

РОЛЬ ВОДОРОДНОГО ОБМЕНА ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ В ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

А. С. Кукушкин

НИЦ «Курчатовский Институт» и НИЯУ МИФИ, Москва

ank755@gmail.com

Практически все известные термоядерные реакции, пригодные, в принципе, для генерации энергии, происходят с участием изотопов водорода в качестве топлива. Все эти реакции требуют высокой энергии сталкивающихся частиц, что обуславливает использование магнитных полей для удержания горячей плазмы в квази-стационарных системах [1]. В настоящее время в качестве первого кандидата рассматривается D-T реакция, имеющая наибольшее сечение реакции и наименьший порог по энергии участвующих частиц. Энергетическая эффективность реактора определяется отношением мощности, выделяемой в термоядерных реакциях, к мощности, затрачиваемой на нагрев и удержание плазмы. Удержание энергии в плазме не идеально, и потери ее характеризуются величиной «энергетического времени удержания» $\tau_E = W/P_{\text{heat}}$, где W – полное энергосодержание плазмы, а P_{heat} – мощность, идущая на ее нагрев (равна мощности потерь в стационаре). Для того, чтобы термоядерная реакция была самоподдерживающейся – то есть, не требующей дополнительного нагрева плазмы, требуется положительный баланс мощности

$$P_{\alpha} - P_{Brm} - P_{loss} \geq 0. \quad (1)$$

Здесь P_{α} – мощность, выделяемая в термоядерных реакциях в виде энергии заряженных частиц (главным образом, α -частиц), столкновения которых с электронами и ионами плазмы и обеспечивают ее нагрев, P_{Brm} – мощность потерь на неизбежно присутствующее при столкновении электронов и ионов тормозное излучение и $P_{loss} = W/\tau_E$ – мощность остальных потерь. Поскольку P_{α} и P_{Brm} пропорциональны квадрату плотности плазмы n , а $W (= 3nTV$ для максвелловской плазмы, считая температуры ионов и электронов равными T и объем плазмы V) пропорционально n , из уравнения (1) можно получить универсальный критерий зажигания термоядерной реакции (критерий Лоусона [2]):

$$n\tau_E \geq \frac{3T}{\frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle_{DT}(T) E_{\alpha} - C_{Brm} Z_{eff} \sqrt{T}} \equiv F(T). \quad (2)$$

Здесь $\langle \sigma v \rangle_{DT}$ – эффективная скорость термоядерных реакций (D-T реакция выбрана для примера), E_{α} – энергия α -частиц, Z_{eff} – эффективный заряд (равен 1 для чистой D-T плазмы) и C_{Brm} – константа в выражении для мощности тормозного излучения. Зависимость $F(T)$ для разных реакций приведена на рис. 1.

Из неравенства (2) следует, что плотность плазмы в термоядерном реакторе ограничена снизу.

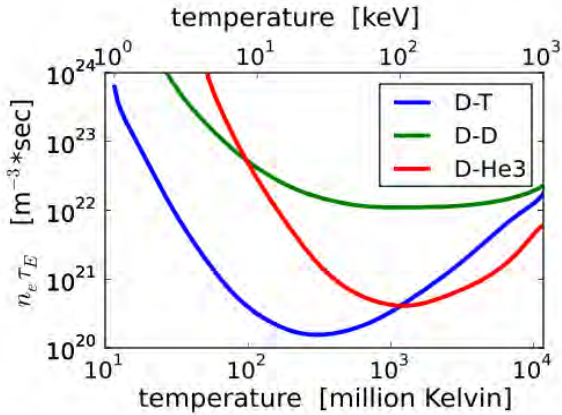


Рис. 1. Кривые зажигания $nT_E(T)$ для различных видов термоядерных реакций [3]

На сегодня наиболее продвинутым типом магнитной ловушки для горячей плазмы является токамак, представляющий собой тороидальный соленоид с плазмой, по которой течет ток, и окруженный дополнительными витками с током для управления формой и положением плазменного шнура, рис. 2. Давление плазмы в токамаке ограничено условиями устойчивости [4]:

$$\beta = \frac{8\pi p}{B^2} < \beta_{\text{lim}}. \quad (3)$$

Здесь p – давление плазмы, а B – напряженность магнитного поля в центре плазменного шнура. Учитывая, что $p \cong 2nT$, условие (3) ограничивает плотность плазмы сверху.

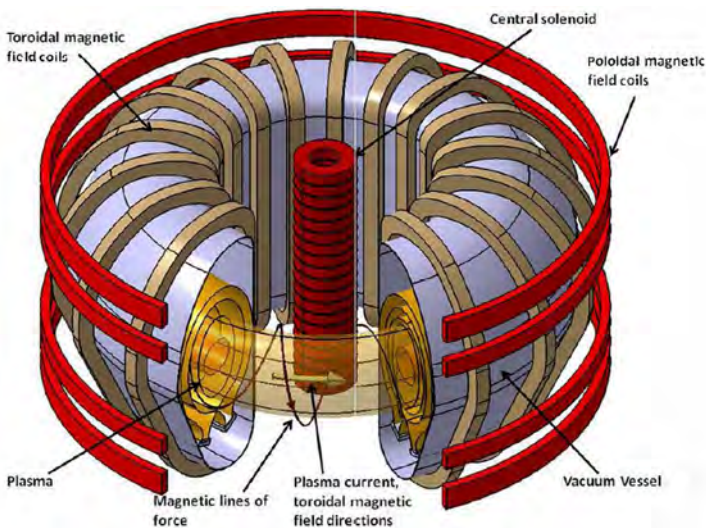


Рис. 2. Схема токамака

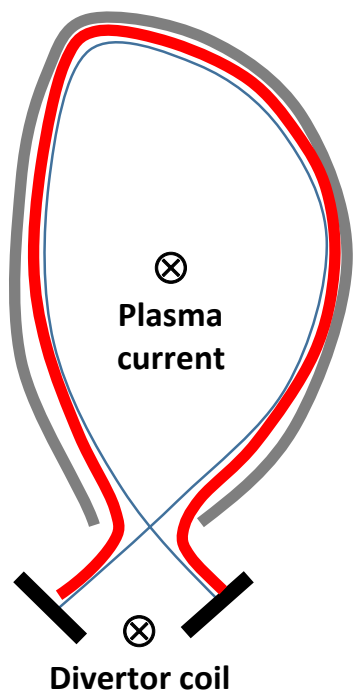


Рис. 3. Принципиальная схема дивертора. Красным выделена зона концентрации потоков

камеры. Простые оценки с использованием предположения об одинаковом удержании частиц и энергии в плазме токамака дают для параметров ИТЭРа ($V \sim 1000 \text{ м}^3$, $S \sim 1000 \text{ м}^2$, $n \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $\tau_E \sim 1 \text{ с}$) среднее значение потока частиц на стенки порядка $10^{20} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Однако, учет рециклинга частиц – то есть, многократно повторяющейся последовательности нейтрализации ионов на поверхности и ионизации образующихся нейтралов, увеличивает этот поток на два порядка величины, а существенная неоднородность потока увеличивает его дальше. В результате пиковые значения потоков водородных (D, T) частиц на поверхность структурных элементов в ИТЭРе могут достигать значений порядка $10^{24} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, рис. 4, а интегральные – порядка 10^{25} с^{-1} .

Плотность плазмы в токамаке не может быть выбрана произвольно. Если она слишком высока, то ухудшается удержание плазмы и может наступить срыв. Слишком низкая плотность плазмы ведет к увеличению нагрузки на диверторные пластины (потенциально аварийная ситуация), перегреву центральной плазмы (снижение термоядерной мощности) и ухудшению условий нагрева плазмы альфа-частицами и пучками нейтралов. Таким образом, эффективный контроль плотности плазмы в разряде является одним из важнейших условий нормальной работы реактора.

В потере энергии из плазмы значительный вклад вносят примеси, которые увеличивают Z_{eff} и вызывают мощное излучение на спектральных линиях неположительно ободранных ионов. Для уменьшения количества примесей, поступающих в плазму со стенок, используется дивертор [4] – конфигурация плазмы, где внешние магнитные поверхности отводятся от основного плазменного шнура и пересекаются специальными конструкциями (диверторными пластинами), обеспечивая удаление места контакта плазмы с материальной поверхностью от основного шнура, рис. 3. При этом происходит концентрация потоков частиц, что способствует откачке продуктов реакции, и энергии, что является причиной одного из основных ограничений на параметры реактора [5].

Чтобы обеспечить требуемые параметры плазмы, ее надо изолировать от окружающей среды – отсюда необходимость стенок. Диффузия плазмы поперек магнитного поля и перезарядка с нейтральными атомами порождают потоки горячих частиц, как заряженных, так и нейтральных, бомбардирующих стенки

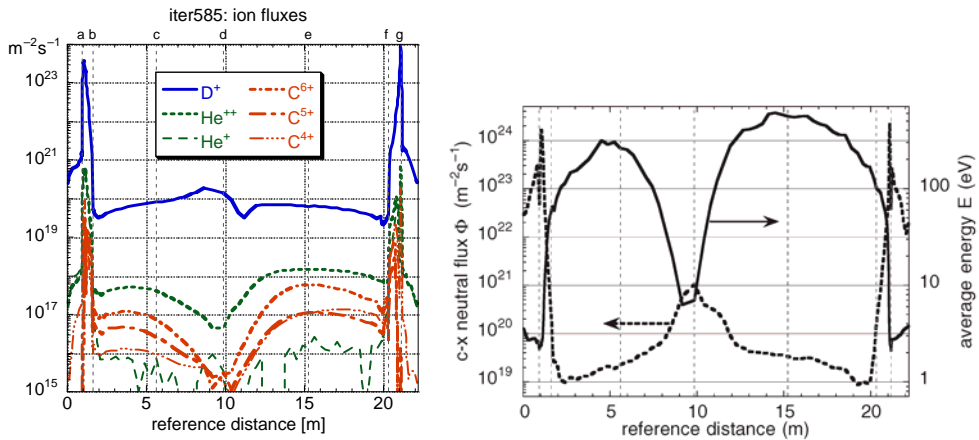


Рис. 4. Распределение потоков ионов и нейтралов по полоидальному обходу камеры ИТЭР [6]. Слева – потоки ионов, справа – поток и средняя энергия высыпавших на стенку нейтралов

Можно выделить два класса проблем, обусловленных взаимодействием изотопов водорода с конструкционными материалами. Первый – накопление трития в материале, второй – выделение накопленных частиц в плазму при изменении условий в плазме или стенке (есть еще проблема изменения термомеханических свойств материала при накоплении водорода, но это изменение, по-видимому, маскируется эффектами, связанными с нейтронным облучением, и здесь мы его не рассматриваем).

Проблема накопления трития обусловлена, в первую очередь, административным ограничением на количество трития, находящегося в установке, и сложностью его учета. В этих условиях накопление трития в материале ограничивает время работы реактора до длительной остановки, в течение которой тритий должен быть удален из элементов конструкции – по крайней мере, частично. Эта проблема стояла в ИТЭРе очень остро в процессе проработки варианта с углеродным дивертором. Собственно, накопление трития в углеродных материалах и заставило отказаться от использования их в диверторе ИТЭРа. В случае полностью металлической камеры можно было бы ожидать замедления накопления изотопов водорода в материале стенок до пренебрежимо низкого уровня, что подтверждается экспериментами на современных токамаках. Однако, интенсивное облучение материала термоядерными нейтронами создает дефекты кристаллической решетки, способствующие лучшим проникновению и удержанию атомов водорода. Расчеты диффузии трития в вольфраме, проведенные по двум различным программам с разными физическими допущениями, показывают, что административный лимит в 700 г трития в металлических конструкциях может быть достигнут за 5000 – 10000 стандартных (400 с) импульсов [7]. Недавние исследования захвата водорода в сильно облученном вольфраме [8] показывают, что реальный уровень насыщения концентрации водорода может составить ~ 1 ат. %, что соответствует допущениям модели, предсказывающим 5000 импульсов до достижения лимита. При

этом современная программа физических исследований на ИТЭРе предусматривает ~ 10000 полномасштабных импульсов с D-T плазмой.

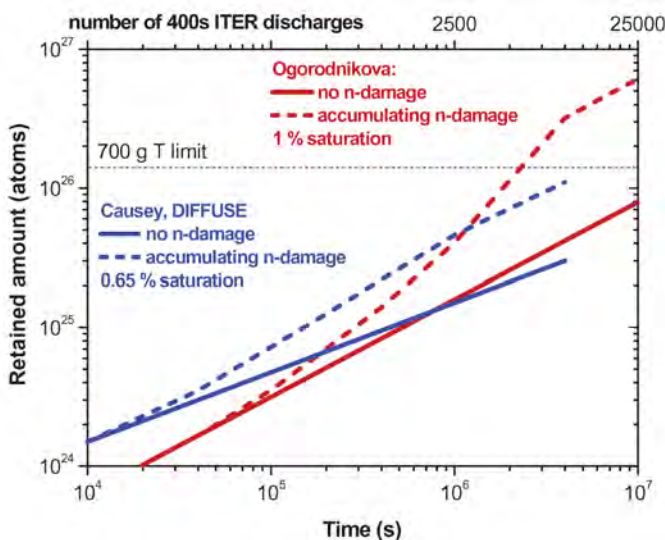


Рис. 5. Время полноценной работы ИТЭРа до достижения предела по накоплению трития (разные модели, разные физические допущения) [7]

Таким образом, с точки зрения накопления трития в материале, наибольший интерес представляют исследования уровня насыщения концентрации, глубины проникновения и скорости диффузии трития в сильно облученном материале, а также разработка методов очистки материала на месте.

Проблема обмена частицами между плазмой и стенкой обусловлена необходимостью контроля плотности плазмы в разряде. Действительно, полное число частиц в плазме ИТЭРа, $N_{pl} = \langle n \rangle V \sim 10^{23}$. Полное же число частиц, которые могут быть накоплены в стенках при достижении административного лимита по тритию примерно на три порядка больше – то есть, стенку можно рассматривать, как бесконечно большой резервуар частиц по сравнению с плазмой. В стационарных условиях насыщенной стенки обмен частицами между плазмой и стенкой приводит к динамическому равновесию между потоками частиц из плазмы и потоками частиц, отраженных или десорбированных со стенки. Поскольку эти потоки по-разному зависят от параметров плазмы и стенки, при любом изменении состояния плазмы или стенки можно ожидать нарушения баланса в ту или другую сторону и, соответственно, эффективной откачки или подпитки рабочего газа стенкой. Величину эффекта можно оценить, зная ожидаемый полный поток частиц на стенку $\Gamma \sim 2 \cdot 10^{25} \text{ c}^{-1}$ (ионы плюс нейтралы) и полагая поток отраженных частиц $\Gamma_{refl} \sim 0,5 \Gamma$. Тогда находящиеся в равновесии потоки частиц, поглощаемые стенкой и выделяемые ей, можно оценить как $\Gamma_{abs} = \Gamma_{des} \sim 10^{25} \text{ c}^{-1}$. Следовательно, нарушение баланса потоков в 1% приводит к эффективному источнику или стоку частиц в 10^{23} c^{-1} , что примерно равно максимально допустимому потоку частиц в си-

стему откачки в ИТЭРе [5]. Если компенсировать эффективную откачку стенок относительно легко увеличением напуска газа, то компенсация противоположного эффекта значительно сложнее. Поскольку увеличение скорости откачки (в два раза или больше) нереально, придется работать постоянно с интенсивностью напуска газа, близкой к максимальной, чтобы иметь необходимую свободу для ее уменьшения в случае излишнего выделения частиц со стенки.

Таким образом, с точки зрения обмена частицами между плазмой и стенкой наиболее интересными представляются исследования, направленные на понимание и количественное описание процессов десорбции частиц и на уточнение коэффициентов отражения частиц и распределение отраженных частиц по углу и энергии (в настоящее время в моделировании пристеночной плазмы широко используются данные, полученные с использованием программы TRIM [9]).

Суммируя, мы показали, что

- Наличие большого количества изотопов водорода есть неотъемлемое свойство термоядерного реактора.
- Их взаимодействие с конструкционными материалами неизбежно.
- Потоки частиц изотопов водорода распределены по стенкам неоднородно и могут достигать значений плотности потока свыше $10^{24} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.
- Наиболее серьезными проблемами, связанными с взаимодействием изотопов водорода с конструкционными материалами представляются
 - Накопление трития в материале (ограничение на продолжительность работы)
 - Поглощение и выделение частиц поверхностью (контроль плотности плазмы)
- Нужна ясность с описанием состояния стенки в отношении накопления изотопов водорода и обмена ими с плазмой.

Список литературы

1. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматгиз, 1961.
2. Lawson J. D. in «Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor», A.E.R.E. report GP/R 1807, December 1955. declassified April 9th 1957.
3. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12380921>.
4. Wesson J. «Tokamaks», Oxford Engineering Science Series No 48, Clarendon Press, Oxford, 2nd edition, 1997.
5. Pitts R. et al. Phys. Scr. T138 (2009) 014001.
6. Behrisch R. et al. J. Nucl. Mater. 313–316 (2003) 388.
7. Roth J. et al. J. Nucl. Mater. 390–391 (2009) 1.
8. Hatano Y. et al. 22nd PSI Conference, Rom 30.05–3.06.2016, to appear in Nucl. Mater. & Energy.
9. Moller W., Eckstein W. (1984). «Tridyn – A TRIM simulation code including dynamic composition changes». Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 2: 814.