

УДК 533.9

Радиационно-гидродинамическое моделирование контактной границы плазменной мишени, находящейся во внешнем магнитном поле

В.В. Кузенов, С.В. Рыжков

Работа посвящена анализу воздействия ударных волн на контактную границу различной формы. Для поиска решения используется радиационно-магнитные уравнения Рейнольдса, квазимонотонный численный метод повышенной разрешающей способности, специальные методы построения квазиортогональной и адаптивной криволинейной расчетной сетки. Описан процесс роста и циркуляции простых (уединенные) двумерных возмущений, характер воздействия на них внешнего магнитного поля. Выполнены расчеты всех основных параметров плазменного образования.

PACS: 52.25.Fi, 52.25.Kn, 52.25.Xz, 52.65.-y

Ключевые слова: уравнения Рейнольдса, замагниченная плазма, магнитное поле.

Введение

В основе магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) с плазменным лайнером и лазерным драйвером [1–3] лежит обжатие и нагрев плазменного образования (мишени), удерживаемой внешним магнитным полем, высокоскоростными плазменными струями и симметричная квазисферическая (квазицилиндрическая) имплозия замагниченной плазмы лазерными пучками с высокой энергией импульса. При этом на границе между термоядерной мишенью и окружающей средой возникают радиационно-магнитные гидродинамические неустойчивости типа Рэлея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова. С этими неустойчивостями связано турбулентное перемешивание холодных плотных слоев вещества мишени и горячих, менее плотных слоев окружающей среды, что приводит к ограничению величины достигаемой плотности энергии в термоядерной мишени (этот процесс заметно ухудшает условия для зажигания термоядерной реакции). Важным в концепции МИТС является также импульсный характер внешнего воздействия т.к. в этом случае представляют опасность не все возможные плазменные неустойчивости, а только те варианты их, которые могут быстро нарастать с течением времени.

В работе приводятся отдельные результаты исследования радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей типа Рэлея–Тейлора (РТ), Рихтмайера–Мешкова (РМ) и связанного с ними турбулентного перемешивания. Наличие этих неустойчивостей является одним из основных препятствий в

проблеме МИТС, а проблема сжатия мишеней без заметного развития гидродинамических неустойчивостей на границе между веществом мишени и окружающей её средой является чрезвычайно важной в исследованиях связанных с МИТС.

Постановка задачи и численный метод решения

Относительно сложные пространственные движения контактных границ (соответствующих линейным и нелинейным стадиям развития неустойчивостей РМ и РТ), сопровождается соответствующим сложным взаимодействием ударных волн (УВ), волн разряжения и контактных разрывов, которое может быть математически описано только в рамках многомерных, многокомпонентных, двухтемпературных магнитно радиационных уравнений Рейнольдса с учетом турбулентности (в $q-\omega$ приближении) [4–9]. Особенностью данной модели является учет и описание движения контактной границей (с помощью модели «фиктивной» примеси), разделяющей плазму вещества контактной границы и окружающего газа, и использование динамически адаптируемых сеток [4]. Использование динамически адаптивных сеток приводит к необходимости аппроксимировать уравнения Рейнольдса в подвижной системе координат, т.е. осуществить переход от декартовых координат x^α к произвольным криволинейным координатам q^α с учетом зависимости этого преобразования от времени t . Для учета изменений газодинамических параметров, связанных с адаптивным движением сетки, применяется метод интерполяционного профиля и нормализованный вариант метода фиктивной примеси. Электромагнитные процессы описываются системой уравнений Максвелла и Ома в плазме с конечной проводимостью. Перенос излучения рассматривается в рамках многогруппового диффузионного приближения.

Численное решение для разработанной в работе нестационарной двумерной двухтемпературной радиационно-магнитогазодинамической модели бази-

Кузенов Виктор Витальевич, доцент.
Рыжков Сергей Витальевич, доцент.
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/1.
Тел.: (499)263-65-70. E-mail: gyzhkov@power.bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.

© Кузенов В. В., Рыжков С. В., 2014

руется на методе расщепления по физическим процессам, пространственным направлениям. Для газодинамической части расщепленных уравнений применяется метод, который опирается на разработанный авторами вариант нелинейной монотонизированной компактной разностной схемы повышенного порядка (7-го) точности [5]. Исходная дифференциальная система уравнений относительно временной переменной t разрешается с помощью многошагового метода Рунге-Кутты (в данной работе использован четырехшаговый вариант метода, который обладает 4-м порядком аппроксимации по времени t). При решении уравнений переноса излучения применен модифицированный попеременно-треугольный метод с использованием трехслойной итерационной схемы, в которой итерационный «временной» шаг находится с помощью метода сопряженных направлений.

Уравнения магнитной индукции решались полуневяным методом расщепления по физическим процес-

сам. Расчет входящих в данную систему уравнений термодинамических $e(T, \rho)$, $P(T, \rho)$ параметров рабочих сред проводился на основе нестационарной модели среднего заряда [5].

Результаты расчетов

Ниже приведенные (см. рис. 1 и рис. 2) некоторые результаты расчетов (при наличии внешнего магнитного поля $P_{mag} \neq 0$ и без него $P_{mag} = 0$) соответствуют движению УВ (число Маха ударной волны равняется $M_{УВ} = 10$) через невозмущенную ($\rho_{Air} = 1,29 \times 10^{-3}$ г/см³, $T_{Air} = 0,3$ К) внешнюю (по отношению к контактной границе) газовую среду и её последующему «падению» на контактную границу (КГ), которая имеет в начальный момент времени $t = 0$ пространственный вид ступени (см. рис. 1). Материалом «ступенчатой» КГ является Al, который в начальный момент времени $t = 0$ имеет следующие значения термодинамических величин: $\rho_{Al} = 2,7$ г/см³, $T_{Al} = 0,3$ К.

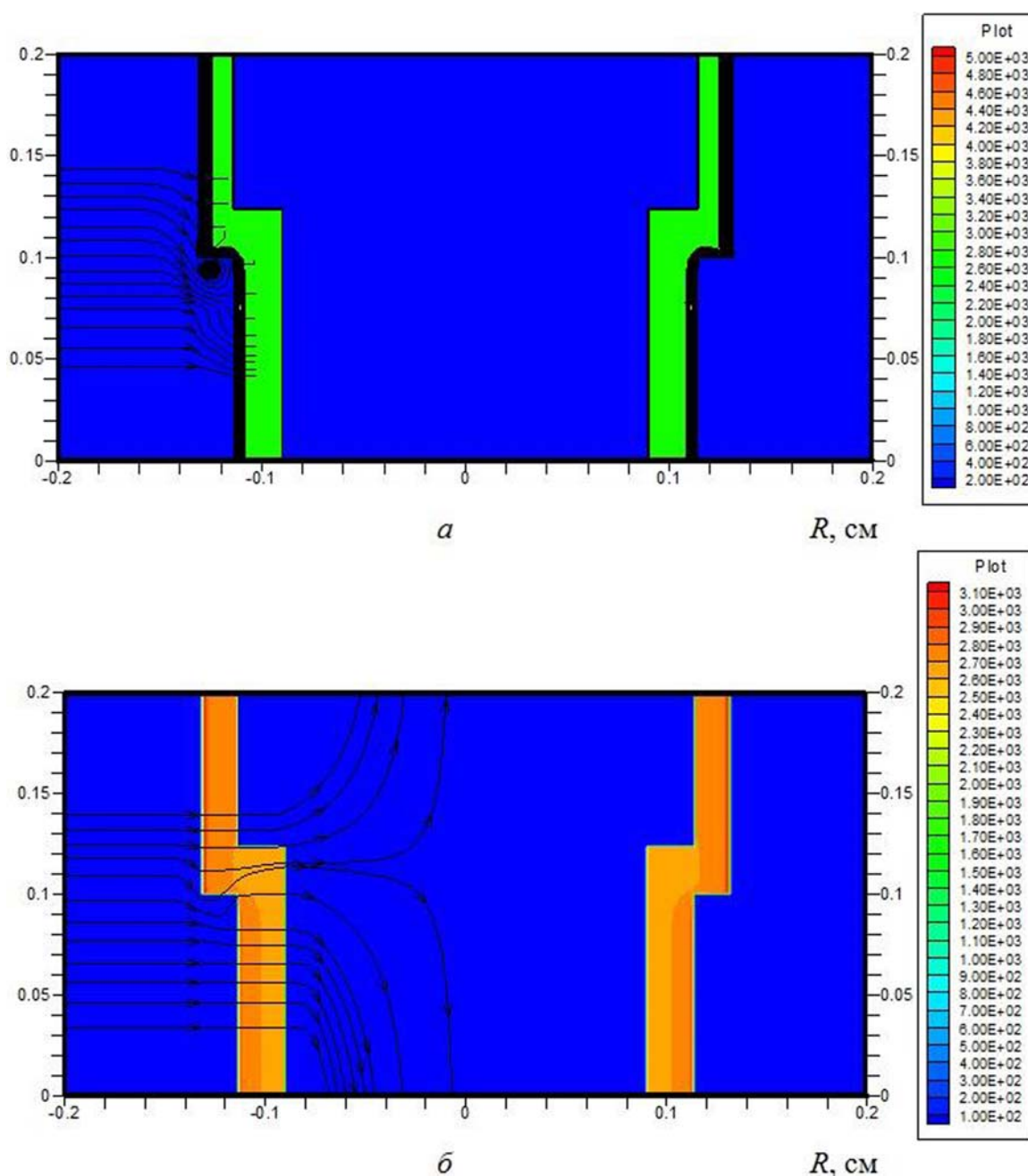


Рис. 1. Пространственное распределение плотности на момент времени $t = 10^{-5}$ с: а – $P_{mag} = 0$; б – $P_{mag} \neq 0$.

Из показанных на рис. 1 и рис. 2 пространственных распределений следует, что после падения УВ и её дифракционного отражения (с усилением) от контактной границы газодинамические параметры вблизи неё заметно меняются (в сторону увеличения).

В частности, в области над поверхностью «ступенчатой» части КГ (наиболее удаленной от оси цилиндрической

системы координат (R, Z)) возрастают значения всех термодинамических параметров (например: $T = 17$ кК, $P = 10^3$ атм, $P_{mag} = 0$). В результате вблизи угловой точки КГ поток плазмы ускоряется (рис. 2), создаются условия для отрыва потока от поверхности КГ и возникновения возвратно-вихревого течения (рис. 1, рис. 2; при условии отсутствия внешнего магнитного поля $P_{mag} = 0$).

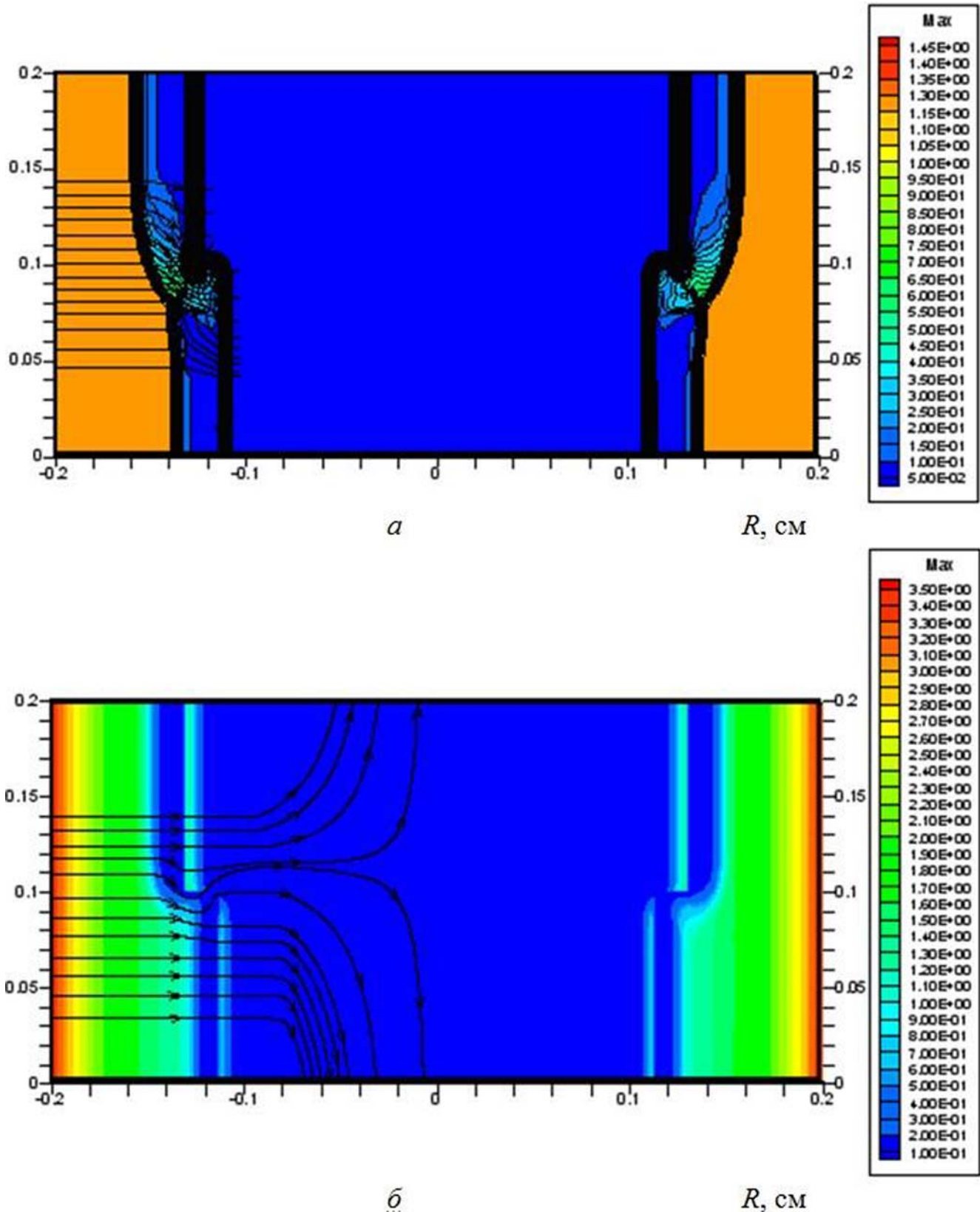


Рис. 2. Пространственное распределение числа Маха на момент времени $t = 10^{-5}$ с: а – $P_{mag} = 0$; б – $P_{mag} \neq 0$.

Если же в процессе ударно-волнового взаимодействия КГ и падающего на неё потока плазмы участвует внешнее магнитное поле (рис. 1, рис. 2; магнитное давление вдоль координаты R максимально у верхней границы: $P_{mag} = 10$ атм при $R = 0,2$ см), то значение термодинамических параметров несколько снижаются, а именно, $T = 11$ кК, $P = 800$ атм (по сравнению случаем $P_{mag} = 0$). Это обстоятельство, в конечном счете, приводит к появлению условий для отсутствия возвратно-вихревого течения вблизи КГ при действии на неё внешнего магнитного поля (рис. 1, рис. 2; при условии отсутствия внешнего магнитного поля: $P_{mag} = 0$).

Заключение

В работе на основе разработанной авторами многомерной математической модели, которая использует многокомпонентные, двухтемпературные, магниторадиационные уравнения Рейнольдса, исследуется влияние внешнего магнитного поля на модельные конфигурации радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей типа Рэлея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова. Кратко описан процесс развития в пространстве и во времени гидродинамических неустойчивостей теплофизических параметров вблизи поверхности контактной границы. Выполненные в работе первоначальные расчеты показывают перспективность воздействия внешнего электромагнитного поля на процесс развития указанных неустойчивостей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 13.79.2014/К и частично поддержана Германской службой академических обменов (DAAD) и Министерством образования и науки РФ (госзадание на проведение научно-исследовательских работ № 11.9198.2014).

Литература

1. Костюков И.Ю., Рыжков С.В. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 65; Kostyukov I. Yu., Ryzhkov S. V. // Plasma Phys. Rep. 2011. V. 37. P. 1092.
2. Chirkov A. Yu., Ryzhkov S. V. // J. Fus. Energy. 2012. V. 31 (1). P. 7.
3. Рыжков С.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. С. 647; Ryzhkov S. V. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2014. V. 78. P. 456.
4. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. // Acta Technica. 2011. V. 56. P. T454.
5. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Препринт ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН. – М.: Институт Проблем Механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2010. № 942.
6. Ryzhkov S. V. // Problems of atomic science and technology. 2010. No. 4. P. 105.
7. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. // Problems of atomic science and technology. 2013. No. 1 (83). P. 12.
8. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. // Problems of atomic science and technology. 2013. No. 4 (86). P. 103.
9. Ryzhkov S. V., "Low radioactive and hybrid fusion – a path to clean energy" // Sustainable Cities and Society. 2014. (Available online 21 May 2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.05.003>

Radiation-hydrodynamic modeling of the contact boundary of the plasma target placed in an external magnetic field

V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov

Bauman Moscow State Technical University,
5/1 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru

Received April 25, 2014

This paper analyzes the effects of shock waves on the contact boundary of different shapes. Radiation-magnetic Reynolds equations and quasimonotone numerical method of a high resolution and special methods of construction and the quasi-adaptive curvilinear computational grid are used to find solutions. The process of growth and circulation of simple (solitary) two-dimensional perturbations, and the nature of exposure to an external magnetic field are described. The basic parameters of the plasma formation are calculated.

PACS: 52.55.Lf, 52.38.Fz, 52.25.Xz, 52.65.-y

Keywords: Reynolds equations, magnetized plasma, magnetic field.

References

1. I. Yu. Kostyukov and S. V. Ryzhkov, *Prikladnaya Fizika, Прикладная физика*, No. 1, 65 (2011); I. Yu. Kostyukov and S. V. Ryzhkov, *Plasma Phys. Rep.* **37**, 1092 (2011).
2. A. Yu. Chirkov and S. V. Ryzhkov, *J. Fus. Energy.* **31** (1), 7 (2012).
3. **S. V. Ryzhkov**, *Bull. Russ. Acad. Sci.* **78**, 456 (2014).
4. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, *Acta Technica* **56**, T454 (2011).
5. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, Preprint No. 942 (IPM RAN, 2010).
6. S. V. Ryzhkov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 4, 105 (2010).
7. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 1, 12 (2013).
8. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 4, 103 (2013).
9. S. V. Ryzhkov, *Low radioactive and hybrid fusion – a path to clean energy* (Sustainable Cities and Society, 2014). Available online 21 May 2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.05.003>