

А.Н. ЩЕРБАК¹, С.В. МИРНОВ¹, Я.А. ВАСИНА², Н.С. МАХОВ²,
И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, А.В. ВЕРТКОВ³, М.Ю. ЖАРКОВ³

¹АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³АО «Красная Звезда», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СБОРА ЛИТИЯ И ВОДОРОДА КОЛЛЕКТОРНОЙ МИШЕНЬЮ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ В СИСТЕМЕ ЭМИТТЕР-КОЛЛЕКТОР НА ТОКАМАКЕ T-11M

Контур непрерывной циркуляции лития вблизи первой стенки термоядерного источника нейтронов (ТИН) призван обеспечить ее защиту в режиме стационарной эксплуатации. Наряду с эмиттером лития ключевым элементом такого контура должен стать литиевый коллектор, предназначенный для сбора «отработанных» (т.е. выходящих на стенку) лития и неиспользованного «горючего» – изотопов водорода – с целью их последующего возвращения в плазменный шнур. Работа посвящена экспериментальному исследованию в условиях токамака T-11M работы такого коллектора, выполненного в виде гладкой металлической трубы из нержавеющей стали, помещенной в «тень» литиевого эмиттера. Количественной характеристикой его эффективности является коэффициент захвата падающего на него потока литиевых ионов и водорода. В случае охлаждения его изнутри жидким азотом, как показала линейная зависимость от времени экспозиции, коэффициент захвата им лития можно было считать близким к 1, по крайней мере, в ходе экспозиции коллектора длительностью 600 рабочих импульсов T-11M, что эквивалентно примерно 150 с непрерывной работы коллектора.

В режиме стационарной эксплуатации коллекторной мишени ее охлаждение жидким азотом представляется нерентабельным и следовало бы быть готовым к переходу на другие хладагенты и, соответственно, на другие температуры рабочих поверхностей будущих коллекторов лития. При этом возникает вопрос о допустимом пределе отклонения температуры поверхности коллектора от криогенного уровня в реальных условиях, когда поверхность коллектора уже будет покрыта активным слоем собранного лития. Изучение эффективности гладкого металлического покрытия в качестве коллектора по отношению к падающим на него ионам лития, а именно, определение допустимого температурного диапазона сбора лития гладкой мишенью и являлось первой целью этой работы.

Далее, не менее важным становится вопрос захвата изотопов водорода литием, осажденным на таких коллекторах. Поэтому в работе была исследована зависимость захвата водорода в ходе рабочих разрядов от температуры поверхности коллекторной мишени. Учитывая, что периферийная плазма многих токамаков практически идентична, эти результаты могут быть естественно экстраполированы на условия работы ТИН.

Все эксперименты проводились в типичных разрядах токамака Т-11М: $I_p=70$ кА, $B_T=1,4$ Тл, $t=200$ мс, $n_e=3\cdot 10^{19}$ см⁻³. В экспериментах по исследованию зависимости сбора лития коллекторной мишенью от температуры поверхности мишени в качестве основного лимитера-эмиттера использовался вертикальный литиевый лимитер на основе капиллярно-пористой системы (КПС), а также продольный литиевый лимитер на основе КПС, коллекторная мишень при этом располагалась в тени вертикального эмиттера.

Эксперименты осуществлялись следующим образом: коллекторная мишень вводилась в камеру токамака ($r=27$ см) на расстояние примерно 10 см от стенки камеры ($r=16$ см), располагаясь в тени основного источника лития ($r=14-15$ см) в виде вертикального, либо продольного литиевых эмиттеров. Кроме них на $r=26$ см располагался графитовый лимитер, излучение кромки которого (LiI) служило индикатором литиевого потока на стенку. Внутри мишени были установлены нагреватель и термопара (ТХА), которая определяла температуру ее поверхности.

Далее мишень экспонировалась в сериях по 35-600 импульсов рабочих разрядов Т-11М, длительность каждого из которых составляла около 0.2 с. После завершения экспозиции мишень выводилась из камеры токамака через шлюз, затем погружалась в горячую дистиллированную воду. Полученный раствор впоследствии анализировался на содержание лития тремя различными способами: по рН-фактору, по электропроводности раствора и, так называемым «пламенным методом» – по спектральной эмиссии лития в пламени газовой горелки.

Эксперименты по сбору лития проводились также в водородном тлеющем разряде в диапазоне температур мишени от комнатной до 500°C.

Эмиссия водорода из лития, захваченного мишенью, изучалась с помощью стандартной масс-спектрометрии путем нагрева мишени (ТДС-спектры) до 570°C.

На рис. 1 представлены полученные результаты сбора лития коллекторной мишенью в зависимости от температуры ее поверхности.

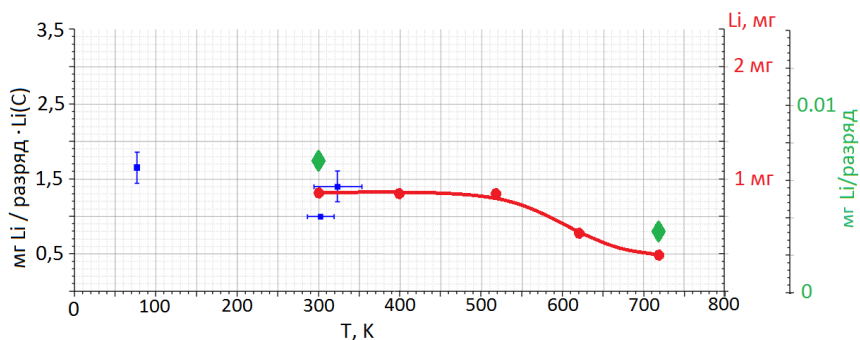


Рис. 1 Зависимость сбора лития от температуры поверхности коллекторной мишени

Синим цветом обозначены точки, когда сбор лития коллекторной мишенью исследовался в случае использования продольного литиевого лимитера в качестве основного литиевого эмиттера. Зеленым цветом – когда основным являлся вертикальный литиевый лимитер. А красным цветом обозначена кривая, соответствующая исследованию сбора лития в тлеющем разряде.

Из всего этого можно сделать следующие выводы, что по мере нагрева мишени в диапазоне температур от -196°C до 80°C (сравнение эксперимента с заливкой жидкого азота и без нее) эффективность сбора лития уменьшилась незначительно, не более чем на 20%, что делает необязательным охлаждение литиевых коллекторов жидким азотом, а можно ограничиться, например, водой.

Также было получено, что по мере нагрева мишени в диапазоне температур от 20°C до 400°C эффективность литиевого сбора оставалась практически постоянной от комнатной температуры вплоть до 270°C с последующим спадом примерно вдвое при нагреве до 400°C .

Эксперименты по исследованию захвата водорода литием, осажденным на коллекторную мишень, заключались в следующем: точно так же в камеру вводилась коллекторная мишень, которая располагалась в тени вертикального литиевого лимитера, служившим основным эмиттером лития, экспонировалась в рабочих разрядах токамака при различных температурах поверхности мишени. Затем по завершению экспозиции мишени включался ее прогрев до 570°C , и по квадрупольному масс-спектрометру наблюдался выход водорода из лития.

На рис. 2 приведена зависимость выхода водорода из осажденного на поверхности мишени лития в зависимости от температуры поверхности мишени, при которой экспонировалась мишень. Красные точки – захват лития гладкой металлической мишенью. Пунктир – коррекция на испарение лития с поверхности мишени («пламенный анализ») между разрядными импульсами T-11M. Абсолютные оценки позволяют заключить, что максимальное число атомов водорода, захваченных осажденным литием может достигать 10% на атом лития при температуре мишени масштаба 300K и снижаются на порядок и более при повышении температуры до 500-600K.

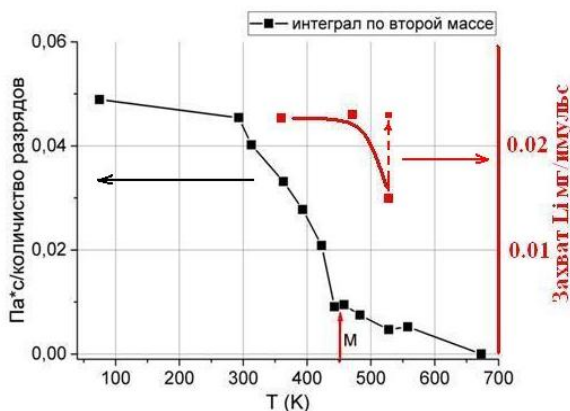


Рис.2 Зависимость захвата лития и водорода литием в зависимости от температуры поверхности мишени

Таким образом, можно сделать важный вывод, что в рамках модели непрерывной циркуляции лития в будущих ТИН накопления трития внутри разрядной камеры можно избежать, если температура ее стенок будет находиться в диапазоне $350 \pm 50^\circ\text{C}$. При этом допустимый температурный предел сбора лития гладкой металлической мишенью из водородно-литиевой плазмы может находиться существенно выше, вблизи $450 \pm 50^\circ\text{C}$.

Работа поддержана грантом РФФИ 15-12-30027.