

Модернизация ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ — проект “ИТЭФ-ТВН”

Д.Г. Кошкарев, Н.Н. Алексеев, И.В. Чувило, Б.Ю. Шарков
ИТЭФ, Москва, Россия

Введение

Направление инерциального термоядерного синтеза, основанное на использовании интенсивных пучков тяжелых ионов, в настоящее время рассматривается как одно из наиболее перспективных с точки зрения построения термоядерной электростанции. Основанием для такой оценки является ряд известных преимуществ ускорителей тяжелых ионов: высокий КПД, возможность работы с частотой 10 Гц, большой запас надежности и др.

Работы по УТС на тяжелых ионах проводятся в Европейском Сообществе, США и России. В 1994 г. начала действовать Европейская исследовательская группа, объединившая ряд европейских научных центров и университетов. В 1995 г. в Российской Федерации была выдвинута сходная инициатива по организации исследовательской группы для разработки концептуального проекта Российской тяжелоионной термоядерной установки (РТТУ). Ведущими институтами Российской исследовательской группы являются ВНИИЭФ (Саров) и ИТЭФ (Москва).

Уже к 1996 г. стало ясно, что существует ряд научных задач, связанных с физикой ускорителей и с физикой взаимодействия пучков тяжелых ионов с ионизированной материей, которые могут быть решены на экспериментальной установке, обеспечивающей выделение энергии тяжелоионного пучка в виде импульса с мощностью на уровне 1 ТВт.

При рассмотрении путей создания тяжелоионной установки с выходной мощностью около 1 ТВт обращает на себя внимание возможность использования существующего ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ.

1 Физические основы предлагаемой модернизации

Для создания тераваттного накопителя ионов предлагается использовать существующий в ИТЭФ ускорительный комплекс [1], состоящий из протонного синхротрона (У-10) с жесткостью кольца ≈ 34 тесла·метров (9,3 ГэВ по протонам) и малого вспомогательного кольца (УК) с жесткостью ≈ 13 тесла·метров. В качестве инжектора ионов используется имеющийся одиночный двухззорный резонатор (И-3) с суммарной амплитудой ускоряющего напряжения ≈ 4 МВ.

Наиболее подходящим ионным источником является источник лазерного типа (CO_2 лазер). Такой источник производит достаточное число ионов при зарядности $z \leq 25$. При переинжекции ионов из малого кольца в большое предполагается исполь-

зовать перезарядку ионов на плотной мишени, поэтому заряд ядра следует выбирать в диапазоне $26 \div 28$. Оптимальным элементом является Co_{59}^{27} .

Схема ускорения и накопления выглядит следующим образом. Выходящие из лазерного источника ионы Co^{+25} ускоряются в И-3 до энергии 100 МэВ на ядро и инжектируются в УК. Количество ионов на орбите составит $1.3 \cdot 10^{10}$ ионов в импульсе. После ускорения в УК до энергии ≈ 40 ГэВ ионы кобальта перезахватываются в один банч на небольшой по длительности площадке магнитного поля. Длительность банча составит около 250 нсек. После формирования одиночного ионного банча он выводится за время одного оборота и направляется в камеру протонного синхротрона, где установлена перезарядная мишень с толщиной 1 - 10 мг/см². При пересечении перезарядной мишени ионы кобальта теряют последние два электрона, и полученные ядра кобальта с зарядом +27 оказываются захваченными в режим накопления в камере протонного синхротрона.

Для минимизации возмущающего действия мишени на накапливаемый пучок он отклоняется на перезарядную мишень только на время инжекции очередной порции ионов из малого кольца. При этом используется также и то обстоятельство, что площадь поперечного сечения инжектируемого пучка примерно в 25 раз меньше площади накапливаемого пучка. Следовательно, и площадь перезарядной мишени может составлять только 1/25 от размера поперечного сечения накапливаемого пучка; в это же число раз уменьшается влияние перезарядной мишени на накапливаемый пучок.

Для смещения пучка накапливаемых ионов на перезарядную мишень в камере У-10 создается бамп с помощью системы согласованных дефлекторов [2]. Характерное время работы дефлекторов: длительность переднего фронта, длительность площадки и длительность спада поля по 300 нсек.

В результате 1000-кратного повторения процесса накопления интенсивность накопленных ионов достигнет величины примерно $1.2 \cdot 10^{13}$, что соответствует накопленной энергии ≈ 80 КДж.

После накопления осуществляется процесс продольного сжатия пучка до длительности ≈ 80 нсек за счет резкого включения первой гармоники ВЧ-поля до уровня 10 кВ. Для эффективного продольного сжатия пучка почти в 10 раз нужно, чтобы разброс ионов по импульсам в основной части пучка не превышал величины $5 \cdot 10^{-4}$. Однако для стабилизации когерентных неустойчивостей полный разброс ионов по импульсам должен быть не ниже $2 \cdot 10^{-3}$. Нужную форму распределения накапливаемых ионов кобальта по импульсу можно сформировать, незначительно уменьшая по определенному закону в процессе накопления импульс первичного пучка ионов Co^{+25} . При этом предполагается полное отсутствие ВЧ-поля в камере накопителя.

В этих условиях основным эффектом, препятствующим продольной компрессии пучка, по-видимому, может стать внутрипучковое рассеяние, приводящее при наших

параметрах к заметному увеличению разброса ионов по импульсу. Детальные расчеты этого эффекта планируется провести в ближайшее время.

Заметим, что хотя полное время накопления составит ≈ 30 минут, рассеяние ионов кобальта на атомах остаточного газа при крайне низком (10^{-10} Торр) давлении остаточного газа в камерах УК и У-10 практически незаметно.

После завершения процесса компрессии производится быстрый вывод пучка из камеры протонного синхротрона в канал транспортировки, по которому он направляется на экспериментальную мишень.

2 Программа научных исследований

Программа экспериментов на установке ИТЭФ – ТВН планируется по следующим главным направлениям:

- Фундаментальная физика высокой плотности энергии в веществе.
- Физика ионных пучков и ускорителей заряженных частиц.
- Фундаментальная релятивистская ядерная физика.
- Физика процессов инерциального термоядерного синтеза.

Предварительные расчеты показывают, что накопленный и сжатый во времени до 80 нсек пучок ионов Co^{27+} может быть сфокусирован в пятно диаметром около 1 мм. С учетом пробега ионов Co^{27+} с энергией 0,7 ГэВ/нуклон — 15 г/см^2 сфокусированный ионный пучок позволяет получить уровень удельной мощности 6 - 10 ТВт/г, нагревая цилиндрический объем вещества до температуры ~ 40 эВ.

Характерные параметры плазмы, достижимые на установке ИТЭФ - ТВН и ряде существующих мощных импульсных генераторах сравниваются в таблице.

Параметр	ИТЭФ-ТВН	SIS-18	Ангара-5	PBFA-II	Искра-5	Nova
Плотность, г/см ³	19.5	10.	0.1	1.0	0.01	0.01
Температура, эВ	40.	0.01	100.	60.	200.	200.
Давление, Мбар	20.	0.01	2.0	2.0	1.0	1.0

Получаемые на установке ИТЭФ - ТВН высокие значения характерных давлений в веществе (~ 20 Мбар) открывают возможность проведения физических исследований уравнения состояния и непрозрачности веществ в мало изученной области параметров сильно неидеальной плазмы.

Цилиндрическая геометрия облучения мишени в установке ИТЭФ - ТВН является благоприятной для исследований эффективности использования предварительного разогрева плазмы от внешнего, например лазерного, источника энергии. Как известно, предварительный разогрев мишени до температур ~ 0.03 кэВ оказывает существенное влияние на развитие процесса сжатия плазмы, способствуя достижению области

термоядерных параметров. Особое место в физической программе экспериментов займут фундаментальные проблемы преобразования энергии ионного пучка во внутреннюю энергию вещества мишени и энергию излучения.

Уникальные экспериментальные условия установки ИТЭФ - ТВН позволят провести исследование кулоновского торможения тяжелых частиц в сверхплотной плазме. Эти исследования представляют собой классическую задачу атомной физики, а их результаты позволяют определить профиль потерь энергии вдоль тормозного пути пучков в реальных конструкциях термоядерных мишеней.

Программа исследований по физике ускорителей заряженных частиц включает комплекс экспериментальных работ по нелинуйливиевской инжекции ионных пучков из ускорителя в накопительное кольцо, по устойчивости процессов накопления и компрессии пучка во времени, по транспортировке сильноточного ионного пучка и по его фокусировке на экспериментальную мишень.

Создание в ИТЭФ установки ИТЭФ - ТВН фактически будет означать также завершение начатой в середине 80^{-х} годов работы по модернизации ускорительного комплекса ИТЭФ, целью которой было получение пучков тяжелых ионов с энергиями от 3 до 4 ГэВ/нуклон, необходимых для исследований в области релятивистской ядерной физики. Перевод установки ИТЭФ - ТВН в режим ускорения ядер до релятивистских энергий (3 - 4 ГэВ/нуклон) потребует проведения только небольшой переналадки установки, осуществляемой в течение одной рабочей смены.

Заключение

Модернизация ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ фактически представляет собой переход к новой уникальной установке. Получаемые на ней параметры — мощность пучка $\simeq 1$ ТВт, интенсивность облучения ~ 120 ТВт/см² — открывают широкую возможность для проведения экспериментальных работ по фундаментальным проблемам физики высокой плотности энергии в веществе и релятивистской ядерной физики. Результаты экспериментальных исследований на установке ИТЭФ - ТВН будут иметь существенное значение для выбора конкретной формы установки инерциального термоядерного синтеза, обеспечивающей воспламенение ДТ-мишени. Несомненно, реконструкция ускорителя положительно скажется и на текущих экспериментах на У-10 в ИТЭФ.

Литература

1. Н.Н.Алексеев, А.Е.Большаков и др. Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1. Дубна, 1993, стр. 126.
2. Н.Н.Алексеев, А.Е.Большаков, М.М.Кац. Схема многооборотной инжекции ионов в синхротрон У-10. Протвино, 1996.