

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

533.92

ОСУЩЕСТВИМОСТЬ ИНЕРЦИАЛЬНО-ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА *)**Дж. Г. Накколлс**

Результаты недавних экспериментов, продемонстрировавших эффективность воздействия лазерного излучения на мишени, а также новые идеи конструирования экономически конкурентоспособных термоядерных станций — все эти успехи ободряют исследователей инерциально-термоядерного синтеза.

Ad hoc Комитет экспертов при Министерстве энергетики США предпринял обстоятельное изучение-обзор состояния американской инерциально-термоядерной программы. В результате этого изучения были сделаны выводы, на основании которых глава этого Комитета сказал в заключение своей речи на ежегодном собрании Американской Ассоциации перспектив науки в 1980 г. в Сан-Франциско следующее ¹: «Итак, теперь видно, что больше нет никаких непреодолимых препятствий на пути к практическому получению электроэнергии с помощью инерциального термоядерного синтеза... Инерциальный термоядерный реактор может иметь относительно малый объем камеры реактора, ... он является также относительно простым в эксплуатации и ремонте».

Увы, несмотря на столь позитивную оценку инерциально-термоядерного синтеза, значение этого вида «термояда» в общей энергетической программе США все еще продолжает оставаться предметом разногласий ^{2а}.

Но прежде чем упомянуть, к чему же сводятся споры, я позволю себе кратко описать суть инерциально-термоядерного синтеза.

В типичной схеме контролируемого инерциального термояда в камеру реактора вбрасывается термоядерная «таблетка» — мишень размером с горошинку, содержащая смесь тяжелых изотопов водорода. В реакторной камере эта мишень подвергается практически мгновенному облучению интенсивными лазерными лучами или пучками ионов, посылаемыми в камеру внешним источником («драйвером») (рис. 1). По мере того как поверхностные слои мишени испытывают взрывообразное испарение в вакуум, т. е. абляцию, эффект реактивной отдачи схлопывает внутреннюю часть мишени до плотностей и температур, достаточных для инициирования термоядерной реакции между ядрами тяжелых изотопов водорода — трития и дейтерия. В результате наступает микровзрыв, выделяющий такое количество энергии, которое эквивалентно сгоранию барреля нефти (т. е. 159 литров, дающих около 6000 МДж ^{2б}).

Те, кто настроен скептически относительно осуществимости программы инерциального термояда, выдвигают множество возражений. Они ссылаются на тот факт, что установки магнитного удержания термоядерной плазмы — типа «Токамака» и «магнитных зеркал» — на годы опередили установки инерциального удержания. К этому они добавляют, что мол еще потребуются значительные затраты времени и сил на решение технических и технологических проблем инерциального термояда, главным образом связанных с физикой взаимодействия лазерного излучения с плазмой мишени, конструкцией взрывной камеры и разработкой практически пригодных лазеров, ускорителей или других средств воздействия на мишени.

В течение последних трех лет, однако, в исследованиях инерциального синтеза был достигнут существенный прогресс в направлении решения его главных научных и технико-технологических проблем. В этот период удалось достигнуть следующего:

*) N u c k o l l s J. H., The Feasibility of Inertial-confinement Fusion.— Phys. Today, September 1982, v. 35, pp. 24—31.— Перевод В. А. Белокопья.

Дж. Г. Накколлс — руководитель отдела конструирования термоядерных мишеней Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса, США.

© American Institute of Physics 1982.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1984.

- найти эффективные режимы воздействия лазерного излучения на плазму мишеней с использованием коротковолновых лазеров;
- осуществить опыты с так называемыми «тепловыми» мишенями, абляция которых происходит за счет вторичного теплового излучения внешней оболочки (см. ниже) и дает в результате импlosionи наиболее высокие экспериментальные плотности термоядерного топлива;
- усовершенствовать конструкцию реакторов с жидкометаллическими стенками, позволяющими выдерживать эксплуатационный режим при высоких плотностях мощности воздействия продуктов микровзрыва;
- сконструировать предназначенные для воздействия на мишени лазеры: ускорители, обладающие более высокой эффективностью при пониженной стоимости;

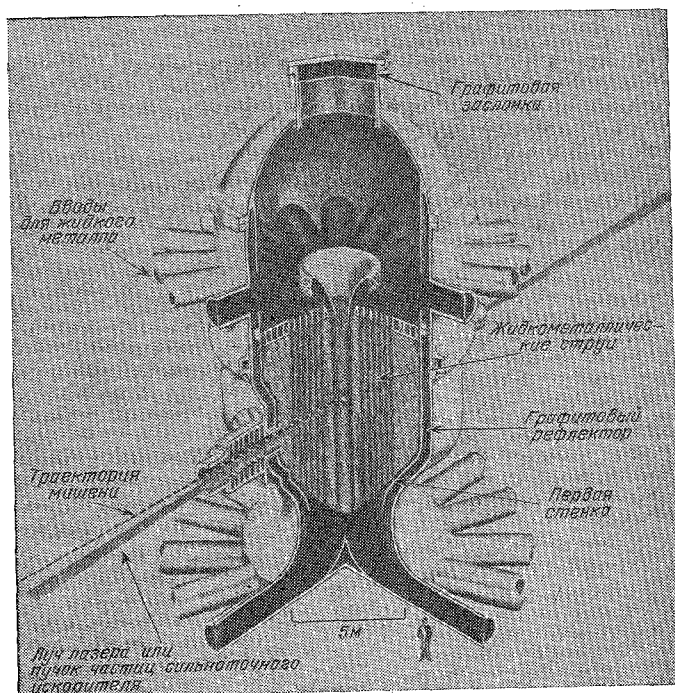


Рис. 1. Инерциально-термоядерный реактор типа HYLIFE.

«Дождевая» пелена из жидкого лития экранирует «первую стенку» реактора от повреждающего воздействия нейтронов, рентгеновских лучей и горячей плазмы, т. е. от продуктов микровзрыва мишени с ДТ-топливом. При средней толщине лития 50 см повреждающее воздействие нейтронной вспышки снижается настолько, что время жизненного цикла «первой стенки» реактора возрастает раз в десять, а наведенная нейтронами радиация конструкции реактора снижается в 10—100 раз. Средняя по времени мощность воздействия на первую стенку довольно высока и составляет примерно 10 МВт/м². Более 90% этой мощности поглощается именно пеленой жидкого лития.

— начать разработку способов эффективного использования специфики инерциального термояда — физического разделения, удаленности термоядерного источника мощности, т. е. реактора от чувствительных к ударным нагрузкам высокосложных подсистем — лазеров и ускорителей, а также — мишенных фабрик; это позволяет, в частности, одному большому лазеру (ускорителю) обслуживать последовательно (параллельно) несколько реакторов.

Эти разработки реализуют возможность создания будущих реакторов, стоимость и радиационная опасность которых минимальны.

ИСТОКИ РАЗВИТИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДА

В 1942 г. Ганс Бете, Энрико Ферми, Ю. Роберт Оппенгеймер, Эдвард Теллер и другие начали разработку физических проблем практического достижения термоядерной энергии. Несколько позднее термоядерные исследования в Лос-Аламосе были успешно продолжены по настоянию Теллера, взявшего на себя техническое руководство этими работами. В 1952 г. семь лет спустя после создания того устройства, которое послужило «атомным запалом» термоядерной реакции, сейсмографы всего мира зарегистрировали успешное испытание мультимегатонного устройства, в котором произошло инерциальное удержание термоядерной реакции взрывного типа. Такие многообещающие свойства термоядерной реакции (если ее удастся сделать контролируемой), как безопасность и надежность, чистота по сравнению с реакцией деления, а также низкая стоимость энергии, выделяемой неисчерпаемым топливом, доступным любой нации, привели к созданию исследовательских программ магнитного удержания термоядерной плазмы, осуществляемых крупнейшими плазменными лабораториями мира. А с самого начала 60-х годов возникла идея, отчасти подкреплённая расчетами, инерциального подхода к проблеме удержания (контро-

лирования) термоядерной плазмы, в том числе в виде наших схем, основанных на сверхплотной²⁶ имплозии, вызываемой лазерным, или пучковым, или тепловым воздействием.

Энергетический кризис стимулировал быстрый рост программ исследования управляемого термоядерного синтеза в начале 70-х годов как магнитного, так и инерциального. Уже начатые в таких лабораториях, как Ливерморская, Рочестерская, ФИАН СССР и Лимей во Франции, инерциально-термоядерные исследования были заново развернуты в виде программ работы лабораторий «КМС фьюжн», Лос-Аламос, «Сандиа» и Военно-морская лаборатория США, Резерфордская лаборатория в Англии, при университете в Осака в Японии, в Гархинге при Институте Макса Планка в ФРГ и кое-где еще. Быстрый рост этих лабораторий поддерживался на протяжении 70-х годов в том числе и за счет событий, связанных с действиями стран ОПЕК, политическими и технологическими трудностями внедрения в промышленность реакторов деления, а также научным прогрессом термоядерных исследований.

В 1980 г. Конгресс и президент США недвусмысленно поддерживали программу ускоренного развития исследований и разработок магнитного термояда в виде утвержденных законопроектов. Хотя новые экономические трудности и несколько задержали это развитие, безотлагательность решения термоядерной проблемы продолжала усиливаться. Средний Восток — источник значительной доли нефти, потребляемой в США, — нестабилен. Обнаружились слабые и ненадежные элементы стратегии энергетической независимости, основанной на комбинации угля с реакторами деления. Развитие атомной энергетики все более сдерживается законопроектами Мэрфи, вредные последствия которых еще предстоит испытать, а также растущей оппозицией широких масс. Вместе с тем развитие энергетики, основанной на угле, неизбежно приведет к выпадению кислотных дождей и в результате в XXI веке могут произойти глобальные климатические изменения, связанные с так называемым «парниковым» эффектом, обусловленным повышенным содержанием CO_2 в атмосфере. Прежде чем внести свой вклад в решение этих энергетических проблем следующего столетия, инерциальный термояд должен быть развит до такого уровня, чтобы можно было преодолеть некоторые решающие трудности.

Комитет экспертов Министерства энергетики США, который возглавляли Джон Фостер, вице-президент по науке и технике компании TRW, тогдашний директор управления оборонных исследований и разработок при Министерстве обороны США, а также директор Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса отметил, что ¹ «... множество проблем еще остается — и уже известных и еще не известных, — однако имеются разные обещающие идеи и направления, благодаря которым мы считаем вполне правдоподобным, что продолжение общенациональных усилий США должно обеспечить постройку и пуск прототипа экспериментального инерциально-термоядерного реактора к началу следующего столетия».

Что же это за проблемы, известные и неизвестные, и каковы многообещающие направления?

Мы уже отметили выше, что ключевая идея²⁶ инерциально-термоядерного процесса заключается в иницировании микровзрыва, т. е. термоядерного взрыва, масштаб которого настолько мал, что для удержания производной термоядерной плазмы достаточно небольшого реактора. Микровзрыв этот иницируется высокоомощными воздействиями направленного (лучевого) типа, способными вызвать имплозию (взрыв внутрь) термоядерного топлива, плотность которого в результате должна стать сверхвысокой, а температура — достаточно высокой для поджигания реакции. И для инерциального, и для магнитного удержания термоядерной плазмы эффективность сгорания (точнее, процент ядер, испытавших слияние при сгорании, далеко от полного) пропорциональна произведению плотности термоядерного топлива на время удержания.

При магнитном удержании термоядерной плазмы плотность ее лимитирована свойствами материала камеры, и поэтому степень выгорания топлива может быть повышена главным образом за счет увеличения длительности удержания плазмы. В инерциальном термояде время удержания ограничено законами динамики — ньютоновской инерцией, а также тепловой скоростью. Именно поэтому стараются сжать топливо до сверхвысоких плотностей. Плотности, достигающие 1000 г/см^3 , можно считать энергетически достижимыми потому, что они потребуют довольно малой энергии в процессе изэнтропического сжатия при неизменной малой энтропии. Дело в том, что при нулевой энтропии термоядерного топлива сжатие потребовало бы затрат только на «энергию Ферми» — минимально возможную энергию сжатого вещества, которая гораздо меньше тепловой энергии зажигания термоядерной реакции.

Разработаны два основных типа конструкций термоядерных мишеней для инерциально-термоядерных реакторов:

— мишени непосредственного воздействия, поглощающие энергию пучка во внешнем слое или «оболочке», которая движется реактивной силой абляции, и это движение непосредственно, гидродинамически преобразуется в имплозию — сжатие топлива;

— мишени с тепловой абляцией поглощают энергию внешнего воздействия (пучка, луча) ради преобразования ее в сравнительно мягкое рентгеновское излучение, удерживаемое во внутренней полости мишени и используемое для имплозии внутренней оболочки с топливом. Детальная информация о мишенях с тепловой абляцией пока весьма ограничена.

Инерциальный термояд еще должен пройти стадию демонстрации того факта, что достаточно высокий энергетический коэффициент усиления мишеней достижим при вполне приемлемых параметрах установок воздействия на мишени — по энергии (пучка, луча) и мощности, а также — стоимости. Коэффициент усиления мишени — это отношение энергетического выхода термоядерной реакции к энергии внешнего воздействия на мишень (лазера, ускорителя). Считая, что к. п. д. преобразования энергии в установке внешнего воздействия равен 10% и что также 10% составляет к. п. д. преобразования энергии воздействия на мишень и имплозию, получаем, что коэффициент усиления мишени должен заведомо превышать 100, поскольку энергия нужна не только для самообеспечения реактора. Такой коэффициент усиления осуществим с помощью мультимегаджоулевых установок внешнего воздействия на мишени (лазеров, ускорителей) при условии, что будут выполнены следующие три условия:

- воздействующий на мишень пучок (луч) эффективно взаимодействует с плазмой мишени;
- топливо эффективно сжимается до плотности, примерно в 1000 раз превосходящей плотность его обычного конденсированного состояния;
- непосредственно поджигается лишь малая часть топлива, расположенная, например, в центральной части мишени; при этом должна эффективно поджигаться и сгорать остальная часть топлива — основная, посредством распространения горения (детонации) от «запальной» части.

Для того чтобы получаемая таким образом термоядерная энергия обладала практической ценностью, еще предстоит разработка трех технических направлений, без чего невозможно воспользоваться даже высокoeffективными мишенями:

- источник внешнего воздействия на мишени с достаточно высоким к. п. д. собственном и к. п. д. воздействия на мишень;
- практичный в эксплуатации и вообще конкурентоспособный реактор, воплощающий в своей конструкции достижения износоустойчивости под воздействием продуктов микровзрыва, в особенности ударных радиационных нагрузок;
- эффективная и удобная в эксплуатации фабрика мишеней.

Обратимся теперь к разбору этих научно-технических проблем.

Исследователям удалось улучшить поглощение энергии внешнего воздействия мишенями, применив высокоинтенсивное лазерное излучение, причем получилось и снижение генерации так называемых горячих электронов, которые греют внутренние слои

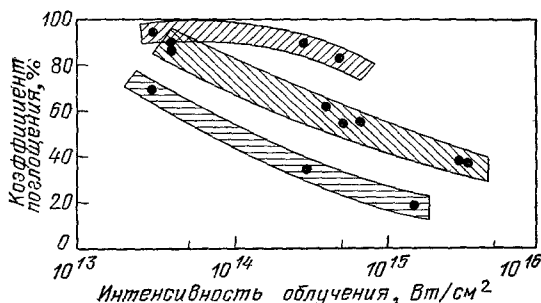


Рис. 2. Эффективность поглощения лазерного излучения мишенями явно растет с переходом на более короткие длины волн лазерного излучения.

Кривые, от нижней к верхней, соответствуют длинам волн в 1, 1/2 и 1/3 мкм, а данные взяты из результатов опытов: Эколь Политехник (Франция); Рочестский университет и Ливерморская Национальная лаборатория им. Лоуренса, США.

мишени, затрудняя сжатие топлива из-за повысившейся энтропии. На рис. 2 изображены результаты измерения эффективности воздействия лазерного излучения. В таких опытах измерялось поглощение³ в виде функции интенсивности облучения на трех лазерных длинах волн — 1, 0,53 и 0,35 мкм — дисковых мишеней из материалов с низким Z . Отметим, что инерциально-термоядерные мишени сконструированы для интенсивностей облучения около 10^{14} – 10^{15} Вт/см². При этих интенсивностях измерено 90%-ное поглощение коротковолнового лазерного излучения. Было также показано, что при более коротких длинах лазерных волн генерируется меньше сверхтепловых электронов³. Этот эффект снижения доли сверхтепловых электронов хорошо иллюстрируется «смягчением хвоста» относительно жестких рентгеновских лучей с укорочением длины волны лазера (рис. 3). Результаты опытов лабораторий различных стран мира подтверждают эти закономерности⁴. Высокоэффективное воздействие лазерного облучения коротких длин волн на плазму мишени было предсказано, а затем и уточнено теоретиками Ливерморской Национальной лаборатории⁵.

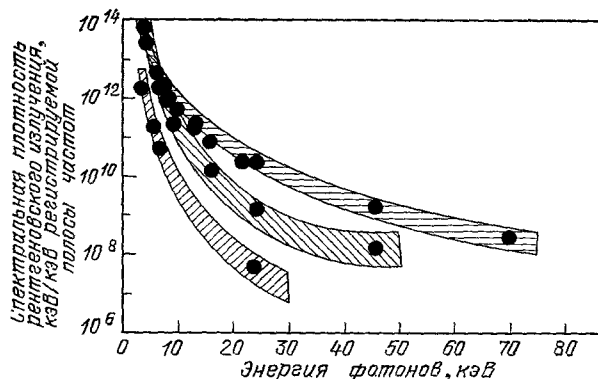
При таком взаимодействии плазмы с когерентным электромагнитным излучением эффект столкновительного поглощения (обратный тормозному излучению) конкурирует с эффектами коллективного поглощения, связанными главным образом с явлениями бриллюэновского и комбинационного рассеяния, множественной самофокусировки или «филаментации», а также с плазменной неустойчивостью типа распадающей двухплазменной неустойчивости. При переходе от лазерного излучения с длиной волны 1 мкм к существенно более коротким длинам волн достигается более глубокое проникание электромаг-

нитной волны в плазму, где она плотнее, и поэтому частота соударений между частицами плазмы выше. Уже поэтому укорочение длины волны отодвигает в сторону более высоких интенсивностей облучения порог наступления существенных коллективных плазменных不устойчивостей.

В то время как текущие эксперименты проводятся с плазмой, пространственный характерный масштаб которой составляет около миллиметра, следовало бы перейти к таким плазменным экспериментам, которые позволили бы проверить наши теоретиче-

Рис. 3. «Сверхтепловое» рентгеновское излучение уменьшается более чем на два порядка, когда вместо лазерного излучения 1 мкм переходят к излучению 1/3 мкм.

Для мишеней в виде золотых дисков при лазерном воздействии с интенсивностью около $3 \cdot 10^{14}$ Вт/см², длительностью около 600 пс. Это рентгеновское излучение является признаком генерации в мишени «сверхтепловых» электронов, способных к преждевременному прогреву мишени. Кривые рентгеновского спектра соответствуют, от нижней к верхней, экспериментам для длин волн лазера 1, 1/2 и 1/3 мкм.



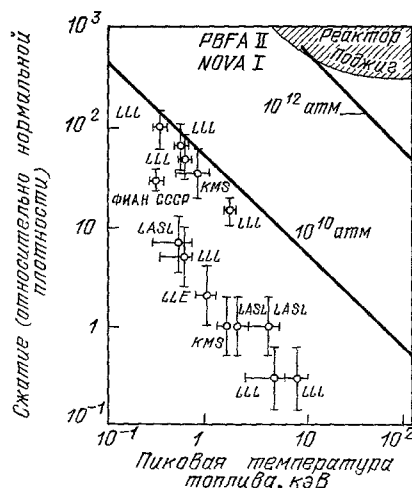
ские расчеты для плазменной короны мишеней инерциально-термоядерных реакторов. Их корона имеет характерный пространственный масштаб около сантиметра. К тому же есть насущная необходимость в повышении пространственно-временной чувствительности измерений профиля разлетающейся плазмы по плотности и температуре, чтобы подтвердить, либо опровергнуть наши представления о деталях взаимодействия лазерного излучения с плазмой.

О «ФИЗИЧЕСКОЙ ОСУЩЕСТВИМОСТИ» ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДА

Наивысшая плотность, достигнутая в настоящее время в экспериментах с лазерной имплозией тритий-дейтериевой смеси, составляет 20 г/см³, т. е. стократную плотность нормального конденсированного (жидкого или твердого) состояния ДТ-смеси²¹. Как видно из рис. 4, этот сверхплотный материал имеет температуру 500 эВ и давление 10^{10} атм.

Рис. 4. Результаты экспериментов различных лабораторий по исследованию инерциального термояда.

Данные для результатов, отмеченных в верхнем левом углу, получены в результате лазерного воздействия на мишень, конструкция которой еще не опубликована нами, но известно, что имплозия капсулы с ДТ-топливом в этой мишени была вызвана тепловым рентгеновским излучением (см. текст). Радиационно-химические методики диагностировали при имплозии таких мишеней плотность топлива, превосходящую плотность жидкой ДТ-смеси раз в 100. Эти результаты достигнуты с лазером SHIVA, в то время как вступление в строй лазера NOVA I даст возможность осуществить планы по осуществлению подобной имплозии ДТ-смеси, но уже с максимальной плотностью в 1000 раз выше нормального конденсированного состояния, причем с температурой в несколько килоэлектрон-вольт. (PBFA II — установка фирмы «Сандия» (1984) для исследования критического режима ДТ-мишеней, сжимаемых легковыми пучками ≈ 4 МДж/40 ТВт; NOVA I — неодимовый лазер (1984) Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса (AAA) ≈ 100 КДж/100 ТВт; LLL — AAA; LASL — Лос-Аламос; KMS — частная организация («KMS фижн»); LLE — Лаборатория лазерной энергетики, Рочестерский университет, США.)



Полученные в Ливерморе результаты находятся в хорошем согласии с общей теорией и с детальными расчетами процесса воздействия лазерного излучения на мишень и вторичных процессов в мишени. Расчеты эти проводятся на основе сложной магнитогидродинамической программы вычисления термоядерных процессов, называемой LASNEX. Но для инициирования мишеней, предназначенных для инерциально-термоядерных

реакторов, указанного достигнутого сжатия недостаточно: для таких мишеней DT-смесь должна испытать имплозию до плотности, в тысячу раз превышающей плотность нормального конденсированного состояния, т. е. до 200 г/см^3 , причем при температуре в несколько (5—20) килоэлектрон-вольт. Таким образом, давление в точке зажигания должно составлять около 10^{12} атм. В настоящее время мы ожидаем результатов попыток достигнуть диапазона плотностей, превышающих плотность конденсированного топлива (DT) в 200—400 раз, т. е. до $40\text{--}80 \text{ г/см}^3$ с помощью нового лазера NOVELLE, фокусирующего на мишень $1/2\text{-мкм}$ излучение в импульсе 10 кДж. Таковы наши планы на 1984—1985 гг. На 1986—1988 гг. мы планируем тысячекратное сжатие, до 200 г/см^3 , с помощью 100-килоджоулевого лазера NOVA I, дающего на мишень $1/2\text{-и } 1/3\text{-мкм}$ излучение.

В этих предстоящих на NOVA I экспериментах по достижению сверхвысоких плотностей ожидается также, что термоядерная энергия, выделившаяся в мишени, будет приблизительно равна той тепловой энергии, которую в результате сжатия приобретает DT-смесь мишени.

На рис. 4 изображено состояние инерциально-термоядерных экспериментов и их ближайшие цели. Так, опыты с достижением 100-кратного сжатия (по сравнению с нормальной плотностью жидкого DT) были выполнены с помощью 10 кДж/1 мкм-лазера SHIVA Ливерморской лаборатории им. Лоуренса, причем характерный параметр удержания по Лоусону (произведение плотности числа частиц на время удержания) превысил 10^{14} с/см^3 .

Установка NOVA I должна позволить достичь порога зажигания по параметру Лоусона, т. е. величины $nt \geq 3 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3$, при температуре около 2 кэВ, т. е. давления около $3 \cdot 10^{11}$ атм.

Неэффективность, присущая известным способам абляционного воздействия на мишень, а также самому процессу имплозии, приводит к требованию, чтобы при инерциальном термояде критерий Лоусона nt был примерно в 10 раз выше, чем при термояде магнитном, если иметь в виду достижение условий, соответствующих практически полезным режимам работы термоядерного реактора.

Следующей за достижением высокой плотности захватывающей задачей является демонстрационный эксперимент по доказательству «физической осуществимости» инерциального синтеза. Еще до того, как можно будет сконструировать, финансировать и соорудить установку воздействия на мишень, например большой лазер, мы должны получить опытное подтверждение, или корректировку, теоретических оценок для параметров, которыми должна обладать установка воздействия на мишень, начиная с энергии ее пучка (луча). Такой лазер (ускоритель) для полномасштабного реактора весьма дорог, он обойдется, вероятно, в полмиллиарда долларов, и поэтому нецелесообразно строить, из-за возможной ошибки в оценке, установку в два раза большую, чем необходимо. Следовательно, мы должны дать убедительные экспериментальные аргументы в пользу того, что если будет создана конкретная установка для сжатия мишеней (лазер, ускоритель), то мишени, предназначенные для полномасштабного реактора, дадут с нею высокий коэффициент усиления энергии. Именно такие экспериментальные аргументы могут быть использованы в качестве «операционального» определения понятия «физической осуществимости» инерциального термоядерного синтеза.

Американские физики собираются использовать опыты на лазере NOVA в нашей Ливерморской лаборатории им. Лоуренса, а также на легкоинной установке сжатия мишеней в Национальной лаборатории «Сандиа», называемой PBFA II (термоядерный ускоритель пучков заряженных частиц II) именно для исследования упомянутой «физической осуществимости» инерциального термояда. Для мишеней «нетеплового» типа, т. е. непосредственно использующих лазерную абляцию для имплозии, при работе этих установок центральная часть — сердцевина — мишеней должна достичь высоких плотностей и температуры, соответствующей «порогу поджигания». Количество DT-топлива в этих мишенях, плотность которого достигнет весьма высоких значений, будет недостаточным для того, чтобы горение из центра мишени распространилось на все топливо. Однако уже достигнутых параметров топлива должно быть достаточно для проведения их диагностики по распределению высокой плотности, температуры и степени перемешанности топлива с материалом содержащей его инертной оболочки-тампера (пушера). Специальные серии экспериментов с имплозией до сверхвысоких плотностей должны быть посвящены диагностике динамики имплозии оболочек мишени. Будет обеспечена рентгеновская подсветка-вспышка (с помощью воздействия лазера на специальные мишени) для мгновенного фотографирования структуры сжатых мишеней. Дополнительно к этим снимкам будет налажена диагностика поверхности схлопывающихся оболочек с помощью «мгновенной» съемки камерами в оптическом и рентгеновском диапазонах при подсветке вспышками очень короткой длительности — ради измерения эффекта преждевременного нагрева оболочки, прослеживания изменений ее скорости со временем, а также регистрации степени нарушения симметрии имплозии. Наконец, NOVA будет использована также для экспериментального исследования взаимодействия между плазмой мишени и лазерным излучением при масштабах плазменной «короны» мишени, сравнимых с таковыми для мишеней типа реакторных. Результаты этих измерений, естественно, с достаточной степенью точности позволят предсказывать, насколько большие мишени и соответственно лазеры (ускорители) потребуются для достижения высоких коэффициентов усиления энергии. NOVA и PBFA II войдут в строй действующих установок в середине 80-х годов.

ТРИ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ИНЕРЦИАЛЬНО-ТЕРМОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрим несколько более детально каждую из ключевых технических проблем, решение которых необходимо для создания инерциально-термоядерной энергетической промышленной установки. Покажем, какой именно прогресс уже достигнут, притом весьма существенный, в решении всех трех проблем.

Эти три проблемы таковы:

- создание соответствующего лазера (ускорителя);
- разработка соответствующих мишеней;
- конструирование соответствующего реактора.

Лазер (или ускоритель) должен посылать на мишень, если ее коэффициент усиления можно будет довести до планируемых значений, около 2 МДж, с пиковой мощностью сто тераватт, при собственном к. п. д. около 10—20%. Лучи лазера (пучки частиц ускорителя) должны фокусироваться до сечения в немногие миллиметры, входя в пяти-метровую камеру и создавая на мишени поверхностную плотность мощности 10^{14-15} Вт/см², причем эффективность взаимодействия лазерного луча (пучка частиц ускорителя) с плазмой мишени должна быть относительно высока. Далее, мы должны достичь «скорострельности» от десяти до двадцати микровзрывов в секунду. Лазер (ускоритель) указанного масштаба должен стоить не более 400 млн. долларов.

Среди лазеров кандидатами на реакторные системы воздействия — сжатия мишеней — являются системы на КгF, CO₂, а также лазеры на свободных электронах. Среди ускорителей — те, которые способны давать сильноточные пучки тяжелых или легких ионов. Согласно нашим оптимистическим оценкам легкоионные ускорители должны быть способны давать фокусировку до 10^{14} Вт/см². Экспериментаторы, например в «Сандии», уже смогли фокусировать легкие ионы до 10^{12} Вт/см². Вместе с тем еще не удалось достичь нужной эффективности при воздействии лазерного CO₂-излучения на мишени. В настоящее время достраивается 40 кДж ANTARES — самый большой в мире CO₂-лазер, на котором есть надежда изучить эту проблему. В Лос-Аламосской лаборатории, где уже действует 10 кДж-CO₂-лазер HELIOS, с помощью которого в настоящее время ведутся испытания весьма остроумных по конструкции мишеней.

Если основываться на уже разработанной технике, то большинство проектируемых установок воздействия на мишени должно обойтись примерно в 400 долларов/Дж, т. е. 800 миллионов долларов за 2 МДж. Однако многие из установок-кандидатов испытывают неуклонный прогресс, в том числе в снижении стоимости. Это дает основания прогнозировать достаточно вероятное снижение вдвое стоимости джоуля, т. е. примерно до 200 долларов/Дж. Легкоионные ускорители и перспективные лазеры могут даже быть значительно дешевле.

Когда учитывается стоимость той части реакторной системы, которая предназначена для питания системы воздействия на мишень, то такие высокоэффективные системы воздействия, как тяжелоионные ускорители с к. п. д. 25%, могут привести к удешевлению реактора в целом вдвое по сравнению с лазерными системами, к. п. д. лазеров в которых равен минимальной терпимой величине 5%.

Т а б л и ц а

Системы воздействия — кандидаты

Требования	Лазеры			Ускорители	
	CO ₂	КгF	на свободных электронах	тяжелых ионов	легких ионов
К.п.д. 10—20 %	?	?	+	+	+
Фокусировка до 10^{14-15} Вт/см ² на 5 м	+	+	+	+	?
К.п.д. воздействия на мишень 10 %	?	++	+++	+++	+
Скорострельность 10—20 Гц	+	+	+++	+++	+
Стоимость 200 долларов/Дж (2 МДж)	+	+	+	+	+++

В таблице дано суммарное представление о перспективах, достоинствах и недостатках систем воздействия — кандидатов.

М и ш е н и

Ведется интенсивная разработка как «тепловых» мишеней, так и «мишеней непосредственного воздействия». При разработке конструкций мишеней приходится учитывать определенные требования надежности, чтобы компенсировать ту неопределенность, которая еще не устранена в отношении знания закономерностей имплозии и разгорания мишеней.

Мишень для инерциально-термоядерных реакторов должна изготавливаться из весьма малого количества дешевого материала, если не говорить о тритии, который должен регенерироваться в реакторе. Если это достигнуто, то стоимость мишени определится главным образом стоимостью капиталовложений в постройку фабрики мишеней, а также стоимостью процесса их изготовления. Уже сейчас намечены убедительные решения главных проблем технологии изготовления мишеней таких, как полировка поверхностей их оболочек, автоматическая массовая инспекция и селекция, высокая скорость массового изготовления.

В так называемых «тепловых» мишенях, как мы уже упоминали, энергия воздействующего луча (пучка) поглощается специальным слоем, где она перерабатывается в энергию рентгеновского излучения такого спектра, который позволяет удерживать это излучение в некоторой внутренней полости мишени, где происходит абляционное воздействие рентгеновского излучения на внутреннюю часть мишени с топливом, испытывающим имплозию.

Именно трансформация энергии луча лазера (пучка ускорителя) в энергию соответствующего рентгеновского излучения придает «тепловым» мишеням важное достоинство — улучшенную симметрию имплозии.

В этих «тепловых» мишенях достаточно высокая симметрия имплозии достигается без требования, чтобы лучи (пучки), фокусируемые на мишень, были высокооднородны и расположены симметрично вокруг мишени. В некоторых реакторах новой конструкции сжатие мишени осуществляется всего лишь двумя лучами (пучками) — мишень предусматривается «тепловая». Сжать мишень «непосредственного воздействия» с помощью небольшого числа лучей (пучков) гораздо труднее, так как для симметрии сжатия таких мишеней требуется весьма большое число лучей (пучков). Другим важным преимуществом «тепловых» мишеней является то, что они эффективны при разных способах воздействия на мишень, возможно, даже CO_2 -лазерами. Исследователи Ливерморской лаборатории им. Лоуренса провели довольно много опытов с «тепловыми» мишенями, облученными 1-мкм излучением лазера SHIVA (около 10 кДж/10 ТВт), а также 1, 1/2 и 1/3-мкм излучением лазера ARGUS (1 — 2 кДж/4 ТВт). Полученные экспериментальные результаты мы считаем находящимися в превосходном согласии с детальными расчетами по вычислительной программе LASNEX, а также с законами подобия, выведенными нашими теоретиками.

Мишени «непосредственного воздействия» все-таки представляются более выгодными для энергий воздействия, не превышающих 100 кДж. Исследователи «НМСФюжн», Военно-морской лаборатории и Рочестерского университета США, а также ряда организаций других стран не прекращают попыток разработать такие мишени «непосредственного воздействия», которые и по симметрии имплозии и по к. п. д. имплозии (по эффективности преобразования энергии лазерного излучения в энергию сжатия) не уступали бы «тепловым» мишеням даже на уровне мегаджоулевых воздействий реакторного диапазона. Уточним, что к. п. д. имплозии определяется и эффективностью взаимодействия луча (пучка) с плазмой мишени, и эффективностью переработки энергии, воспринятой мишенью от луча (пучка), в энергию сжатия топлива, т. е. к. п. д. имплозии — это как бы итоговая энергетическая эффективность процессов воздействия и сжатия. Для мишеней «непосредственного воздействия» здесь важна проблема генерации весьма многих лучей (пучков) наряду с решением задач по достижению их высокой однородности и рациональной комбинации при фокусировке на мишень.

Еще далеко не исчерпаны возможности существенного улучшения конструкции мишеней для инерциального синтеза. Теория говорит, например, о возможностях достижения плотностей топлива гораздо выше 1000 г/см³. Поскольку типичный параметр подобия, определяющим эффективность сгорания топлива в мишени, — произведение плотности топлива на его радиус, или произведение массы топлива на квадрат его плотности, то, значит, всего лишь 40%-ный рост плотности топлива мог бы позволить снизить массу топлива, а значит, и характерный размер установки — генератора воздействия на мишень — примерно вдвое!

Вполне реальной может оказаться также возможность существенного улучшения эффективности имплозии мишеней. Так, повышенная эффективность имплозии может быть достигнута в тех схемах сверхвысокого сжатия, в которых давление, ускоряющее вещество мишени, получается не за счет абляции. За счет перехода к неабляционной имплозии можно было бы, вероятно, снизить масштабы (мощность, а также энергию рельсотрона и т. п.) генератора воздействия на мишень при увеличении коэффициента усиления энергии мишенью вдвое.

Добавлю также, что разработанные в настоящее время конструкции мишеней предусматривают существенный «допуск», запас надежности, учитывающий неопределенность наших знаний об эффективности воздействия на мишени реакторного масштаба и симметрии их имплозии. Иными словами, конструкция этих мишеней основана на соответствующих консервативных оценках. Вероятно, мы сможем ослабить эти консервативные критерии конструирования мишеней, когда сумеем добиться большего теоретического и экспериментального понимания процессов, связанных с имплозией, иницированием и горением мишеней. Такое ослабление критериев могло бы, вероятно, раза в два снизить требуемый размер генератора воздействия на мишень (лазера, ускорителя), а также раза в два повысить коэффициент усиления энергии мишени.

Подчеркиваю, что мы действительно имеем основания надеяться на снижение вдвое требуемой (для данного коэффициента усиления) энергии внешнего воздействия при двукратном росте мишенного коэффициента усиления энергии для данной величины энергии воздействия на мишень.

В Ливерморской лаборатории проведена работа по установлению зависимости между коэффициентом усиления реакторных мишеней и соответствующими требованиями к реактору. Эта зависимость иллюстрируется графиком⁶, приведенным на рис. 5. Нижняя полоса графика соответствует расчетам коэффициента усиления наших мишеней, основанным на консервативных предположениях. Оптимистическая полоса соответствует принципиально возможному улучшению этой характеристики мишеней по крайней мере раза

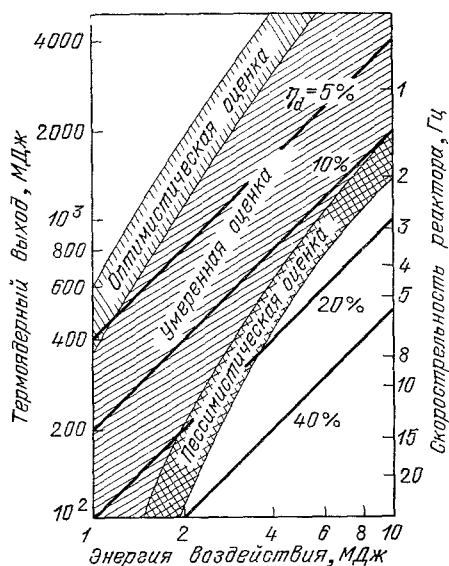


Рис. 5. Соотношения параметров мишени, воздействия на мишень и реактора электрической мощностью в 1 ГВт для наземной станции-прототипа промышленного термоядерного реактора, сжигающего в мишенях DT-смесь.

Инерциально-термоядерные реакторы могут быть экономически конкурентоспособны по отношению к легководящим реакторам на тяжелых делящихся элементах, если их удастся создать для воздействия (лазерного или пучкового) масштабом 2 МДж с мишенным выходом 600 МДж, к.п.д. лазера (ускорителя) в 15% при скорострельности реактора 5 Гц и воздействия 10—20 Гц, т. е. лазер (ускоритель) должен последовательно стрелять в 2—4 реакторные камеры с мишенями.

в четыре. В качестве проектной оценки выбрана промежуточная умеренно консервативная оценка коэффициента усиления 300 при энергии воздействия 2 МДж, т. е. при термоядерной энергии микровзрыва 600 МДж. Для реактора с такими мишенями, вырабатывающего 1 ГВт электроэнергии при условии, что генератор внешнего воздействия на мишень (лазер, ускоритель) имеет собственный к. п. д. 10—20%, энергетика в целом выглядит достаточно работоспособной. Если в качестве генератора внешнего воздействия на мишень применить криптон-фторовый (KrF) лазер, собственный к. п. д. которого 7%, то такая система в целом будет работоспособна с оптимистическими мишенями высокого коэффициента усиления, однако достаточно надежные конструкции мишеней дали бы для такого лазера коэффициент усиления лишь на грани допустимого.

Линии минимального необходимого к. п. д. генераторов внешнего воздействия здесь (на рис. 5) основаны на предположении о том, что произведение к. п. д. генератора внешнего воздействия η_D на коэффициент усиления энергии Q мишенью составляет $\eta_D Q = 20$. Это соответствует допущению, что упомянутый генератор потребляет 10—15% мощности, вырабатываемой (в среднем) термоядерным реактором.

Реакторы

Критическим процессом в инерциально-термоядерных реакторах является термоядерный микровзрыв, который повторяется с определенной скорострельностью и обладает способностью разрушить незащищенные стенки реактора, вызывая их абляцию и усталостные дефекты. Если обратиться к такой конструкции термоядерного реактора, как ливерморский проект NULIFE с завесой из жидкого лития, то здесь (см. рис. 1) устроен как бы сильный дождь из струй жидкого лития — между микровзрывом и так называемой «первой стенкой»⁶. Этот жидкий слой, толщина которого составляет от полуметра до метра, защищает «первую стенку» и от вспышки радиации, и от разлета горячей плазмы. Эта мера приводит также к снижению в 10—100 раз наведенной радиации и повреждениям первой стенки, вызванным воздействием нейтронов.

Другим вариантом реакторной проблемы является осуществимость сравнительно небольших, но эффективных микровзрывов, энергетическим эквивалентом в немногие сотни килограммов ТНТ, т. е. масштабом около тысячи мегаджоулей, и их утилизации с помощью сравнительно небольших и достаточно универсальных реакторов⁷.

Заметим, что импульс взрыва пропорционален корню квадратному из произведения массы, движимой взрывом, на энергию взрыва. Так вот, хотя энергия микровзрыва и составляет заметную часть тонны ТНТ, она в основном излучается мишенью в виде нейтронов и рентгеновских лучей, попадающих в жидкий «занавес», а масса мишени, т. е. ее плазмы, в миллионы раз меньше массы эквивалентного количества ТНТ, поскольку масштаб удельного выхода при термоядерной реакции составляет 10 МэВ вместо 1 эВ для химической реакции взрыва. Таким образом, импульс воздействия взрыва снижается тысячекратно — ведь масса меньше в миллион раз. К тому же целена, «занавес» из лития, обладает достаточной массивностью и взаимодействие лития с микровзрывом происходит в достаточной удаленности от стенок, т. е. итоговое воздействие на стенки происходит в основном неимпульсивно.

Важным процессом в реакторе является также радиационное загрязнение продуктами микровзрыва мишени. Любой материал, входящий в состав мишени, кроме дейтерия и трития, подвергается активации под воздействием интенсивного потока нейтронов.

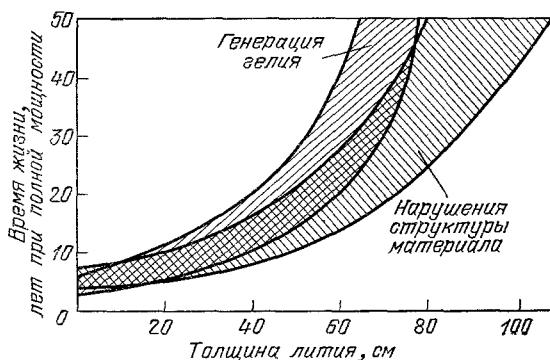


Рис. 6. Жизненный цикл «первой стенки» инерциально-термоядерного реактора как функция толщины защитной литиевой целены.

Данные оценки приведены для реактора с плотностью мощности 10 МВт/м², стенка которого состоит из стали с добавкой хрома/молибдена в соотношении 2,25/1. Полуметровая литиевая защита продлевает жизнь «первой стенки» от нескольких лет до 30 лет. Разброс данных отражает эффекты генерирования гелия нейтронами и нарушение структуры твердого тела. Верхняя и нижняя оценки для производства гелия здесь соответствуют 1000 и 500 атомным частям на миллион для гелия. Верхние и нижние оценки для эффекта нарушения структуры твердого тела соответствуют 330 и 165 атомным смещениям на атом (см.⁶).

Продукты микровзрывов подвергаются дополнительной активации, когда они многократно циркулируют внутри реактора вместе с жидким литием. Если говорить о мишенях, сконструированных так, чтобы минимизировать радиационное загрязнение, то наиболее радиоактивным материалом становится свинец. Доминантной радиоактивностью обладает изотоп свинца ²⁰³Pb с периодом полураспада 53 часа. Можно считать, что прочие радиоактивные изотопы дают пренебрежимый вклад в радиационную опасность термоядерных реакторов. Через считанные месяцы после того, как свинец отделен от лития, радиоактивность свинца затухает в огромное число раз и его снова можно направлять на фабрику мишеней, т. е. замыкать его циркуляцию.

Полная масса радиоактивных отходов, создаваемых плазмой микровзрыва мишени, за весь 30-летний жизненный цикл реактора составит считанные тонны.

Если говорить о нашей ливерморской схеме NULIFE (рис. 1), то лазерные лучи (либо пучки частиц) идут к мишени из генераторов (лазера, ускорителя), удаленных примерно на 100 м от микровзрывной камеры, характерный размер которой составляет около 5 м. Средняя величина производства плотности на толщину завесы из литиевых струй составляет около 40 г/см². На рис. 6 показано ожидаемое время жизни «первой стенки», изготовленной из безникелевой стали с низким содержанием хрома, как функция толщины лития⁶. В термоядерных реакторах по крайней мере два нейтронных эффекта приводят к снижению времени жизни «первой стенки»: дислокации атомов твердого тела и накопление образующегося гелия. Для толщины лития, например, равной полметра, время жизни «первой стенки» может составить примерно 30 лет, так что ее не придется менять ни разу за все время эксплуатации реактора. Без жидколитиевой защиты стенка простояла бы всего лишь около 5 лет, т. е. ее пришлось бы заменять методами дистанционного контроля и манипуляций не раз в течение жизненного цикла реактора.

Поскольку мишень в реакторе NULIFE не выстреливается, а как бы «роняется» или «выплевывается», то время, требуемое для ее падения на глубину 5 м, составляет около 1 с. Именно поэтому наш проект рассчитан в настоящее время на скорострельность 1 микровзрыв в секунду. Возрастание скорострельности перспективных лазеров (не говоря об ускорителях), но и теплоемкость текущего лития, которая в данном случае пока остается в несколько раз выше, чем нужно, т. е. является недоиспользованной. Но для повышения скорострельности реактора следует улучшить его конструкцию. Если пойти на эволюционные, так сказать, улучшения, то реактор такого типа мог бы дать скорострельность 3 Гц, что еще осуществимо. Радикальные новшества дают надежду на более существенное возрастание скорострельности. Так, в более новой схеме HIBALL⁷ жидкий литий просачивается через пористые силиконокарбидовые трубки, но это не чистый литий, а жидкий сплав 17% лития с 83% свинца. Кстати, течение по трубкам сравнительно медленное, что позволяет полнее использовать теплофизические свойства охладителя-защиты.

Что же касается осуществимости инерциального термояда, то заключение Комитета Фостера сохраняет свою силу: множество весьма обещающих идей и направлений находится в обнадеживающем равновесии с проблемами, которые уже известны и которые, вероятно, еще возникнут. Никаких непреодолимых препятствий на пути к практическому освоению инерциального термояда не обнаружилось. Если не говорить о доказательствах физической, чисто научной осуществимости инерциального термояда, то главными пунктами исследований с целью достижения практического освоения инерциального термояда являются работы по реализации следующих потенциальных преимуществ, открывающихся благодаря последним научным результатам: осуществимость конструкций мишеней с повышенным коэффициентом усиления при снижении жесткости требований к параметрам воздействия на мишени (к энергии, мощности, симметрии облучения и т. д.); более дешевые и более эффективные средства воздействия на мишени (лазеры, ускорительные системы); жидкостенные реакторы, способные выдерживать весьма высокую скорострельность микровзрывов.

ПРИМЕНИМОСТЬ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДА

Теперь обратим свое внимание на два ключевых, критических вопроса об экономической и экологической применимости термояда независимо от способов его осуществления:

— Является ли контролируемый термоядерный синтез экономически состоятельным хотя бы в пределе лучших технических прогнозов?

— Оправдывает ли прогнозируемый экономический и экологический потенциал термояда ускоренное его развитие, в особенности в свете ограничений, прогнозируемых для дальнейшего развития угольной и ядерной (основанной на делении ядер) энергетик? К сожалению, экономический и экологический потенциалы термояда еще не изучены как следует. И тем не менее я попытаюсь ответить на эти вопросы, предположив, что научная, физическая осуществимость термояда уже доказана и что можно осуществить те прогнозы развития термояда, которые мы разработали.

Разве не считаются аргументами в пользу потенциальных практических возможностей термоядерного «гибридного» реактора, как, впрочем, и жидкометаллического быстрого бридера, такие факторы, как:

— долгосрочная эскалация цен на химические и ядерные виды топлива;
— рост цен на такие «внешние» нужды энергетики, как радиоактивные отходы и меры безопасности?

Эти факторы могли бы привести к экономической конкурентоспособности термояда уже при удвоении нынешней стоимости энергосистем, основанных на использовании химического и ядерного топлива.

Отметим, что термоядерные «гибридные» реакторы производят топливо для реакторов деления. Далее, большинство инерциальных и магнитных термоядерных систем обойдется, согласно известным оценкам, примерно раза в два дороже, чем легководяные реакторы деления. Вместе с тем, однако, термоядерные «гибриды» способны покрыть практически любой рост стоимости энергии, вырабатываемой на основе делящихся материалов, если они соответственно подорожают, на уровне всего лишь 20% полной стоимости самих легководяных реакторов, поскольку «гибрид», который обойдется в сумму, равную стоимости трех легководяных реакторов, мог бы снабжать топливом 15 легководяных реакторов. Более того, согласно оценке Комитета ядерных и альтернативных энергетических систем Национальной Академии наук США, «внешние» нужды энергетики не дают определяющего вклада в конкурентоспособность. Легкометаллические быстрые бридерные реакторы могли бы также ограничить эскалацию стоимости топливных делящихся материалов⁸.

И тем не менее, поскольку энергия обходится США менее чем на уровне 10% валового национального продукта, наше общество вполне могло бы решиться на оплату энергетической системы, которая превосходит другие виды энергетики в отношении чистоты окружающей среды, но обойдется эта экологически более чистая энергия вдвое дороже самой дешевой, но экологически небезопасной энергетической системы.

Однако в таком случае индустрия США, питаемая вдвое более дорогостоящей энергетической системой и использующая заведомо более дорогую рабочую силу, оказалась бы менее конкурентоспособной по отношению к иностранной индустрии, питаемой с помощью более дешевой энергетики. Этот вариант прогноза был бы особенно вероятен, если бы к тому же упомянутые государства догадались инвестировать средства, полученные экономией энергии, в автоматизацию, перспективные виды техники, а также на исследование и разработки.

И все же важным фактором, который мог бы придать инерциально-термоядерным реакторам экономическую конкурентоспособность по отношению к реакторам деления, является удаленность места выделения энергии (мощности) термоядерного микровзрыва от генератора воздействия (лазера, ускорителя). Этот пункт также подчеркивался при обсуждении термоядерной проблемы в комитете Фостера: «Одним из главных перспективных преимуществ инерциального термояда является то, что ...генератор внешнего воздействия отделен от камеры реактора функционально и может быть удален от нее на зна-

чительное расстояние. Это означает, что инерциально-термоядерный реактор может иметь относительно малый объем удержания термоядерной плазмы; его эксплуатация, техническое обслуживание, ремонт и демонтаж будут относительно просты; наиболее дорогостоящие компоненты системы не будут подвержены нейтронной бомбардировке и активации. Это же качество инерциально-термоядерных реакторов придает им потенциальные возможности для огромного многообразия конструкций инерциально-термоядерных установок в отношении как их размеров, так и различных конфигураций.

Более того, добавим, что удаленный от взрывной камеры генератор воздействий на сжимаемую мишень способен обслуживать (одновременно или последовательно) несколько реакторных камер, а фабрики мишеней, работающие в режиме «разделения времени», также осуществимы.

Для тех инерциальных и магнитных термоядерных схем, в которых нет ни режима «разделения времени», ни жидких стенок-завес, стоимость и уровень радиации могут быть уменьшены иными средствами, такими, как разработка удешевленных сверхпроводящих материалов, выдерживающих повышенные магнитные поля (позволяющие повысить плотность мощности реактора); разработка материалов для «первой стенки» с повышенной живучестью и сниженной наведенной радиацией.

Высокую стоимость термоядерных реакторов первого поколения по сравнению со стоимостью легководяных реакторов обуславливают главным образом три следующие фактора:

- стоимость термоядерной техники и оборудования — генератора воздействия на мишень и мишенной фабрики в случае инерциального термояда, а в случае термояда магнитного — сверхпроводящий магнит, генератор пучка нейтронов (для токамаков) и система обеспечения высокого вакуума;
- пониженная плотность мощности термоядерных систем;
- повышенная сложность таких конструкций, как первая стенка и устройства, обеспечивающие теплоперенос.

ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ

Допустим, что термоядерная техника и оборудование являются бесплатными. Но даже в этом случае некоторые схемы получения термоядерной энергии оказались бы более дорогостоящими, чем производство энергии легководяными реакторами, в силу двух последних из трех перечисленных выше факторов. Для достижения экономической конкурентоспособности переплата, обусловленная этими тремя факторами, должна быть, естественно, меньше чем примерно 50—20% цикла для делящегося топлива в условиях эскалации цены на него или примерно 25% стоимости цикла делящегося топлива без эскалации цены на него. В случае легководяных реакторов стоимость цикла топлива составляет примерно 25% полной стоимости выработки энергии, и эта стоимость не входит в стоимость капиталовложений. В первом приближении термоядерные реакторы могли бы стать экономически конкурентоспособными по отношению к легководяным реакторам даже в том случае, если они окажутся по капиталовложениям (при постройке) дороже на 50% легководяных. Попробуем объяснить такой запас в стоимости:

— Стоимость генератора воздействия на мишень составляет всего лишь 20% стоимости легководяного реактора. Это могло бы послужить компенсацией 20% повышения стоимости энергии, вырабатываемой на основе делящихся материалов, которое обусловлено эскалацией стоимости такого горючего.

— Стоимость мишеней и мишенной фабрики составляет менее 25% стоимости легководяного реактора, что компенсирует 25% расхода на топливный цикл легководяного реактора. Стоимость капиталовложений на реактор и на остальные подсистемы термоядерной энергоустановки должна быть при этом не выше стоимости легководяного реактора.

Стоимость генератора воздействия на мишень может быть снижена до 10—20% стоимости легководяного реактора электрической мощностью 1 ГВт, т. е. до величины, примерно составляющей 150 миллионов долларов, если не учитывать выплаты доходов акционерам. Такое снижение стоимости можно достичь как за счет снижения удельной стоимости генератора воздействия на мишень, например до 200 долларов/Дж для коротковолнового лазера и тяжелоионного ускорителя, так и за счет усовершенствования мишеней с повышением вдвое их коэффициента усиления, например позволяющим снизить энергию воздействия с 4 до 2 МДж, либо за счет использования одиночного генератора воздействия, обслуживающего два и более реакторов. Этот путь развития мы уже обсуждали выше, здесь остановимся только на многореакторной системе.

Многореакторные системы, генераторы воздействия в которых работают в режиме «разделения времени», несомненно, осуществимы. И лазерный луч, и пучок тяжелых ионов выстреливаются в короткие промежутки времени, быстро преодолевая стометровые расстояния от генератора до реактора. И лазеры, и ускорители способны на скорострельность 10—20 Гц, причем такая повышенная скорострельность достигается за счет относительно малого роста стоимости генератора. Некоторые ускорители высоких энергий, на основе которых разрабатываются инерциально-термоядерные системы, обладают большими резервами для доработки. Если немного увеличить число лучей многолучевого

термоядерного лазера, то отдельные лучи можно будет отключать в случае ремонта, не нарушая режима работы реактора.

Четырехреакторный комплекс на 4 ГВт электроэнергии давал бы примерно 1% электроэнергии, которую прогнозируют производить в США в 2010 г. и несколько менее 1/2% — в 2050 г., если рост производства энергии будет довольно медленный, 2% в год.

Техника генерирования воздействия на мишень совершенствуется, и такие генераторы, как легкоионные ускорители и усовершенствованные лазеры перспективных схем, могут оказаться достаточно дешевыми для того, чтобы, с учетом возможностей роста коэффициентов усиления мишеней вдвое против наших умеренных оценок, термоядерные реакторы малых размеров — мощностями всего лишь около 500 МВт (в сеть) — были экономически конкурентоспособны по отношению к легководным реакторам. Эти небольшие реакторы могли бы во многом способствовать практическому внедрению инерциального термояда в промышленное производство электроэнергии.

Оценка капиталовложений и стоимости эксплуатации фабрики мишеней составляет 10—30% стоимости легководного реактора (см. ⁷). Пределы оценки задаются несколькими факторами, в том числе ее низкая стоимость определяется ее малыми размерами, полной автоматизацией и массовостью производства в перспективе, а также относительным расположением в пределах энергетической станции и уровнем совершенства автоматики, обеспечивающей подачу мишеней в реакторную камеру.

Капиталовложения в постройку жидкометаллического реактора HIBALL и остальные подсистемы термоядерной станции, не считая системы воздействия (генератора луча или пучка) и мишенной фабрики, оцениваются как примерно равные стоимости капиталовложений в легководной реактор ⁷.

Инерциально-термоядерные реакторы характеризуются исключительно высокими возможностями для оптимизации. Мишень достаточно мала, и есть основания считать ее не только дешевой, но и совершенствуемой даже быстрее, чем успеет завершиться жизненный цикл реактора. Генератор воздействия на мишени (лазер или ускоритель) пространственно удален от реактора, так же как удалена и фабрика мишеней. Поэтому указанные подсистемы слабо подвержены радиационной активации за счет воздействия термоядерных нейтронов.

Более того, выводящие из строя аварии, сопровождаемые, как в реакторах деления, расплавлением реактора, невозможны при выключенном реакторе термоядерного типа. Эта повышенная безопасность инерциально-термоядерных реакторов означает добавочный потенциал, важный для практического внедрения высокосоввершенных инерциально-термоядерных реакторов в промышленное производство энергии.

Инерциально-термоядерные реакторы, в которых удерживают термоядерные взрывы микромишеней из дейтерия, обладали бы значительным преимуществом перед системами с DT-мишенями в отношении загрязнения окружающей среды, причем реакторы на дейтерии могут оказаться к тому же и дешевле. Дело в том, что в реакторах с дейтериевыми мишенями радиоактивность первой стенки должна быть пониженной, поскольку термоядерная DD-реакция дает не только меньше нейтронов, чем DT-реакция, но DD-нейтроны получают и меньшей энергии. Для устранения возможности возникновения трития в реакторной «завесе» из жидкого лития, первую стенку потребуется защитить иным материалом, например вроде жидкого свинца. Устранение лития и минимизация тритиевой опасности вместе с радиоактивностью первой стенки позволит довести инерциальный термояд до такого состояния, в котором реализованы практически полностью потенциальные возможности термояда с точки зрения воздействия на окружающую среду. Поскольку горение термоядерного топлива происходит внутри мишени, да и нейтронов DD-реакция дает меньше, чем DT-реакция, то реакторы, работающие на дейтериевых микровзрывах, обладали бы более высокой плотностью мощности, чем аналогичные реакторы на DT-мишенях. Такие инерциально-термоядерные системы на дейтериевых мишенях могут оказаться и существенно дешевле, чем легководные реакторы на делящихся материалах — при условии, что масштаб (энергия и мощность, стоимость) генератора воздействия, требуемого для достижения высоких коэффициентов усиления дейтериевых мишеней, невелик.

По-своему привлекательны перспективы создания гибридных реакторных систем «синтез — деление», а также реакторов — производителей синтетического топлива. Осуществимость таких систем обусловлена тем фактом, что в «первой стенке» возможен бридинг нейтронов и трития в случае гибридов, а производство синтезируемого топлива (водорода) возможно в реакторах, углеродные стенки которых можно поддерживать при весьма высокой температуре ⁹.

ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ БУДУЩЕГО

Все еще остаются весьма важные неясности в нашем понимании проблемы глобального «парникового эффекта», вызываемого выбросом в атмосферу двуокиси углерода. Однако если считать корректными известные расчеты, то уже до наступления 2050 г. может оказаться весьма желательным переход на виды топлива, отличные от ископаемых, для производства более 50% полной энергии.

Кстати, ядерная энергетика США, основанная на реакторах деления, не в состоянии развиваться настолько ускоренно, чтобы поддержать прогнозируемые темпы экономи-

ческого роста. Более того, ядерная энергетика ныне вступила в полосу утраты своих былых преимуществ, составлявших основу ее конкурентоспособности.

Одним из возможных вариантов сценария будущего является приемлемость более вялого экономического роста при соответствующем падении роста валового национального продукта.

Другим возможным сценарием будущего был бы вариант с ростом импорта урана и массовым внедрением таких реакторов деления, как надежные и дешевые реакторы типа японского «Тойота» и западногерманского «Фокке-Вульф».

Приведенные нами два варианта будущего обошлись бы чрезвычайно дорого — во многие тысячи миллиардов долларов на немногие десятилетия.

Известен третий вариант сценария будущего, в котором потепление, вызываемое «парниковым эффектом», ликвидируется с помощью меры глобального климатического контроля. Например ¹⁰, речь идет о рассеивании аэрозолей в стратосфере ради достижения

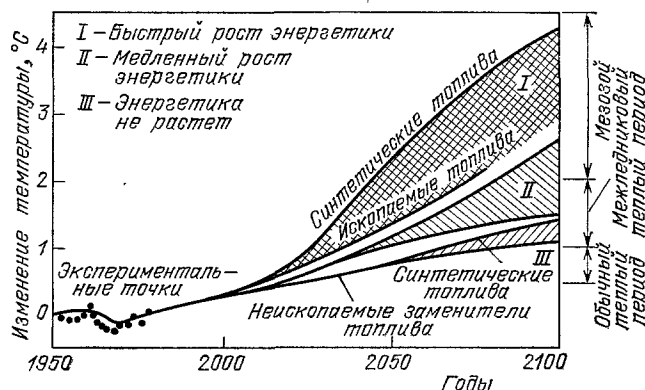


Рис. 7. Прогноз изменения средней глобальной температуры из-за производства CO_2 при сгорании ископаемых видов топлива.

Указывается ожидаемый рост температуры выше фона на период 1990—2000 гг. На данном графике представлены результаты прогноза для различных темпов экономического роста и различных стратегий использования топлива. Верхняя и нижняя кривые для медленного темпа экономического роста представляют результаты расчетов, при которых предполагалось не использовать сжигание углей (нижняя кривая) или продолжать сжигать угли (верхняя кривая). Стратегия «работать, как с 2020 г. (нижняя кривая)» дает в будущем среднюю температуру, близкую к климату эры динозавров. При реализации сценария медленного энергетического роста повышение температуры можно удержать в пределах $1,5^\circ\text{C}$ при условии воздержания от сжигания углей в самом начале XXI столетия (см. ¹¹).

эффекта возрастания альбедо земной атмосферы, т. е. и Земли в целом. Подобные меры роста альбедо всего на 2% могли бы ликвидировать потепление, вызываемое удвоением содержания CO_2 в нашей атмосфере. Но следует отметить, что эффективные мероприятия по глобальному контролю климата невозможны без беспрецедентно хорошо налаженного международного сотрудничества.

Поэтому есть основания считать, что лучшая стратегия сводится к интенсификации мероприятий по экономии энергии наряду с реанимацией американской реакторной промышленности и ускоренным развитием экономически конкурентоспособных систем, основанных на термояде и солнечной энергии.

На рис. 7 показан результат недавних расчетов «парникового эффекта», обусловленного двуокисью углерода, произведенных учеными НАСА ¹¹. Их модель дает прогноз среднего возрастания глобальной температуры, обусловленного выбросом CO_2 при сжигании ископаемого топлива. Эти расчеты показывают, что рост температуры будет явно ощутимым к периоду 1990—2000 гг. Если даже темп роста производства энергии будет замедленным, т. е. составит всего 2%, но без снижения темпа роста использования углей, то к 2100 г. средняя температура вырастет на $2,5^\circ\text{C}$. Если же в период 2020—2060 гг. сжигание угля прекратится, то рост температуры к 2100 г. составит только $1,5^\circ\text{C}$, что немного лишь выше роста на 1°C , обусловленного эффектом накопившегося CO_2 в нашей атмосфере. Если же учесть потепление, обусловленное не только двуокисью углерода, но и разного рода выхлопными газами, количество которых считается обычно незначительным, то получается, что время прекращения сжигания угля должно быть придвинуто на 20 лет к началу XXI столетия.

Оптимисты, правда, считают, что «парниковый эффект» в итоге может оказаться даже полезным. Так, часть территории СССР могла бы превратиться в зону сельскохозяйственного процветания, но в то же время часть сельскохозяйственных угодий среднего запада США начнет, вероятно, превращаться в засушливую зону. В среднем же возрастет длительность сезона, благоприятного для роста растений, причем их рост ускорится.

Таяния восточноантарктической шапки льда и затопления прибрежных городов по всему миру не следует, вероятно, ожидать до конца XXI века.

И тем не менее, в то время как данный темп изменения климата может оказаться тяжелым даже для процветающих наций, его воздействие может быть губительным для наций неразвитых, население которых уже теперь находится на грани голода. Далее, сжигание углей может также вызывать серьезные экологические последствия, такие, как кислотный дождь.

Поскольку внедрение в промышленность новой энергетической техники и технологий потребует, согласно убедительным прогнозам, лет 40, то вероятные кандидатуры на замену ископаемого топлива должны продемонстрировать свои возможности уже в нашем столетии. Наиболее высокоусовершенствованной кандидатурой на замену таких топлив, как уголь, является ядерная энергетика на делящихся материалах. Возникает важный вопрос: способны ли реакторы деления к 2030 г. удовлетворить энергетические нужды США? Дело в том, что реакторостроение США сдерживается существующим законодательством (законами Марфи), и поэтому в ближайшие 5—10 лет не предвидится постройка хотя бы одного собственного реактора. Вероятность выхода из строя реактора (вылоте до приведения в непригодное состояние) в случае аварии оценивается довольно высоко: 1/30 за весь период жизненного цикла реактора. А. Вайнберг уже призывал к разработке реактора второго поколения легководяного типа, в 10—100 раз надежнее существующих конструкций¹².

Нынешние исследования¹³ компаний TRW и учеными Ливерморской лаборатории им. Лоуренса, включая такого известного сторонника угольно-урановой энергетике, как Теллер, содержат вывод о том, что при прогнозируемом умеренном росте энергетике реакторы деления были бы способны производить всего лишь 15% полной выработки энергии США к 2040 г. Изучение этих прогнозов показывает, что и при медленном (2%) росте производства энергии, сопровождаемом ограниченными мерами экономии энергии, и при исторически сложившемся темпе роста производства энергии, сопровождаемом хорошим прогрессом мер экономии энергии, реакторы деления способны производить не более чем примерно 30% полной выработки энергии в США к периоду 2040—2050 гг. Лишь при условии сочетания слабого роста производства энергии с усиленными мерами экономии энергии реакторная атомная энергетика могла бы удовлетворить существенную часть энергетических нужд.

Энергетика, основанная на реакторах с делящимися материалами, ограничена в темпах роста из-за того, что «время удвоения» для жидкометаллических быстрых бридеров составляет лет 10—20, а также из-за ограниченности поставок топлива для американских легководяных реакторов и реалистических оценок темпа внедрения новой техники и технологии быстрых бридеров.

Поскольку один гибридный реактор «синтез — деление» способен снабжать топливом 15 легководяных реакторов, то программа ускоренного развития гибридов «синтез — деление» в сочетании с «реанимированной» конкурентоспособной атомной энергетикой США могла бы дать 50% полного производства энергии в США к 2030 г. за счет одних этих мер даже при поддержании уже сложившихся исторически темпов роста энергетике.

Прогнозируемые энергетические трудности мирового масштаба по своей глубине намного превосходят трудности энергетике США.

В течение следующих 50 лет относительно быстрый рост мировой энергетике будет стимулирован удвоением населения Земли, а также неуклонным возрастанием потребления энергии на душу населения, в связи с чем прогнозируется¹⁴ рост выработки энергии в 3—4 раза за последующие полстолетия. Этот рост потребовал бы десятикратного роста производства угля, а также ввода в строй 10 000 ядерных реакторов деления и термоядерных реакторов.

Создаваемый в силу этих обстоятельств потребительский рынок для промышленных термоядерных реакторов соответствовал бы капиталовложениям порядка 10^{13} долларов. С этими многими тысячами миллиардов долларов на промышленную ядерную энергетике, или на неядерную энергетике, следовало бы сравнивать ту сумму затрат, в которую оценивается разработка термоядерных реакторов, — 20 миллиардов. Получаемая относительная оценка составляет всего 0,2% и говорит сама за себя.

В эти 80-е годы программы термоядерных исследований — и инерциальная, и магнитная — будут развиваться в сторону все большего, лучшего понимания экономических и экологических потенциальных возможностей термояда. Следовало бы наладить координированное руководство этими программами работ на единой основе для планирования и оценки результатов. Если пока основываться на уже достигнутом уровне понимания проблем (пусть этот уровень еще несовершенен), то можно с достаточной уверенностью дать положительный ответ на два ключевых вопроса об осуществимости экономически оправданного термоядерного синтеза:

— экономически конкурентоспособные термоядерные системы принципиально осуществимы;

— ускоренная разработка термоядерных энергетических систем оправдана и экономическими, и экологическими потенциальными возможностями термояда, особенно в свете неизбежных существенных ограничений на развитие угольной и атомной энергетике. Итак, в силу ограничений, присущих развитию угольно-атомной энергетике, мы можем, по всей вероятности, оказаться в положении острой потребности развития энергетике

термоядерной, наряду с другими альтернативными видами энергетики, уже к самому началу XXI столетия. Поэтому термоядерная программа США должна быть ускорена таким образом, чтобы к концу нашего столетия успеть разработать практически пригодные термоядерные системы, производящие промышленную энергию.

Разработка термоядерной энергетики заслуживает внимания как срочная проблема общенационального значения, решение которой требует привлечения наших главных научных и технических ресурсов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Foster J. S. The Promise of Inertial Confinement Fusion Power.— In: AAAS Annual Meeting.— San Francisco, January 1980.
2. a) Metz W. D.— Science, 1981, v. 212, p. 517.
б) Nuckolls J. H. et al.— Phys. Today, 1973, v. 26, No. 8, p. 46.
3. Mead W. C.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 47, p. 18.
4. Seka W. et al.— Opt. Comm., 1982, v. 40, p. 437.
Басов Н. Г. и др.— Квант. электрон., 1973, т. 2, с. 429.
Slater D. C. et al.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 46, p. 18.
Garban-Labaunc et al.— Ibid., 1982, v. 48, p. 1018.
5. Max C. E., Estabrook K. G.— Comm. Plasma Phys., 1980, v. 5, p. 239.
6. Monsler M. et al.— Nucl. Techn. and Fusion, 1981, v. 1, p. 302.
7. Badget B. et al. HIBALL Rept. UWEDM-450/KfK-3202.— University of Wisconsin, 1981.
8. National Acad. Science. Energy in Transition 1985-2000.— San Francisco: Freeman, 1980.
9. Conn R. et al.— Rept. UWEDM-220.— University of Wisconsin. 1977.
10. Будыко М. И.— Метеор и гидрол., 1974, № 2.
11. Hansen J. et al.— Science, 1981, v. 213, p. 957.
12. Weinberg A.— Science, 1982, v. 214, p. 16.
13. Maniscalco J. et al.— Rept. UCRL-87801.— LLNL, 1982.
14. Anderer J., Hafele W. et al.— IASIA, Energy in a Finite World.— Cambridge, Mass., 1981.

ЛИТЕРАТУРА, ДОБАВЛЕННАЯ ПРИ ПЕРЕВОДЕ

1. Lord Rayleigh.— Phil. Mag., 1917, v. 34, p. 94.
Riemann B.— Gött. Abh., 1859, Bd. 8.
Busemann A.— Luftfahrtforsch., 1942, Bd. 19; Fusion, 1981, v. 5, p. 38.
Guderley G.— Luftfahrtforsch., 1942, Bd. 19.
Irving D.— Virus House.— Lnd., 1967; перевод: Ирвинг Д. Вирусный флигель.— М.: Атомиздат, 1969.
2. Прохоров А. М. и др.— УФН, 1976, т. 119, с. 401; 1984, т. 142, с. 395.
Белоконов В. А.— УФН, 1977, т. 122, с. 179; ДАН СССР, 1983, т. 268, с. 86.
Басов Н. Г. и др.— Тр. ФИАН СССР, 1982, т. 134.
Mc Call G. H.— Plasma Phys., 1983, v. 25, p. 237.
Wood L. L.— Rept. UCRL-76573, 77422.— LLL, 1975.
Lindl J.— Rept. UCRL-79735 Rev. 1.— 1977; UCRL-50021-77.— LLNL, 1979.
Kidder R.— Rept. UCRL-83342.— LLNL, 1979/80; Laser Focus, 1982, No. 1, p. 65.
Nuckolls J. H. et al.— Rept. UCRL-79610, LLNL-1977. Inertial Fusion: Strategy and Economical Potential.: Paper at London International Conference (ECLIM).— Lnd., 1983.
3. Laser Focus, 1983, No. 3, p. 4.
4. Kruger W.— Comm. Plasma Phys., 1981, v. 6, p. 167.
Сардеев Р. З. и др.— Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 451.
Силин В. П., Тихончук В. Т.— ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 1332.
5. Annual Report UCRL-50021-81.— LLNL, 1983.
6. Lindl J., Max C., Mead W.— Nucl. Fusion, 1983, No. 2, p. 131.
7. Ahlstrom H.— Preprint, UCRL-84707.— LLNL, 1980.
8. Annual Report UCRL-50021-80.— LLNL, 1981.
9. Laser Focus, 1983, No. 3, p. 34.
Forslund D., et al.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 2083.
10. Annual Report UCRL-50021-78.— LLNL, 1980.
Meyer-Ter-Vehn J.— Nucl. Fusion, 1982, v. 22, p. 561.
11. Annual Report UCRL-50021-77.— LLNL, 1979, v. 2 (Fusion Propulsion).
12. Рудаков Л. И. и др.— Письма ЖЭТФ, 1976, т. 24, с. 505.
Аврорин Е. Н. и др.— Письма ЖЭТФ, 1980, т. 32, с. 457.
Феокистов Л. П. и др.— Физ. плазмы, 1980, т. 6, с. 965.