

УДК 533.9,621.039,533.9:51-73,517.958:536

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНУЮ МИШЕНЬ

© 2016 г. В. В. Кузенов^{a, b}

^aФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана” (национальный исследовательский университет)”

^bФедеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова” предприятие госкорпорации “РОСАТОМ”

E-mail: vik.kuzenov@gmail.com

Поступила в редакцию 31.10.2016 г.

Работа посвящена расчетно-теоретическому исследованию процессов сжатия и энергосвободения для магнитно-инерционного способа удержания плазмы. Данный подход открывает возможности для создания новых плазменных источников высокой плотности, применения их в материаловедческих экспериментах и в перспективных направлениях энергетики.

Ключевые слова: высокая плотность энергии, лазерные пучки, магнитно-инерциальный термоядерный синтез, математическое моделирование, цилиндрическая мишень

DOI: 10.1134/S2079562916040102

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования [1–5] магнитно-инерционного способа удержания плазмы или магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС), который основывается на комбинации внешних источников нагрева плазмы (драйверов – лазерных пучков или сверхзвуковых плазменных струй) и затравочного магнитного поля, получили в последнее время заметное развитие. При таком подходе принципиально важным является наличие затравочного магнитного поля, которое усиливается при лазерном сжатии мишени и препятствует электронному теплопереносу, уносящему энергию из центральной нагретой части; может удерживать практически все вылетающие быстрые заряженные частицы, которые, испытывая несколько актов “ядерного” рассеяния, расходуют свою энергию на разогрев прилегающих областей плазмы.

Отметим, что в работе [4] авторами даны первоначальные оценки теплофизических параметров плазмы, энергетических затрат на сжатие электромагнитного поля и работу вихревых токов.

В настоящей работе проводится компьютерное моделирование процессов сжатия и нагрева замагниченной цилиндрически симметричной мишени при воздействии на нее лазерного драйвера [6–8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Математическая модель, описывающая физические процессы, протекающие в цилиндрически симметричной мишени МИТС, приведены в работах [4, 9, 10] и опирается на одномерные уравнения радиационной плазмодинамики: систему уравнений Эйлера; уравнение переноса собственного широкополосного излучения; уравнение магнитной индукции; уравнение переноса лазерного излучения; методы расчета уравнений состояния вещества и коэффициентов поглощения лазерного излучения, определяющие условия возникновения и протекания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза.

Расчетная область и мишень МИТС состоят из центральной части и одного коаксиального слоя. Они имеют цилиндрическую форму со следующим диапазоном значений начальных параметров мишени и окружающей среды:

- центральная часть мишени (радиус ядра $R_{\text{я}} = 0,05$ см) заполнена $D-T$ смесью с плотностью $\rho = 5 \cdot 10^{-2}$ г/см³ и начальной температурой равной $T = 297$ К. Она окружена коаксиальным слоем (наружный радиус $R_{\text{с}} = 0,1$ см), состоящим из металла (Al) с плотностью $\rho = 2,7$ г/см³ и начальной температурой равной $T = 297$ К.

- расчетная область имеет внешний радиус $l = 0,2$ см. При этом термодинамические парамет-

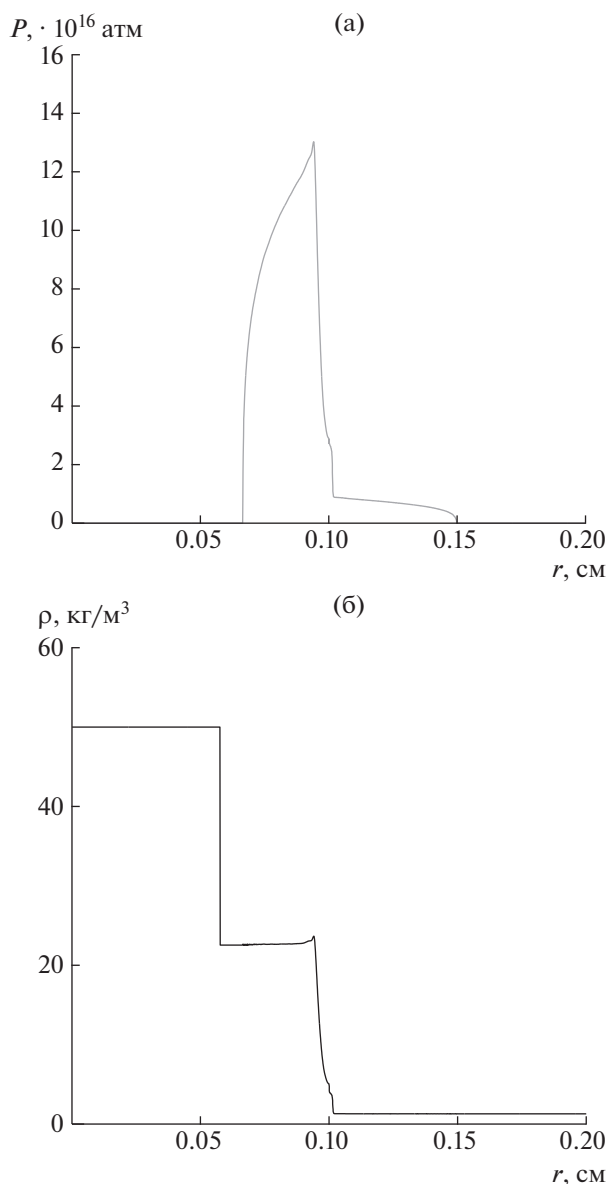


Рис. 1. Пространственное распределение давления (а) и плотности (б) на момент времени $t = 0.19$ нс.

ры внешней разреженной окружающей среды (состоит из Ar) задаются значениями: $T = 297$ К, $\rho = 2.7 \cdot 10^{-3}$ г/см³.

Начальные значения напряженности “затраповочного” магнитного поля в разреженной окружающей среде составляет доли тесла. Спектральный поток и объемная плотность широкополосного излучения, а также лазерный поток излучения для $r \in [0, \ell]$ в начальный момент времени $t = 0$ равны нулю.

Несмотря на одномерный характер рассматриваемой задачи, она предъявляет серьезные требования к численному методу, используемому при ее решении:

- расчетная схема должна обладать улучшенными дисперсионными и диссипативными свойствами, быть экономичной, обладать свойством монотонности и аппроксимировать гладкие решения желательно с максимально высоким порядком точности.

Этим требованиям удовлетворяет численный метод, разработанный и описанный в работах [4, 9, 10]. Отметим, что данный численный метод позволяет выполнить компьютерное моделирование всех основных физических закономерностей присущих МИТС.

ОТДЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Конвективная и “тепловая” части компьютерной модели мишеней тестировались в работах авторов [9, 10].

Группа расчетов, выполненных в работе, с плотностью потока излучения на уровне $q_{\text{лаз}} \approx 1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14}$ Вт/см² показала, что процесс лазерного сжатия мишени, находящейся во внешнем магнитном поле относительно времени t , можно условно представить в виде трех стадий:

- “начальная” стадия сжатия замагниченной мишени,
- стадия “схлопывания” плазменной мишени,
- стадия “разлета” плазменного образования.

Далее приведем краткое описание полученных результатов для плотности потока лазерного излучения $q_{\text{лаз}} = 6 \cdot 10^{15}$ Вт/см².

На рис. 1–4 показаны распределения статического давления P и магнитного давления $P_{\text{маг}}$, плотности ρ и температуры T , потока суммарного q и лазерного излучения $q_{\text{лаз}}$, отвечающие стадиям сжатия мишени МИТС и следующим параметрам математической модели:

- локальное (термоядерное) энерговыделение $Q_{\text{Fus}}^e \neq 0$ в электронный компонент плазмы,
- плотность потока лазерного излучения $q_{\text{лаз}} \approx 6 \cdot 10^{15}$ Вт/см², полуширина лазерного импульса $\tau = 10$ нс.

На рис. 1 и рис. 2 приведены распределения статического P и магнитного $P_{\text{маг}}$ давления, плотности ρ и потока лазерного излучения $q_{\text{лаз}}$, которые соответствуют первой “начальной” стадии ($t = 0.19$ нс) сжатия мишени МИТС, находящейся во внешнем магнитном поле.

Графические зависимости, которые показаны на рис. 3, отвечают стадии “схлопывания” замагниченной мишени.

На рис. 4 представлены распределения магнитного давления $P_{\text{маг}}$ и суммарного потока q собственного излучения плазменного образования,

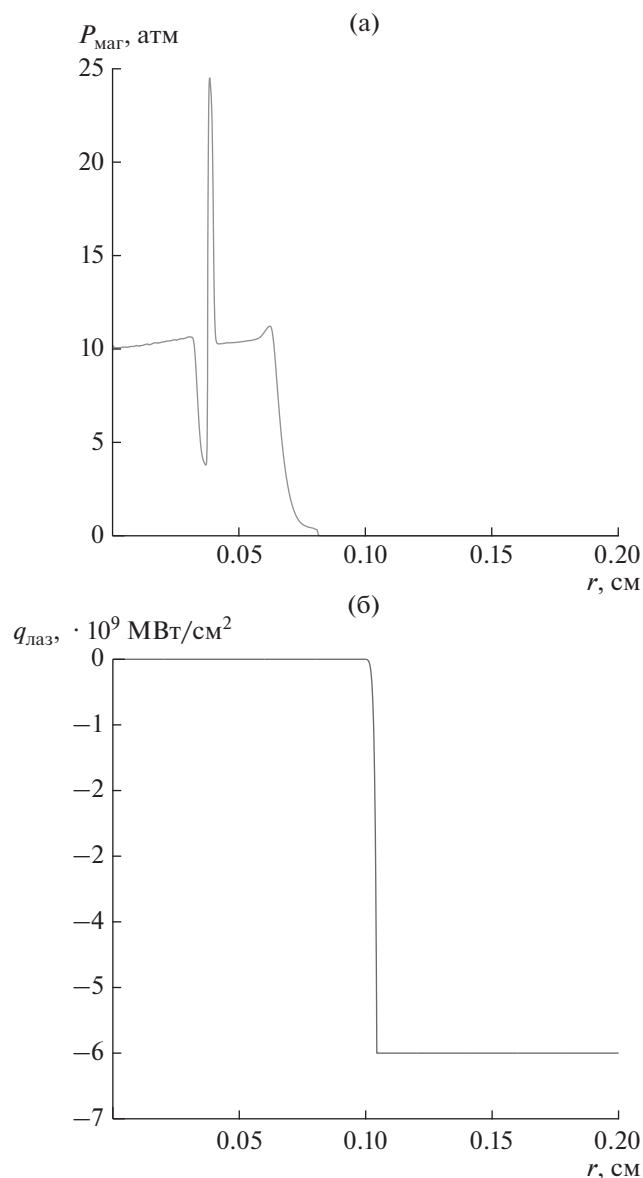


Рис. 2. Пространственное распределение магнитного давления (а) и потока лазерного излучения (б) на момент времени $t = 0.19$ нс.

соответствующие стадии разлета плазменного образования ($t = 0.593$ нс).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны одномерные математические модели и численные методы повышенного порядка точности [11–14], которые позволяют производить расчеты процессов сжатия и нагрева мишеней МИТС во внешнем магнитном поле для центрально-симметричной системы координат. Выполнены первоначальные расчеты всех основных газодинамических и излучательных параметров лазерной плазмы мишени. Численное моделирование процесса сжа-

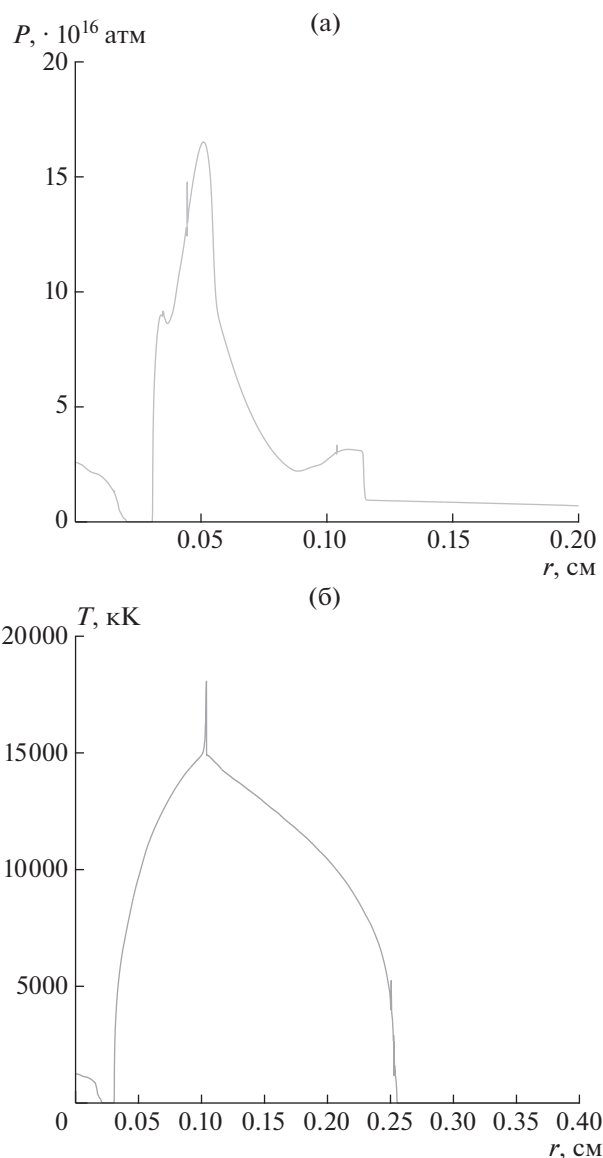


Рис. 3. Пространственное распределение давления (а) и температуры (б) на момент времени $t = 0.38$ нс.

тия мишени (при $q_{\text{лаз}} = 1 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{15}$ Вт/см²), состоящей из центральной части и одного коаксиального слоя, показало следующее:

- центральная часть мишени в процессе сжатия является оптически прозрачной, как для лазерного излучения, так и для собственного широкополосного излучения плазмы. Однако при этом плотность тепловых потоков на первую стенку камеры реактора в отдельные моменты времени могут достигать величин $\sim 10^{11}$ Вт/см²,

- в процессе сжатия мишени МИТС уровень магнитного давления $P_{\text{маг}}$ в плазме меняется во

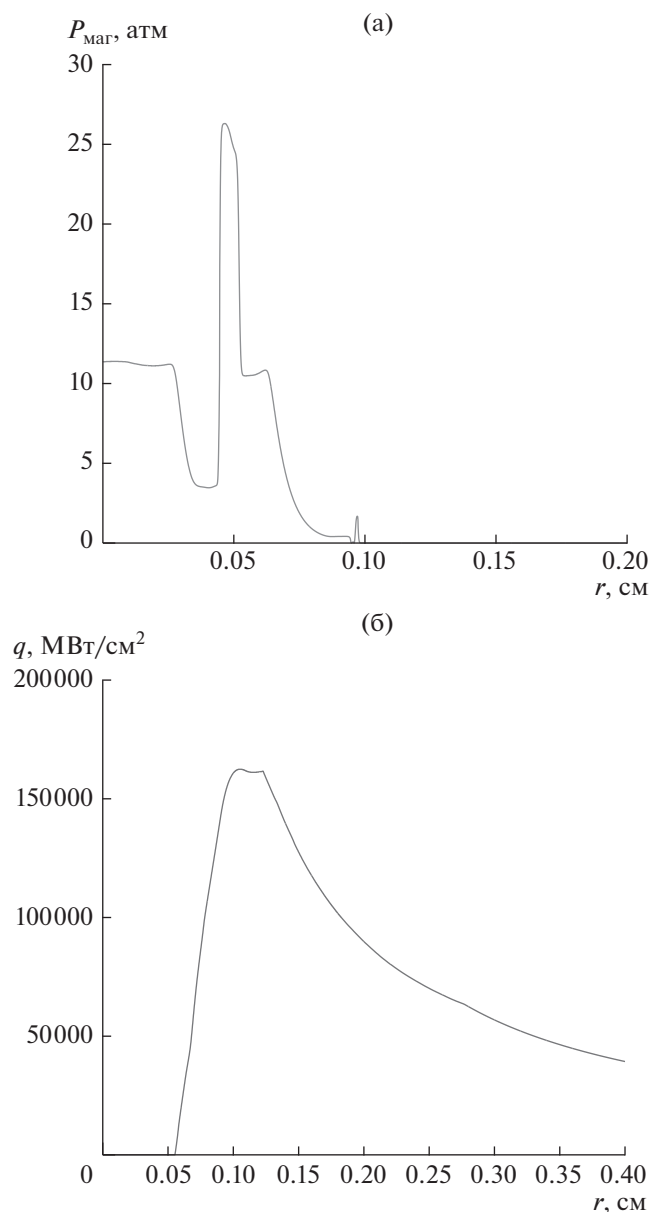


Рис. 4. Пространственное распределение магнитного давления (а) и суммарного потока собственного излучения плазмы (б) на момент времени $t = 0.593$ нс.

времени и сопоставим со статическим давлением P (достигая величин $\sim 10^6$ атм),

- максимальные значения давления и температуры плазмы мишени наблюдаются в момент времени 0.2–5 нс после отражения ударной волны от геометрической оси симметрии.

Можно отметить также, что плазма мишени МИТС является мощным источником увеличивающегося во времени (на первой и второй стадиях) магнитного потока и широкополосного излучения. Все сказанное позволяет надеяться, что

подход, основанный на МИТС, годится для создания новых плазменных источников интенсивного широкополосного излучения и потоков частиц высокой плотности, применения их в материаловедческих экспериментах и в перспективных направлениях энергетики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты исследования получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации No. 13.5240.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Shmatov M.L.* // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79. P. 666–670.
2. *Kostyukov I.Yu., Ryzhkov S.V.* // Plasma Phys. Rep. 2011. V. 37. No. 13. P. 1092–1098.
3. *Boldarev A.S., Bolkhovitinov E.A., Vichev I.Yu., Volkov G.S., Gasilov V.A. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2015. V. 41. P. 178–181.
4. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika plazmy (19). [Problems of Atomic Science and Technology]. 2013. No. 1(83). P. 12–14.
5. *Shumaev V.V.* // Yadernaya fizika i inzhiniring. 2015. V. 6. No. 5–6. P. 309–314 (in Russian); [*Shumaev V.V.* // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79. No. 9–10. P. 1414–1418].
6. *Krainov V.P.* // Phys. Atom. Nucl. 2011. V. 74. No. 10. P. 1410–1423.
7. *Ryzhkov S.V.* // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Plazmennaya elektronika i novyye metody uskoreniya (7). [Problems of Atomic Science and Technology]. 2010. No. 4(68). P. 105–110.
8. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Plazmennaya elektronika i novyye metody uskoreniya (8). [Problems of Atomic Science and Technology]. 2013. No. 4(86). P. 103–107.
9. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 5. P. 598–602.
10. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Matematicheskoye modelirovaniye. 2017. V. 29. P. 19–32; [*Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Math. Models. Comput. Simul. 2018. V. 10] (in press)].
11. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012124.
12. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Appl. Phys. 2014. No. 3. P. 26–30.
13. *Kuzenov V.V., Lebo A.I., Lebo I.G., Ryzhkov S.V.* // Fiziko-matematicheskiye modeli i metody rascheta vozdeystviya moshchnykh lazernykh i plazmennyykh impul'sov na kondensirovannyye i gazovyye sredy. [Physico-Mathematical Models and Methods for Calculating the Effect of High-Power Laser and Plasma Pulses on Condensed and Gaseous Media]. 2015. Moscow: BMSTU (in Russian).
14. *Ryzhkov S.V.* // Sustain. Cities. Soc. 2015. V. 14. P. 313–315.

Computer Modeling of the Process of Compression and Energy Release in a Laser-Irradiated Cylindrically Symmetric Target

V. V. Kuzenov^{1, 2}

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

²*All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, 127055 Russia*

e-mail: vik.kuzenov@gmail.com

Received October 31, 2016

Abstract—The theoretical and computational study of compression and energy release for magneto-inertial plasma confinement has been reported. This approach allows creating new high-density plasma sources for applications in materials science experiments and perspective trends of power engineering.

Keywords: high energy density, laser, magneto-inertial fusion, mathematical modeling, cylindrical target