

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК КСЕНОНА В ДЕЙТЕРИЕВО-ТРИТИЕВУЮ СМЕСЬ НА РАБОТУ МИШЕНИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

*Аверин Максим Сергеевич (MSAverin@vniief.ru), Гнутов Артем Сергеевич,
Елисеев Геннадий Михайлович, Тихонов Александр Викторович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Ксенон в сравнении с легкими элементами обладает лучшей сжимаемостью при температурах $T > \sim 0,01$ кэВ, т. к. имеет высокий порог ионизации и меньшую теплоемкость. Это создает условия для большей эффективности термоядерного горения при наличии в топливе атомов ксенона. Рассматриваются основные физические закономерности сжатия и термоядерного горения топлива с добавками ксенона. На основании расчетных данных на примере инерциального термоядерного сжатия дейтериево-тритиевой (DT) капсулы с аблятором $\text{Be}_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$ показывается влияние различных по концентрации добавок ксенона на итоговый нейтронный выход. Определяются условия и критерии, при которых добавка ксенона в дейтерий-тритий является оправданной, с точки зрения увеличения нейтронного выхода. Отдельно анализируется влияние пробега излучения в газовой смеси на процесс сжатия.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), DT капсула, ксенон, пробег излучения.

NUMERICAL AND THEORETICAL STUDIES OF XENON DOPING ON THE PERFORMANCE OF A DEUTERIUM-TRITIUM INERTIAL CONFINEMENT FUSION TARGET

*Averin Maksim Sergeevich (MSAverin@vniief.ru), Gnutov Artem Sergeevich,
Eliseev Gennadiy Michailovich, Tikhonov Aleksandr Viktorovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Xenon has higher compressibility than light chemical elements at temperatures $T > \sim 0.01$ keV because of its high ionization threshold and lower heat capacity. This creates favorable conditions for more effective thermonuclear burning of xenon-doped deuterium-tritium fuel. We consider basic regularities in the physics of compression and burning of xenon-doped thermonuclear fuel and use numerical simulations of a compressed DT capsule with a $\text{Be}_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$ ablator to reveal the effect of doping with xenon in various concentrations on the neutron yield. Conditions and criteria making xenon doping reasonable in terms of a higher neutron yield are identified. A separate issue under consideration is the influence of radiation path in the gas mixture on the capsule compression.

Key words: inertial confinement fusion, DT capsule, xenon, radiation path.

Введение

Инерциальный термоядерный синтез – один из способов получения управляемой термоядерной реакции [1–2]. В его основе лежит воздействие на мишень мощного импульсного источника энергии. Сжатие и удержание плазмы происходит за счет сил

инерции самой мишени. Одна из схем ИТС – непрямой лазерный ИТС. Данная схема предполагает преобразование энергии лазерного излучения в рентгеновское излучение в конверторе из тяжелого вещества (золото), которое уже в свою очередь воздействует на оболочку мишени-аблятора и сжимает капсулу по принципу радиационной имплозии. В каче-

стве термоядерного топлива используется DT – смесь, т. к. для реакции дейтерий-тритий величина потенциального барьера наименьшая из возможных величин.

Обеспечение самоподдерживания термоядерной реакции и выделения в объеме достаточного количества энергии за счет поглощения альфа частиц характеризуется резким увеличением нейтронного выхода и температуры. Подобная ситуация называется термоядерным зажиганием. Зажигание имеет пороговый характер и в первом приближении описывается критериями по максимальному сжатию топлива $\rho R \sim 1 \text{ г/см}^2$ и температуре ионов $T > 5 \text{ кэВ}$. Преодоление этого порога на лазерных установках мегаджоульного класса является одной из ключевых целей ИТС. Одним из направлений в рамках этой цели является поиск оптимальных конструкций мишеней ИТС.

В августе 2021 г. на американской установке NIF эта цель впервые в научной практике была достигнута – удалось получить рекордное количество DT термоядерных реакций $\sim 4,5 \text{ E}17$, что эквивалентно выделению в термоядерных реакциях энергии 1,3 МДж, при вложенной энергии лазерного излучения около 1,8 МДж. Этот результат без сомнения можно трактовать как зажигание.

Принцип уменьшения теплоемкости газовой смеси при добавлении тяжелых элементов

Наличие любых примесей в термоядерном топливе рассматривается многими авторами скорее, как негативное явление [1], [2]. Однако, надо понимать, что подобное утверждение справедливо только в рамках ухудшения процесса термоядерного горения. Между тем при добавлении тяжелых элементов в газовую смесь можно уменьшить ее теплоемкость. Уменьшение теплоемкости связано с уменьшением количества электронов в системе при высоких температурах. Тяжелые атомы обладают гораздо более высоким порогом ионизации по сравнению с дейтерием и тритием. Поэтому часть электронов тяжелых атомов остаются связанными с ионами на протяже-

нии всего процесса сжатия. Таким образом, уменьшение теплоемкости системы за счет добавок тяжелых элементов, таких как ксенон, должно приводить к более эффективному сжатию мишеней.

В рамках всего процесса ИТС, конечно, необходимо учитывать комплексное воздействие добавки ксенона на работу мишени. Помимо отмеченного уже газодинамического сжатия необходимо выделить еще два основных процесса, на которые добавка ксенона оказывает существенное влияние: скорость протекания реакции термоядерного синтеза и лучистый теплообмен. Влияние добавки ксенона на эти процессы носит неоднозначный характер и подлежит более детальному исследованию. Поэтому целью данной работы является определение комплексной эффективности добавки ксенона в DT смесь.

Моделирование сжатия и горения газовой смеси без учета излучения

Для определения принципиальной возможности и качественного анализа увеличения нейтронного выхода при добавке ксенона с использованием ПО «Matlab» была разработана модель сферического сжатия идеального газа несколькими ударными волнами, без учета излучения. Описание модели представлено на рис. 1.

Согласно предварительным расчетам с использованием данной модели в области параметров, характерных для ИТС, добавка ксенона увеличивает газодинамическую эффективность сжатия, что подтверждается данными рис. 2. В рамках модели это приводит к увеличению скорости термоядерных реакций на величину порядка десятков процентов. Таким образом, добавка ксенона обеспечивает принципиальную возможность увеличения нейтронного выхода в области параметров, характерных для ИТС. Следует отметить, что эффективность добавки ксенона растет с увеличением адиабатичности сжатия.



Рис. 1. Описание модели сжатия и горения DT смеси без учета излучения

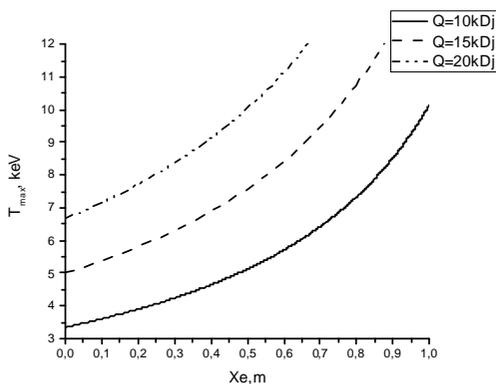


Рис. 2. Зависимость температуры сжатой области от добавки ксенона

Расчетное моделирование

Следующим этапом исследований стало расчетное моделирование с использованием одномерного расчетного комплекса. Исследуемая капсула представляет собой сферу с DT газом с добавками ксенона общей массой около 9 мкг, заключенную в берилловую оболочку с добавками меди, выполняющую роль аблятора. Общий размер капсулы около 1 мм. Разрез капсулы представлен на рис. 3. В качестве граничного условия и непосредственного драйвера сжатия задается профиль температуры рентгена на правой стенке, изображенный на рис. 4. Данный профиль получен в расчетах по конверсии лазерного излучения в рентгеновское при общей энергии лазерного излучения 1,3 МДж. В расчете учитывалась лагранжева газодинамика, перенос излучения по диффузионной модели, термоядерная кинетика, перенос быстрых заряженных частиц.

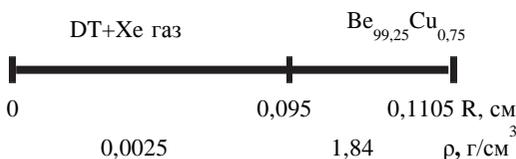


Рис. 3. Разрез капсулы для расчетного моделирования

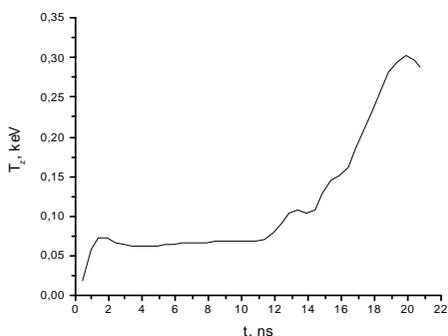


Рис. 4. Граничная температура рентгеновского излучения

Для разделения вкладов теплоемкости, термоядерной кинетики и излучения в общий нейтронный выход мишени было проведено несколько серий расчетов, которые отличаются друг от друга принудительным отключением каждого из этих процессов по отдельности. Результаты различных серий расчетов представлены на рис. 5. Так в серии расчетов «ΔI» учитывается только изменение пробега излучения, в «ΔN, ΔCv» – изменение теплоемкости и концентрации атомов DT, а в «ΔN, ΔCv, ΔI» – все перечисленные процессы.

Из сравнения серий «ΔI» и «ΔN, ΔCv, ΔI» видно, что влияние пробега излучения на работу мишени существенно, и добавка ксенона, уменьшая пробег смеси, приводит к росту потерь на излучение и не обеспечивает увеличение нейтронного выхода. Подобный эффект связан с прозрачностью плазменной области сжатого DT газа для собственного излучения. Поэтому, несмотря на то, что уменьшение теплоемкости без изменения пробега приводит к росту нейтронного выхода ~ 65 % для Xe=15 %, увеличившиеся потери на излучения не позволяют достичь более высоких температур в газовой области.

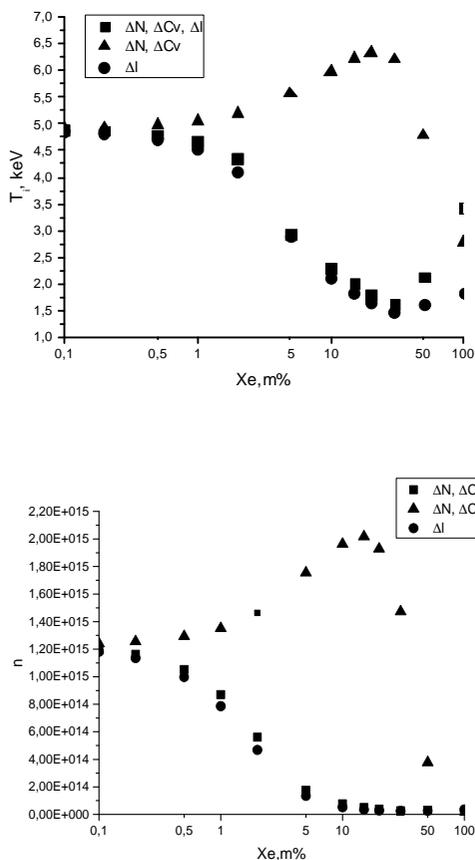


Рис. 5. Зависимость средней температуры ионов в области и нейтронного выхода от концентрации ксенона в смеси

Условия для потенциальной эффективности добавки ксенона в DT смесь

Для принципиального преодоления негативного влияния уменьшения пробега необходимо наличие непрозрачной для излучения области – т. е. области, размер которой больше длины свободного пробега. В таких условиях уменьшение пробега уже будет скорее благоприятным фактором, препятствующим остыванию системы. Размер оптически непрозрачных систем равен или превышает длину свободного пробега излучения. Таким образом, при $R > R_{гр} = l$ система переходит к непрозрачному состоянию.

Характеристикой таких граничных систем может выступать параметр оптической толщины ρR . В области параметров, характерных для ИТС переход к непрозрачности осуществляется для степеней сжатия $\rho R > 5 \text{ г/см}^2$. Такие значения ρR являются достаточно завышенными и не наблюдаются в экспериментах ИТС. Поэтому во всей области температур и плотностей, характерных для ИТС переход к «непрозрачности» не происходит и добавка ксенона не является оправданной.

Заключение

Подводя итоги проделанной работы, хотелось бы отметить, что добавка ксенона в DT газ приводит к улучшению эффективности газодинамического сжатия, но одновременно с этим приводит и к увеличению потерь на излучение. Влияние свободного пробега излучения в DT смеси на полученную в результате сжатия ионную температуру и нейтронный выход существенно. В связи с этим добавка ксенона не приводит к увеличению нейтронного выхода из мишени ИТС. Так как в области температур, плотностей и размеров мишени, характерных для ИТС, DT газ всегда является прозрачным для излучения, то добавление в него ксенона в рамках ИТС неэффективно.

Список литературы

1. Гуськов С. Ю., Шерман В. Е. Влияние радиационных процессов на зажигание дейтерий-тритиевой плазмы, содержащей инертные примеси // ЖЭТФ. 2016. Вып. 2. Т. 150, № 8. С. 418–428.
2. Гуськов С. Ю., Ильин Д. В., Шерман В. Е. Влияние инертных примесей на горение мишеней инерциального термоядерного синтеза // Физика плазмы. 2011. № 37. С. 1096.