

## МИШЕНИ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВСПЫШКИ И ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА

*Е.Н. Аврорин, А.И. Зуев, Н.Г. Карлыханов,  
В.А. Лыков, В.Е. Черняков*

Обсуждаются результаты расчетов мишеней для ЛТС, выполненные по программе "Заря" с учетом спектрального переноса излучения,  $\alpha$ -частиц, быстрых электронов, ограничения электронной теплопроводности. Сформулированы требования к мишеням и параметрам лазерной установки для получения вспышки и для гибридного реактора.

1. В основу программы "Заря" положена двухтемпературная газодинамическая модель [1], описывающая движение вещества с учетом ряда диссипативных процессов и переноса энергии неравновесным излучением [2, 3]. Различаются электронные, ионные и фотонные компоненты как в термодинамических функциях, так и в диссипативных процессах. В каждой из компонент выделены квазиравновесные и существенно неравновесные составляющие: быстрые электроны, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с плазмой; нейтроны и заряженные продукты термоядерной реакции; неэквилибрийное излучение. Перенос энергии и импульса заряженных частиц может рассматриваться как в однополовом приближении с эффектными пробегами, так и в спектральной постановке. При описании взаимодействия лазерного излучения с плазмой принимаются во внимание обратное тормозное, резонансное и параметрическое поглощение на профиле плотности, деформированном поперечными силами, процессы вынужденного рассеяния (см. обзор [4]). Учитывается возможное ограничение электронной теплопроводности [5].

2. После уточнения [6, 7] расчетно-теоретической модели по существующим экспериментам с газонаполненными оболочками [8, 9] были проведены расчеты [7] с целью определения масштаба лазерной установки и возможных конструкций мишеней для получения вспышки

("breakeven"). Перед расчетами ставилась задача выяснения требований на лазер (энергия  $E$ , мощность  $P$ , длина волны  $\lambda$ , форма импульса), которые предъявляют различные конструкции мишеней.

К настоящему времени опубликованы многочисленные варианты мишеней: однородные, требующие профилированного импульса [10]; оболочечные [11 + 15], в которых возможно достижение высоких сжатий при простой форме импульса. Однако при выборе возможных конструкций мишеней необходимо учитывать следующие обстоятельства. Эффекты, связанные с прогревом оболочки неравновесным излучением, исключают применение материалов с  $Z \gtrsim 6$  в испаряющейся части мишени [14]. Развитие гравитационной неустойчивости и турбулентного перемешивания не допускает большого перепада плотностей на контактных границах тонких оболочек [15 – 16], если же такой перепад плотности необходим, то оболочки должны быть достаточно толстыми.

Были рассмотрены следующие типы мишеней: I тип мишени в виде оболочки из материала с небольшим  $Z(\text{CH}_2, \text{Be})$  и слоем ДТ-льда на внутренней поверхности суммарной относительной толщиной  $\sim 3\%$ ; II тип мишени в виде двух concentрических оболочек, внутренняя из Au относительной толщиной  $10 \div 15\%$  заполнена ДТ-жидкостью, внешняя из  $\text{CH}_2$  (или Be) имеет массу в три – пять раз больше и относительную толщину  $2 \div 5\%$ , между оболочками газ малой плотности; III тип отличается от II отсутствием зазора между оболочками.

Расчеты проводились для следующих форм лазерного импульса: А – прямоугольный треугольник; В – равнобедренный треугольник; С – гауссовский импульс; Д – профилированный с перепадом мощности  $\lesssim 10^3$ .

Варьировались параметры мишеней и импульса до появления в расчетах заметного термоядерного горения. Для удобства сравнения различных мишеней, форм импульса, а также длины волны лазерного излучения на рисунке в координатах энергия – пиковая мощность лазера ( $E, P$ ) указаны положения различных систем "мишень-лазер" при условии, что температура горения в два – три раза превышает температуру сжатия. Это условие можно принять за определение вспышки. Обозначения, принятые на рисунке для мишеней I типа, приведены в таблице.

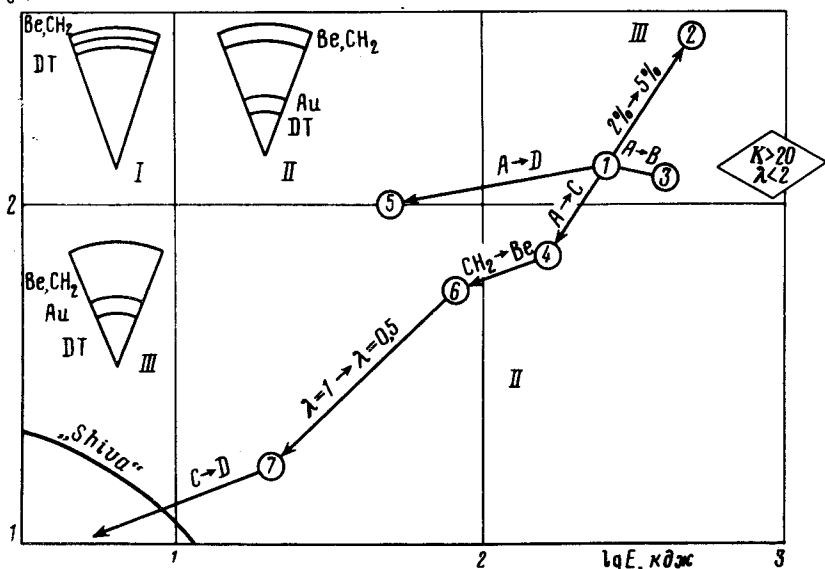
Длина волны, форма лазерного импульса, а также материал и относительная толщина инертной оболочки для мишеней I типа, представленных на рисунке

№	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda, \mu\text{м}$	1	1	1	1	1	1	0,5
Импульс	А	А	В	С	Д	С	С
Мишень	$\text{CH}_2-2\%$	$\text{CH}_2-5\%$	$\text{CH}_2-2\%$	$\text{CH}_2-2\%$	$\text{CH}_2-2\%$	$\text{Be}-2,5\%$	$\text{Be}-2\%$

На рисунке приведены также требования на лазер (при  $\lambda = 1 \mu\text{м}$  и гауссовской форме импульса), предъявляемые мишенями II и III типа. Как видно из этого рисунка, масштаб установки для вспышки су-

щественно зависит от длины волны, формы импульса и конструкции мишени. Эти поисковые расчеты показали: а) для получения вспышки необходимы криогенные мишени в виде  $2 \div 3\%$  оболочки из материала с небольшим  $Z$  и высокой начальной плотностью ( $Be$ ), на внутренней поверхности которой наморожен слой ДТ-льда относительной толщиной  $\sim 1\%$ . С такой мишенью возможно получение вспышки на установке с параметрами  $E \sim 100$  кДж,  $P \sim 50$  ТВт,  $\lambda = 1$  мкм при гауссовской форме импульса; б) возможно снижение необходимых для вспышки энергии и мощности лазера за счет усложнения как конструкции мишени, так и формы импульса: применение мишеней II типа позволяет снизить пиковые мощности в два раза; использование профилированного импульса — снизить в пять — шесть раз; в) радикальным средством снижения масштаба установки для вспышки является уменьшение длины волны до  $\lambda \lesssim 0,5$  мкм; в этом случае результаты расчетов становятся более устойчивыми к предположениям относительно ограничения электронной теплопроводности и спектра быстрых электронов; г) в случае использования второй гармоники излучения неодимового лазера, профилированного импульса и криогенных мишеней масштаб установки для вспышки соизмерим с действующей лазерной установкой "Shiva".

$\lg P, \text{ТВт}$



Требования к лазерной установке для получения термоядерной вспышки.

В плоскости энергия — пиковая мощность лазера представлены положения различных систем лазер-мишень для вспышки, которые отличаются типом мишеней, формой импульса и длиной волны лазера. Отличительные особенности расчетов мишеней I типа (1 + 7) представлены в таблице. С переходом на вторую гармонику Nd-лазера, при использовании профилированного импульса и криогенных мишеней I типа возможно осуществление вспышки на действующей установке "Shiva".

3. Осуществление вспышки позволит экспериментально доказать принципиальную возможность создания гибридного реактора на основе ЛТС [13]. Возможное решение системы "лазер-мишень" для гибридного реактора может быть следующим. Лазер: КПД 1 + 2%, простой

импульс  $P \approx 100$  ТВт,  $E \sim 1$  МДж,  $\lambda \lesssim 1 \div 2$  мкм. Мишень: инертная оболочка со слэем ДТ-льда суммарной относительной толщиной  $\sim 3\%$  [13]. К настоящему времени максимальный коэффициент усиления для гауссовой формы импульса в расчетах по программе "Заря" получен для оболочки из ДТ-льда умеренной толщины и составляет величину  $\sim 150$  при  $E = 1$  МДж. Наши расчеты не подтвердили возможность получения заметно большего (в пять — шесть раз) коэффициента усиления при  $E \approx 1 \div 10$  МДж ни для мишеней со сверхтонкими оболочками [12], ни для мишеней II типа с заменой части внешней оболочки на ДТ-лед [17].

Мы считаем, что требования относительно низкой стоимости, повышенной надежности и высокого коэффициента усиления по энергии могут быть одновременно выполнены в случае применения мишеней I типа.

Поступила в редакцию

26 июля 1980 г.

### Литература

- [1] С.И.Брагинский. Сб. "Вопросы теории плазмы", 1, 183, 1963.
- [2] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., изд. Наука, 1966.
- [3] G.Fraley, et. al. Phys. Fluids, 17, 474, 1974.
- [4] Ю.В.Афанасьев, Н.Г.Басов, О.Н.Крохин и др. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой. ВИНТИ, 17, 1978.
- [5] Е.В.Мишин. ДАН СССР, 215, 565, 1974.
- [6] А.И.Зуев и др. О роли быстрых электронов и ограничения электронной теплопроводности в экспериментах с газонаполненными оболочками. Препринт ИПМ, №37, 1980 г.
- [7] Е.Н.Аврорин и др. О требованиях к мишеням и параметрам лазерной установки для получения термоядерной вспышки. Препринт ИПМ, №48, 1980.
- [8] P.M.Cambell, et. all. Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research. IAEA, I, 227, Vienna, 1977.
- [9] E.K.Storm, et. all. Phys. Rev. Lett., 40, 1570, 1978.
- [10] J.Nuckolls, et. all. Nature, 239, 193, 1972.
- [11] J.Nuckolls, et all. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, II, 535, 1975; G.Fraley, et all. ibid, 543, 1975.
- [12] Ю.В.Афанасьев, Н.Г.Басов, П.П.Волосевич, Е.Г. Гамалий, О.Н.Крохин, С.П. Курдюмов, Е.И.Леванов, В.Б.Розанов, А.А.Самарский, А.Н.Тихонов. Письма в ЖЭТФ, 21, 150, 1975.
- [13] Л.П.Феоктистов, Е.Н.Аврорин и др. Квантовая электроника, 2, 349, 1978.
- [14] R.Mason. Nucl. Fusion, 15, 1031, 1975.
- [15] В.А.Лыков, В.А.Мурашкина, В.Е.Неуважаев, Л.И.Шибаршов, В.Г.Яковлев. Письма в ЖЭТФ, 30, 339, 1979.
- [16] В.А.Андронов, С.М.Бахрах, В.И.Мохов, В.В.Никифоров, А.В.Певницкий. Письма в ЖЭТФ, 29, 62, 1979.
- [17] J.Lindle. LLL Report UCKL 80104, Proceeding of Topical. ICF Meeting, Feb., 1978.