэВ в плазме с температурой 30 кэВ составляет около 3 г/см<sup>2</sup>. Следовательно, для того, что бы реализовать эффективный самонагрев топлива за счет поглощения энергии  $\alpha$ -частицы, необходимо довести его до таких условий, когда  $\rho r > 3 \text{ г/см}^2$ .

На рисунках 5, 6 показаны зависимости длины пробега и глубины проникновения протонов с различной энергией от плотности и температуры мишени. Результаты показывают, что при более низкой температуре мишени  $T = 5 \text{ кэВ}$ , протоны могут сохранять свою энергию внутри мишени при  $\rho R < 1.2 \text{ г/см}^2$ . Однако, когда мишень становится более горячей  $T = 10 \text{ кэВ}$ , требуемая начальная энергия протона уменьшается до  $\leq 2 \text{ МэВ}$ , чтобы удовлетворить требуемую глубину оптимального осаждения.

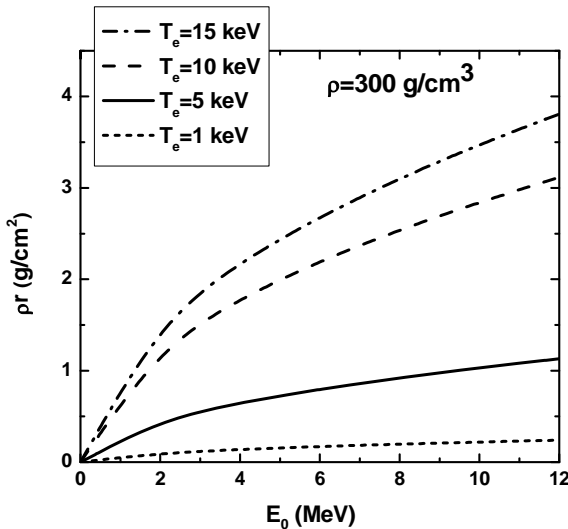


Рисунок 5 – Длина пробега протона в DT плазме при плотности  $\rho = 300 \text{ г/см}^2$

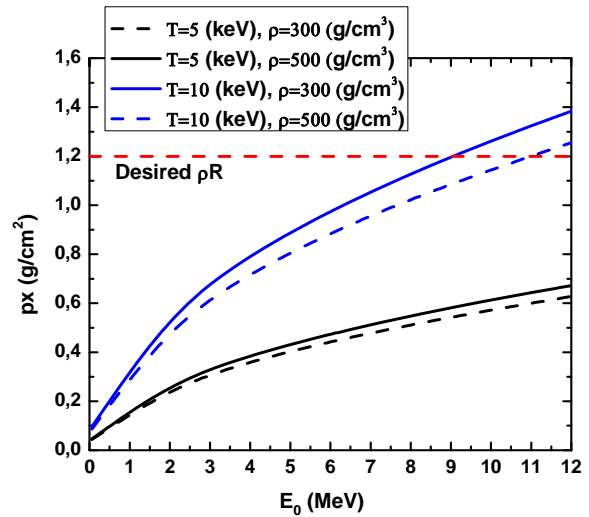


Рисунок 6 – Глубина проникновения протона в DT плазме при разных значениях плотности и температур

Исследование потери энергии заряженных частиц в плазме имеет большое значение для физики плазмы, также как для проблем инерционного синтеза [13, 14]. Действительно, проход заряженных частиц через мишень сопровождается множеством процессов взаимодействия с атомами. Природа и результаты этих взаимодействий зависят от типа энергии пучка заряженных частиц, а так же от типа, плотности, состава и размера мишени.

Первые систематизированные измерения тормозных потерь в плазме с высокой степенью ионизации были проведены на GSI -Дармштадт (Германия) для различных типов ионов – от  $^{40}\text{Ca}$  до  $^{238}\text{U}$  - с энергией 1,4 МэВ [13, 14]. Мишень, через которую направлялись пучки ионов для измерения энергетических потерь, представляла собой плазму сильноточного разряда в водороде с температурой  $T_e = 2\text{eV}$  и плотностью  $n_e = 4 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ . Кроме исследования широкого спектра тяжелых ионов вида  $^{40}\text{Ca}^{13+}$ ,  $^{74}\text{Ge}^{18+}$ ,  $^{110}\text{Pd}^{26+}$ ,  $^{208}\text{Pd}^{30+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ,  $^{238}\text{U}^{33+}$ , этот эксперимент [14] свидетельствует об увеличении заряда ионов  $Z_{\text{eff}}$  при прохождении через плазму.

Сравнение результатов численных вычислений на основе кулоновского логарифма с экспериментом приведены на рисунке 7. Из сравнения результата компьютерного моделирования с экспериментом [14] видно, что значения кулоновского логарифма на основе эффективного потенциала хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это можно объяснить учетом увеличения эффективного заряда ионов в эксперименте и изменения кулоновского логарифма в моделировании.

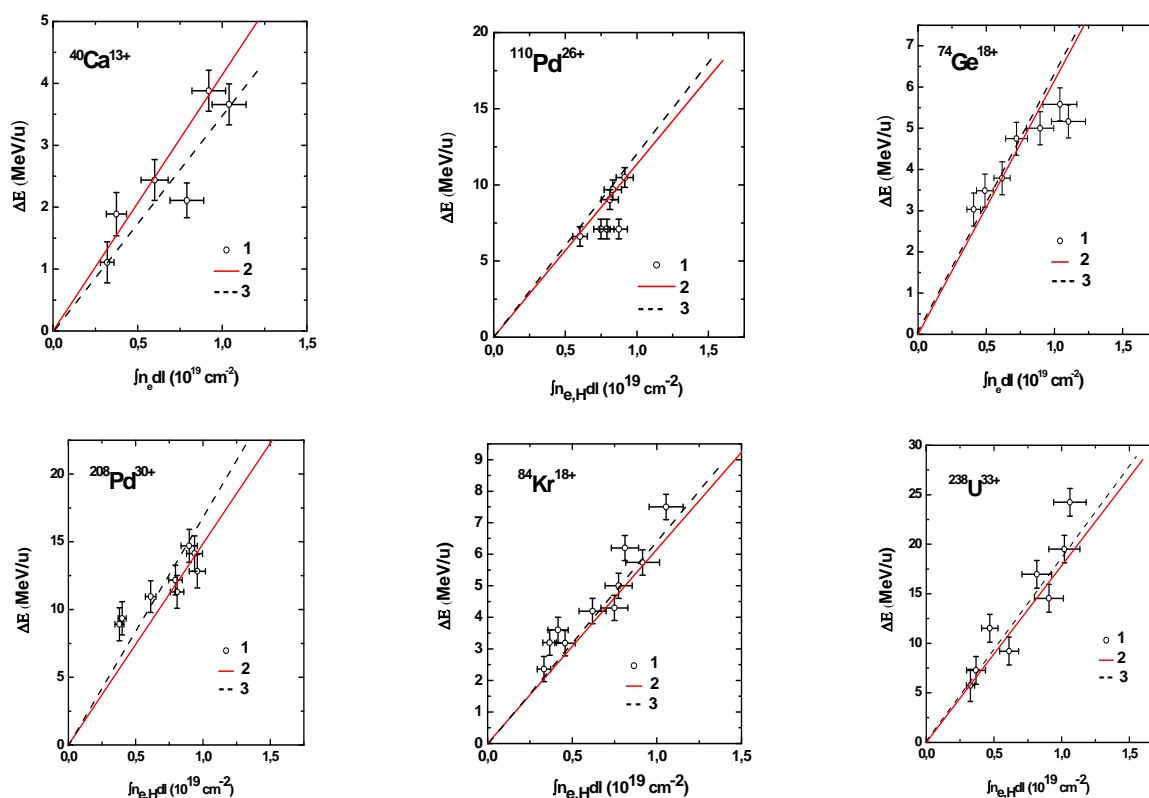


Рисунок 7 – Потеря энергий ионов  $^{40}\text{Ca}^{13+}$ ,  $^{74}\text{Ge}^{18+}$ ,  $^{110}\text{Pd}^{26+}$ ,  $^{208}\text{Pd}^{30+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ,  $^{238}\text{U}^{33+}$  в водородной плазме: 1 – эксперимент [14], 2 – на основе эффективного потенциала, 3 – формула Бете

**Заключение.** В соответствии с теоретическими представлениями плазма должна обладать более высокой тормозной способностью при одинаковой с неионизованным газом плотностью. Причинами этого являются, более высокий эффективный заряд и более высокое значение кулоновского логарифма. Таким образом, знание величин пробегов и профилей энерговыделения 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 ИГТ-1/ГФ4 2015.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.Е. Фортов. Экстремальные состояния вещества – М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2009. – 332 с.  
 [2] V.E. Fortov. Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos. – Berlin: Springer. - 2009. – 332 p.  
 [3] В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков // УФН. – 2008. – Т. 178. – №2. – P.114.  
 [4] M. Kulish, A. Golubev, A. Fertman, V. Turtikov, A. Tauschwitz // Review of Scientific Instruments. – 2001. – V. 74, - №5. P. 119.  
 [5] C.A. Ordonez, M.I. Molina // Phys. Plasmas. – 1994. – №1. - P. 2515.  
 [6] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova // Phys. Plasmas. 2001. – № 8. - P. 5049.  
 [7] G. Belyaev, M. Basko, A. Cherkasov, A. Golubev, A. Fertman, I. Roudskoy, S. Savin, B. Sharkov, V. Turtikov, A. Arzumanov, A. Borisenko, I. Gorlachev, S. Lysukhin, D. H. H. Hoffmann, and A. Tauschwitz // Phys. Rev. E. – 1996. - №.53. – P. 2701.  
 [8] A. Golubev, M. Basko // Phys. Rev E. – 1996. - № 53. - p. 2701-2707.  
 [9] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova // Contrib. Plasma Phys. -2015. – Vol.55, No. 2-3, p. 271 – 276.  
 [10] P. Seufferling, J. Vogel, and C. Toepffer // Phys. Rev. A. - 1989.-Vol. 40. - p. 323-329.  
 [11] R. Bredow, Th. Bornath, W.D. Kraeft, R. Redmer // Contrib. Plasma Phys. -2013. - Vol. 53. - p. 276-284.  
 [12] M. Mahdavi and T. Koohrokhi // Physical Review E. – 2012. Vol. 85. – P. 016405.  
 [13] J.R. Adams, N.S. Shilkin, V.E. Fortov, V.K. Gryaznov, V.B. Mintsev, R. Redmer, H. Reinholz, and G. Ropke // Phys. Plasmas. – 2007. - Vol. 14. - P. 062303.  
 [14] Hoffmann D.H.H. et al // Phys. Rev. 1990. - Vol. A 42. P. 2313.

## REFERENCES

- [1] V.E. Fortov. Extreme states of matter. *PHIZMATHLIT*, **2009**. 332 p. (in Russ.).  
 [2] V.E. Fortov. Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos. *Berlin, Springer*, **2009**. 332 p. (in Eng.).  
 [3] V.E. Fortov, D.H.H. Hoffmann, B.Yu. Sharkov. *UFN*. **2008**. T. 178, №2. P.114. (in Eng.).  
 [4] M. Kulish, A. Golubev, A. Fertman, V. Turtikov, A. Tauschwitz. *Review of Scientific Instruments*, **2001**. V. 74, №5. P. 119. (in Eng.).  
 [5] C.A. Ordonez, M.I. Molina. *Phys. Plasmas*, **1994**. 1, P. 2515. (in Eng.).  
 [6] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova. *Phys. Plasmas*, **2001**. 8, P. 5049. (in Eng.).  
 [7] G. Belyaev, M. Basko, A. Cherkasov, A. Golubev, A. Fertman, I. Roudskoy, S. Savin, B. Sharkov, V. Turtikov, A. Arzumanov, A. Borisenko, I. Gorlachev, S. Lysukhin, D. H. H. Hoffmann, and A. Tauschwitz. *Phys. Rev. E*. **1996**. 53, P. 2701. (in Eng.).  
 [8] A. Golubev, M. Basko. *Phys. Rev E*. **1996**. 53, p. 2701-2707. (in Eng.).  
 [9] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova. *Contrib. Plasma Phys.* **2015**. Vol. 55, No. 2-3, p. 271 – 276. (in Eng.).  
 [10] P. Seufferling, J. Vogel, and C. Toepffer. *Phys. Rev. A*. **1989**. Vol. 40. p. 323-329. (in Eng.).  
 [11] R. Bredow, Th. Bornath, W.D. Kraeft, R. Redmer. *Contrib. Plasma Phys.* **2013**. Vol. 53. p. 276-284. (in Eng.).  
 [12] M. Mahdavi and T. Koohrokhi. *Physical Review E*. **2012**. 85, P. 016405. (in Eng.).  
 [13] J.R. Adams, N.S. Shilkin, V.E. Fortov, V.K. Gryaznov, V.B. Mintsev, R. Redmer, H. Reinholz, and G. Ropke. *Phys. Plasmas*. **2007**. Vol. 14. P. 062303. (in Eng.).  
 [14] D.H.H. Hoffmann et al. *Phys. Rev. A*. **1990**. Vol. 42. P. 2313. (in Eng.).

ИНЕРЦИАЛДЫ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАСЫНЫҢ  
ИОНДАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

С. К. Коданова, Т. С. Рамазанов, М. К. Исанова

**Тірек сөздер:** тежегіштік қабілет, кулон логарифмы, эффективтік потенциал, тежелу уақыты, энергия жоғалтуы.

**Аннотация.** Жұмыста инерциалды термоядролық синтез тығыз плазмасының иондарының энергетикалық сипаттамалары зерттелді. Зерттеу Кулон логарифмы негізінде бөлшектердің өзара әсерлесуінің эффективтік потенциалын пайдалана отырып жүргізілді. Кулон логарифмын есептеуде үлкен ара-қашықтықта экрандалу эффектісін, кіші ара-қашықтықта дифракция және симметрия эффектісін ескеретін эффективтік потенциал қолданылды. Кулон логарифмі эффективтік потенциал негізінде қос кулондық соқтығысуда массалар центрінің шашырау бұрышы арқылы анықталады. Сутегі изотоптары: дейтерий мен тритий қатысу реакциясы (DT-цикл) зерттелді. Иондардың DT плазмасында орташа шашырау бұрышы, тежелу уақыты, жол ұзындығы, ену тереңдігі есептеулері орындалды. ИТС нысаналарында нақты жағдайдағы альфа-бөлшектердің тежегіштік қабілеті мен тежелу энергиясы есептелді. Проведено исследование широкого спектра тяжелых ионов вида  $^{40}\text{Ca}^{13+}$ ,  $^{74}\text{Ge}^{18+}$ ,  $^{110}\text{Pd}^{26+}$ ,  $^{208}\text{Pb}^{30+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ,  $^{238}\text{U}^{33+}$  түріндегі ауыр иондардың ауқымды спектрі зерттелді. Ионның тежегіштік қабілеті бойынша басқа авторлардың эксперименттік және теориялық нәтижелерінің есептеу мәліметтерімен салыстыру жүргізілді.

Поступила 15.15.2015 г.

---

**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 described work 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 Cross Check originality detection service <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)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 25.09.2015.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
11,0 п.л. Тираж 300. Заказ 5.