

В.В. Кузенов^{1,2}, С.В. Рыжков¹, В.В. Шумаев¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

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

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛАЗМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены некоторые газодинамические аспекты, характерные для установок инерциального термоядерного синтеза, и, в частности, магнитно-инерциального синтеза. Особое внимание уделено зависимостям от температуры термодинамических функций (давлению, удельной внутренней энергии и энтропии) смеси, а также степени ионизации. Приведены результаты расчетов этих величин на основе моделей Саха и Томаса-Ферми для случая смеси веществ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучается возможность сочетания двух видов ядерной энергетики, создания так называемых гибридных ядерно-термоядерных реакторов - гибридеров. Термоядерные установки могут быть использованы для уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов реакторов деления. Перспективные технологии и энергетические системы высокой плотности, а именно источники нейтронов и протонов, будут востребованы в ближайшее время для материаловедения, анализа и неразрушительного контроля, производства медицинских изотопов, уничтожения химических отходов, обучения персонала и т.д.

В свою очередь, существует промежуточный магнитно-инерциальный термоядерный синтез [1-3], где в качестве источников разгона могут быть использованы емкостные и индуктивные накопители (электродинамический метод), взрывомагнитные генераторы, заряды взрывчатого вещества (взрывной метод) и энергия сжатого газа (газодинамический метод). Мы рассматриваем обжатие и нагрев плазменного образования, удерживаемого сильным внешним магнитным полем, высокоскоростными плазменными струями и лазерными пучками с высокой энергией импульса. Сверхсильные магнитные поля уменьшают электронные тепловые потери и обеспечивают достаточное удержание плазмы.

Для расчета теплофизических процессов установок МИТС, компактного мощного источника термоядерных нейтронов, а также экспериментальных прототипов перспективных систем и технологических устройств на основе термоядерной плазмы в магнитном поле необходимо разработать методики расчетно-теоретического обоснования энергетической эффективности и оптимизации альтернативных систем и перспективных направлений

энергетики. Кроме того, определить магнитно-инерциальные режимы перспективных установок: термоядерных реакторов с плазменной (аргоновой или ксеноновой) оболочкой (коэффициент усиления плазмы $Q = 10-20$) и нейтронных генераторов ($Q = 0.1-0.5$) и оптимизировать режимы с учетом технических требований, допускающих создание экономически конкурентоспособных промышленных установок.

Наиболее критичной частью работы системы на основе магнитно-инерциального удержания высокотемпературной плазмы является конечная стадия сжатия, когда необходимы соответствующая изоляция и удержание плазмы, вращательная скорость для гидродинамической устойчивости. Авторами разработан двумерный радиационный магнитогазодинамический код PLUM, который является частью программного комплекса NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) и включает радиационный транспорт в многогрупповом диффузионном приближении и газодинамику с динамической адаптивной сеткой и конечно-разностной схемой повышенного порядка точности, а также влияние энерговыделения, вызванного протекающими в плазме термоядерными реакциями, на гидродинамику плазмы. В работах [4-9] показана возможность подавления гидродинамической неустойчивости внешним магнитным полем.

2. ГАЗОДИНАМИКА И УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Важно осуществить такой режим сжатия мишени, когда до температуры зажигания доводится лишь центральная её часть, а остальная часть топлива остается холодной. Этот режим характеризуется минимальной энергией драйвера, поскольку она используется только для сжатия топлива до высокой плотности. Энергия драйвера вкладывается во внешние слои мишени. Затем в результате электронной теплопроводности эта энергия переносится внутрь поверхности абляции, где она вызывает нагрев и разлёт вещества мишени. Большое давление, возникающее в результате абляции, приводит к созданию ударной волны, направленной внутрь мишени. В результате топливо сжимается до очень высокой плотности изоэнтропийно [10]. При достижении максимального сжатия центральная область мишени доводится до температуры инициирования термоядерных реакций сходящи-

мися ударными волнами. В результате образуется волна термоядерного горения, распространяющаяся из центра мишени к её периферии сквозь холодное сжатое топливо.

Чтобы обеспечить такое энергетически выгодное термоядерное горение, гидродинамика процесса имплозии должна удовлетворять следующим условиям [10]: Во-первых, необходимо сжать ядро мишени в изоэнтروпийном режиме до значений $\rho R > 1 \text{ г/см}^2$, где ρ – плотность плазмы, R – радиус мишени. Во-вторых, необходимо обеспечить такой режим сжатия, при котором интенсивность ударной волны, сходящейся в центре мишени, была бы достаточной для нагрева топлива и инициирования термоядерных реакций в небольшой центральной области перегретого топлива в момент схлопывания ударных волн в центре мишени.

Заметим, что в присутствии сильного магнитного поля, характерного для установок МИТС, условие $\rho R > 1 \text{ г/см}^2$ облегчается [11, 12].

Требуется рассматривать процессы изоэнтропийного сжатия мишени сходящейся ударной волной в связке с уравнениями состояния вещества на различных стадиях, в том числе и на стадии сильного сжатия.

Для получения уравнений состояния вещества в области высоких температур и плотностей (темпе-

ратуры $T > 10^5 \text{ К}$, плотности порядка плотности твердого тела и выше) обычно применяется модель Томаса-Ферми [13–17]. Для более низких температур и плотностей используется модель ионизационного равновесия (модель Саха) [18–20].

Переходная область термодинамических параметров $10^3 \text{ К} < T < 10^6 \text{ К}$, $10^{-7} < \rho < 10^{-1} \text{ г/см}^3$ описывается, как моделью Саха, так и моделью Томаса-Ферми. При этом известно, что вещество при указанных параметрах удовлетворяет условиям локального термодинамического равновесия [13, 14, 20].

Методика расчета степени ионизации и термодинамических свойств (давления, удельной внутренней энергии и энтропии) смесей ионизованных газов описана в следующих работах: для модели Томаса-Ферми [14–16, 21–22], для модели ионизационного равновесия (модели Саха) [18, 19].

На рис. 1–2 представлены графические зависимости от температуры степени ионизации \bar{Z} , давления P , удельной внутренней энергии E и энтропии S для смеси Li + 10% In при средних плотностях $\rho = 3 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$. Расчет по модели Томаса-Ферми выполнен авторами, значения степени ионизации и термодинамические функции по модели Саха взяты из таблиц [23].

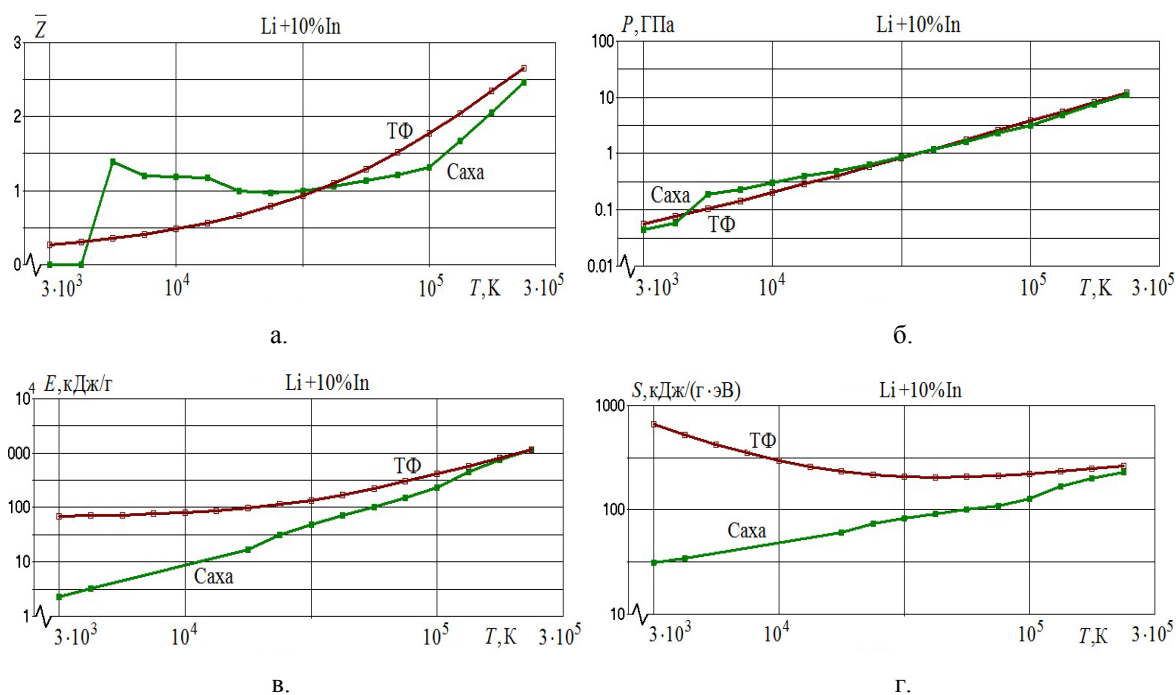


Рис. 1. Термодинамические функции смеси Li + 10% In в зависимости от температуры, рассчитанные по моделям Саха и Томаса-Ферми при средней плотности $3 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$: а. — степень ионизации; б. — давление; в. — удельная внутренняя энергия; г. — удельная энтропия.

Из рисунков видно, что при $T \sim 10^5 \text{ К}$ обе модели показывают качественно сходные результаты

для степени ионизации и всех термодинамических функций. При меньших температурах наблюдается значительная разница в результатах, объясняемая тем, что термодинамические параметры, полученные по модели Томаса–Ферми, имеют заметную ошибку [13, 14, 16]. При этом точность модели То-

маса–Ферми увеличивается с ростом температуры, поскольку квантовые и обменные поправки к данной модели обратно пропорциональны температуре [14, 16]. В свою очередь, модель Саха подходит к границе своей применимости при температурах $T > 10^5$ К [13, 20].

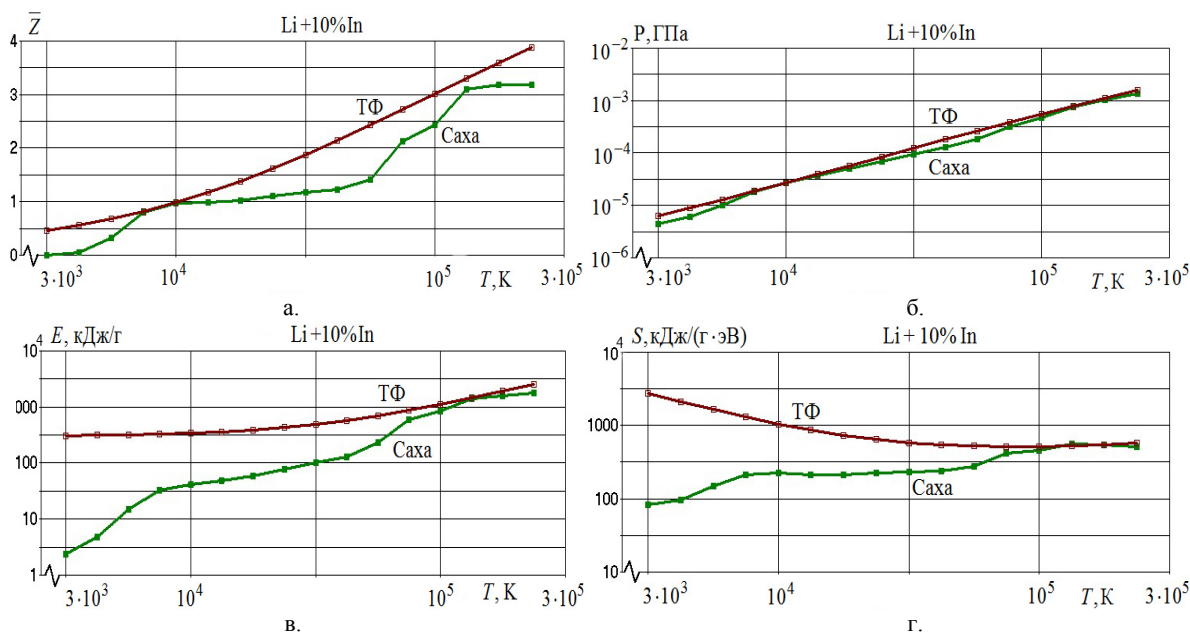


Рис. 2. То же, только для средней плотности смеси $3 \cdot 10^{-6}$ г/см³: а. — степень ионизации; б. — давление; в. — удельная внутренняя энергия; г. — удельная энтропия.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В переходной области термодинамических параметров 10^3 К $<$ $T <$ 10^6 К для смеси Li + 10% In при средних плотностях $3 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^{-6}$ г/см³ вычислены степень ионизации, давление, удельная внутренняя энергия и энтропия в зависимости от температуры.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации № 13.79.2014/К.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- T — температура, К;
- ρ — плотность г/см³;
- \bar{Z} — степень ионизации;
- P — давление, ГПа;
- E — удельная внутренняя энергия, кДж/г;
- S — удельная энтропия, кДж/(г·эВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Математическая модель взаимодействия лазерных пучков высокой энергии импульса с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле // Препринт ИПМех РАН. М.: Институт Проблем Механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2010. № 942. 57 с.
2. Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Магнитно-инерциальный термоядерный синтез с лазерным обжа-

- тием замагниченной сферической мишени // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 65–72.
3. Рыжков С.В. Современное состояние, проблемы и перспективы термоядерных установок на основе магнитно-инерционного удержания горячей плазмы // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78, № 5. С. 647–653.
4. 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. 2013. № 4 (86). P. 103–107.
5. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды / В.В. Кузенов, А.И. Лебо, И.Г. Лебо, С.В. Рыжков // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 334 с.
6. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Радиационно-гидродинамическое моделирование контактной границы плазменной мишени, находящейся во внешнем магнитном поле // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 26–30.
7. 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. 2013. № 1 (83). P. 12–14.
8. Samtaney R. Suppression of the Richtmyer–Meshkov instability in the presence of a magnetic field // Phys. Fluids. 2003. V. 15. L53.
9. Sano T., Inoue T., Nishihara K. Critical magnetic field strength for suppression of the Richtmyer–Meshkov instability in plasmas // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 205001.
10. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984. 304 с.

11. **Basko M.M., Kemp A.J, Meyer-ter-Vehn J.** Ignition conditions for magnetized target fusion in cylindrical geometry // Nuclear Fusion. 2000. V. 40. P. 59–68.
12. **Шумаев В.В., Рыжков С.В.** Сравнение критериев зажигания D-T мишени в условиях магнитно-инерциального термоядерного синтеза // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Баумана. Электронное издание. 2012. №3.
URL.<http://sntbul.bmstu.ru/doc/458155.html>
13. **Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.** Физика ударных волн и высокотемпературных явлений гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
14. **Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б.** Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчёта росселандовых пробегов и уравнений состояния. М.: Физматлит, 2000. 400 с.
15. **Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В.** Определение термодинамических свойств замагниченной плазмы на основе модели Томаса–Ферми // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 22–25.
16. **Dyachkov S., Levashov P.** Region of validity of the finite-temperature Thomas–Fermi model with respect to quantum and exchange corrections // Phys. Plasmas. 2014. V. 21, № 5. 052702.
17. **Кузенов В. В., Рыжков С. В., Шумаев В. В.** Сравнение термодинамических свойств ионизованных газов по моделям Томаса–Ферми и Саха в области их совместной применимости // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. №5.
18. **Калиткин Н.Н., Луцкий К.И.** Обобщение уравнений Саха на жидкую плазму // ДАН. 2014. Т. 457, № 2. С. 157–161.
19. **Калиткин Н.Н., Козлитин И.А.** Сравнение детального состава плазмы в различных моделях // Математическое моделирование. 2008. Т. 20, № 4. С. 69–77.
20. **Термодинамические** и оптические свойства ионизованных газов при температурах до 100 эВ: Справочник / Ю.В. Бойко [и др.] М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
21. **Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В.** Применение модели Томаса – Ферми для определения термодинамических свойств замагниченной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. №3.
22. **Шумаев В.В.** Выражение термодинамических функций плазмы на основе модели Томаса-Ферми с квантовыми и обменными поправками // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Баумана. Электронное издание. 2014. №9.
URL.<http://sntbul.bmstu.ru/doc/732050.html>
23. **Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Рогов В.С.** Таблицы термодинамических функций и транспортных коэффициентов плазмы. М.: Изд. ИПМ АН СССР, 1972. 112 с.