

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**

4 (308)

ШІЛДЕ – ТАМЫЗ 2016 ж.

ИЮЛЬ – АВГУСТ 2016 г.

JULY – AUGUST 2016

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 **Байғұнчечков 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 ең 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 / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

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 / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

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 3, Number 307 (2016), 73 – 85

UDC 533.93

**CROSS SECTION AND STOPPING POWER IN DENSE PLASMAS:
THE EFFECT OF DIFFRACTION AND DYNAMIC SCREENING**

**M.K. Issanova¹, S.K. Kodanova¹, T.S. Ramazanov¹, N.Kh. Bastykova¹,
M.T. Gabdullin², Zh.A. Moldabekov¹**

¹IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;
²NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
isanova_moldir@mail.ru

Key words: dense plasma, dynamical screening, scattering cross section, Coulomb logarithm, stopping power

Abstract. Classical electron-ion scattering, Coulomb logarithm, and stopping power were studied taking into account the quantum mechanical diffraction effect and the dynamic screening effect separately and together. Inclusion of the quantum diffraction effect is realized at the same level as the well-known first order gradient correction in the extended Thomas-Fermi theory. In order to include the effect of dynamic screening the model suggested by Grabowski et al. [Phys. Rev. Lett. 111, 215002 (2013)] is used. Scattering as well as stopping power of the external electron (ion) beam on plasma ions (electrons) and scattering of plasma own electrons (ions) on plasma ions (electrons) were considered differently. In the first case, it was found that in the limit of the non-ideal plasma, $\Gamma = e^2/ak_B T \rightarrow 1$, the effects of quantum diffraction and dynamic screening partially compensate each other. In the second case, the dynamic screening enlarges the scattering cross section, Coulomb logarithm and stopping power, whereas the quantum diffraction reduces their value. Comparisons with the results of the other theoretical methods and computer simulations indicate that the model used in this work gives good description of the stopping power for projectile velocities $v \leq 1.5 v_{th}$.

УДК 533.93

**СЕЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ И ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ
В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ: ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ДИФРАКЦИИ
И ДИНАМИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ**

**М.К. Исанова¹, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Н.Х. Бастыкова¹,
М.Т. Габдуллин², Ж.А. Молдабеков¹**

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан;
¹ННЛОТ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: плотная плазма, динамическое экранирование, сечение рассеяния, кулоновский логарифм, тормозная способность.

Аннотация. В этой работе исследованы электрон-ионное рассеяние, кулоновский логарифм и тормозная способность с учетом квантово-механического эффекта дифракции и динамического эффекта экранирования по отдельности и вместе. Квантовый эффект дифракции учитывается с помощью хорошо известной градиентной поправки первого порядка в обобщенной теории Томаса-Ферми. Для учета эффекта

динамического экранирования была использована модель, предложенная Грабовским и др. [Phys. Rev. Lett. 111, 215002 (2013)]. В работе рассматривались рассеяние, а также потери энергии пучка внешних электронов (ионов) на ионах (электронах) плазмы. Было обнаружено, что в пределе неидеальной плазмы, $\Gamma = e^2/ak_B T \rightarrow 1$, эффекты квантовой дифракции и динамического экранирования частично компенсируют друг друга. Показано, что динамическое экранирование приводит к увеличению значения сечения рассеяния, кулоновского логарифма и тормозной способности, в то время как учет квантового эффекта дифракции уменьшает их значение. Сравнения с результатами других теоретических методов и компьютерного моделирования показывают, что модель, используемая в этой работе, дает хорошее описание тормозной способности для скоростей налетающих частиц $v \leq 1.5 v_{th}$.

Введение. В настоящее время плотная плазма является предметом активных теоретических исследований [1-8]. В частности, эти исследования актуальны в связи с экспериментами NIF (National Ignition Facility) [9] и экспериментами на Z-пинче в Сандиа [10]. Для получения термоядерной реакции в вышеуказанных объектах, необходимо изучить такие динамические свойства, как тормозная способность [11-15], теплопроводность и электропроводность плотной плазмы. Все эти процессы требуют понимания микроскопических процессов в плотной плазме.

В этой работе мы рассмотрим классическое электрон-ионное рассеяние, кулоновский логарифм и тормозную способность для частиц плазмы и частиц внешнего налетающего пучка. Для описания силы электрон-ионного взаимодействия при столкновении, был использован параметр связи, равный отношению характерной энергии парного взаимодействия между частицами к кинетической энергии налетающей частицы, $\beta = Z_{ion} e^2 / (\lambda_D m v^2)$, где λ_D - длина экранирования, Z_{ion} - число заряда иона, $m v^2$ описывает начальную кинетическую энергию налетающей частицы расположенной далеко от мишени. При низких скоростях пучка, кинетическая энергия сводится к тепловой энергии электронов со скоростью $v_{th} = \sqrt{k_B T / m_e}$. Так как рассматривается слабосвязанная плазма, рассеяние электронов плазмы на ионе характеризуется малым параметром связи $\beta < 1$, в то время как рассеяние электрона (иона) внешнего пучка на ионе (электроне) плазмы не имеет такого ограничения.

Квантовый эффект дифракции учитывается при помощи квазиклассического потенциала [16-17], в то время как динамический эффект экранирования - простой перенормировкой длины экранирования [9]. Влияние этих эффектов исследуется по отдельности, а затем рассматривается воздействие обоих эффектов, одновременно.

Во втором разделе рассматривается эффективный потенциал электрон-ионного взаимодействия с учетом квантового эффекта дифракции, а также экранирования окружающей плазмы. В третьем разделе исследованы процессы рассеяния в плотной горячей плазме. В четвертом разделе изучаются кулоновский логарифм и тормозная способность.

Экранированный потенциал взаимодействия. Квазиклассический потенциал взаимодействия частиц без учета экранирования имеет следующий вид [17]:

$$\phi_{ab} = \frac{e_a e_b}{r} (1 - \exp(-r/\lambda_{ab})), \quad (1)$$

где $\lambda_{ab} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{ab} k_B T}$ - тепловая длина волны, $m_{ab} = m_a m_b / (m_a + m_b)$, T - температура, a и b обозначают электрон или ион.

Тщательное исследование процессов рассеяния в плазме требует принятия во внимание экранирования зарядов [22]. Для того чтобы получить экранированный эффективный потенциал используется хорошо известная формула для эффективного потенциала в пространстве Фурье:

$$\tilde{\Phi}_{ab}(k) = \frac{\tilde{\phi}_{ab}(k)}{\varepsilon(k)}, \quad (2)$$

где $\tilde{\phi}_{ab}(k)$ - Фурье преобразование потенциала (1), $\varepsilon(k)$ - статическая диэлектрическая проницаемость плазмы в приближении линейного отклика:

$$\varepsilon(k) = 1 + \frac{n_e}{k_B T} \tilde{\phi}_{ee}(k) + \frac{n_i}{k_B T} \tilde{\phi}_{ii}(k). \quad (3)$$

Для учета квантового эффекта дифракции, в уравнении (3) используем квантовый потенциал Дойча (1) для электрон-электронного взаимодействия. Статическая диэлектрическая проницаемость плазмы в приближении линейного отклика имеет вид [16]:

$$\varepsilon(k) = 1 + \frac{k_e^2}{(\tilde{\lambda}^2 k^2 + 1)k^2} + \frac{k_i^2}{k^2}. \quad (4)$$

здесь ионы рассматриваются как точечные частицы $\tilde{\lambda}_{ii} = 0$ и $k_i = \sqrt{4\pi n_i e^2 / k_B T}$, $k_e = \sqrt{4\pi n_e e^2 / k_B T}$.

Из уравнения (1)-(4), выполняя обратное Фурье преобразование, получен следующий эффективный потенциал для электрон-ионного взаимодействия [16]:

$$\Phi_{ei}(r) = -\frac{e^2 Z_{ion}}{\tilde{\lambda}_{ei}^2 \gamma^2 \sqrt{1 - (2k_D / \tilde{\lambda}_{ei} \lambda)^2} r} \times \left(\frac{1/\tilde{\lambda}_{ee}^2 - B^2}{1/\tilde{\lambda}_{ei}^2 - B^2} \exp(-rB) - \frac{1/\tilde{\lambda}_{ee}^2 - A^2}{1/\tilde{\lambda}_{ei}^2 - A^2} \exp(-rA) \right) + \frac{e^2 Z_{ion}}{r} \exp(-r/\tilde{\lambda}_{ei}), \quad (5)$$

где $\gamma^2 = 1/\tilde{\lambda}_{ee}^2 + k_i^2$, $k_D = (k_e^2 + k_i^2)^{1/2} = 1/\lambda_D$ обратная длина экранирования,

$$B = \left(\sqrt{1 - \sqrt{1 - (2k_D / \tilde{\lambda}_{ei} \gamma)^2}} \right) / \gamma, \quad A = \left(\sqrt{1 + \sqrt{1 - (2k_D / \tilde{\lambda}_{ei} \gamma)^2}} \right) / \gamma. \quad (6)$$

Если пренебречь эффектом квантовой дифракции, уравнение (5) превращается в хорошо известный потенциал Дебая (Юкавы):

$$\Phi_{ei}(r) = -\frac{e^2 Z_{ion}}{r} \exp(-r/\lambda_D). \quad (7)$$

Если вкладом ионов (третий член) в уравнении (4) можно пренебречь, то обратное значение диэлектрической функции записывается в виде:

$$\varepsilon(k)^{-1} = \frac{k^2 (1 + \tilde{\lambda}_{ee}^2 k^2)}{k^2 + k_{De}^2 + \tilde{\lambda}_{ee}^2 k^4} \quad (8)$$

где $k_{De}^2 = 4\pi n_e e^2 / k_B T_e$ - параметр экранирования за счет электронов.

Недавно было получено точное разложение обратной величины диэлектрической функции Линдхарда для электронов в длинноволновом пределе [18]. Результат второго порядка этого разложения имеет следующий вид:

$$\varepsilon_2(k)^{-1} = \frac{k^2 \left(1 + \frac{\tilde{a}_2}{\tilde{a}_0} k^2 \right)}{k^2 + k_Y^2 + \frac{\tilde{a}_2}{\tilde{a}_0} k^4}. \quad (9)$$

где для $\tilde{a}_2 / \tilde{a}_0$

$$\frac{\tilde{a}_2}{\tilde{a}_0} = \frac{I_{-3/2}(\eta)}{12\theta k_F^2 I_{-1/2}^2(\eta)}. \quad (10)$$

здесь $k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}$, I_ν - интеграл Ферми порядка ν , $\eta = \mu/k_B T$ - химический потенциал электронов, $k_Y^2 = k_{TF}^2 \theta^{1/2} I_{-1/2}(\eta)/2$ - длина экранирования, интерполяция между Дебаем и разложением Томаса-Ферми, $\theta = k_B T/E_F$ - параметр вырождения, который определяет, является ли плазма вырожденной или классической.

С точки зрения теории функционала плотности, диэлектрическая функция (9) учитывает градиентную поправку первого порядка к кинетической энергии невзаимодействующих электронов [18-19]. Это связано с квантовым эффектом дифракции или согласно с Данн и Бройлес [20] квантовым эффектом туннелирования, что позволяет частицам достигать областей, недоступных для классических частиц.

Результат второго порядка диэлектрической функции разложения Линдхарда (9) имеет тот же вид, что и уравнение (8), разница лишь в постоянных коэффициентах. Это позволяет сделать вывод о том, что включение квантового эффекта дифракции осуществляется на том же уровне, что и хорошо известная градиентная поправка первого порядка в обобщенной теории Томаса-Ферми. Кроме того, это позволяет обобщить эффективный потенциал парного взаимодействия (5), в случае плазмы с вырожденными электронами заменой $\tilde{\lambda}_{ee}$ и k_{De} на $\sqrt{\tilde{a}_2/\tilde{a}_0}$ и k_Y , соответственно.

В пределе $\theta \gg 1$, коэффициент $\sqrt{\tilde{a}_2/\tilde{a}_0}$ равен $\hbar/\sqrt{12m_e k_B T_e}$, который отличается от тепловой волны и используется в квантовом потенциале парного взаимодействия (1) в работах Дойча [17], Данна [20], и Келбга [21]. Здесь необходимо иметь в виду тот факт, что диэлектрическая функция Линдхарда не учитывает неидеальность плазмы, в то время как тепловая длина волны в эффективном потенциале парного взаимодействия получен в результате квазиклассического рассмотрения слабонеидеальной плазмы. В частности, недавно было показано, что квантовый потенциал парного взаимодействия в виде уравнения (1) правильно воспроизводит вклад Монтролл-Ворда для уравнения состояния плазмы в пределе $\tilde{\lambda}_{ee} k_D \ll 1$. В этой работе используется эффективный потенциал (5) для изучения процесса рассеяния и тормозной способности, поскольку мы рассматриваем слабосвязанную квазиклассическую плазму,

На рисунке 1 показан эффективный экранированный потенциал взаимодействия (5). Эффективный потенциал (5) учитывает эффект экранирования на больших расстояниях и квантовый эффект дифракции - на малых.

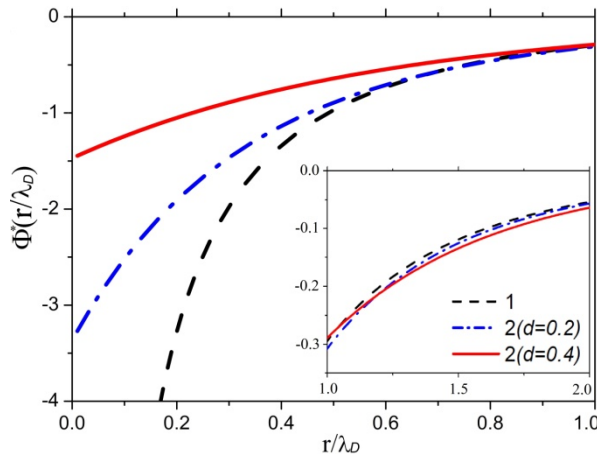


Рисунок 1 – Эффективный потенциал взаимодействия в единицах тепловой энергии $k_B T$:

1 – потенциал Юкава (7), 2 – эффективный потенциал (5) при разных значениях параметра $d = \tilde{\lambda}_{ei}/\lambda_D$.

Для того, чтобы принять во внимание эффект динамического экранирования мы используем способ, предложенный на основе данных моделирования методом молекулярной динамики [5]. Согласно этой работе длина экранирования записывается в виде:

$$\lambda_D \rightarrow \lambda_D \sqrt{1 + (\nu/\nu_{th})^2 (1 + \Gamma^3)^{1/4}}, \quad (11)$$

здесь $\nu_{th} = \sqrt{k_B T / m_e}$, и $\Gamma = e^2 / ak_B T$ - параметр неидеальности плазмы.

Такая процедура перенормировки была впервые предложена Звикнагелем [23] ($\lambda_D \sqrt{1 + (\nu/\nu_{th})^2}$), формула (11) расширяет их подход для случая сильно связанной плазмы. Недавно в работе Джумагуловой и др. [24] была использована процедура перенормировки Звикнагеля для расчета сечения рассеяния в первом приближении Борна.

Далее эффективный потенциал с перенормированной длиной экранирования будет упоминаться как динамический экранированный потенциал.

Процесс электрон-ионного рассеяния. Классический угол рассеяния для двух частиц с массами m_1, m_2 и с потенциалом взаимодействия $U(r)$ для заданного прицельного параметра ρ равен следующему выражению:

$$\chi(\rho) = |\pi - 2\varphi(\rho)|, \quad (12)$$

где

$$\varphi(\rho) = \rho \int_{r_{min}}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \sqrt{1 - U_{eff}(r, \rho)}}, \quad (13)$$

$E = m\nu^2/2$, U_{eff} - эффективный потенциал взаимодействия в единицах кинетической энергии налетающей частицы имеет следующий вид:

$$U_{eff}(r, \rho) = \frac{\rho^2}{r^2} + \frac{2U(r)}{m\nu^2}, \quad (14)$$

Эффективный потенциал (14) учитывает центробежную силу. В формуле (13) r_{min} соответствует минимальному расстоянию при заданном ρ и получена из уравнения $U_{eff}(r_{min}, \rho) = 1$. Используя $\chi(\rho)$, сечение рассеяния $\sigma(\beta)$ была получена из известной формулы:

$$\sigma = 2\pi \int_0^{\infty} (1 - \cos \chi(\rho)) \rho d\rho. \quad (15)$$

В качестве потенциала $U(r)$ мы взяли экранированный потенциал электрон-ионного взаимодействия (5). Процесс рассеяния описывается параметром связи β и параметром $d = \lambda_{ei} / \lambda_D$, т.е. отношением тепловой волны на радиус Дебая. Угол рассеяния и сечение рассеяния получены на основе эффективного потенциала (5) с учетом динамического экранирования и без учета представлены ниже. Приведены сравнения угла рассеяния и сечение рассеяния, полученного на основе потенциала Юкавы (7).

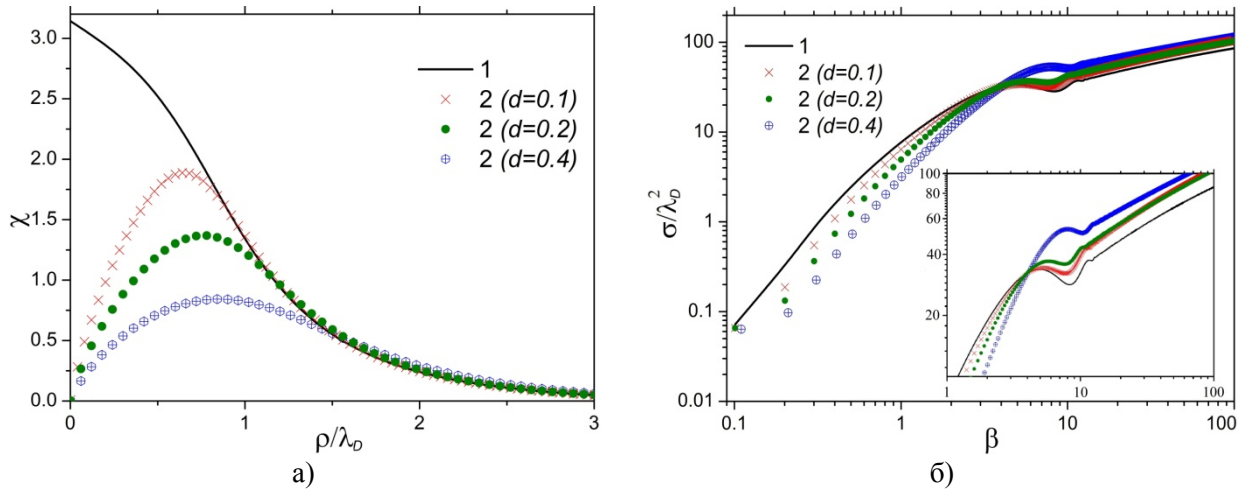


Рисунок 2 – а) углы рассеяния при $\beta = 0.8$ полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5) (2). б) сечения рассеяния при $\Gamma = 0.8$, полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5)

а.: Влияние квантового эффекта дифракции.

Прежде всего, на рисунке 2 показаны угол рассеяния и сечение рассеяния для потенциала Юкавы и эффективного потенциала (5) без динамического экранирования. Видно, что и угол рассеяния и сечение рассеяния уменьшается с увеличением параметра d для $\beta < 5$. Угол рассеяния близок к нулю при $\rho \rightarrow 0$, возможная дифракция налетающей частицы на частицы мишени при малых прицельных параметрах связано с конечными значениями эффективного потенциала взаимодействия на малых межчастичных расстояниях. Ранее мы получили этот эффект в работе [3], где рассматривается влияние квантового эффекта дифракции на транспортные свойства при $\beta < 1$. Здесь мы продолжим наши расчеты в пределе сильной связи. Напротив, при $\beta > 5$ сечение рассеяния возрастает с увеличением параметра d . Такое поведение можно объяснить тем, что при сильной связи происходит рассеяние на большом расстоянии от юкавовского типа хвоста эффективного потенциала (5) [29, 30]. Квантовый эффект нелокальности делает экранирование на больших расстояниях слабее, по сравнению с классическим случаем (7) (см. Рис.1), в результате чего, в пределе сильной связи $\beta > 5$ сечение рассеяния растет с увеличением влияния квантового эффекта дифракции.

б.: Влияние динамического экранирования.

Здесь, мы учитываем как квантовый эффект дифракции, так и динамический эффект экранирования. Рассмотрим сначала рассеяние внешнего пучка электронов (ионов) на ионах (электронах) плазмы. Таким образом, два параметра Γ и β являются независимыми друг от друга. При $\beta < 1$ обнаружено, что когда значение параметра Γ становится равны единице, квантовый эффект дифракции и динамический эффект экранирования компенсируют друг друга и вместе дают почти нулевой эффект. Таким образом, эффективный потенциал (5) с перенормированным параметром экранирования дает примерно такое же сечение рассеяния (пунктирная линия на рис. 3(б)), что и потенциал Юкавы (7) (сплошная линия на рис. 3(б)). Как видно на рисунке 3, где λ_D^* является перенормированным параметром экранирования и $\Gamma = 0.8$, $d = 0.4$ для $\beta \gg 1$ эффект динамического экранирования можно не учитывать.

При малых значениях Γ динамическое экранирование и квантовый эффект дифракции не могут компенсировать друг друга, как это показано на рисунке 4, где расчеты проводились для $\Gamma = 0.2$ и $\Gamma = 0.4$. Динамическое экранирование имеет тенденцию к увеличению поперечного

сечения, в то время как квантовый эффект дифракции приводит к уменьшению поперечного сечения.

в.: Влияние динамического экранирования на рассеяние частиц плазмы.

Рассмотрим электрон-ионное рассеяние в плазме, где $\beta < 1$, а рассеяние обусловлено тепловым движением частиц. Здесь параметр Γ зависит от β , как $\Gamma = (\beta/Z_{ion})^{2/3} 6^{-1/3}$. Как видно из рисунка 5(а) общее поведение отмечено выше, динамический эффект экранирования делает сечение больше, а квантовая дифракция делает сечение рассеяния меньше. Таким образом, квантовый эффект дифракции и динамическое экранирование имеют противоположное влияние на рассеяние при $\beta < 1$.

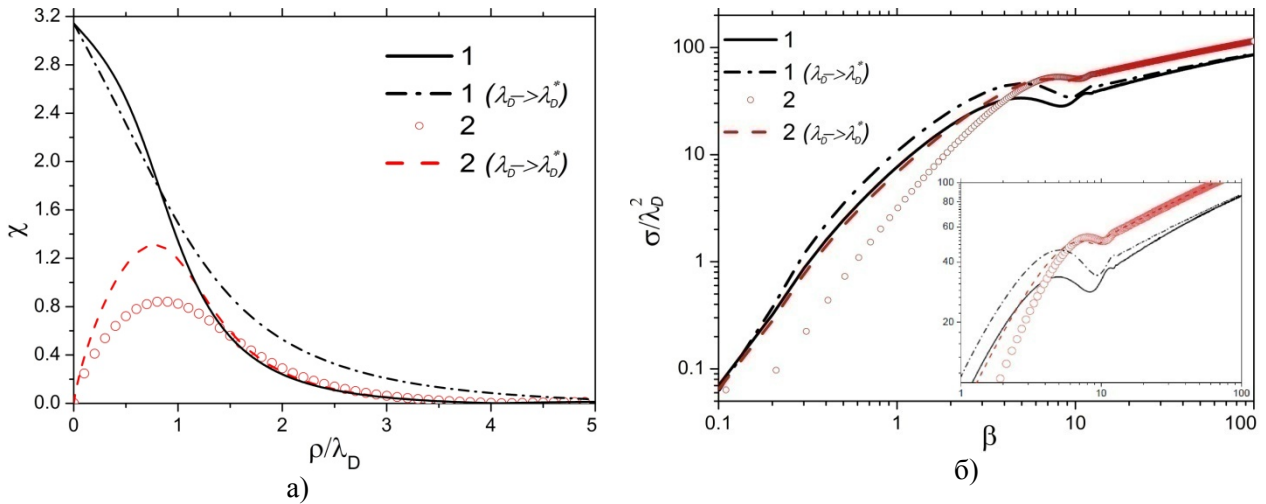


Рисунок 3 – а) углы рассеяния при $\beta = 0.8$, полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5).
 б) сечения рассеяния при $\Gamma = 0.8$, $d = 0.4$, полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5).

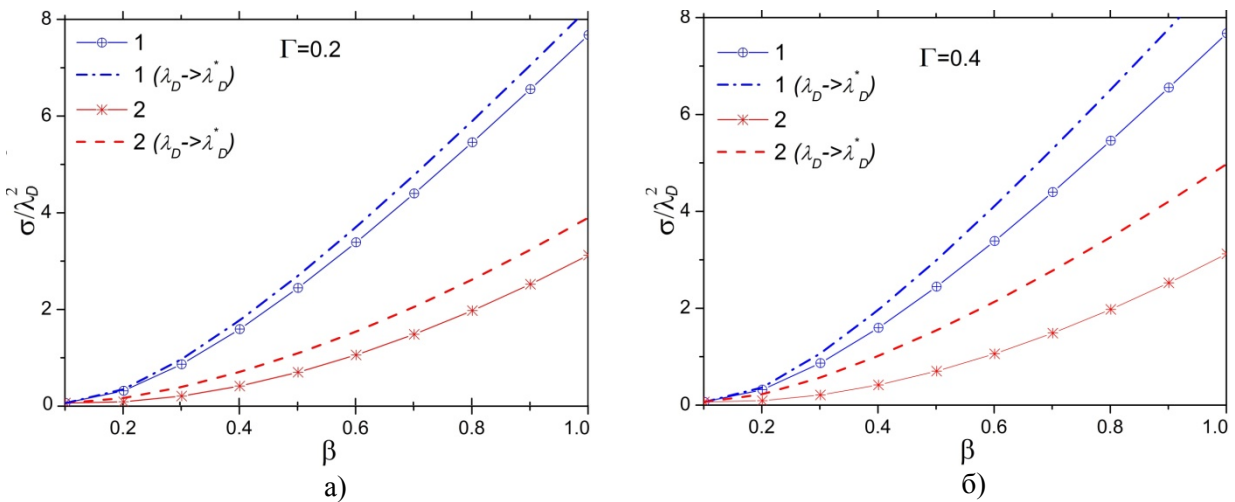


Рисунок 4 – сечения рассеяния при $d = 0.4$ и а) $\Gamma = 0.2$ б) $\Gamma = 0.4$, полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5)

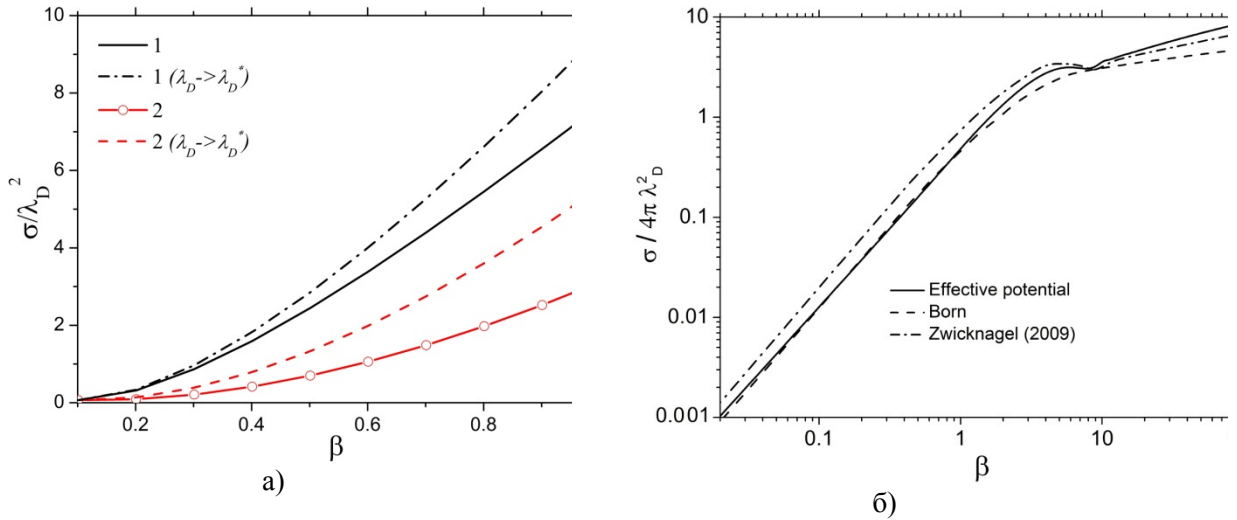


Рисунок 5 – а) Сечения рассеяния при $\Gamma = (\beta/Z_{ion})^{2/3} 6^{-1/3}$ и $d = 0.4$, полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала (5).
 б) Сечения рассеяния на основе эффективного потенциала (5) (сплошная линия), в приближении Борна первого порядка (пунктирная линия) [27] и результат Зwickнагеля [27] (штрихпунктирная линия), полученные в рамках классического рассеяния частиц на основе потенциала Юкавы при $\Gamma = 0.1$, $d = 0.2$. В обозначениях Зwickнагеля [27] сечение рассчитывается для параметра $k = Ze^2 \mu_{ei} \lambda_D / \hbar^2 = 1$, где μ_{ei} приведенная масса.

Рисунок 5(б) показывает сравнение сечения рассеяния, полученные на основе эффективного потенциала (5) (без перенормировки длины экранирования) с сечением рассеяния, рассчитанным в первом приближении Борна и с данными Зwickнагеля [27], полученные в приближении классического рассеяния частиц, взаимодействующих через потенциал Юкавы. Как видно из рисунка 5(б), эффективный потенциал (5) дает хорошее согласие с борновским приближением при низких значениях параметра связи β . Это указывает на то, что квантовый эффект дифракции правильно описывается эффективным потенциалом (5).

Эти особенности сечения рассеяния позволяют понять зависимость кулоновского логарифма и тормозной способности в квазиклассической плазме при параметрах β и d , и как кулоновский логарифм и тормозная способность связаны с сечением рассеяния $E_C \sim \Lambda_{ei} \sim \int \sin^2(\chi/2) \sigma' d\Omega$ (здесь Ω угол рассеяния, σ' дифференциальное сечение рассеяния).

Кулоновский логарифм и тормозная способность. Одним из наиболее важных параметров, используемых, для описания взаимодействия ионов с веществом является энергия налетающих частиц. Тормозная способность – параметр, характеризующий скорость потери средней энергии быстро движущихся электронов или ионов плазмы. Следовательно, тормозная способность в приближении парного столкновения [31-32]:

$$\frac{dE}{dx} = 8\pi m \left(\frac{\mu_{ei}}{m_i} \right) \cdot E_C \cdot b_{\perp}^2 \cdot \Lambda_{ei}, \tag{16}$$

здесь $E_C = \frac{1}{2} \mu_{ei} v^2$ - энергия центра масс сталкивающихся частиц, v - относительная скорость рассеянной пробной частицы, $b_{\perp} = Z_{ion} e^2 / (2E_C)$, Λ_{ei} - кулоновский логарифм (33-34).

Кулоновский логарифм на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц определяется с помощью угла рассеяния при парном кулоновском столкновении. Вводя центр масс в процесс столкновения, кулоновский логарифм записывается в виде [33, 34]:

$$\Lambda_{ei} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{\infty} \sin^2\left(\frac{\chi(\rho)}{2}\right) \rho d\rho, \tag{17}$$

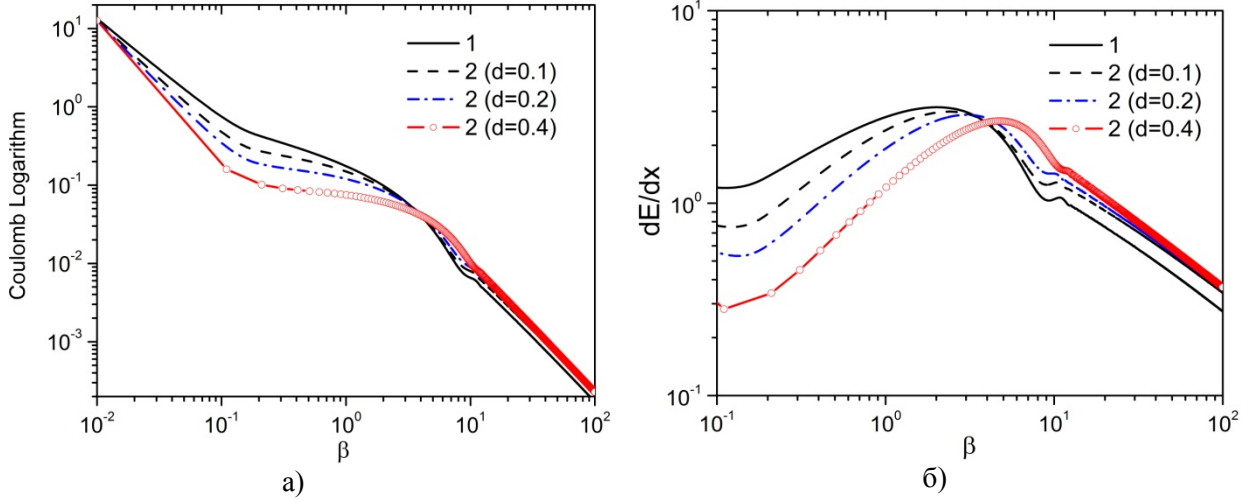


Рисунок 6 – а) Кулоновский логарифм, полученный: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5).
 б) Тормозная способность при $\Gamma = 0.8$, полученная: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала взаимодействия (5).

Тормозная способность дается в единицах $k_B T$.

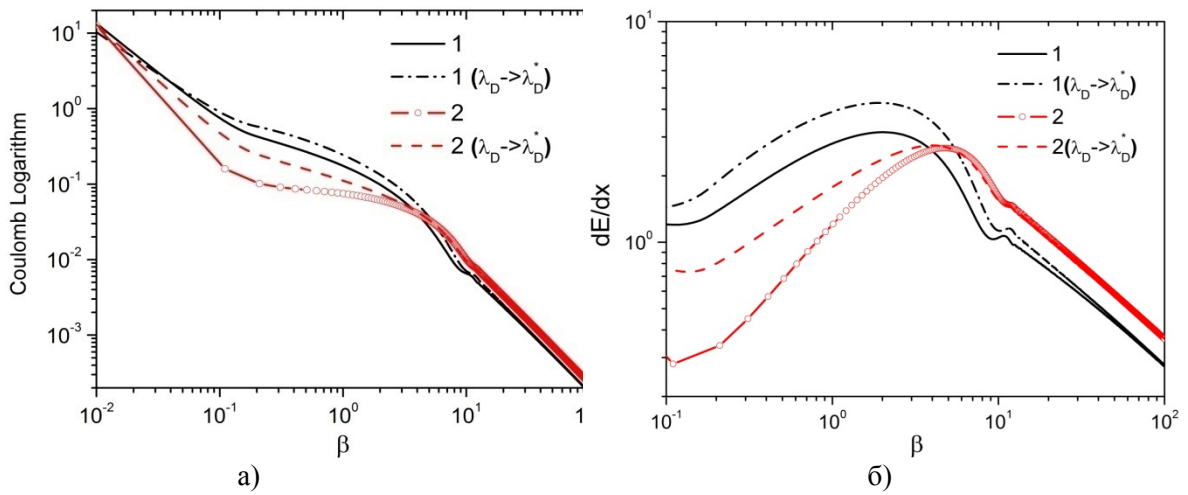


Рисунок 7 – а) Кулоновский логарифм, полученный на основе потенциала Юкавы (линия 1) и на основе потенциала взаимодействия (5) (линия 2).
 б) Тормозная способность, полученные на основе потенциала Юкавы (линия 1) и на основе потенциала взаимодействия (5) (линия 2)

Здесь λ_D^* является перенормированным параметром экранирования, $\Gamma = 0.8$, $d = 0.4$.

Тормозная способность дается в единицах $k_B T$.

Рассмотрим влияние квантового эффекта дифракции на кулоновский логарифм и тормозную способность, в случае плазменно-пучкового рассеяния частиц. Как видно, из рисунка 6, при $\beta < 5$, включение квантового эффекта дифракции уменьшает значение кулоновского логарифма и тормозной способности. Это происходит из-за низких значений сечения рассеяния по сравнению со случаем, когда квантовый эффект дифракции не учитывается. При $\beta > 5$, как кулоновский логарифм, так и тормозная способность растет с увеличением параметра d . Этот результат может быть также объяснен большим сечением, что в случае $\lambda = 0$ (потенциал Юкавы).

Теперь рассмотрим влияние динамического экранирования на рассеяние пучка плазмы. Из рисунка 7 видно, что учет как динамического экранирования, так и квантового эффекта дифракции приводит к частичной компенсации влияния этих двух эффектов при $\beta < 5$. При больших значениях параметра $\beta \gg 1$, эффектом динамического экранирования можно пренебречь, в то время как квантовый эффект дифракции остается важным, как это было описано в предыдущем разделе.

Наконец, рассмотрим влияние динамического экранирования на рассеяние частиц в плазме. В этом случае, воздействие динамического экранирования повышается, так как величина параметра β становится больше, в связи с увеличением параметра связи $\Gamma = (\beta/Z_{ion})^{2/3} 6^{-1/3}$, в отличие от случая налетающих частиц.

Сравнения вычисленных значений тормозной способности с помощью эффективного потенциала (5) с результатами комбинированной модели, $T matrix$, приближением Борна первого порядка, динамическим RPA и результатами моделирования методом частицы в ячейке (PIC) показаны на рисунках 9, 10. Из рисунков видно, что без перенормированной длины экранирования эффективный потенциал (5) дает хорошее описание тормозной способности при $v < v_{th}$. Перенормировка длины экранирования расширяет этот диапазон до $v \leq 1.5 v_{th}$. Для сравнения комбинированная модель, $T matrix$, включающая динамическое экранирование, которое приводит к хорошему согласию с данными моделирования при скоростях $v \leq 3 v_{th}$. Наши результаты при больших скоростях становятся ближе к результатам борновского приближения.

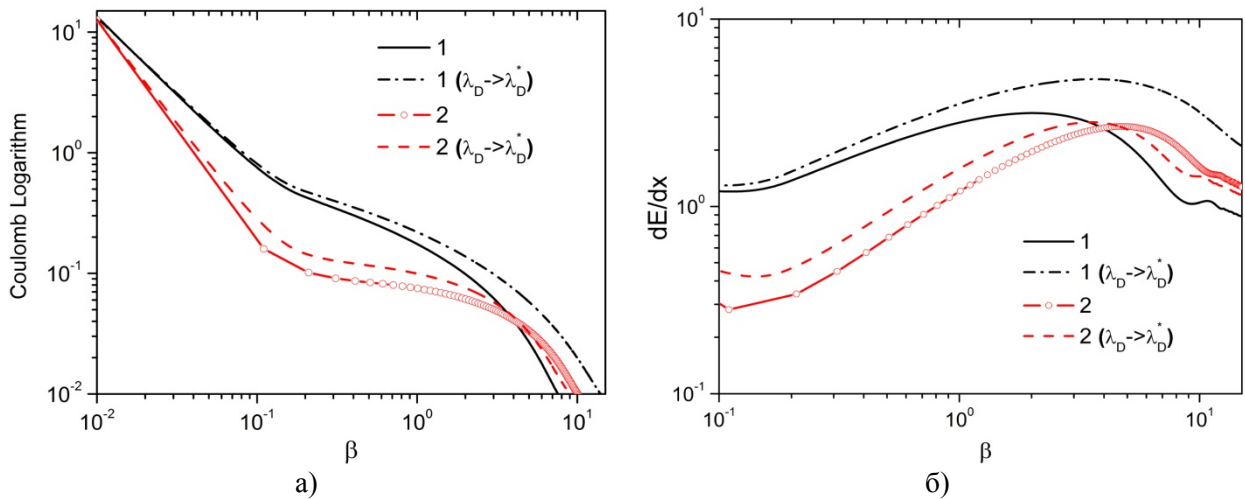


Рисунок 8 –Кулоновский логарифм а) и тормозная способность б), полученные: 1 - на основе потенциала Юкавы; 2 - на основе эффективного потенциала (5). $\Gamma = (\beta/Z_{ion})^{2/3} 6^{-1/3}$, $d = 0.4$. Тормозная способность дается в единицах $k_B T$.

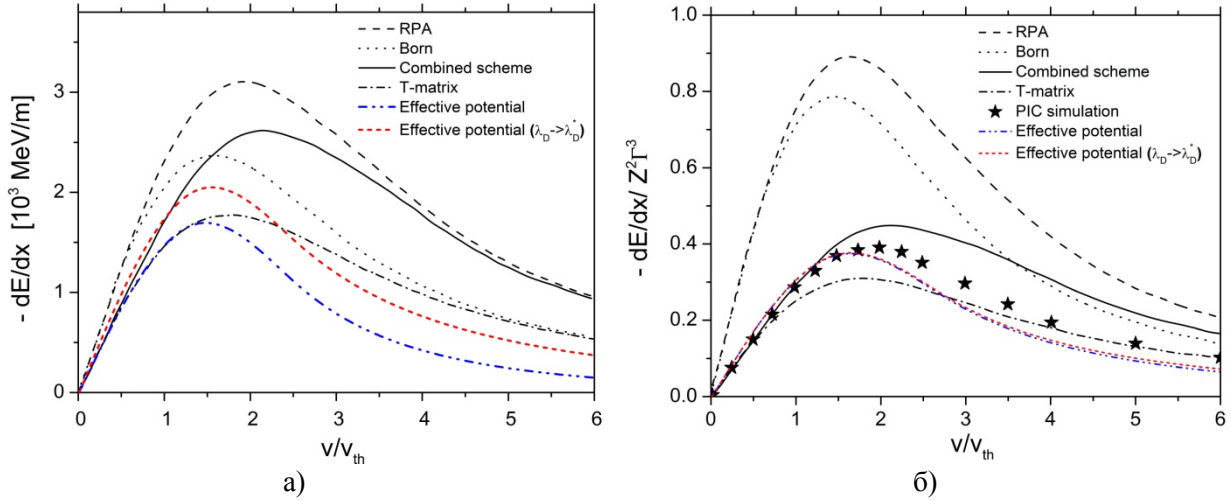


Рисунок 9 – Тормозная способность, полученная на основе эффективного потенциала взаимодействия (5) с учетом перенормировки длины экранирования и без учета в сравнении с результатами различных теоретических подходов [28] для а) $Z = 1$, б) $Z = 10$.

На рисунке б) тормозная способность дается в единицах $3k_B T / \lambda_D$.

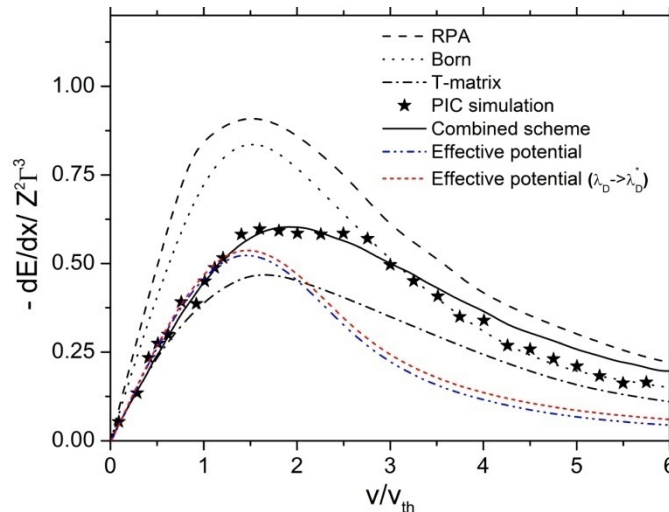


Рисунок 10 – Тормозная способность, полученная на основе эффективного потенциала взаимодействия (5) с учетом перенормировки длины экранирования и без учета в сравнении с результатами различных теоретических подходов [28] для $Z = 5$.

Тормозная способность дается в единицах $3k_B T / \lambda_D$.

При высоких скоростях потенциал вокруг иона имеет сильные отклонения от типа юкавского потенциала и имеет отрицательный продольный потенциальный минимум позади иона, что может привести к притяжению между одноименно заряженными ионами [1, 2].

Заключение. Были рассмотрены электрон-ионное рассеяние, кулоновский логарифм, и тормозная способность с учетом квантового эффекта дифракции и динамического эффекта экранирования. Было показано, что при $\beta < 5$ динамическое экранирование приводит к увеличению сечения рассеяния, кулоновского логарифма, и тормозной способности. Квантовый эффект дифракции делает эти значения меньше в сравнении с результатами полученными на основе потенциала Дебая (Юкавы). В отличие от этого при $\beta > 5$ квантовый эффект дифракции

увеличивает значения сечения рассеяния, а также кулоновского логарифма и тормозной способности, в то время как динамическое экранирование становится несущественным (в пределах используемой модели).

Также было установлено, что при $\beta < 1$ в плотной плазме, когда параметр Γ близок к единице, рассмотренные эффекты могут частично компенсировать друг друга.

Сравнение значений тормозной способности, рассчитанной на основе модели, представленной в данной работе, с результатами комбинированной модели, *T matrix*, на основе приближения Борна первого порядка, динамическим RPA и результатами моделирования методом частицы в ячейке (PIC) показало, что наша модель дает хорошее описание тормозной способности при скоростях $v \leq 1.5 v_{th}$ и имеет правильное поведение при всех значениях рассматриваемых скоростей.

Эти результаты дают полезную информацию о квантовом экранировании, коллективных, квантово-механических эффектах в процессах столкновении в плотной плазме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта 3083/ГФ4 (2016).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zh. A. Moldabekov, P. Ludwig, M. Bonitz, and T. Ramazanov // Phys. Rev. E. – 2015. – Vol. 91. – P. 023102.
- [2] Zh. A. Moldabekov, P. Ludwig, J.P. Joost, M. Bonitz, and T. Ramazanov // Contrib. Plasma Phys. -2015. – Vol.55. -P. 186.
- [3] 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.
- [4] T. S. Ramazanov, S. K. Kodanova, Zh. A. Moldabekov, and M. K. Issanova // Phys. Plasmas. – 2013. – Vol. 20. – P. 112702.
- [5] P. E. Grabowski, M.P. Surh, D.F. Richards, F.R. Graziani, and M.S. Murillo // Phys. Rev. Lett. – 2013. – Vol. 111. – P. 215002.
- [6] L. X. Benedict et al // Phys. Rev. E. – 2012. – Vol. 86. – P. 046406.
- [7] Woo-Pyo Hong and Young-Dae Jung // Phys. Plasmas. – 2015. – Vol. 22. P. 012701.
- [8] Dae-Han Ki and Young-Dae Jung // Phys. Plasmas. – 2010. – Vol. 17. – P. 074506.
- [9] O. Hurricane et al // Nature. – 2014. – Vol. 506. – P. 343.
- [10] M. E. Cuneo et al // IEEE Trans. Plasma Science. – 2012. – Vol. 40. – P. 3222.
- [11] D. H. H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni et al // Laser and Particle beams. – 2005. – Vol. 23. – P. 47.
- [12] D. H. H. Hoffmann, K. Weyrich, H. Wahl et al // Phys. Rev. A. – 1990. – Vol. 42. – P. 2313.
- [13] D. H. H. Hoffmann, J. Jacoby, W. Laux et al // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 74. – P. 1550.
- [14] J. A. Frenje, P. E. Grabowski, C. K. Li, F. H. Seguin, A. B. Zylstra, M. Gatu Johnson, R. D. Petrasso, V. Yu Glebov, and T. C. Sangster // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 115. – P. 205001.
- [15] A. B. Zylstra, J. A. Frenje, P. E. Grabowski, C. K. Li, G. W. Collins, P. Fitzsimmons, S. Glenzer, F. Graziani, S. B. Hansen, S. X. Hu, M. Gatu Johnson, P. Keiter, H. Reynolds, J. R. Rygg, F. H. Seguin, and R. D. Petrasso // Phys. Rev.Lett. – 2015. – Vol. 114. – P. 215002.
- [16] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin // Phys.Rev. E. – 2015. – Vol. 92. – P. 023104.
- [17] C. Deutsch // Phys. Lett. A. – 1977. – Vol. 60. – P. 317.
- [18] Zhandos Moldabekov, Tim Schoof, Patrick Ludwig, Michael Bonitz, and Tlekkabul Ramazanov // Phys. Plasmas. – 2015. – Vol. 22. – P. 102104.
- [19] L. G. Stanton, and M. S. Murillo // Phys. Rev E. – 2015. – Vol. 91. – P. 033104.
- [20] T. Dunn and A. A. Broyles // Phys. Rev. – 1967. – Vol. 157. – P. 156.
- [21] G. Kelbg // Ann. Phys. Lpz. – 1963. – Vol. 12. – P. 219.
- [22] M. D. Kilgore, J. E. Daugherty, R. K. Porteous, and D. B. Graves // J. Appl. Phys. – 1993. – Vol. 73. – P. 7195.
- [23] G. Zwicknagel, C. Toepffer, P.-G. Reinhard // Physics Reports. – 1999. – Vol. 309. – P. 117.
- [24] K. N. Dzhumagulova, E. O. Shalenov, and G. L. Gabdullina // Phys. Plasmas. – 2013. – Vol. 20. – P. 042702.
- [25] W.D. Kraeft and B. Strege // Physica A. – 1988. – Vol. 149. – P. 313.
- [26] D.O. Gericke, M. Schlages, and W.D. Kraeft // Phys. Lett. A. – 1996. – Vol. 222. – P. 241.
- [27] G. Zwicknagel // Laser and Particle Beams. – 2009. – Vol. 27. – P. 399.
- [28] D.O. Gericke, and M. Schlages // Phys.Rev. E. – 1999. – Vol. 60. – P. 904.
- [29] S. A. Khrapak, A. V. Ivlev, G. E. Morfill // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – P. 22502.
- [30] S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, N. Kh. Bastykova, Zh. A. Moldabekov // Phys. Plasmas. – 2015. – Vol. 22. – P. 063703.
- [31] C.A. Ordóñez, M.I. Molina // Phys. Plasmas. – 1994. – Vol. 1. – P. 2515.
- [32] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova // Phys. Plasmas. – 2001. – Vol. 8. – P. 5049.
- [33] G. Belyaev, M. Basko, A. Cherkasov, A. Golubev et al // Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 53. – P. 2701.
- [34] A. Golubev, M. Basko // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 57. – P. 3363.

REFERENCES

- [1] Zh. A. Moldabekov, P. Ludwig, M. Bonitz, and T. Ramazanov. *Phys. Rev. E*. **2015**. 91, P. 023102. (in Eng.).
- [2] Zh. A. Moldabekov, P. Ludwig, J.P. Joost, M. Bonitz, and T. Ramazanov. *Contrib. Plasma Phys.* **2015**. 55, P. 186. (in Eng.).
- [3] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova. *Contrib. Plasma Phys.* **2015**. 55, No. 2-3, p. 271 – 276. (in Eng.).
- [4] T. S. Ramazanov, S. K. Kodanova, Zh. A. Moldabekov, and M. K. Issanova. *Phys. Plasmas*. **2013**. 20, P. 112702. (in Eng.).
- [5] P. E. Grabowski, M.P. Surh, D.F. Richards, F.R. Graziani, and M.S. Murillo. *Phys. Rev. Lett.* **2013**. 111, P. 215002. (in Eng.).
- [6] L. X. Benedict et al. *Phys. Rev. E*. **2012**. 86, P. 046406. (in Eng.).
- [7] Woo-Pyo Hong and Young-Dae Jung. *Phys. Plasmas*. **2015**. 22, P. 012701. (in Eng.).
- [8] Dae-Han Ki and Young-Dae Jung. *Phys. Plasmas*. **2010**. 17, P. 074506. (in Eng.).
- [9] O. Hurricane et al. *Nature*. **2014**. 506, P. 343. (in Eng.).
- [10] M. E. Cuneo et al. *IEEE Trans. Plasma Science*. **2012**. 40, P. 3222. (in Eng.).
- [11] D. H. H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni et al. *Laser and Particle beams*. **2005**. 23, P. 47. (in Eng.).
- [12] D. H. H. Hoffmann, K. Weyrich, H. Wahl et al. *Phys. Rev. A*. **1990**. 42, P. 2313. (in Eng.).
- [13] D. H. H. Hoffmann, J. Jacoby, W. Laux et al. *Phys. Rev. Lett.* **1995**. 74, P. 1550. (in Eng.).
- [14] J. A. Frenje, P. E. Grabowski, C. K. Li, F. H. Seguin, A. B. Zylstra, M. Gatu Johnson, R. D. Petrasso, V. Yu Glebov, and T. C. Sangster. *Phys. Rev. Lett.* **2015**. 115, P. 205001. (in Eng.).
- [15] B. Zylstra, J. A. Frenje, P. E. Grabowski, C. K. Li, G. W. Collins, P. Fitzsimmons, S. Glenzer, F. Graziani, S. B. Hansen, S. X. Hu, M. Gatu Johnson, P. Keiter, H. Reynolds, J. R. Rygg, F. H. Seguin, and R. D. Petrasso. *Phys. Rev. Lett.* **2015**. 114, P. 215002. (in Eng.).
- [16] T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov, M. T. Gabdullin. *Phys. Rev. E*. **2015**. 92, P. 023104. (in Eng.).
- [17] C. Deutsch. *Phys. Lett. A*. **1977**. 60, P. 317. (in Eng.).
- [18] Zhandos Moldabekov, Tim Schoof, Patrick Ludwig, Michael Bonitz, and Tlekkabul Ramazanov. *Phys. Plasmas*. **2015**. 22, P. 102104. (in Eng.).
- [19] L. G. Stanton, and M. S. Murillo. *Phys. Rev. E*. **2015**. 91, P. 033104. (in Eng.).
- [20] T. Dunn and A. A. Broyles. *Phys. Rev.* **1967**. 157, P. 156. (in Eng.).
- [21] G. Kelbg. *Ann. Phys. Lpz.* **1963**. 12, P. 219. (in Eng.).
- [22] M. D. Kilgore, J. E. Daugherty, R. K. Porteous, and D. B. Graves. *J. Appl. Phys.* **1993**. 73, P. 7195. (in Eng.).
- [23] G. Zwicknagel, C. Toepffer, P.-G. Reinhard. *Physics Reports*. **1999**. 309, P. 117. (in Eng.).
- [24] K. N. Dzhumagulova, E. O. Shalenov, and G. L. Gabdullina. *Phys. Plasmas*. **2013**. 20, P. 042702. (in Eng.).
- [25] W.D. Kraeft and B. Strege // *Physica A*. – 1988. – Vol. 149. – P. 313. (in Eng.).
- [26] D.O. Gericke, M. Schlanges, and W.D. Kraeft // *Phys. Lett. A*. – 1996. – Vol. 222. – P. 241. (in Eng.).
- [27] G. Zwicknagel. *Laser and Particle Beams*. **2009**. 27, P. 399. (in Eng.).
- [28] D.O. Gericke, and M. Schlanges. *Phys. Rev. E*. **1999**. Vol. 60, P. 904. (in Eng.).
- [29] S. A. Khrapak, A. V. Ivlev, G. E. Morfill // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – Vol. 90. – P. 22502. (in Eng.).
- [30] S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, N. Kh. Bastykova, Zh. A. Moldabekov. *Phys. Plasmas*. **2015**. 22, P. 063703. (in Eng.).
- [31] C.A. Ordonez, M.I. Molina. *Phys. Plasmas*. **1994**. 1, P. 2515. (in Eng.).
- [32] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova. *Phys. Plasmas*. **2001**. 8, P. 5049. (in Eng.).
- [33] G. Belyaev, M. Basko, A. Cherkasov, A. Golubev et al. *Phys. Rev. E*. **1996**. 53, P. 2701. (in Eng.).
- [34] A. Golubev, M. Basko. *Phys. Rev. E*. **1998**. 57, P. 3363. (in Eng.).

ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАДАҒЫ ШАШЫРАУ ҚИМАСЫ ЖӘНЕ ТЕЖЕГІШТІК ҚАБІЛЕТ: ДИФРАКЦИЯ ЖӘНЕ ДИНАМИКАЛЫҚ ЭКРАНДАЛУ ЭФФЕКТИЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

М.К. Исанова¹, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Н.Х. Бастыкова¹, М.Т. Габдуллин², Ж.А. Молдабеков¹

Тірек сөздер: Тығыз плазма, Динамикалық экрандалу, Шашырау қимасы, Кулон логарифмы, Тежегіштік қабілет.

Аннотация. Бұл жұмыста дифракция квант-механикалық және динамикалық экрандалу эффектілерін бірге және бөлек ескере отырып, электрон-иондық шашырау, Кулон логарифмы және тежегіштік қабілеті зерттелді. Дифракция квант-механикалық эффектісін қосу Томас-Ферми жалпыланған теориясындағы белгілі бірінші ретті градиентті түзету жуықтауында жүзеге асырылады. Динамикалық экрандалу эффектісін қосу үшін Грабовский және т.б. [Phys. Rev. Lett. 111, 215002 (2013)] ұсынған модель қолданылды. Плазма иондарында (электрондарында) сыртқы электрондар (иондар) шоғырының энергия жоғалтуларымен қатар, шашырау процесстері қарастырылды. Идеал емес плазма шегінде, $\Gamma = e^2/ak_B T \rightarrow 1$, кванттық дифракция және динамикалық экрандалу эффектілері жартылай бір-бірін өтейтіні анықталды. Динамикалық экрандалу эффектісі шашырау қимасын, Кулон логарифмын, тежегіштік қабілетін арттыратындығы, ал кванттық дифракция эффектісі олардың мәндерін кемітетіндігі көрсетілді. Басқа теориялық әдістермен және компьютерлік модельдеу нәтижелерімен салыстыру бұл жұмыста қолданылған модель ұшып келе жатқан бөлшектердің жылдамдығы $v \leq 1.5 v_{th}$ болғанда тежегіштік қабілет үшін жақсы сипаттама беретінін көрсетті.

Поступила 17.06.2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Процессы в околоземном космическом пространстве

<i>Яковец А.Ф., Гордиенко Г.И., Жумабаев Б.Т., Литвинов Ю.Г., Абдрахманов Н.</i> Статистика ночных увеличений электронной концентрации в максимуме F2-слоя.....	5
<i>Сомсиков В.М.</i> О природе бифуркации динамических систем.....	11
<i>Жантаев Ж.Ш., Грищенко В.Ф., Мукушев А.</i> Схемотехническое моделирование защиты электронной аппаратуры от электростатического разряда.....	15
<i>Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю., Чубенко А.П.</i> Эффекты землетрясений в интенсивности нейтронов тепловых энергий на высокогорной станции Северного Тянь-Шаня.....	20
<i>Салихов Н.М.</i> Новый метод регистрации динамики вспышек ионизации в ионосфере аппаратно-программным комплексом доплеровских измерений на наклонной радиотрассе.....	27

Наземно-космические методы исследования геодинимических процессов в земной коре

<i>Виляев А.В., Жантаев Ж.Ш., Стихарный А.П.</i> Динамика сезонных движений GPS станций на территории Северного Тянь-Шаня.....	34
<i>Хачикян Г.Я., Жумабаев Б.Т., Тойшиев Н.С., Калдыбаев А., Нуракунов С.</i> Вариации солнечной активности и пространственно-временное распределение сильных землетрясений ($M \geq 7.0$) на территории Евразии в 1973-2014 гг.....	40
<i>Бибосинов А.Ж., Шигаев Д.Т., Калдыбаев А.А., Нуракунов С.М., Бреусов Н.Г., Мамырбек Г.Б.</i> Исследование Шардаринского гидрокомплекса методом георадиолокации.....	46
<i>Бибосинов А.Ж., Нуракунов С.М., Калдыбаев А.А., Шигаев Д.Т.</i> Эффективность применения георадиолокационного метода при изучении инженерно-геологических условий на участках Алматинского метрополитена приповерхностного залегания.....	50
<i>Шигаев Д.Т., Мунсызбай Т.М.</i> Маломощная солнечная теплоэлектростанция с максимальным использованием энергии Солнца.....	56
<i>Жантаев Ж.Ш., Хачикян Г.Я., Кайраткызы Д., Андреев А.</i> Долговременные тренды в вариациях продолжительности земных суток и частоты возникновения на планете землетрясений.....	62
<i>Хачикян Г.Я., Жумабаев Б.Т., Сералиев А., Хасанов Э.</i> Пространственное распределение характеристик главного геомагнитного поля и эпицентров глубокофокусных ($h > 350$ км) землетрясений по данным 1973-2014 гг.....	67

<i>Исанова М.К., Коданова С.К., Рамазанов Т.С., Бастыкова Н.Х., Габдуллин М.Т., Молдабеков Ж.А.</i> Сечение рассеяния и тормозная способность в плотной плазме: влияние эффектов дифракции и динамического экранирования.....	73
<i>Кудайкулов А.А., Жозеранд К., Калтаев А.</i> Численное исследование процесса пальцеобразования при течении двух не смешивающихся жидкостей в канале.....	86
<i>Ахметов Б.С., Корченко А.А., Жумангалиева Н.К.</i> Модель решающих правил для обнаружения аномалий в информационных системах.....	91
<i>Бапаев К.Б., Сламжанова С.С., Исаева Г.Б.</i> О дискретных неравенствах.....	101
<i>Боос Э.Г., Альменова А.М., Жуков В.В., Садыков Т.Х., Степанов А., Таутаев Е.М.</i> Исследование взаимодействий частиц космического излучения методом радиоизлучения на высоте 3340 метров над уровнем моря.....	110
<i>Джакупов К.Б.</i> О моделировании динамики вязкой жидкости уравнениями ротора скорости и функции тока.....	117
<i>Джакупов К.Б.</i> Эффективное применение уравнений максвелла и закона ома в численном моделировании двухфазных процессов магнитной гидродинамики.....	124
<i>Исадыков А.Н., Иванов М.А., Сахиев С.К., Жаугашиева С.А., Нурбакова Г.С., Мукушев Б.А.</i> Вычисление ширины распада $\omega(782)$ мезона для реакции $\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ в ковариантной модели кварков.....	135
<i>Калмурзаев Б.С.</i> О полурешетках роджерса двухэлементных семейств разностей в п. множеств.....	141
<i>Кошеров Т.С., Жумабекова Г.Е.</i> Исследование структуры и фазового состава поверхности кремния при температурном и лазерном воздействии.....	147
<i>Кошеров Т.С., Көшикбай Б.Қ.</i> Особенности напряженного состояния пластин кремния в процессе термического отжига.....	156
<i>Курманбаев Д.М.</i> Солитонная деформация поверхности энепера третьего порядка.....	163
<i>Майлебаева Д., Тилегенова Д.</i> Метод параметризации при решении трансцендентных уравнений.....	168
<i>Мамаев Ш.М., Даниярбек Р.Н.</i> Ұзындығы шектелген стерженде пластикалық облыстың және кернеуді жеңілдету толқындаларының құрылуын торлық-характеристика әдісімен зерттеу.....	173
<i>Оңгарбаева А.Д.</i> Электрондық білім беру ресурстарын оқу процесінде болашақ мұғалімдерді оқытуда қолдану.....	184
<i>Сүйменбаев Б.Т., Алексеева Л.А., Сүйменбаева Ж.Б., Гусейнов С.Р.</i> Моделирование динамики космического аппарата в гравимагнитном поле земли в системе «MATLAB SIMULINK».....	188
<i>Түленбаев К.М., Шаймарданова Ж.Н., Габдуллин Б.</i> Структурные свойства (α, β) – коммутативных алгебр.....	208
<i>Сарсенгельдин М.М., Касабек С., Сагидолла Б.М.</i> Точное и приближенное решения двухфазовой обратной задачи Стефана.....	214