

- [19] M. Mahdavi and T. Koohrokhi. Physical Review E 85, 016405 (2012).
- [20] J.R. Adams, N.S. Shilkin, V.E. Fortov, V.K. Gryaznov, V.B. Mintsev, R. Redmer, H. Reinholtz, and G. Ropke. Phys. Plasmas. Vol. 14. P. 062303 (2007).
- [21] D.H.H. Hoffmann et al. Phys. Rev. Vol. A 42. P. 2313 (1990).

Коданова С.К., Исанова М.К., Слямова Э.С.

Тығыз плазмадағы иондардың тәжелуін 2D және 3D визуализациялау бойынша құрал ортасын әзірлеу

Түйіндеме. Осы жұмыстың шеңберінде тиімді бөлшектердің өзара әрекеттесу потенциалын пайдалана отырып, кулондық логарифм негізінде тығыз плазмалық тәжеу процестерін есептеу, талдау және визуализациялау үшін бағдарламалық кешен әзірленді. Әзірленген құрал ортасы инерциялық термоядролық синтездегі тығыз плазма қасиеттерін зерттеуге ынғайлы және сенімді құрал болып табылады. Жасалынған бағдарламалық кешен идеалды емес тығыз плазманың қасиеттерін зерттеу және моделдеу үшін теориялық және қолданбалы мәнге ие. Сондай-ақ, бағдарламада суреттерді түрлендіру, пайдалану, жылжыту, айналдыру, толық экран, масштабтау операторлары қарастырылған.

Түйін сөздер: тығыз плазма, инерциялық термоядролық синтез, бағдарламалық кешен, компьютерлік моделдеу, визуалдау

Kodanova S.K., Issanova M.K., Slyamova E.S.

Development of tool environment in 2D and 3D visualization of ions stopping in a dense plasma

Summary. In this work developed the software package for calculation, analysis and visualization of the stopping processes in dense plasma based on the Coulomb logarithm using an effective interaction potential. The software module provides users with extensive information as graphical interpretations as well as in table. Created tool environment is a convenient and reliable means to investigate properties of the dense plasma of inertial thermonuclear fusion. Software package developed by the project has both theoretical and practical importance for the investigation and simulation of non-ideal dense plasma properties. Also, control which using is included in the program, shift operators, turn, a full-screen mode, scaling transforms images.

Keywords: dense plasma, inertial confinement fusion, software complex, computer simulation, visualization

УДК 533.9:004.9

С.К. Коданова, М.К. Исанова, Э.С. Слямова

(Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,

Казахский национальный университет имени Аль-Фараби,

Алматы, Республика Казахстан,

E-mail: moldir.issanova@gmail.com)

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПО РАСЧЕТУ ТОРМОЖЕНИЯ ИОНОВ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Аннотация. В рамках данной работы разработан программный комплекс по расчету, анализу и визуализации процессов торможения плотной плазмы на основе Кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала взаимодействия частиц. Программный модуль обеспечивает пользователей широкой информацией, как в графической интерпретации, так и в табличной форме. Созданный автоматизированный комплекс является удобным и надежным средством для исследования свойств плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза. Разработанный программный комплекс имеют как теоретическое, так и прикладное значение для исследования и моделирования свойств неидеальной плотной плазмы. Численные результаты полученные на основе программных модулей были сравнены с теоретическими и экспериментальными работами других авторов и имеют хорошие согласие.

Ключевые слова: плотная плазма, инерционный термоядерный синтез, программный комплекс, компьютерное моделирование, визуализация

На сегодняшний день в мире проводится большое количество теоретических и экспериментальных работ по изучению фундаментальных физических процессов в области ИТС [1-5]. Пробеги тяжелых многозарядных ионов в мишени, и ионизационные потери обусловлены тормозной способностью плотной высокотемпературной плазмы. Следовательно, знание величин пробегов и профилей энерговыделения тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно рассчитать конструкцию термоядерной мишени.

Известно, что тормозная способность – параметр, характеризующий скорость потери средней энергии для быстродвижущихся электронов или ионов плазмы. В процессе прохождения иона через вещество в результате совместного действия разнообразных физических процессов ион теряет свою энергию, замедляется и в конце концов останавливается. Для пробной частицы, подвергнутой N парным столкновениям и перемещенной на расстояние δl , ее полная потеря энергии есть:

$$\delta E = \sum_{i=1}^N \Delta E_i, \quad (1.1)$$

где ΔE_i - потеря энергии при i -том столкновении. Тормозная способность S определяется как $\int_0^{\delta l} S dl = \delta E$. При увеличении числа N столкновений имеем $\int_0^{\delta l} S dl = S \cdot \delta l$; $S = \frac{\delta E}{\delta l}$. Потеря энергии в результате соударения пробной частицы с частицами плазмы есть:

$$\Delta E = 4 \left(\frac{\mu_{\alpha\beta}}{m_\beta} \right) \cdot E_c \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right), \quad (1.2)$$

здесь $E_c = \frac{1}{2} \mu_{\alpha\beta} v^2$ - энергия центра масс сталкивающихся частиц; v - относительная скорость пробной частицы; θ_c - угол рассеяния центра масс. Для удобства значение потери энергии пробной частицы в одном парном соударении обозначим как ΔE . Следовательно, тормозная способность [6-7]:

$$\frac{dE}{dx} = 8\pi n \left(\frac{\mu_{\alpha\beta}}{m_\beta} \right) \cdot E_c \cdot b_\perp^2 \cdot \lambda, \quad (1.3)$$

здесь $b_\perp = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{2E_c}$, λ - кулоновский логарифм, который определяется формулой [6-8]:

$$\lambda = \frac{1}{b_\perp^2} \int_0^\infty \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) b db. \quad (1.4)$$

Угол рассеяния центра масс определяется как [7]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^\infty \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.5)$$

где $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ - энергия центра масс, $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ - приведенная масса частиц сорта α и β ; $b_\perp = Z_\alpha Z_\beta / (m_{\alpha\beta} v^2)$. 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: параметр связи $\Gamma = Z_\alpha Z_\beta e^2 / a k_B T$, где $Z_\alpha e, Z_\beta e$ - заряды частиц сорта α и β ; $a = (3/4\pi n)^{1/3}$ - 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 (1.5) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (1.6)$$

Следовательно, очень важно правильно выбрать потенциалы взаимодействия сталкивающихся частиц [9-12]. Если потенциал известен, то по формулам (1.1)-(1.5) можно найти потерю энергии налетающей частицей.

Из изложенного выше, был построен код и разработан программный модуль для понимания фундаментальных процессов, происходящих в веществе, необходимых для изучения динамических характеристик плотной плазмы. Исходным пунктом при моделировании динамики полной и частично ионизованной плазмы является нахождение состава плазмы. Расчеты производятся на основе потенциалов взаимодействия, учитывающие те или иные свойства. Ниже приведен интерфейс разработанного программного модуля по расчету торможения тяжелых ионов в полной и частично ионизованной плотной плазме (рис. 1).

Программный модуль представляет собой библиотеку классов (namespace) "STOPPING". Класс "STOPPING" разрабатывался отдельно и был подключен к вышеописанной библиотеке классов "SOLUTIONS" и имеет один реализованный класс "MSOLUTION", также наследуется от класса "SIMULATION". После проведения расчетов, результаты моделирования обрабатываются с помощью модуля "PLOTTER2D". Результаты выводятся на экран по ходу их вычисления в виде графика и таблицы данных. Программа написана на языке программирования C# на Visual Studio 2012 [13-17].

Программный модуль обеспечивает пользователей широкой информацией, как в графической интерпретации, так и в табличной форме, которые получены теоретическими расчетами и с помощью физических экспериментов в лабораторных условиях. В программном модуле предусмотрена возможность изменения заданных параметров, потенциала взаимодействия, шага моделирования. Также в программном модуле предусмотрена возможность задавать входные параметры задачи, сравнивать полученные результаты с теоретическими результатами других авторов (рис. 1). В программном модуле представлены:

- переключатели в виде прямоугольной области с текстом и кнопкой, при помощи которой происходит управление процессом расчета **PLOT** **SOLVE**, **CLEAR** **GRID**;
- кнопки для обработки полученных результатов **Export** **Import** **View** **Setting**;
- панель параметров и панель вывода полученных данных;
- возможность сравнения полученных результатов с другими теоретическими подходами и построения 2D графиков на основе полученных результатов.

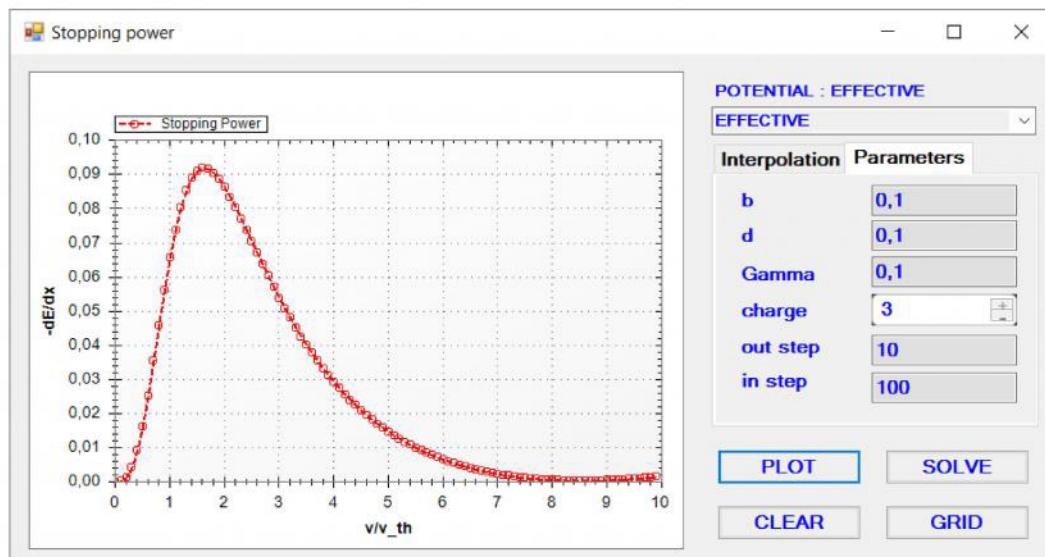


Рис. 1. Программный модуль по расчету торможения тяжелых ионов

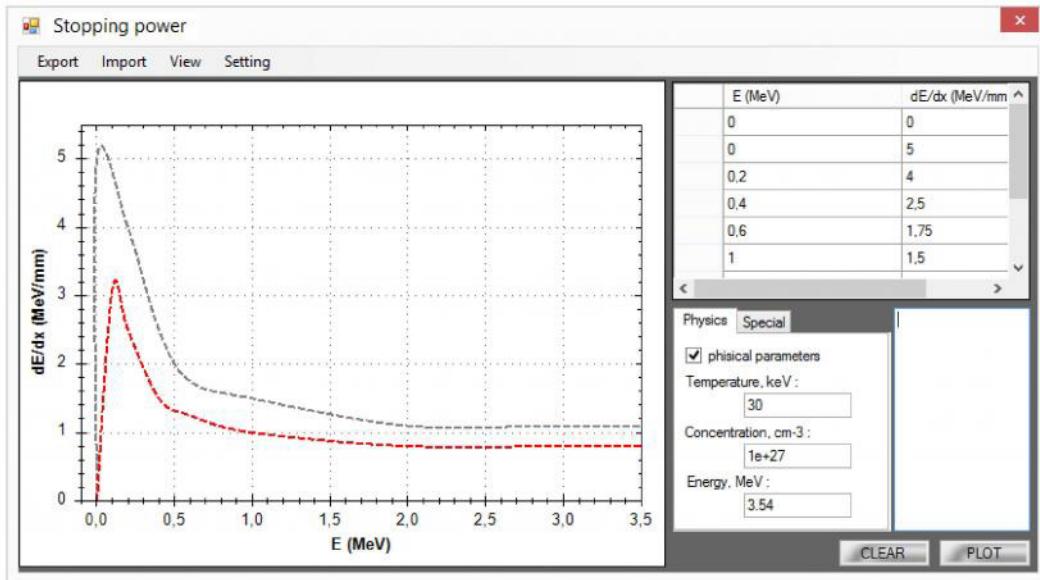


Рис. 2. Интерфейс по расчету тормозной способности альфа-частицы

Для подтверждения достоверности построенного кода было проведено сравнение вычисленных значений тормозной способности с помощью эффективного потенциала с результатами комбинированной модели, моделью Т-матрицы, приближением Борна первого порядка, динамическим RPA и результатами моделирования методом частицы в ячейке (PIC) показаны на рисунках 3 - 4. Эти результаты дают полезную информацию о квантовом экранировании, коллективных, квантово-механических эффектах в процессах столкновений в плотной плазме [18-20].

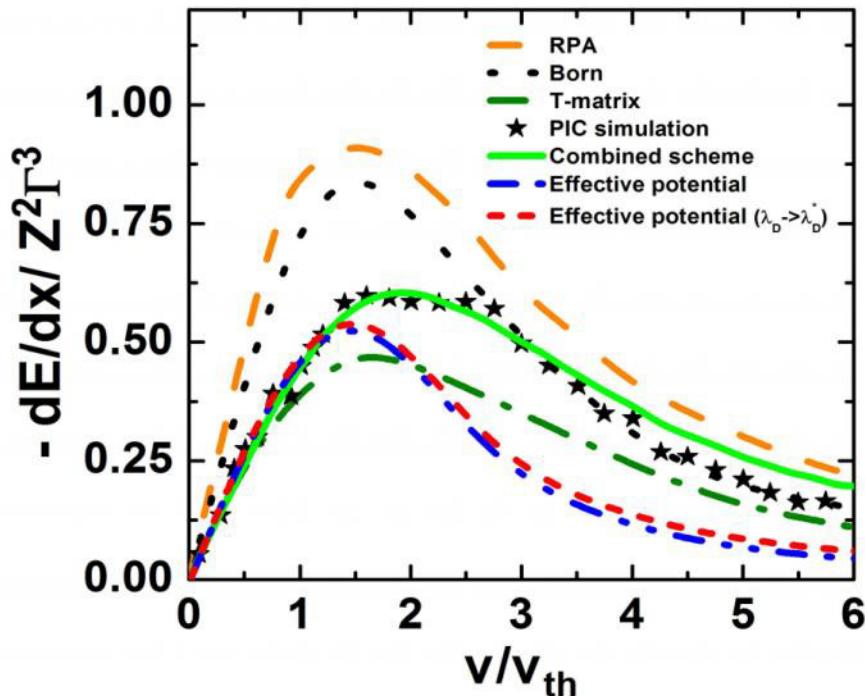


Рис. 3. Тормозная способность, полученная на основе эффективного потенциала взаимодействия с учетом перенормировки длины экранирования и без учета в сравнении с результатами различных теоретических подходов [24] для $Z = 5$.

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

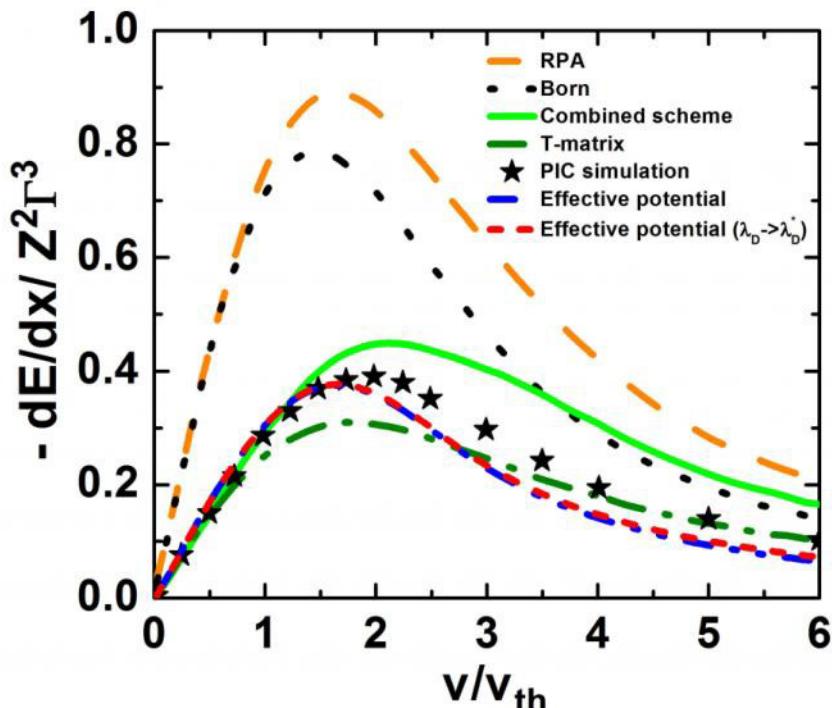


Рис. 4. Тормозная способность, полученная на основе эффективного потенциала взаимодействия с учетом перенормировки длины экранирования и без учета в сравнении с результатами различных теоретических подходов [24] для $Z = 10$.

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

Программный модуль сочетает в себе пользовательский интерфейс пакета с мощными алгоритмами и численными методами высокого уровня. В основе программы лежит расчет тормозных потерь и траекторий налетающей частицы в приближении парного столкновения. Модуль позволяет обрабатывать результаты для ионов с энергиями в интервале от 10 эВ до 1 ГэВ. Следует отметить, что данная программа разработана для моделирования процессов рассеяния ионов при попадании в мишень. Данная программа имеет опции, позволяющие оценивать влияние налетающей частицы на плазму.

Таким образом, разработан программный модуль по моделированию торможения тяжелых ионов в полной и частично ионизованной плазме инерционного термоядерного синтеза с возможностью использования различных физических приближений для описания взаимодействия ионного пучка с веществом. Можно сделать вывод, что полученные данные с использованием программного модуля применимы для исследования динамических характеристик плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N.A. Tahir, Th. Stöhlker, A. Shutov, I.V. Lomonosov, V.E. Fortov, M. French, N. Nettelmann, R. Redmer, A.R. Piriz, C. Deutsch, Y. Zhao, H. Xu, G. Xio and P. Zhan. New Journal of Physics 12, 073022 (2010).
- [2] B.E. Фортов. Экстремальные состояния вещества. – Москва, ФИЗМАТЛИТ (2009).
- [3] V.E. Fortov. Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos. – Berlin, Springer (2009).
- [4] B.E. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков. УФН. Т. 178, №2. С.114 (2008).
- [5] M. Kulish, A. Golubev, A. Fertman, V. Turtikov, A. Tauschwitz. Review of Scientific Instruments V. 74, №5 (2001).
- [6] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova. Phys. Plasmas 8 , 5049 (2001).
- [7] C.A. Ordóñez, M.I. Molina. Phys. Plasmas 1, 2515 (1994).
- [8] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, Zh.A. Moldabekov, M.K. Issanova. Phys. Plasmas 20, 112702 (2013).
- [9] S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, Zh.A. Moldabekov, G. Nigmatova. Contrib. Plasma Phys. 55, No. 2-3, 271 – 276 (2015).

- [10] M.K. Issanova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, D.H.H. Hoffmann. Contrib. Plasma Phys. 56, 425 (2016).
- [11] M.T. Gabdullin, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, M.K. Issanova, T.N. Ismagambetova. Nukleonika 61, №2, 125 (2016).
- [12] M.K. Issanova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova, Zh.A. Moldabekov, C.-V. Meister. Laser and Particle Beams, 34, 457-466 (2016).
- [13] Д. Рихтер. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. 4-е изд., изд. Питер, 2016. – 896 с.
- [14] К. Нагел, Б. Ивъен, Дж. Глинн, К. Уотсон, М. Скиннер. C# 4.0 и платформа .NET 4 для профессионалов, изд. Вильямс, 2011. – 1440 с.
- [15] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, Zh.A. Moldabekov, M.K. Issanova. Communications in Computational Phys., Vol. 15, 2014, 981-995.
- [16] Г. Шилдт. C# 4.0, изд. Вильямс, 2015. – 1056 с.
- [17] Н. А. Литвиненко. Технология программирования на C++, изд. БХВ-Петербург, 2010. – 281 с.
- [18] M. Mahdavi and T. Koohrokh. Physical Review E 85, 016405 (2012).
- [19] J.R. Adams, N.S. Shilkin, V.E. Fortov, V.K. Gryaznov, V.B. Mintsev, R. Redmer, H. Reinholz, and G. Ropke. Phys. Plasmas. Vol. 14. P. 062303 (2007).
- [20] D.H.H. Hoffmann et al. Phys. Rev. Vol. A 42. P. 2313 (1990).

Коданова С.К., Исанова М.К., Слямова Э.С.

Тығыз плазмадағы иондардың тәжелуін есептеу үшін бағдарламалық модуль құру

Түйіндеме. Осы жұмыстың шенберінде тиімді бөлшектердің өзара әрекеттесу потенциалын пайдалана отырып, кулондық логарифм негізінде тығыз плазмалық тәжеу процестерін есептеу, талдау және визуализациялау үшін бағдарламалық кешен әзірленді. Бағдарламалық модуль пайдаланушыларды графикалық интерпретация және кесте түрінде кең ақпаратпен қамтамасыз етеді. Құрылған автоматтандырылған кешен инерциялық термоядролық синтездегі тығыз плазма қасиеттерін зерттеудің ынғайлы және сенімді құралы болып табылады. Жасалынған бағдарламалық кешен идеалды емес тығыз плазманың қасиеттерін зерттеу және моделдеу үшін теориялық және қолданбалы мәнге ие. Бағдарламалық модульдер негізінде алынған сандық нәтижелер басқа авторлардың теориялық және тәжірибелік жұмыстарымен салыстырылып, жақсы келісімдерге ие болды.

Түйін сөздер: тығыз плазма, инерциялық термоядролық синтез, бағдарламалық кешен, компьютерлік моделдеу, визуалдау

Kodanova S.K., Issanova M.K., Slyamova E.S.

Creation of the program module for calculation of ion stopping in a dense plasma

Summary. In this work developed the software package for calculation, analysis and visualization of the stopping processes in dense plasma based on the Coulomb logarithm using an effective interaction potential. The software module provides users with extensive information as graphical interpretations as well as in table. Created automated complex is a convenient and reliable means to investigate properties of the dense plasma of inertial thermonuclear fusion. Software package developed by the project has both theoretical and practical importance for the investigation and simulation of non-ideal dense plasma properties. The numerical results obtained on the basis of software modules were compared with the theoretical and experimental works of other authors and have good agreement.

Keywords: dense plasma, inertial confinement fusion, software complex, computer simulation, visualization.

УДК 533.9:004.9

С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, М.К. Исанова^{1*}, Р.И. Голятина², С.А. Майоров²

(¹Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,

Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия,

*E-mail: moldir.issanova@gmail.com)

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ИОНОВ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ,
РАССЧИТАННЫХ МЕТОДОМ МОНТЕ КАРЛО**

Аннотация. В работе методом Монте Карло проведен расчет торможения ионов в плотной плазме инерционного термоядерного синтеза. Результатом компьютерного моделирования являются численные данные по динамическим характеристикам, такие как, тормозные потери, средний угол рассеяния, глубина