

частей вещества аблятора, в результате чего вся лазерная энергия преобразуется в тепловую и кинетич. энергию разлетающегося вещества. На границе испарения формируется импульс т. н. а б л я ц и о н н о г о давления, складывающегося из теплового давления и реактивного давления разлетающейся плазмы (при темп-ре  $\approx 1$  кэВ, скорость разлёта в более плотные слои к центру мишени составляет  $\approx 300$  км/с, давление более  $10^6$  атм).

Под действием этого давления неиспарённая часть мишени движется к центру симметрии и сжимается. Как правило, длительность лазерного импульса примерно равна времени сжатия. Для мишени в виде тонкой оболочки процесс сжатия описывается т. н. моделью тонкой оболочки:

$$M \frac{du}{dt} = 4\pi R^2 2\rho v^2; \quad \frac{dM}{dt} = -4\pi R^2 \rho v$$

( $M = 4\pi R^2 \cdot \Delta R \rho_0$  — масса оболочки,  $R$  — текущий радиус мишени,  $\Delta R$  — толщина оболочки,  $\rho_0$  — плотность оболочки,  $u$  — скорость сжатия,  $v$  — скорость разлёта «коронны»). Решение зависит от единственного параметра  $\beta = R\rho/\Delta R \cdot \rho_0$ . Важными величинами являются скорость сжатия  $u = (0,5-1)v_{зв}$  и кинетич. энергия оболочки  $Mu^2/2$ . Величина  $\gamma = (Mu^2/2) \int Q dt$ , наз. гидродина-

мической эффективностью, определяет долю поглощённой энергии, перешедшей в кинетич. энергию сжимающейся оболочки, по отношению ко всей энергии ЛИ. Это важный параметр для характеристики энергетич. проблемы ЛТС. В сферич. мишенях она зависит от  $\beta$  и составляет 3—15%; в предельном случае плоского слоя ( $R \rightarrow \infty$ ) может достигать 41%. Одновременно с трансформацией поглощённой энергии в кинетическую происходит сжатие термоядерного горючего и неиспарённого вещества оболочки ударными волнами и адиабатич. сжатие за счёт движения оболочки, играющей роль поршня. Препятствиями к достижению сверхвысокого сжатия являются: нагрев вещества ударными волнами, быстрыми электронами, рождающимися при поглощении ЛИ, и рентг. излучением из «коронны»; рэлеевская — тейлоровская неустойчивость (см. Неустойчивости плазмы) процесса сжатия, связанная с неоднородностями мишени и распределением поглощённой энергии на её поверхности. Препятствия первой группы устраняются выбором соответствующего диапазона плотности потока ( $10^{14} - 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>) и длины волны лазера ( $\lambda \approx 0,3 - 0,5$  мкм), временной формы лазерного импульса и устройства мишени. Для устойчивого сжатия мишени относительная точность в её изготовлении должна быть не менее 1%, а колебания однородности облучения не более 5%. Как показывают теоретич. расчёты, при выполнении этих условий периферийная часть термоядерного горючего может быть сжата до плотности  $10^2 - 10^3$  г/см<sup>3</sup> при темп-ре 0,5—1 кэВ, а центр. часть (1—10% от всей массы DT-горючего) нагрета до  $\approx 10$  кэВ ( $10^8$  К) при меньшей плотности (5—50 г/см<sup>3</sup>), что достаточно для возбуждения самоподдерживающейся термоядерной реакции. Термоядерное воспламенение происходит вблизи центра симметрии мишени, а затем распространяется на периферию.

Центр мишени можно окружить спец. теплоизолирующими слоями, облегчающими инициирование термоядерных реакций. Для развития интенсивного горения центр. зона ( $T \approx 10$  кэВ) должна быть достаточной по размерам для замедления и сохранения в ней  $\alpha$ -частиц, образующихся в результате термоядерных реакций и имеющих энергию 3,6 мэВ. Размер  $d$  центр. зоны можно определить из сравнения его с длиной замедления  $\alpha$ -частиц указанной энергии:  $nd \geq 0,2 - 0,4$  г/см<sup>2</sup>.

Расчётный коэф. усиления  $K$  (отношение выделившейся термоядерной энергии к энергии лазера) может достигать  $10^2 - 10^3$ , что достаточно (в случае подтверждения этих данных на опыте) для создания экономически рентабельной термоядерной электростанции.

Для осуществления микровзрыва с таким коэф. усиления энергия лазерного импульса должна составлять 1—3 МДж, а для демонстрации физ. порога зажигания достаточно нескольких сотен кДж.

Энергетика ЛТС. На рис. 1 представлена возможная схема использования ЛТС в замкнутом энергетич. цикле с полезным энергетич. выходом. Энергия лазера



Рис. 1. Схема замкнутого энергетического цикла с использованием ЛТС.

в реакторе трансформируется в термоядерную с коэф. усиления  $K$ . Затем происходит частичное преобразование термоядерной энергии в электрическую ( $\alpha K$ ) и тепловую  $(1-\alpha)K$ , где  $\alpha$  — кпд системы преобразования. Часть энергии  $(1/\eta, \eta$  — кпд лазера) необходимо вернуть в систему для накачки лазера. Т. о., полезный энергетич. выход в виде электрич. энергии составляет  $\alpha K - 1/\eta$ , остальная энергия  $(1-\alpha)K + 1/\eta - 1$  реализуется в виде тепла. При определ. отношении  $\xi$  электрич. энергии к тепловой  $\xi = (\alpha K - 1/\eta) / ((1-\alpha)K + 1/\eta - 1)$  получается зависимость необходимой эффективности лазера от коэф. усиления (рис. 2). При кпд лазера 3% необходим коэф. усиления 170, при коэф. усиления  $> 10^3$  эффективность используемых лазеров может быть снижена до 0,5%.

Рис. 2. Зависимость необходимой эффективности лазера  $\eta$  от коэффициента усиления реактора.

Термоядерный микровзрыв мишени и последующее использование и преобразование энергии осуществляется в лазерном термоядерном реакторе.

Лазер для энергетич. реактора, по совр. представлениям, должен обладать след. параметрами: энергия 1—3 МДж; длительность импульса  $(2-3) \cdot 10^{-8}$  с;  $\lambda \approx 0,25 - 0,5$  мкм; кпд 5—10%; частота повторения импульсов 1—10 Гц; расходимость луча должна быть достаточной для фокусировки её на мишень размером 1 см

Крупнейшие действующие лазерные установки (1987)

	Энергия, кДж	Длительность импульса, с	Длина волны, мкм	Число лучков
«Новая» (Ливермор, США) . . .	20—100	$10^{-10} - 10^{-9}$	Nd-лазер 0,35—1,06	20
«Генко XII» (Осака, Япония) . .	20	$10^{-10} - 10^{-9}$	Nd-лазер 0,53—1,06	12
«Лекко VII» (Осака, Япония) . . . . .	10	$10^{-10} - 10^{-9}$	CO <sub>2</sub> -лазер 10,6	8
«Дельфин-1» (ФИАН, СССР)	2	$(1,5-4) \cdot 10^{-9}$	Nd-лазер 1,06	6
«Омега» (Рочестер, США) . . . .	3	$0,7 \cdot 10^{-9}$	Nd-лазер 0,35—1,06	24