N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 3, Number 319 (2018), 153 – 159

UDC 533.93

T.S. Ramazanov[1], S.K. Kodanova[1], N.Kh. Bastykova[1], A. Tikhonov[2], S.A. Maiorov[3]

[1]IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan;
[2]School of Science and Technology, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan;
[3]General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ramazan@physics.kz

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROPERTIES OF HOT DENSE PLASMA

Abstract. In this work hydrodynamic properties of hot dense plasma bunch have been studied in terms of their application to the problem of inertial confinement fusion. The two-temperature hydrodynamic equations taking into account the electron thermal conductivity and kinetics of the charge composition are presented. The following model problems are considered: expansion of a plasma bunch in the vacuum, compression of the plasma by shock waves, on the role of the electronic thermal conductivity in compression of the plasma bunch by shock waves, interaction of the plasma bunch with a laser and a beam of heavy ions. On the basis of the developed numerical methods the test problems arising in the problem of inertial confinement fusion are analyzed. The results shows that the expansion wave tail of the electron temperature is much higher than the ion as time energy exchange between electrons and ions is proportional to the ratio of their masses. In the case of a spherical geometry in passing of the shock wave to the center, reaching the center several times and reflected from it, and a dense layer of the ablator, resulting in a significant increase in density and temperature.

Key words: Hot dense plasma, Hydrodynamic model, Shock wave, Two-temperature plasma, The target for inertial confinement fusion, Compression by shock waves.

УДК 533.93

Т.С. Рамазанов[1], С.К. Коданова[1], Н.Х. Бастыкова[1] , А. Тихонов[2], С.А. Майоров[3]

[1]НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан;
[2]Школа Наук и Технологий, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан;
[3]Институт общей физики РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СГУСТКА ПЛОТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация. В данной работе исследованы гидродинамические свойства сгустка плотной горячей плазмы применительно к проблеме инерциального термоядерного синтеза. Приведены уравнения двухтемпературной гидродинамики с учетом электронной теплопроводности, кинетики зарядового состава. Рассмотрены модельные задачи: разлет плазменного сгустка в вакуум, сжатие плазмы ударными волнами, о роли электронной теплопроводности при сжатии сгустка плазмы ударными волнами, взаимодействие сгустка плазмы с лазерным излучением и пучком тяжелых ионов. На основе разработанных численных методов получены и проанализированы тестовые задачи, возникающие в проблеме инерциального термоядерного синтеза. Результаты показывают, что в хвосте волны разрежения электронная температура значительно превышает ионную, так как время обмена энергии между ионами и электронами велико из-за большого отношения их масс. А также, в случае сферической геометрии, при прохождение ударной волны к центру, она, достигая несколько раз центра и отражаясь от него и плотного слоя аблятора, приводит к значительному повышению плотности и температуры.

Ключевые слова: Плотная горячая плазма, Гидродинамическая модель, Ударная волна, Двухтемпературная плазма, Мишени для инерционного термоядерного синтеза, Сжатие ударными волнами.

Введение. На сегодняшний день в мире проводится большое количество теоретических и экспериментальных исследований в области инерционного термоядерного синтеза (ИТС) [1, 2]. Из-за сложностей в проведении экспериментов с полномасштабным управляемым термоядерным взрывом очень широко используются методы вычислительного эксперимента [3-5]. Среди них модели на основе уравнений гидродинамики являются разумным компромиссом между точностью модели и сложностью получения численного решения [6-8].

В данной работе используется гидродинамическая модель двухтемпературной плазмы в условиях инерционного термоядерного синтеза [2]. Рассматриваемая задача связано с энерговкладом лазерного излучения в твердотельный слой металла (иногда - пластика), окружающего дейтерий-тритиевый газ – это слой т.н. аблятора. В нем образуется плазма многозарядных ионов с неравновесным ионным составом, разлет которой определяет важнейший для термоядерного синтеза параметр удержания - произведение радиуса дейтерий-тритиевого сгустка на его плотность.

Свойства плотной горячей плазмы, получаемой на этом этапе поджига термоядерной мишени, в рамках гидродинамической модели изучаются на примере нескольких самостоятельных задач. В каждой из них на основе численного эксперимента рассмотрены следующие упрощенные физические системы.

Первая из них, это разлет плотного горячего сгустка в вакуум. Здесь представляет интерес сравнение с точными решениями - волной разрежения, исследование кинетических свойств многозарядной плазмы - нарушение ионизационного равновесия (закалка ионного состава) [9].

Вторая задача связана с более сложным гидродинамическим явлением - ударными волнами в двухтемпературной плазме [9]. Здесь важную роль играют отрыв ионной и электронной температур и волна электронной теплопроводности.

В третьей задаче рассмотрен случай воздействия мощного лазерного импульса на плотную оболочку из золота, ограничивающую смесь дейтерия с тритием. В ней сжатие дейтериево-тритиевой смеси происходит за счет разлета внешней оболочки, и также важную роль играют волна электронной теплопроводности и ударная волна, распространяющиеся внутрь мишени.

2. Постановка задачи

В случаях плоской, цилиндрической или сферической симметрии (n=0, 1, 2) система уравнений газовой динамики в лагранжевых координатах с учетом кинетических явлений (вязкость, теплопроводность, неравновесность ионного состава и различие температур ионов и электронов, вклад неупругих процессов ионизации, рекомбинации и потерь на излучение в энергобалансе электронов) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{\rho}\right)=\frac{\partial}{\partial s}\left(r^n u\right),\quad u=\frac{\partial r}{\partial t},\quad \frac{\partial u}{\partial t}=r^n\frac{\partial p}{\partial s}+F_{vis}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t}=-p_i\frac{\partial}{\partial s}\left(r^n u\right)+\left(Q_{\Delta T}-Q_{i\,viscocity}\right)/\rho-\frac{\partial}{\partial s}\left(r^n q_i\right), \tag{2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t}=-p_e\frac{\partial}{\partial s}\left(r^n u\right)+\left(-Q_{\Delta T}-Q_{e\,viscocity}+Q_{non\ elastic}\right)/\rho-\frac{\partial}{\partial s}\left(r^n q_e\right), \tag{3}$$

$$p_e=N_eT_e=\frac{z}{m_i}\rho T_e,\qquad p_i=N_iT_i=\frac{\rho}{m_i}T_i \tag{4}$$

Эта система уравнений должна быть дополнена уравнениями кинетики ионного состава. Уравнения баланса для описания ионного состава многозарядной плазмы имеют вид:

$$\frac{\partial y^{(z)}}{\partial t}=\Gamma^{(z)}/N_i,\quad \mathrm{z}=1,2,\ldots,\mathrm{z}_{\max} \tag{5}$$

здесь $y^{(z)}=N^{(z)}/N_i$ - относительная концентрация ионов с кратностью ионизации z, $z_{\max}$ - максимальная степень ионизации

$$\Gamma^{(1)}=\beta^{(1)}N_e^2N^{(2)}-S^{(1)}N_eN^{(1)}, \tag{6a}$$