

Анализ действия внешнего магнитного поля на структуру течения вблизи поверхности контактной границы

© В.В. Кузенов^{1,2}, С.В. Рыжков¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва 119526, Россия

Работа посвящена проблеме газодинамических неустойчивостей, связанного с ними турбулентного перемешивания и численным методам ее решения. Решена задача (на основе трехслойной расчетной зоны) о турбулентном перемешивании в слоистых (двухслойных) цилиндрических мишенях и рассмотрены три способа ускорения контактной границы. Определены числа подобия и комбинации безразмерных параметров, влияющих на процесс развития радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей.

Ключевые слова: газовая динамика, численные методы, контактная граница, неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, неустойчивость Рэлея — Тейлора.

В работе проводятся исследования радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей типа Рэлея — Тейлора, Рихтмайера — Мешкова и связанного с ними турбулентного перемешивания, наличие которых являются одним из основных препятствий на пути решения важной научно-технической проблемы — управляемого инерциального термоядерного синтеза. При этом известно [1–7], что для решения этой проблемы необходимо путем воздействия мощного лазерного излучения на периферийные слои термоядерной мишени сжимать (до $\rho_{DT} \approx 10^2$ г/см³) и нагревать (до $T_{DT} \approx 10^8$ К) *DT*-горючее. Для достижения больших коэффициентов сжатия (> 100) внешние слои термоядерной мишени изготавливают из инертного вещества с плотностью, значительно большей, чем плотность конденсированного *DT*-горючего.

В процессе такого сжатия развиваются гидродинамические неустойчивости типа Рэлея — Тейлора, Рихтмайера — Мешкова. Их присутствие на границе между термоядерной мишенью и окружающей средой приводит к перемешиванию холодных плотных слоев вещества мишени и горячих менее плотных слоев окружающей среды, что влечет за собой ограничение достигаемой плотности энергии в термоядерной мишени (этот процесс существенно ухудшает условия для зажигания термоядерной реакции). Таким образом, проблема сжатия

мишеней без развития гидродинамических неустойчивостей на границе между веществом мишени и окружающей ее средой является чрезвычайно важной, и в настоящее время ей уделяется первостепенное внимание.

Постановка задачи. Для прояснения данного вопроса рассматривается задача (на основе трехслойной расчетной зоны) о турбулентном перемешивании в слоистых цилиндрических мишенях. Расчетная область в данном случае состоит из следующих трех зон:

- 1) воздух — окружающая газовая среда ($\rho_{\text{воз}} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$);
- 2) тонкая металлическая оболочка, которая изготовлена из Be ($\rho_{\text{Be}} = 1,85 \text{ г/см}^3$), Pb ($\rho_{\text{Pb}} = 2,6 \text{ г/см}^3$), Au ($\rho_{\text{Au}} = 19,3 \text{ г/см}^3$) или Al ($\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3$);
- 3) *DT*-горючее ($\rho_{\text{Dt}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$).

Таким образом, в данной ситуации имеются две контактные границы (КГ): первая — между окружающей средой и наружной поверхностью металлической оболочки, вторая — между внутренней поверхностью металлической оболочки и *DT*-горючим.

В начальный момент времени эти границы имеют пространственный вид ступени или углового выступа (прямого или обратного) и располагаются перпендикулярно или под углом $\pi/2 - \theta$ к направлению движения ударной волны.

Фронт ударной волны (УВ) и его пространственное положение относительно КГ (они расположены перпендикулярно или под углом θ к фронту УВ) определяется варьируемым значением угла θ , который образуется между фронтом УВ и стороной треугольного уступа. Отметим, что пространственный вид КГ условно имитирует различного рода дефекты в оболочке термоядерной мишени.

В предлагаемой работе рассматриваются три способа ускорения КГ.

Первый способ ускорения КГ (оно может сопровождаться развитием неустойчивости типа Рэля — Тейлора) связан с движением сильной УВ (число Маха $M > 5$), которая падает, а затем проходит через рассматриваемую многослойную цилиндрическую мишень. Это движение УВ может приводить к заметному сжатию сплошных сред.

За меру интенсивности ударной волны примем число Маха

$$M_1 = \frac{u_1 - D}{c_1},$$

где u_1 — скорость воздуха перед фронтом УВ (в выполненных расчетах $u_1 = 0$, $M_1 = -M$); $D = Mc_1$ — скорость фронта УВ. Далее принято, что c_1 , ρ_1 , p_1 — скорость звука, плотность и давление воздуха

перед фронтом УВ. Используя известные соотношения газовой динамики [8], можно найти плотность ρ_2 и скорость u_2 воздуха за фронтом УВ, а также определить давление p_2 за фронтом УВ.

Для обобщенного описания процесса развития радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей обозначим давление p_2 символом p_0 . Тогда можно ввести безразмерный параметр μ_p , описывающий влияние статического давления на исследуемый процесс в виде соотношения $\mu_p = \frac{p}{p_0}$.

При этом параметр $\mu_p = \mu_p(M)$ для рассматриваемого случая есть функция числа Маха M . При проведении расчетов было принято, что $M = 1,3 \dots 15$. Радиус r цилиндрической мишени и плотность ρ_0 КГ, ускоряемой ударной волной, показаны на рис. 1.

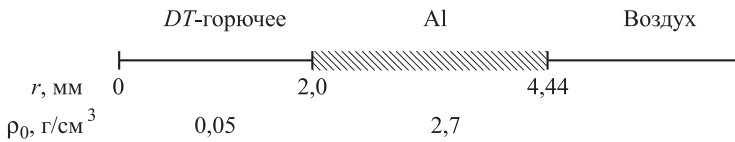


Рис. 1. Радиус слоистой цилиндрической мишени с указанием начальных параметров

Вторым способом ускорения КГ может быть мощное мгновенное энерговыделение в области тонкой металлической оболочки или окружающей среды (в этих двух случаях энерговыделение является варьируемым параметром).

Для реализации второго способа ускорения КГ в начальный момент времени принимается, что в эту область осуществляется мгновенное (однородное вдоль фронта УВ) энерговыделение (на уровне $e_0 \approx 6 \cdot 10^9$ Дж/кг). Такой уровень плотности поглощенной энергии e_0 обуславливает испарение и превращение металлической оболочки в газ (за время $t_0 \approx 10^{-8}$ с). При этом можно принять, что если за время фазового перехода t_0 пространственные границы оболочки не успевают сильно измениться, то возникающее в ней давление составит $p_0 \approx 2,4 \cdot 10^7$ МПа. Таким образом, и для второго способа ускорения КГ можно ввести безразмерный параметр $\mu_p = p/p_0$.

Отметим, что также представляет интерес третий способ генерации неустойчивости КГ, вызванной совместным действием на нее двух первых способов ускорения: падение на КГ сильной УВ и одновременное мгновенное энерговыделение в области тонкой металлической оболочки, разделяющей окружающую среду и термоядерное горючее.

На процесс развития неустойчивостей Рихтмайера — Мешкова и Рэля — Тейлора существенно влияет наличие в расчетной зоне магнитного поля \vec{B} , которое в данных расчетах определяется лишь одной компонентой $\vec{B} = (B_x = 0, B_y = 0, B_z = B_0)$. При этом безразмерным параметром, зависящим от значений B_0 , является параметр $\beta = 2\rho_0/B_0^2$. В расчетах принимали $\beta^{-1} = 0 \dots 1$.

Начальные значения магнитного поля B_0 задаются тремя способами:

- 1) постоянным во всей расчетной зоне ($B_0 = \text{const}$);
- 2) постоянным в пространственной области между наружной поверхностью КГ и расчетной границей окружающей среды;
- 3) постоянным в пространственной области между внутренней поверхностью КГ и расчетной границей DT -горючего.

Общим свойством таких взаимодействий является то, что плотность (за фронтом УВ) вещества, ускоряющего металлическую оболочку и КГ, меньше, чем плотность вещества самой оболочки. В этом случае на КГ между воздухом (или DT -горючего) и КГ развиваются неустойчивости типа Рэля — Тейлора, Рихтмайера — Мешкова с экспоненциальным ростом малых возмущений во времени. В процессе движения КГ условия для роста возмущений на ее поверхности возникают дважды: на стадии ускорения и на стадии торможения. При этом в последнем случае возрастают возмущения на внутренней поверхности оболочки — на ее границе с DT -горючим.

Известно, что для оценки развития нестабильностей с изменением временной переменной t , таких как неустойчивость Рихтмайера — Мешкова или неустойчивость Рэля — Тейлора, применяется число Атвуда, которое может быть описано формулой вида

$$A = \frac{\rho_T - \rho_L}{\rho_T + \rho_L},$$

где ρ_T, ρ_L — плотность «тяжелого» и «легкого» вещества соответственно.

В рассматриваемом варианте задачи, связанной с развитием неустойчивостей типа Рихтмайера — Мешкова, Рэля — Тейлора в трехслойных расчетных зонах, для начального момента времени $t = 0$ можно задать два числа Атвуда — для области первой и второй КГ соответственно:

$$A_{\text{воз}} = \frac{\rho_{\text{КГ}} - \rho_{\text{воз}}}{\rho_{\text{КГ}} + \rho_{\text{воз}}}; \quad A_{DT} = \frac{\rho_{\text{КГ}} - \rho_{DT}}{\rho_{\text{КГ}} + \rho_{DT}},$$

где ρ_{KT} — плотность «внутри» КГ.

Важным геометрическим параметром, влияющим на развитие неустойчивостей, также является аспектное соотношение

$$As = \frac{R_0}{\Delta_0},$$

где R_0 , Δ_0 — начальные радиус и толщина КГ в цилиндрической системе координат.

Для геометрии контактной поверхности, приведенной на рис. 1, необходимо задать два аспектных соотношения:

$$As_1 = \frac{R_0^1}{\Delta_0}; \quad As_2 = \frac{R_0^2}{\Delta_0},$$

где R_0^1 , R_0^2 — минимальный и максимальный начальные радиусы КГ в цилиндрической системе координат.

Из изложенного выше следует, что процесс развития радиационно-магнитных гидродинамических неустойчивостей типа Рэлея — Тейлора, Рихтмайера — Мешкова — это многопараметрическая задача, которая зависит от следующих комбинаций безразмерных параметров.

Для первого способа ускорения КГ такой комбинацией является:

- $(M, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As_1, As_2)$ при начальных условиях, соответствующих «ступенчатой» КГ;
- $(M, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As)$ при начальных условиях, соответствующих «угловой» КГ.

Для второго способа ускорения КГ:

- $(\mu_p, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As_1, As_2)$ при начальных условиях, соответствующих «ступенчатой» КГ;
- $(\mu_p, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As)$ при начальных условиях, соответствующих «угловой» КГ.

Для третьего способа ускорения КГ:

- $(M, \mu_p, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As_1, As_2)$ при начальных условиях, соответствующих «ступенчатой» КГ;
- $(M, \mu_p, \theta, \beta, A_{\text{возд}}, A_{DT}, As)$ при начальных условиях, соответствующих «угловой» КГ.

Математическая постановка. Относительно сложные пространственные движения контактных границ (соответствующих линейным и нелинейным стадиям развития упомянутых неустойчивостей), сопровождается сложным взаимодействием ударных волн, волн разрядки и контактных разрывов, которое может быть математически описано только в рамках многомерных многокомпонентных магнитно-радиационных уравнений Рейнольдса с учетом спонтанных элект-

ромагнитных полей и турбулентности (в q - ω -приближении) [9]. Особенность данной модели заключается в учете и описании движения КГ (с помощью модели «фиктивной» примеси), разделяющей плазму вещества и окружающий газ. Электромагнитные процессы описываются системой уравнений Максвелла и Ома в плазме с конечной проводимостью. Перенос излучения рассматривается в рамках многогруппового диффузионного приближения. Численное решение разработанной нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели базируется на методе расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям.

Для газодинамической части расщепленных уравнений применяется метод, который опирается на метод предиктор-корректор [10]. Для стадии предиктора используется система квазиодномерных уравнений Эйлера в обобщенной недивергентной характеристической форме, в которой неизвестные величины записаны относительно квазиинвариантов Римана [11]. На этапе корректора используется дивергентная форма уравнений. Указанные системы уравнений решаются с помощью разработанного авторами варианта нелинейной монотонизированной компактной разностной схемы повышенного (7-го) порядка точности.

Исходная дифференциальная система уравнений относительно временной переменной t есть система обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, которая была решена 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 полунявным методом расщепления по физическим процессам. Расчет входящих в данную систему уравнений термодинамических $e(T, \rho)$, $p(T, \rho)$ параметров рабочих сред проводился в рамках приближения локального термодинамического равновесия или на основе модели среднего заряда. В последнем случае уравнения этой модели решаются методом Розенброка, позволяющим преодолеть «жесткость» системы уравнений.

Результаты численного моделирования. Приведенные на рис. 2–5 некоторые результаты расчетов при наличии внешнего магнитного поля ($p_{\text{магн}} \neq 0$) и без него ($p_{\text{магн}} = 0$) соответствуют движению УВ (число Маха ударной волны $M_{\text{УВ}} = 10$) через невозмущенную ($T_{\text{возд}} = 300$ К) внешнюю по отношению к КГ газовую среду и ее по-

следующему «падению» на КГ, которая в начальный момент времени $t = 0$ имеет пространственный вид ступени (см. рис. 3). Материалом «ступенчатой» КГ является алюминий (при $t = 0$ $T_{Al} = 300$ К).

Известные простые оценки [1] показывают, что изменение с течением времени t амплитуды возмущений газодинамических параметров КГ пропорционально волновому числу $k = 2\pi/\lambda$, а это означает, что при $\lambda \rightarrow 0$ они возрастают неограниченно. Таким образом, при численном анализе неустойчивостей рассматриваемых типов важно наиболее точно разрешать именно коротковолновые ($\lambda \rightarrow 0$) возмущения, что, в свою очередь, приводит к необходимости сгущения расчетной сетки вблизи и в пределах КГ [12–20].

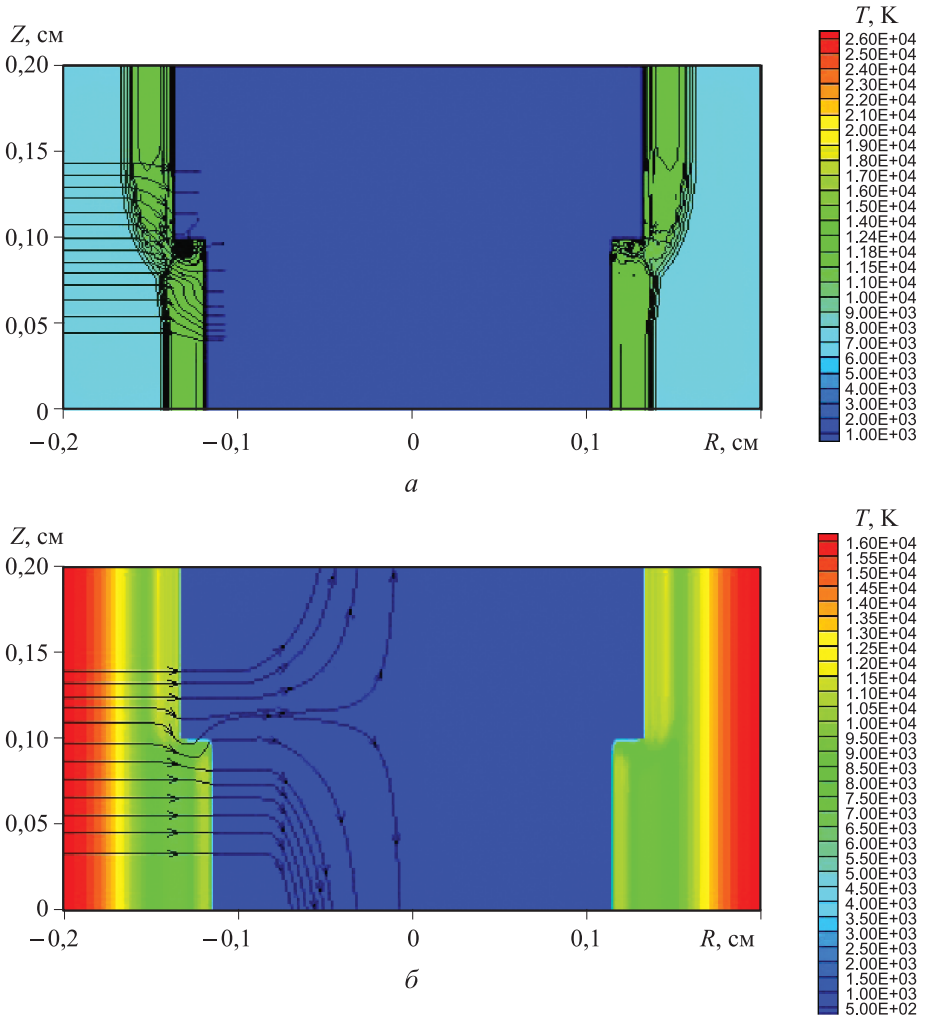


Рис. 2. Пространственное распределение температуры в расчетной области в момент времени $t = 10^{-5}$ с:
 a — $p_{\text{магн}} = 0$; b — $p_{\text{магн}} \neq 0$

Из анализа показанных на рис. 2–5 пространственных распределений следует, что после падения УВ и ее дифракционного отражения (с усилением) от КГ значения газодинамических параметров вблизи нее заметно увеличиваются. В частности, в области над поверхностью «ступенчатой» части КГ (наиболее удаленной от оси цилиндрической системы координат $R-Z$) возрастают значения всех термодинамических параметров: $T = 17 \cdot 10^3$ К, $p = 10^2$ МПа, $p_{\text{магн}} = 0$). В результате вблизи угловой точки КГ поток плазмы ускоряется (см. рис. 5), создаются условия для отрыва потока от поверхности КГ и возникновения возвратно-вихревого течения (при условии отсутствия внешнего магнитного поля, т. е. при $p_{\text{магн}} = 0$).

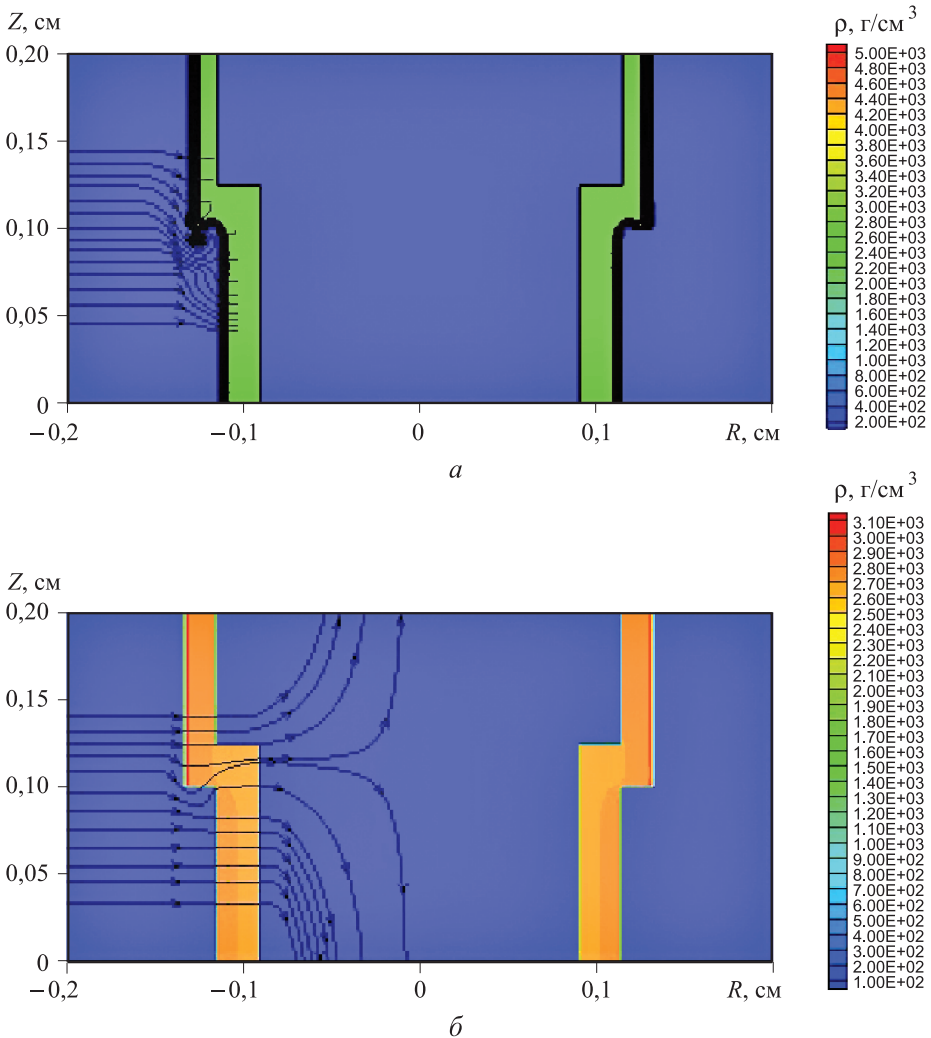


Рис. 3. Пространственное распределение плотности в расчетной области в момент времени $t = 10^{-5}$ с:
 a — $p_{\text{магн}} = 0$; $б$ — $p_{\text{магн}} \neq 0$

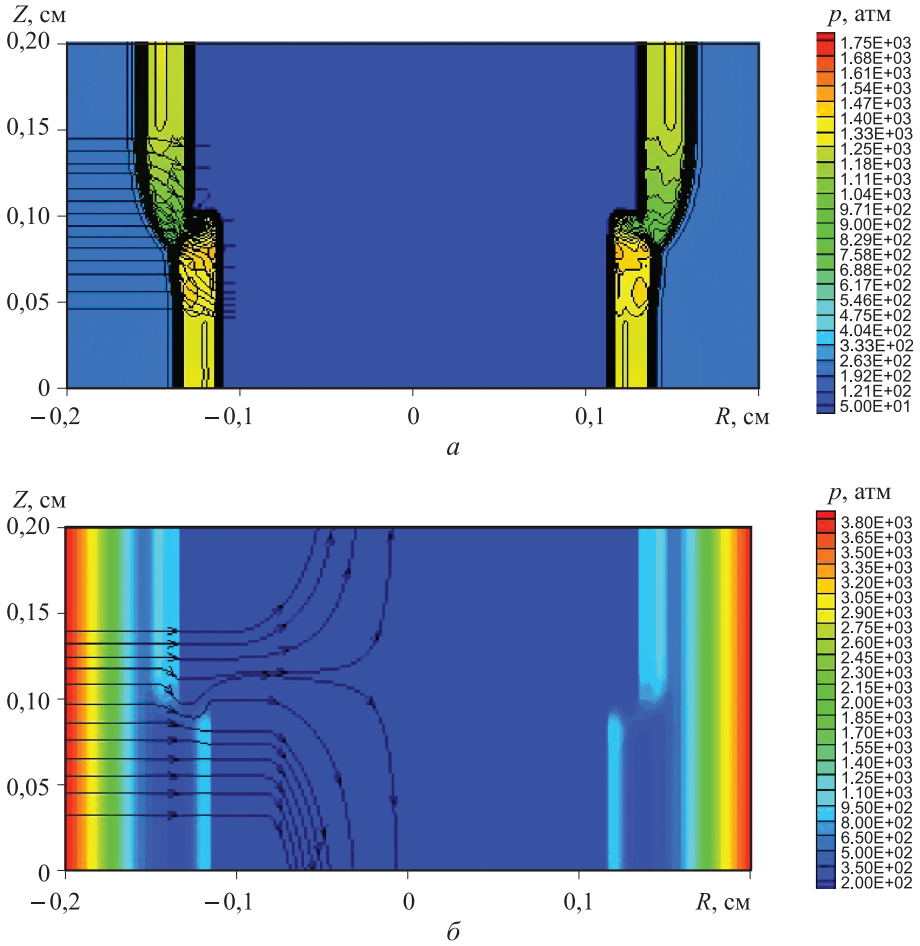


Рис. 4. Пространственное распределение давления в расчетной области в момент времени $t = 10^{-5}$ с:
 a — $p_{\text{магн}} = 0$; b — $p_{\text{магн}} \neq 0$

Если в процессе ударно-волнового взаимодействия КГ и падающего на нее потока плазмы участвует внешнее магнитное поле (магнитное давление вдоль координаты R максимально вблизи верхней границы: $p_{\text{магн}} = 1$ МПа при $R = 0,2$ см), то значения термодинамических параметров несколько снижаются: $T = 11 \cdot 10^3$ К, $p = 80$ МПа (по сравнению со случаем $p_{\text{магн}} = 0$). При действии на КГ внешнего магнитного поля создаются условия для подавления возвратно-вихревого течения вблизи нее (при $p_{\text{магн}} = 0$).

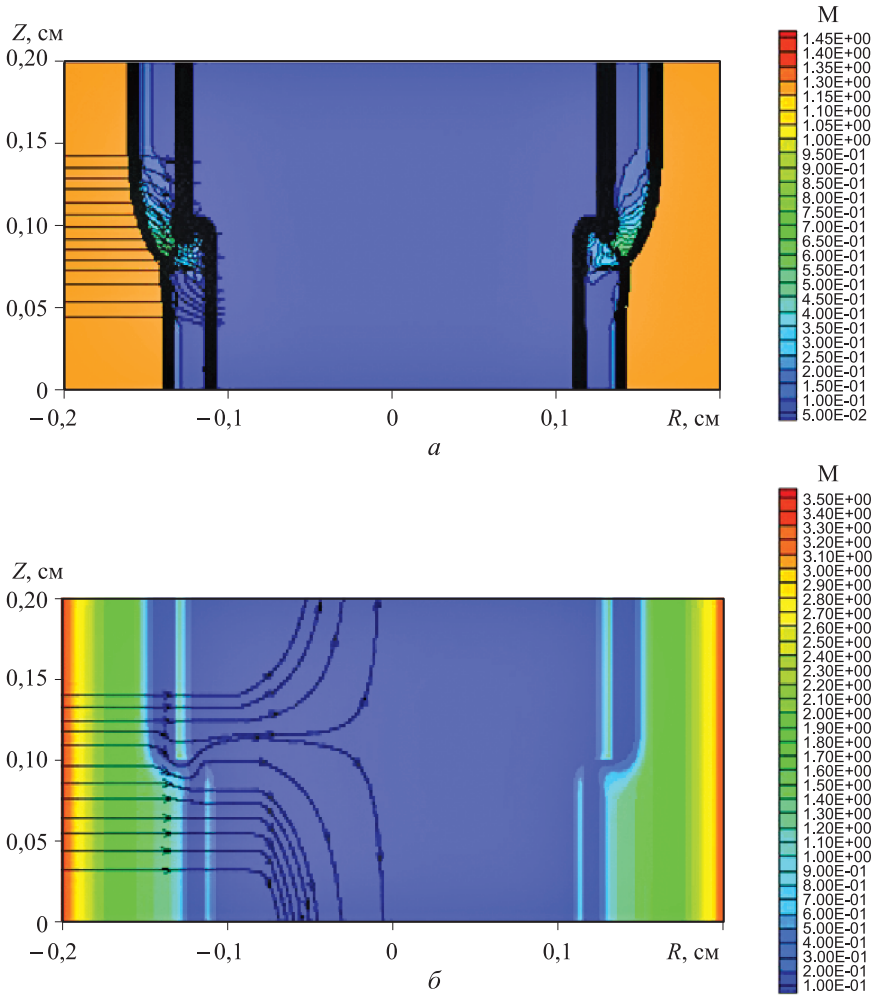


Рис. 5. Пространственное распределение числа Маха в расчетной области в момент времени $t = 10^{-5}$ с:
 a — $p_{\text{магн}} = 0$; b — $p_{\text{магн}} \neq 0$

Выводы. На основе разработанной авторами многомерной математической модели, которая использует многокомпонентные магнитно-радиационных уравнения Рейнольдса, уравнения спонтанных электромагнитных полей и турбулентности (в q - ω -приближении), исследовано 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 КГ.

Выполненные в работе предварительные расчеты показывают, что имеется возможность воздействия внешнего электромагнитного поля на процесс развития указанных неустойчивостей.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН и программ фундаментальных исследований отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», мероприятие 1.6, госконтракт № 14.516.11.0083.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. *Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования*. Москва, Физматлит, 2006, 304 с.
- [2] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical Modeling of Magnetized Plasma Compressed by the Laser Beams and Plasma Jets. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2013, no. 1 (83), pp. 12–14.
- [3] Ryzhkov S.V. The Behavior of a Magnetized Plasma under the Action of Laser with High Pulse Energy. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*. 2010, no. 4, pp. 105–110.
- [4] Рыжков С.В., Симонов М.М. Численное моделирование отдельных теплофизических параметров магнитно-инерциальной плазмы. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2011, т. 11. URL: http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-023_Ryzhkov_Simonov.pdf.
- [5] Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Магнитно-инерциальный термоядерный синтез с лазерным обжатием замагниченной сферической мишени. *Прикладная физика*, 2011, № 1, с. 65–72.
- [6] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing the Numerical Model for Studying Jaser-Compression of Magnetized Plasmas. *Acta Technica*, 2011, vol. 56, pp. 454–467.
- [7] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. The Plasma Jet/Laser Driven Compression of Compact Plasmoids to Fusion Conditions. *Journal of Fusion Energy*, 2012, vol. 31, issue 1, pp. 7–12.
- [8] Овсянников Л.В. *Лекции по основам газовой динамики*. Москва, Наука, 1981, 368 с.
- [9] Кузенов В.В., Рыжков С.В. *Математическая модель взаимодействия лазерных пучков высокой энергии импульса с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле*. ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН. Препринт. Москва, 2010, № 942, 57 с.
- [10] Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. *Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений*. Москва, Физматлит, 2001.
- [11] Головизнин В.М. *Балансно-характеристический метод численного решения уравнений газовой динамики*. ДАН, 2005, т. 403, № 4, с. 1–6.
- [12] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A. Analysis of the Compression and Heating of Magnetized Plasma Targets for Magneto-Inertial Fusion. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, no. 1T, pp. 135–138.
- [13] Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Capitelli M., Colonna G. Numerical Analysis on Near-Surface Laser Plasma in Gases and Vacuum. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 9–12 January 2006, Reno, Nevada, AIAA 2006-1174*.

- [14] Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Petrusev A.S. Radiation Gas Dynamics of Aluminium Laser Plume in Air. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 9–12 January 2008, Reno, Nevada, AIAA 2008-1108*.
- [15] Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Sharikov I.V. Numerical Simulation of Linear-Stabilized Surface Discharge in Rare Air. *Fifteenth Int. Conf. on MHD Energy Conversion and Sixth Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. 24–27 May 2005, Moscow, Russia*, vol. 2, p. 650.
- [16] Кузенов В.В. Математическое моделирование основных плазмодинамических характеристик в лазерном факеле вблизи алюминиевой мишени. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 4 (77), с. 45–77.
- [17] Кузенов В.В., Филипский М.В. Численное моделирование отдельных теплофизических параметров лазерной плазмы. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2010, т. 9.
URL: <http://chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-021.pdf>.
- [18] Кузенов В.В., Филипский М.В. Расчет переноса излучения в приповерхностных лазерных факелах. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2008, т. 7. URL: <http://chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-038.pdf>.
- [19] Кузенов В.В. Использование регулярных адаптивных сеток для анализа импульсных сверхзвуковых течений. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2008, т. 7. URL: <http://chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-016.pdf>.
- [20] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Evaluation of hydrodynamic instabilities in inertial confinement fusion target in a magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*, 2013, no. 4 (86), pp. 103–107.

Статья поступила в редакцию 21.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кузенов В.В., Рыжков С.В. Анализ действия внешнего магнитного поля на структуру течения вблизи поверхности контактной границы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/criogen/719.html>

Кузенов Виктор Витальевич родился в 1956 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1983 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Радиационная газовая динамика» ИПМех РАН, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 публикаций в области теплофизики и радиационной газовой динамики. e-mail: vik.kuzenov@gmail.com

Рыжков Сергей Витальевич родился в 1974 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997 г. и аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2001 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика», ученый секретарь Ученого совета Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение», координатор платформы сотрудничества столичных технических университетов Центральной и Восточной Европы (СЕЕМУТ). Лауреат премии РАО «ЕЭС России» и Российской академии наук «Новая генерация» в области энергетики и смежных наук, лауреат премии и медали РАН для молодых ученых в области физико-технических проблем энергетики. Специалист в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Автор более 100 научных работ в области теплофизики, физики плазмы, радиационной газовой динамики и ядерной энергетики. e-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru