

CONFINEMENT
THERMONUCLEAR
FUSION AND INERTIAL
THERMONUCLEAR
FUSION PROBLEMS

V. I. BOIKO

Qualitative analysis of the results of studies on the confinement of the thermonuclear fusion problem is presented. Primary attention paid to thermonuclear fusion of light nuclei in dense short-lived thermonuclear plasma; to present-day requirements for laser and ion drivers; to the particular features of high-power pulsed radiation with condensed matter and plasma interaction.

Представлен качественный анализ состояния исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза. Основное внимание уделено инерциальному термоядерному синтезу легких ядер в плотной короткоживущей термоядерной плазме, современным требованиям к лазерным и ионным драйверам, особенностям взаимодействия мощных импульсных потоков ионизирующих излучений с конденсированным веществом и плазмой.

© Бойко В.И., 1999

**УПРАВЛЯЕМЫЙ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ
И ПРОБЛЕМЫ ИНЕРЦИАЛЬНОГО
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

В. И. БОЙКО

Томский политехнический университет

Физика плазмы до сих пор остается еще довольно грубой наукой. Только множество красивых формул, выведенных теоретиками, в какой-то степени может скрывать неразвитость ее организма.

Л.А. Арцимович

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время экономически выгодное энергопроизводство основывается на использовании энергии органического топлива, энергии атомного ядра и гидроэнергетике. Эти способы вызвали проблемы экологического, ресурсного и научно-технического характера, что стимулирует развитие и поиск новых энергоисточников. Интенсивны исследования и технические разработки альтернативных (возобновляемых) источников. Спектр их широк — от солнечной энергетике до биоэнергетики. Интегрально их проблемы характеризуются ограниченностью потенциала (кроме солнечной энергетике), научно-техническими сложностями и непредсказуемостью экологических последствий.

Отдельное место в ряду перспективных источников энергии занимает управляемый термоядерный синтез (УТС). Он сверкает яркой манящей звездой на энергетическом небосклоне будущего. Перспективы, которые обещает осуществление УТС, беспрецедентны по своим масштабам и достоинствам. Решение проблемы УТС позволит получить чистый, безопасный и практически неисчерпаемый источник энергии на планете Земля. Это заставляет ученых всего мира упорно штурмовать термоядерную крепость. Этот штурм продолжается почти 50 лет.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

Фундаментальным законом природы, лежащим в основе работы любого источника энергии, является уравнение А. Эйнштейна $E = mc^2$, согласно которому массе m соответствует энергия E , а любое изменение массы Δm сопровождается изменением энергии ΔE . Основная масса вещества сконцентрирована в ядрах атомов. Объединение нуклонов в ядра происходит под действием ядерных сил. Суммарная энергия взаимодействия нуклонов в ядре определяется ядерными силами притяжения всех нуклонов и

электростатическими силами отталкивания протонов. Эта энергия удерживает частицы ядра в связанном состоянии и называется энергией связи $E_{\text{св}}$. Отношение полной энергии связи $E_{\text{св}}$ к массовому числу A дает среднее значение энергии связи на один нуклон и называется удельной энергией связи: $\epsilon = E_{\text{св}}/A$. Максимум энергии связи на нуклон приходится на ядра со средними массовыми числами. В этих ядрах нуклоны наиболее плотно упакованы, ϵ близка к 8,7 МэВ/нуклон.

Капельная модель ядра указывает на то, что малое число нуклонов нельзя расположить в плотной упаковке так, чтобы реализовалась энергетически наиболее выгодная сферическая форма ядра. Например, ядро дейтерия, состоящее из одного протона и одного нейтрона, имеет удлинненную форму. Плотнупакованные 30–40 и большее число нуклонов уже образуют форму, близкую к шарообразной. При дальнейшем увеличении порядкового номера элемента взаимное отталкивание протонов усиливается. Ядра с большим порядковым номером становятся рыхлыми, энергия связи на нуклон уменьшается. Еще более низкое значение ϵ имеют очень легкие ядра. Так, ядра дейтерия (${}^2_1\text{D}$) и трития (${}^3_1\text{T}$) имеют величину удельной энергии связи 1,09 и 2,77 МэВ/нуклон соответственно.

Образование двух средних ядер через реакцию деления тяжелого ядра сопровождается выделением энергии. Этот способ производства энергии реализован в ядерных реакторах деления на атомных электростанциях. Еще больший энергетический эффект достигается при объединении (синтезе) легких ядер. Доказательством этой закономерности является открытие Х.А. Бете (Н.А. Bethe) в 1931 году того, что основным источником энергии в звездах является ядерный синтез. В начале 50-х годов была продемонстрирована возможность получения энергии с помощью ядерного синтеза в земных условиях при испытании термоядерного оружия (водородной бомбы). С тех пор основные усилия были нацелены на разработку научных основ и устройств, в которых удалось бы не только осуществить ядерную реакцию синтеза, но и управлять ею.

Природа глубоко запрятала свои секреты. Сложности, связанные с зажиганием и контролем реакции синтеза, в начале штурма представлялись значительными. В процессе исследований становилось ясно, что видимые препятствия – это только вершина айсберга. “Проблема УТС по своей трудности оставляет позади все научно-технические проблемы, порожденные успехами естествознания в XX веке”, – говорил Л. Арцимович.

Для осуществления реакции синтеза необходимо, чтобы два легких ядра сблизилась на очень малые расстояния, при которых начинают действовать ядерные силы. Характерное расстояние между нуклонами, на котором включаются ядерные силы, меньше $1,5 \cdot 10^{-15}$ м. Сближению положительно за-

ряженных ядер препятствуют силы кулоновского отталкивания. Поэтому ядрам должна быть сообщена кинетическая энергия, достаточная для преодоления кулоновского противодействия. С увеличением зарядового числа Z кулоновский барьер возрастает пропорционально произведению зарядов обоих ядер. Поэтому проще осуществить синтез наиболее легких ядер, таких, как ядра изотопов водорода – ${}^2_1\text{D}$ и ${}^3_1\text{T}$, для которых зарядовое число минимально, $Z = 1$. Наиболее перспективными считаются реакции, приведенные в табл. 1.

Осуществить реакцию синтеза легких ядер возможно ускорив ядра одного типа на ускорителе и бомбардируя ими мишень из изотопа того же или другого элемента. Для получения энергии в промышленных масштабах такой способ неприменим по следующим причинам. Сечения ядерных реакций даже в оптимальных условиях примерно в 10^6 – 10^8 раз меньше сечений атомных столкновений. Поэтому кинетическая энергия ускоренного ядра интенсивно расходуется на ионизацию и возбуждение атомов мишени. Оставшейся энергии ускоренного ядра оказывается недостаточно для осуществления ядерной реакции синтеза. Ее реализация имеет ничтожную вероятность. В результате энергия, затраченная на ускорение ядер, значительно превышает энергию, получаемую в ядерной реакции.

Исключить влияние процессов ионизации и возбуждения атомов возможно, если процесс столкновений осуществлять в веществе, которое находится в состоянии полностью ионизованной плазмы. Такое состояние достигается при очень высокой температуре – порядка 10 кэВ (10^8 К). Поэтому проблема промышленного получения энергии с помощью ядерных реакций синтеза получила название термоядерной. В настоящее время известны два способа осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции.

1. **Медленная реакция**, самопроизвольно происходящая в недрах Солнца и других звезд. В этом случае количество реагирующего вещества настолько колоссально, что оно удерживается и сильно

Таблица 1. Основные реакции термоядерного синтеза и их параметры

Реакция	Энерговыделение, МэВ	Энергия налетающей частицы, соответствующей максимальной вероятности протекания реакции, МэВ
${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	17,59	0,13
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	3,27	1,0
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_1\text{T} + {}^1_1\text{p}$	4,03	2,0

уплотняется (до 100 г/см^3 в центре Солнца) гравитационными силами.

2. **Быстрая реакция** неуправляемого характера, происходящая при взрыве водородной бомбы. В качестве ядерного взрывчатого вещества в водородной бомбе используются ядра легких элементов (например, ядра дейтерия и лития). Высокая температура, необходимая для начала термоядерного процесса, достигается в результате взрыва атомной бомбы, которая входит в состав водородной бомбы (рис. 1).

В современной теории УТС сформулированы требования и определены пределы термодинамических параметров, при которых можно надеяться на достижение цели. При достижении высокой температуры дейтерий-тритиевой плазмы (для простоты изложения в дальнейшем речь пойдет только о реакции $D + T$) некоторые столкновения ядер будут заканчиваться реакциями с выделением термоядерной энергии. Число удачных столкновений будет возрастать с ростом концентрации ядер дейтерия n_D и ядер трития n_T . Если полную концентрацию положительных ионов обозначить через n , тогда число таких столкновений будет пропорционально n^2 , а коэффициент пропорциональности будет зависеть от температуры плазмы T и вида ионов. Поэтому мощность выделившейся энергии можно представить в виде функции $P = f(T)n^2$.

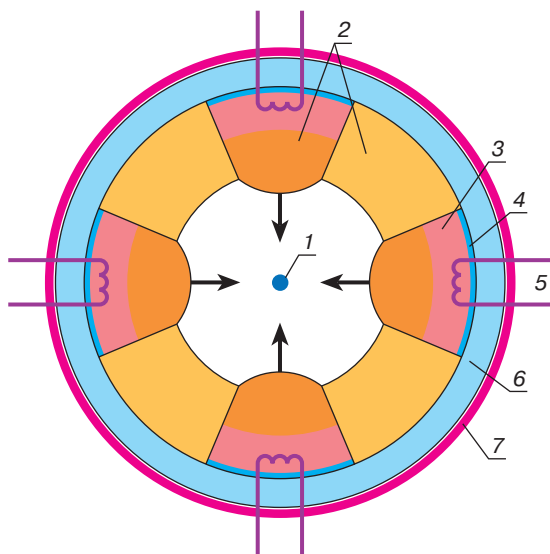


Рис. 1. Принципиальная схема термоядерной (водородной) бомбы системы деление-синтез-деление: 1 – источник нейтронов, 2 – делящееся вещество (U-235 или Pu-239), 3 – химическое взрывчатое вещество, 4 – отражатель нейтронов, 5 – детонатор, 6 – дейтерид лития, 7 – вещество, делящееся на быстрых нейтронах (U-238)

В результате ядерных реакций, приведенных в табл. 1, образуются заряженные частицы ${}^4_2\text{He}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^3_1\text{T}$, ${}^1_1\text{H}$ и нейтроны. Кинетическая энергия теплового движения заряженных частиц вследствие больших сечений взаимодействия может быть преобразована в электрическую энергию с коэффициентом эффективности, близким к единице. Нейтроны, не имеющие электрического заряда, обладают значительно большей проникающей способностью, что затрудняет преобразование их кинетической энергии. И оценочное значение коэффициента преобразования приближается к $1/3$.

Условие существования реакции синтеза состоит в том, чтобы выделившаяся энергия превышала энергию, уносимую из плазмы электромагнитным и корпускулярным излучением. При равенстве этих величин реакция синтеза будет протекать, но генерации избытка энергии для полезного использования происходить не будет. Это равенство называется условием зажигания термоядерной реакции. В оценочном аналитическом виде оно впервые было получено американским физиком Дж.Д. Лоусоном в 1957 году и называется критерием Лоусона:

$$n\tau \geq L(T), \quad (1)$$

где τ – среднее время удержания плазмы в активной зоне реактора; $L(T)$ – коэффициент Лоусона, зависящий от температуры, типа легких ядер и потерь на излучение.

Зависимость критерия Лоусона от температуры при преобразовании выделившейся энергии в полезную работу с КПД = $1/3$ показана на рис. 2. Из рисунка видно, что оптимальная температура для реакции ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T}$ приблизительно равна $2 \cdot 10^8 \text{ К}$, а для ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D}$ реакции – 10^9 К . Критерий Лоусона соответственно $n\tau \geq 10^{14}$ и $n\tau \geq 10^{15} \text{ с/см}^3$.

Таким образом, для осуществления реакции синтеза в дейтерий-тритиевой плазме необходимо обеспечить высокую температуру (нагреть) и концентрацию ионов (сжать) в течение определенного времени (удержать). Детально рассматриваются два способа решения проблемы УТС:

- длительный ($\tau \geq 0,17 \text{ с}$) нагрев дейтерий-тритиевой плазмы низкой плотности ($n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в определенном объеме при температуре порядка 10^8 К ;
- высокоскоростной (около 10^{-9} с) нагрев малых объемов конденсированного термоядерного топлива ($n \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$).

Большинство исследований по проблеме УТС проведено с плазмой малой концентрации. Основной задачей этого направления является обеспечение длительного времени удержания плазмы. Для предотвращения соприкосновения со стенками рабочего объема используются магнитные поля различной конфигурации. Из магнитных ловушек в настоящее время специалисты считают наиболее

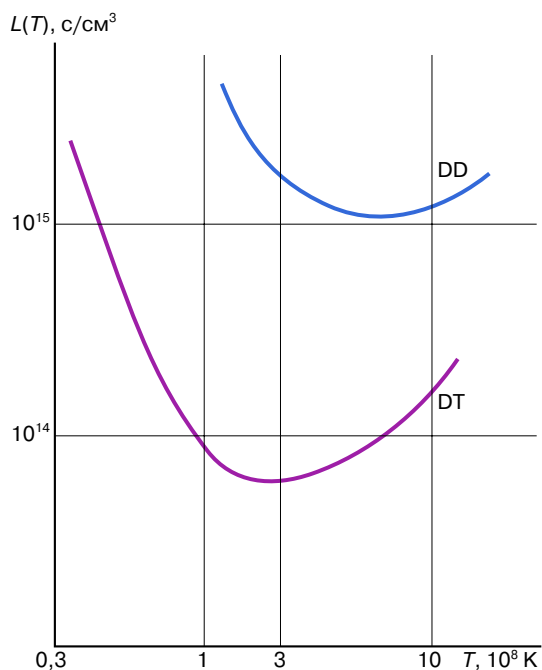


Рис. 2. Зависимость критерия Лоусона от температуры для дейтериевой (DD) и дейтерий-тритиевой (DT) плазмы

перспективной ловушку, называемую ТОКАМАКом (тороидальная камера с магнитными катушками). Не останавливаясь подробно на достижениях и проблемах ТОКАМАКов, отметим, что в конце 70-х годов страны, развивающие это направление, объединили свои усилия по разработке проекта международного термоядерного экспериментального реактора. Цель реализации этого проекта – техническая демонстрация УТС [1].

Второе направление исследований с плазмой высокой концентрации начало развиваться учеными США и СССР в начале 60-х годов. Альтернативность этого направления выражается в том, что его разработчики предложили не преодолевать огромные трудности по удержанию неустойчивых плазменных сгустков, а создать такие условия, при которых значимая часть термоядерного топлива сгорела бы быстрее, чем оно разлетится. Временные параметры этого процесса определялись инерцией топливной смеси. Это направление получило название инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Идея заключалась в том, что дейтерий-тритиевая смесь в конденсированном (замороженном) состоянии сверхбыстро нагревается до температуры порядка 10^8 К. Длительность сохранения объема топлива определяется временем разлета плазмы, которое имеет порядок d/v , где d – линейный размер объема, v – средняя скорость частиц нагретой плазмы. Это время можно принять за время удержания плазмы, которое входит в критерий Лоусона (1). Тогда можно

оценить размер d : $n \cdot d/v \geq L$, откуда $d \geq L \cdot v/n$. Используя для дейтерий-тритиевой плазмы значения $L = 10^{14}$ с/см³, $v = 10^8$ см/с и $n = 5 \cdot 10^{22}$ см³, получим значение $d = 2$ мм, а время удержания $\tau = 2 \cdot 10^{-9}$ с.

Давление в нагретом топливе определяется энергией, переданной внешним источником, энергией, выделившейся в результате протекания термоядерной реакции, и ударно-волновыми процессами, инициируемыми высокоскоростным нагреванием. Такой реактор будет импульсным. Импульсная термоядерная установка подобна двигателю внутреннего сгорания, в котором происходят взрывы горючего, периодически подаваемого в рабочую камеру. Таким образом, трудности УТС, которые заключались в проблеме удержать плазму, перенеслись в ИТС на проблему мгновенно нагреть ее.

Развитие реакторов на основе ИТС находится на стадии создания и обоснования концептуальных проектов. Научный поиск ведется в следующих основных направлениях:

- физика импульсных источников греющего излучения (драйверов),
- физика нагрева и сжатия термоядерных мишеней,
- физико-технические концепции термоядерных мишеней.

Усилия, направленные на развитие ИТС, достигли уже такого уровня, который позволяет по достигнутым результатам конкурировать с более традиционным направлением УТС с магнитным удержанием плазмы. Однако трудности на пути реализации этого направления снова выстраиваются в термоядерную крепость.

ИМПУЛЬСНЫЕ ДРАЙВЕРЫ

Главная идея ИТС – осуществление такого режима сжатия мишени, когда до температуры зажигания доводится лишь ее центральная часть, а основная масса топлива остается холодной. Затем волна горения распространяется к поверхностным слоям топлива. Этот подход позволяет минимизировать требования к энергии драйвера, так как она используется только для сжатия топлива до высокой плотности.

Для сжатия мишеней до параметров, необходимых для инициирования реакции, в начале (60-е годы) было предложено использовать интенсивное лазерное излучение. В 70-х годах резко возрос интерес к электронным и ионным драйверам. Вследствие вложения энергии драйвера в мишень происходит интенсивное испарение и высокоскоростное истечение вещества с ее поверхности (абляция), в результате чего инициируется сжатие внутренней части мишени до очень высоких значений плотности (импlosion). Для обеспечения достаточного сжатия необходимо, чтобы удельное вложение энергии в мишень достигало нескольких мегаджоулей на 1 г

испаряющегося вещества мишени. Следовательно, главным в решении проблемы ИТС является развитие ускорительных систем, которые обеспечивают требуемую интенсивность (более 10^{14} Вт/см²) и удельное вложение энергии (более 20 МДж/г) [2].

Существующие лазерные драйверы для инерциального термоядерного синтеза генерируют свет в инфракрасной области спектра. Наиболее широко используются лазеры на неодимовом стекле, испускающие свет с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Их накачка проводится с помощью ламп-вспышек, энергия для которых запасается в емкостных накопительных системах. Пока энергия таких твердотельных многопучковых лазеров ограничена значением 1000 Дж на один пучок, а эффективность преобразования электрической энергии в световую составляет всего несколько десятых процента. В настоящее время работают уже несколько больших многопучковых лазерных систем на основе неодимового стекла с мощностью 10 ТВт и более (табл. 2).

Для достижения более высоких эффективностей драйвера и скорости повторения лазерных импульсов предлагается использовать газовые лазеры. Большие усилия затрачены на разработку лазеров на двуокиси углерода CO₂, которые генерируют свет с длиной волны 10,6 мкм. Интерес представляют также иодный лазер с $\lambda = 1,315$ мкм и химический лазер на основе фтористого водорода HF с $\lambda = 2,7$ мкм, обладающие высокой энергетической эффективностью. Однако ни один из этих лазеров пока не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к лазерным драйверам для ИТС [2]: энергия 1–5 МДж, эффективность преобразования энергии >1%, длительность импульса 1–10 нс, частота повторения импульсов 1–10 Гц.

Лазеры являются устройствами с высокой мощностью, но низкой энергией. Это объясняется низким КПД большинства схем накачки. Поэтому интенсивно ведутся исследования новейших лазерных систем, работа которых может быть основана на механизме прямой накачки. Самые перспективные лазерные драйверы могут иметь КПД = 1–5%.

Импульсные ускорители электронов на протяжении многих лет использовались в качестве ин-

тенсивных рентгеновских источников. Открытие взрывной электронной эмиссии инициировало развитие мощных электронных ускорителей для целей ИТС. Наиболее масштабно эти работы выполнялись в СССР и США. Однако уже ранние эксперименты показали, что электронные пучки не имеют больших перспектив в ИТС по следующим основным причинам: 1) возникла проблема острой фокусировки электронного пучка на мишени, решению которой препятствовали эффекты пространственного разделения частиц малой массы при их транспортировке в результате возникновения виртуальных и спонтанных электромагнитных полей; 2) пробег электронов слишком велик для создания необходимого абляционного давления; 3) электроны эффективно генерируют тормозное излучение, которое прогревает внутреннюю часть топлива, что препятствует сжатию термоядерной смеси.

После некоторых дискуссий различные научные школы пришли к общему мнению – использовать импульсные ускорительные системы в качестве источников высокоэнергетических (единицы мегаэлектронвольт) легких ионов. Преимуществом ионных пучков является практическое отсутствие генерации надтепловых электронов и жесткого рентгеновского излучения, прогревающих мишень до сжатия. Ионы обладают значительно большей массой по сравнению с электронами, поэтому значительно ослаблено влияние пространственного разделения зарядов, препятствующего фокусировке. Ионные пучки обладают достаточно высокой эффективностью генерации. На современных ускорителях эффективность достигает 30%. Кроме того, предполагалось, что эффективность передачи энергии пучка легких ионов мишени близка к 100%. Дополнительные перспективы связывались со спецификой пространственного распределения поглощенной энергии ионов в мишени. Поглощение энергии моноэнергетического ионного пучка характеризуется брэгговским возрастанием удельной ионизации атомов среды по мере ее торможения, что приводит к концентрации поглощенной энергии в конце пробега ионов (рис. 3). Поэтому внешние слои мишени должны служить экраном для наиболее нагретой

Таблица 2. Параметры современных драйверов для ИТС [3, 4]

Установка	Частицы	Энергия частиц, МэВ	Длительность импульса, нс	Ток пучка, кА	Мощность, ТВт	Плотность мощности на мишени, ТВт/см ²
KALIF	Протоны	1,7	50	600	1,02	1,5
PBFA-X	Ионы Li	–	–	–	4	–
PBFA-II	Ионы Li	10	–	–	–	1–1,5
FIREX	Протоны	1	130	800	0,8	–
Nova	Лазерное излучение					
	$\lambda = 1,06$ мкм	–	1	–	120	–
	$\lambda = 0,35$ мкм	–	1	–	20	–

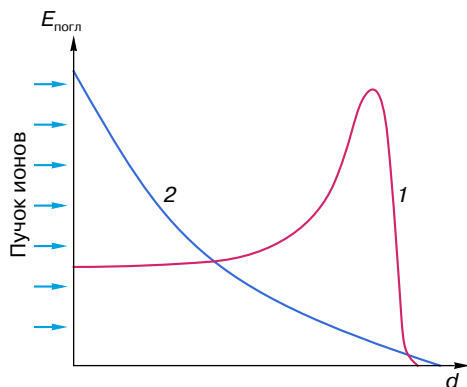


Рис. 3. Распределение поглощенной энергии легкоионного пучка по глубине мишени d : 1 – брэгговский профиль моноэнергетического пучка в холодной мишени, 2 – профиль реального импульсного ионного пучка в плазменной мишени

области, увеличивающим время удержания реактивной топливной смеси.

В процессе развития ИТС на пучках заряженных частиц вслед за предложением использовать легкие ионы возникла идея использовать ускорение тяжелых ионов (например, от Хе до U) до нескольких гигаэлектронвольт с их сфокусированным сбросом на термоядерные мишени. Возможности использования ускорителей тяжелых ионов в ИТС базируются в основном на теоретических исследованиях, поскольку стоимость экспериментальных установок,

развивающих данное направление, необычайно велика.

ФИЗИКА НАГРЕВА И СЖАТИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Основополагающая концепция ИТС – использование излучения драйвера для взрывного сферического абляционного сжатия топливной смеси до параметров термоядерного поджига. При этом плотность D–T-мишени должна в тысячу раз превышать плотность конденсированной фазы, а температура достигать величины порядка 10 кэВ.

Реализация такого грандиозного сжатия предполагает эффективное использование имплозии по следующей схеме (рис. 4):

- 1) сфера с жидким D–T-топливом облучается равномерно по всей поверхности греющим излучением;
- 2) внешняя поверхность мишени нагревается, ионизируется, испаряется и образует вокруг капли облако или корону плазмы, которая продолжает поглощать энергию драйвера;
- 3) взрывной процесс абляции генерирует ударную волну, направленную в центр мишени, которая сжимает и нагревает топливо в центральной части до термоядерных параметров;
- 4) процесс термоядерного горения распространяется из центра мишени к ее периферии.

Представленная схема далеко не полная и характеризует только основные этапы без детализации

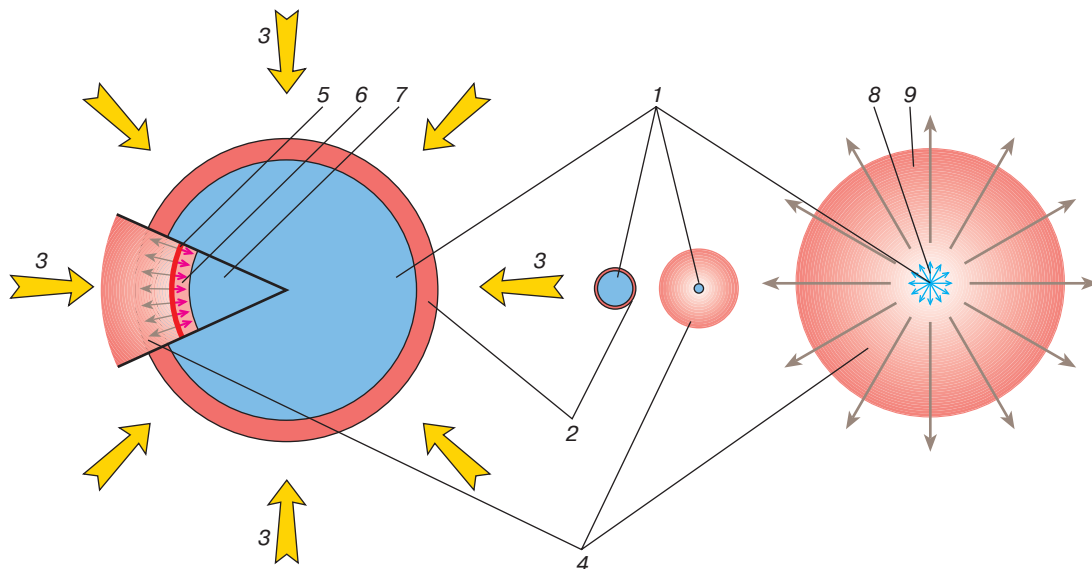


Рис. 4. Схема динамики нагрева и сжатия термоядерной мишени: 1 – ${}^2\text{D}$ или ${}^2\text{D} + {}^3\text{T}$, 2 – оболочка мишени, 3 – пучок излучения, 4 – расширяющаяся плазма вещества оболочки, 5 – фронт абляции, 6 – сжимающаяся неиспарившаяся часть оболочки, 7 – сжимающееся и прогреваемое термоядерное топливо, 8 – термоядерный микро-взрыв, 9 – разреженная плазма вещества оболочки

большого количества самосогласованных нелинейных физических процессов. Очень часто эти процессы, на первый взгляд непринципиальные, по мере продвижения в глубь проблемы ставят задачи более сложные, чем решенные ранее.

Рассмотрим поглощение падающего на мишень пучка излучения драйвера. Детальный механизм поглощения зависит от типа используемого драйвера. Классические механизмы поглощения энергии в плазме как для лазерного излучения, так и для пучков заряженных частиц связаны с процессами соударений заряженных частиц. Электрическое поле падающего лазерного излучения заставляет осциллировать электроны в плазме мишени. В результате столкновений электронов с ионами энергия этих осцилляций преобразуется в тепловую. Аналогично высокоэнергетические заряженные частицы, падающие на мишень, замедляются из-за столкновений заряженных частиц с плазмой. Однако поглощение энергии излучения драйвера в мишенях инерциального синтеза не сводится только к столкновительным процессам. В действительности классические механизмы поглощения при термоядерных температурах могут стать неэффективными. Представляющие наибольший интерес механизмы повышенного поглощения энергии связаны с процессами, которые возникают вследствие большой интенсивности пучка или энергии падающих частиц. Например, падение на мишень лазерного излучения или пучка заряженных частиц может сопровождаться коллективными явлениями в плазменной короне мишени и приводить плазму в турбулентное состояние. Эта турбулентность может способствовать усилению поглощения, а также рассеянию падающего излучения или его отражения от мишени [2].

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Нерешенные вопросы в разработке драйверов и физике взаимодействия излучения с веществом оставляют много неопределенностей, которые переносятся на процессы конструирования мишеней. Однако известны простые исходные предпосылки, которые позволяют определить общие требования к конструкции мишеней.

Мишени в ИТС должны иметь сферическую форму. Содержание конденсированной D–T-топливной смеси оценивается по массе величиной порядка 1 мг, сжатие – величиной порядка 1000 раз по отношению к плотности жидкой фазы. Температура центральной части должна иметь значение порядка 10 кэВ. Для достижения выгорания топлива на 30–50% необходимо, чтобы горячая область составляла не более 0,1 части от массы топлива. Для снижения требований на термодинамические параметры зажигания смеси предлагается заключать топливо в оболочку из материала с большим зарядовым числом Z , которая поглощает энергию излучения и иг-

рает роль толкателя (пушера). Для оптимизации физических процессов в мишенях предлагается использовать следующие способы: обеспечение максимального энерговклада в мишень с помощью выбора энергетических и пространственно-временных параметров излучения драйвера; временная фазировка и синхронизация ударных волн; использование многооболочечных мишеней и др. Основные предпосылки позволяют получить соотношения, связывающие энергию излучения драйвера с массой и размером мишени. Эти параметры необходимы, но недостаточны для полного представления конструкции мишени. Их детализация связана с очень важными и трудновыполнимыми требованиями. В ранних исследованиях предполагалось использование сплошных сфер из D–T-топлива. Существенным недостатком таких мишеней явилась необходимость обеспечения больших уровней мощности более 1000 ТВт и трудности удовлетворения требований к сферической симметрии имплозии. В большинстве последующих исследований использовались мишени, представляющие собой тонкостенную стеклянную оболочку, заполненную D–T-газом под давлением $3 \cdot 10^6$ Па. На них получены первые успешные эксперименты, в которых зарегистрированы термоядерные нейтроны.

Для имплозии в абляционном адиабатическом режиме необходимы мишени с большим усилением энергии. Среди них особый интерес представляют конструкции с несколькими топливными областями. Конкретные конструкции мишеней достаточно уникальны. Однако, когда концептуально мишень разработана, параметры ее элементов могут варьироваться. Обобщая многочисленные предложения, можно представить функциональную схему топливной мишени в следующем виде (рис. 5).

Основным назначением внешнего слоя 1 является функция аблятора. Он поглощает большую часть энергии драйвера, в результате чего генерируется

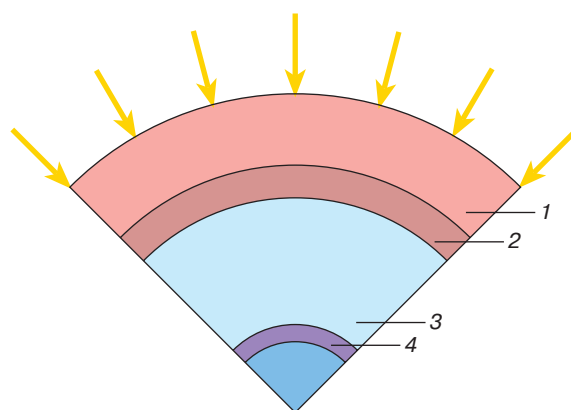


Рис. 5. Функциональная схема многооболочечной топливной мишени

ударная волна, направленная к центру мишени. Для повышения эффективности процесса сжатия за аблятором предлагается разместить слой 2, который должен выполнить две функции: поршня, сжимающего топливную смесь, и экрана, ограждающего ее от преждевременного нагревания. Поэтому этот слой целесообразно изготовлять из вещества, равного по плотности аблятору, но имеющего высокое зарядовое число Z . Равная плотность позволит уменьшить негативное влияние гидродинамических неустойчивостей, а высокое Z – эффективнее поглотить вторичное греющее излучение. Предполагается, что это будет композиционный материал, например на основе органики и тяжелого металла. Следующий слой 3 должен позволить разогнаться сжимающему слою, поэтому предполагается, что он должен быть легко сжимаемым (газ, пенопласт и т.д.) или вообще представлять собой вакуумное пространство. Непосредственно перед топливной смесью, возможно, окажется целесообразным разместить оболочку 4 с большим Z , которая будет служить дополнительным экраном, стабилизатором неустойчивостей и толкателем. Центральная часть сферы представляет собой непосредственно топливо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обширные, дорогостоящие, уникальные по сложности и глубине проникновения в физическую суть исследования, выполняемые в ведущих лабораториях мира, вскрыли задачи, о существовании которых в начале пути не подозревали. Несмотря на значительные достижения, ни одна из драйверных систем (см. табл. 2) не позволяет в настоящее время вплотную приблизиться к решению проблемы. Кроме необходимости повышения энергетических и оптимизации пространственно-временных параметров драйверов встают проблемы поглощения, переноса, излучения энергии и гидродинамических процессов в мишени и плазменной короне.

Ожидаемое и концептуально важное распределение энергии легкоионного пучка с брэгговским пиком в экспериментах с реальными пучками, не являющимися моноэнергетическими и однородными по составу, не было реализовано. В действительности распределение энергии на глубине проникновения имело близкий к экспоненциальному вид (см. рис. 3). Увеличение энергии в импульсе привело к ускоренному образованию плазменной коро-

ны, которая обладает более высокой тормозной способностью, чем холодное вещество. В результате для значительной части энергозапаса пучка снизилась эффективность трансформации его в энергию гидродинамического сжатия, возросла доля энергии, уносимая излучением. Значительные и еще до конца неопределенные задачи ставит гидродинамика системы пучок–мишень.

Таким образом, современное состояние проблемы ИТС подчиняется принципу третьего закона Ньютона: чем ближе исследователи подходят к решению, тем большее противодействие оказывает природа, предлагая для решения новые сложнейшие задачи.

Вопрос: “Когда же наука достигнет уровня хотя бы критической демонстрации УТС?” – звучит давно. Многие прогнозы не сбылись. Вот что сказал по этому поводу выдающийся физик, один из создателей американской водородной бомбы, Эдвард Теллер: “Вместо ответа дам свое определение пессимиста и оптимиста. Пессимист – это тот, кто всегда прав, но его это не радует. Оптимист убежден, что будущее неясно. В данном случае благоразумнее быть оптимистом. Я хотел бы быть оптимистом и верить...”

ЛИТЕРАТУРА

1. Крюков С.В. Проект ИТЭР: Физическое обоснование и концепция // Атом. техника за рубежом. 1996. № 3. С. 3–10.
2. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М.: ЭА, 1984. 301 с.
3. BEAMS'96. Proc. 11th Intern. Conf. High Power Particle Beams. Prague, June 10–14, 1996. Vol. 1–2.
4. Басов Н.Г., Захарченко Ю.А., Рупасов А.А. и др. Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989. 368 с.

* * *

Владимир Ильич Бойко, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физико-энергетических установок физико-технического факультета Томского политехнического университета. Область научных интересов – исследование взаимодействия мощных импульсных потоков заряженных частиц с веществом и проблем ядерной энергетики. Автор около 200 научных публикаций, одной монографии, общественно-популярных изданий, изобретений.