



Рис. 3. Параметры, достигнутые на различных установках для изучения проблемы управляемого термоядерного синтеза к 1991. Т-10—установка токамак Института атомной энергии имени И. В. Курчатова (СССР); PLT—установка токамак Принстонской лаборатории (США); Алкатор—установка токамак Массачусетского технологического института (США); TFR—установка токамак в Фонтене-о-Роз (Франция); 2 XPB—открытая ловушка Ливерморской лаборатории (США); лазер «Шива» (Ливерморская лаборатория, США); стелларатор «Ливень» (ФИАН, Москва); стелларатор «Вендельштейн УП» (Гархинг, ФРГ).

разрабатываемых по программе УТС. В связи со сказанным понятно, что в международном проекте ИТЭР, к-рый предполагается осуществить к 2003 и к-рый должен служить эксперим. моделью будущей электростанции с реактором синтеза, предложено использование системы токамак.

Следует, однако, ясно понимать, что путь от работающего реактора до действующей электростанции ещё очень долог. Радиаци. активация стенок камеры реактора при работе на топливе, содержащем тритий, исключительно велика. Даже если удастся осуществить стационарную работу реактора в течение длит. времени, механич. стойкость первой стенки камеры в результате радиац. повреждений вряд ли сможет превышать (по оценкам экспертов) 5—6 лет. Это означает необходимость периодич. полного демонтажа установки и последующей новой сборки с помощью дистанционно действующих роботов, т. к. остаточная активность будет измеряться тысячами мегаюри. Глубокое подземное захоронение огромных по размерам деталей установки также окажется неизбежным.

Красивая возможность резкого сокращения радиоактивности работающей системы и остаточной наведённой активности может быть достигнута при работе на топливе с изотопом ^3He по реакции $d + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p$. Энерговыведение сохраняется на прежнем уровне, образование нейтронов будет происходить только за счёт побочных (d, d) реакций. К сожалению, необходимый изотоп ^3He пришлось бы привозить с поверхности Луны, где он имеется в значит. концентрациях, тогда как на Земле его содержание ничтожно.

Если говорить о далёких прогнозах, то оптимум, вероятно, следует искать в сочетании солнечной энергетики и УТС. О возможностях, связанных с исключительно интересными, но ещё более отдалёнными перспективами применения процесса мюонного катализа для осуществления УТС, см. в ст. *Мюонный катализ*.

Лит.: Арцимович Л. А., Управляемые термоядерные реакции, 2 изд., М., 1963; Furth Н. Р., Tokamak research, «Nucl. Fus.», 1975, v. 15, № 3, p. 487; Лукьянов С. Ю., Горячая плазма и управляемый ядерный синтез, М., 1975; Проблемы лазерного термоядерного синтеза. Сб. ст., М., 1976; Итоги науки и техники, сер. Физика плазмы, т. 1—3, М., 1980—82. С. Ю. Лукьянов.

УПРУЧЕНИЕ металлов—повышение сопротивляемости металлов и сплавов пластич. деформации или разрушению в результате затруднения движения дислокаций и их размножения.

УПРУГИЕ ВОЛНЫ—упругие возмущения, распространяющиеся в твёрдой, жидкой и газообразных средах, напр. волны, возникающие в земной коре при землетрясениях, звуковые и ультразвуковые волны в жидкостях, газах и твёрдых телах. При распространении У. в. в среде возникают механич. деформации сжатия и сдвига, к-рые переносятся волной из одной точки среды в другую. При этом

имеет место перенос энергии упругой деформации в отсутствие потока вещества (исключая особые случаи, напр. акустические течения). Всякая гармонич. У. в. характеризуется амплитудой колебат. смещения частиц среды и его направлением, колебат. скоростью частиц, перем. механич. напряжением и деформацией (к-рые в общем случае являются тензорными величинами), частотой колебаний частиц среды, длиной волны, фазовой и групповой скоростями, а также законом распределения смещений и напряжений по фронту волны.

В жидкостях и газах, к-рые обладают упругостью объёма, но не обладают упругостью формы, могут распространяться лишь продольные волны разрежения-сжатия, где колебания частиц среды происходят в направлении распространения волны. Фазовая скорость их $c_l = \sqrt{K/\rho}$, где K —модуль всестороннего сжатия, ρ —плотность среды. Пример таких У. в.—звуковые волны.

В однородной изотропной бесконечно протяжённой твёрдой среде могут распространяться У. в. только двух типов—продольные и сдвиговые. В продольных У. в. движение частиц параллельно направлению распространения волны, а деформация представляет собой комбинацию всестороннего сжатия (растяжения) и чистого сдвига. В сдвиговых волнах движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, а деформация является чистым сдвигом. В безграничной среде распространяются продольные и сдвиговые волны трёх типов—плоские, сферические и цилиндрические. Их особенность—независимость фазовой и групповой скоростей от амплитуды и геометрии волны. Фазовая скорость продольных волн

в неограниченной твёрдой среде $c_l = \sqrt{(K+4G/3)/\rho}$, сдвиговых волн— $c_t = \sqrt{G/\rho}$ (G —модуль сдвига). Величины c_l и c_t для разных сред колеблются в пределах от сотен до неск. тысяч м/с.

На границе твёрдого полупространства с вакуумом, газом, жидкостью или с др. твёрдым полупространством могут распространяться упругие поверхностные волны (см. *Поверхностные акустические волны*), являющиеся комбинацией неоднородных продольных и сдвиговых волн, амплитуды к-рых экспоненциально убывают при удалении от границы.

В ограниченных твёрдых телах (пластина, стержень), представляющих собой твёрдые волноводы акустические, могут распространяться только нормальные волны, каждая из к-рых является комбинацией неск. продольных и сдвиговых волн, распространяющихся под острыми углами к оси волновода и удовлетворяющих граничным условиям: отсутствию механич. напряжений на поверхности волновода. Число n нормальных волн в пластине или стержне определяется толщиной или диаметром d , частотой ω и модулями упругости среды. При увеличении ωd число нормальных волн возрастает, и при $\omega d \rightarrow \infty$ $n \rightarrow \infty$. Нормальные волны характеризуются дисперсией фазовой и групповой скоростей.

В бесконечной пластине существуют два типа нормальных волн—*Лэмба волны* и сдвиговые волны. Плоская волна Лэмба характеризуется двумя составляющими смещения, одна из к-рых параллельна направлению распространения волны, другая—перпендикулярна краям пластины. В плоской сдвиговой нормальной волне смещения параллельны краям пластины и одновременно перпендикулярны направлению распространения волны. В цилиндрич. стержнях могут распространяться нормальные волны трёх типов—продольные, изгибные, крутильные.

В анизотропных средах (кристаллах) свойства У. в. зависят от типа кристалла и направления распространения. В частности, чисто продольные и чисто сдвиговые волны могут распространяться только в кристаллах определ. симметрии и по определ. направлениям, как правило, совпадающим с направлением кристаллографич. осей. В общем случае в кристалле по любому направлению всегда распространяются три волны с тремя разл. скоростями: одна квазипродольная и две квазипоперечные, в к-рых преобладают соответственно продольные или поперечные