



**Проект по секции физика**

# **Исследование захвата, удержания и десорбции изотопов водорода из графита тайлов токамака Т-15МД при плазменном облучении**



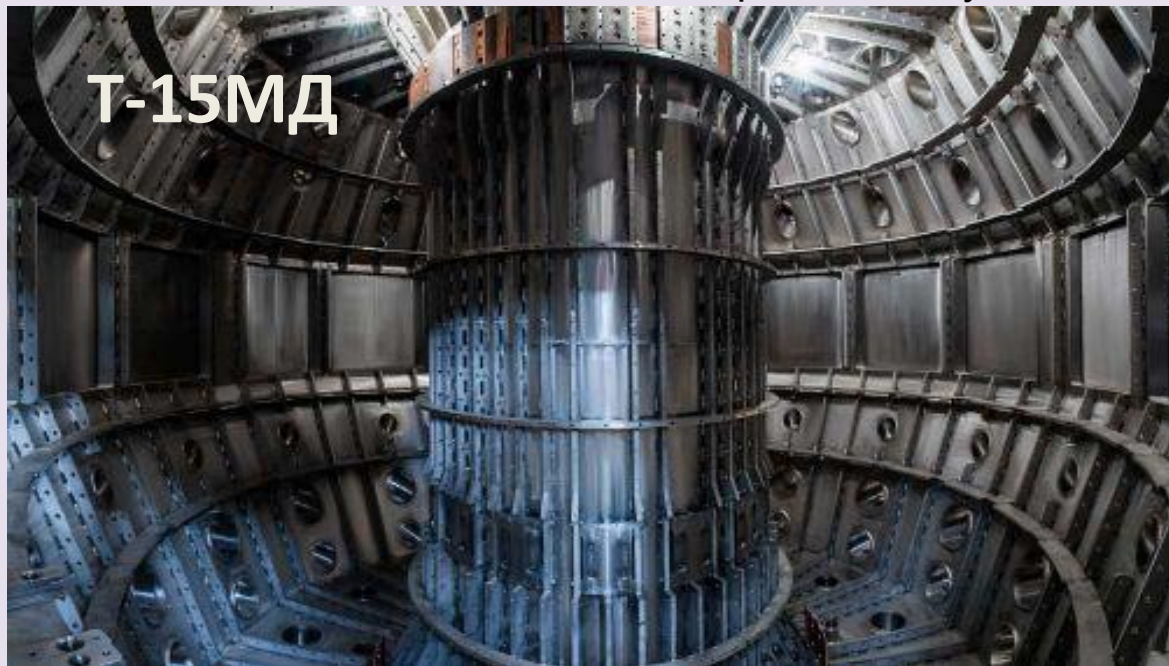
**Выполнил:** Дюло Михаил Александрович  
9 класс, МБОУ «Гимназия №13», г. Алексин,  
Тульской области, Российская Федерация.

**Научный руководитель:** Каплевский  
Александр Сергеевич, НИЯУ МИФИ, кафедра  
физики плазмы (№21), ассистент, к.ф.-м.н.

# Введение

Захват и накопление изотопов водорода в графитовых материалах является важной проблемой для термоядерных установок, таких как токамак Т-15МД (строится в «Курчатовском институте»), в которых графит будет использоваться в качестве материала, контактирующего с плазмой. Накопление в них и затем неуправляемая десорбция изотопов водорода порождает серьёзные проблемы в работе токамака, например, затрудняет управление разрядом. Для прогнозирования накопления изотопов водорода в контактирующем с плазмой графите необходимо знать зависимость захвата, удержания и десорбции из него изотопов водорода от различных параметров облучения в водородной плазме.

Захват и удержание изотопов водорода в графитах изучалось в большом количестве работ, выполненных на токамаках и в лабораторных ионно-пучковых и плазменных установках. Накоплен большой массив данных о величинах захвата в различных условиях облучения. Однако закономерности захвата изотопов водорода в графит тайлов токамака Т-15МД на данный момент не исследовался. В результате затрудняется выбор правильных конструктивных решений и оптимальных режимов эксплуатации графитовых элементов плазменной камеры токамака Т-15МД.



**Целью работы** является исследование закономерностей захвата, удержания и десорбции изотопов водорода из графита для токамака Т-15МД, а также их сравнение с графитом марки МПГ-8.

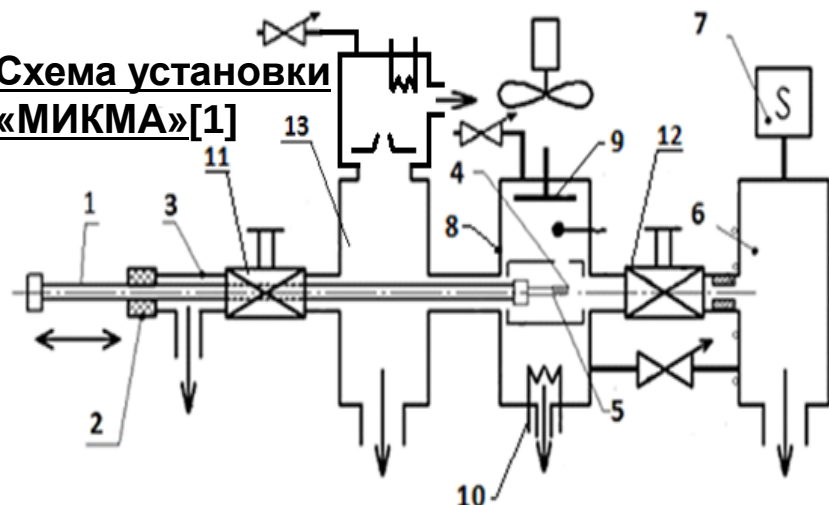
### **Методика подготовки образцов и параметры облучения в плазме**

Образец вырезался из цельного куска исследуемого графита Т-15МД, обрабатывался и полировался со всех сторон. Размеры образца составляют 7×7×2 мм. Затем он помещался в ультразвуковую ванночку со спиртом, где в течение 15 мин промывался для очистки от пыли, а затем отжигался в вакууме до температуры 1450 К.

#### **Параметры облучения образцов в D<sub>2</sub> плазме**

|                                                                           |                                                |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Давление остаточного газа (95% H <sub>2</sub> O и 5% H <sub>2</sub> ), Па | $2.7 \times 10^{-3}$                           |
| Энергия ионов, эВ/ат                                                      | 100 и 650                                      |
| Ионный поток, ат/см <sup>2</sup> сек                                      | $1 \times 10^{16}$ -<br>$1.6 \times 10^{16}$   |
| Доза облучения, ат/см <sup>2</sup>                                        | $0.36 \times 10^{19}$ -<br>$10 \times 10^{19}$ |
| Температура, К                                                            | 630                                            |

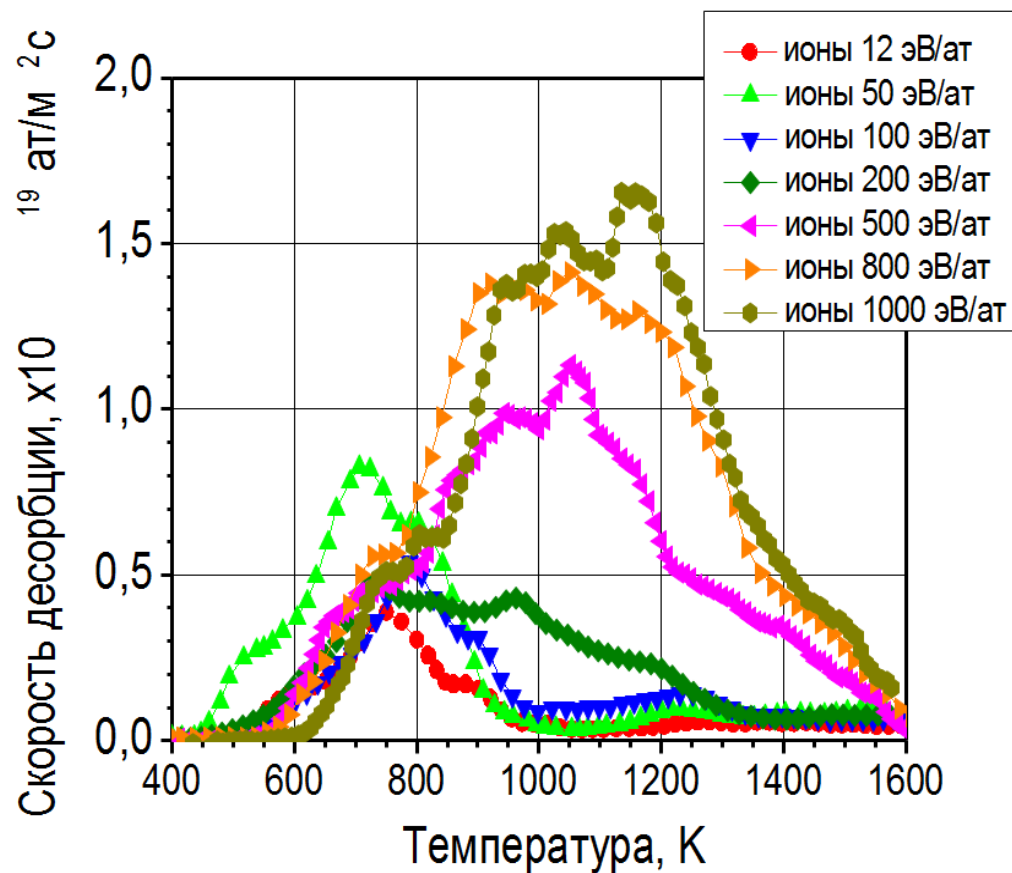
**Схема установки «МИКМА»[1]**



1. Подвижный ввод
2. Уплотнение
3. Шлюз
4. Исследуемый образец
5. Нагреватель образца
6. Камера ТДС-анализа
7. Масс-спектрометр
8. Камера плазменного облучения
9. Анод
10. Накальный катод
11. Шибер в шлюзовой камере
12. Шибер в ТДС камере
13. Камера ускорительного блока

## Метод определения места захват изотопов водорода в графите по виду спектров термодесорбции водород- и дейтерий содержащих молекул

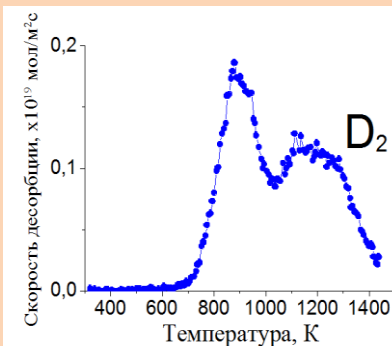
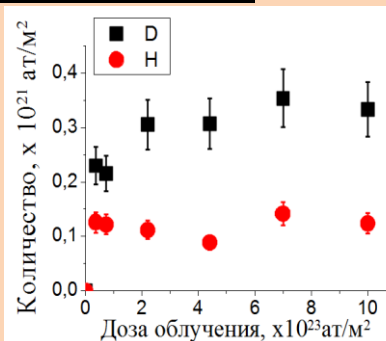
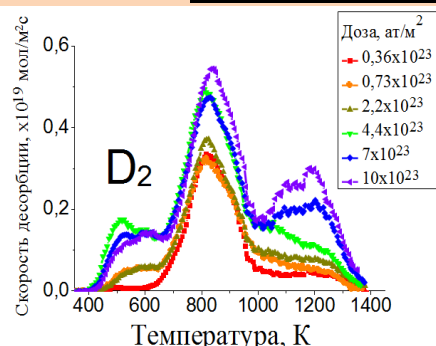
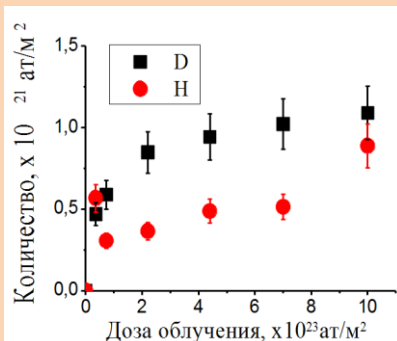
Исследование, проведённое в работе [2] показало, что спектры термодесорбции изотопов водорода из графитовых материалов несут информацию о характере захвата в них ионов плазмы и водорода остаточного газа.



1. Захват дейтерия при облучении ионами с энергией меньше 200 эВ/ат происходит в **приповерхностные ловушки** (термодесорбция при  $T \approx 700-800\text{ К}$ ), и объясняется **захватом за счет потенциальной энергии взаимодействия облучающих ионов с поверхностью графита**.
2. Захват дейтерия при облучении ионами с энергией больше 200 эВ/ат происходит **в зоне торможения** (ТДС максимумы при  $T \approx 900-1100\text{ К}$ ) **в ловушки, создаваемые за счет кинетической энергии**.
3. В обоих случаях **часть внедренных частиц** диффундирует и **захватывается в глубине** (ТДС максимумы при  $T \approx 1100-1600\text{ К}$ ).

## Зависимость захвата ионов от дозы облучения в плазме.

### Энергия ионов 100 эВ/ат

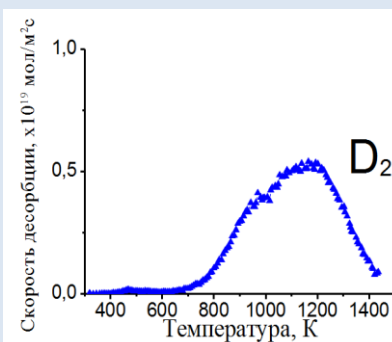
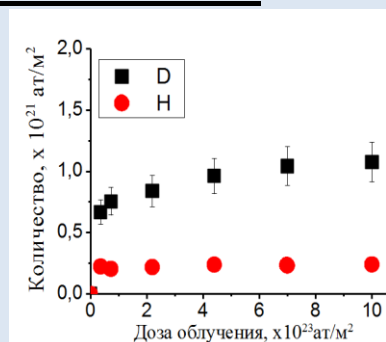
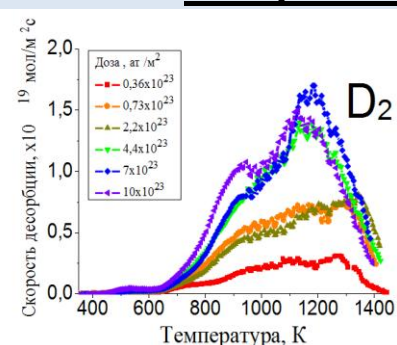
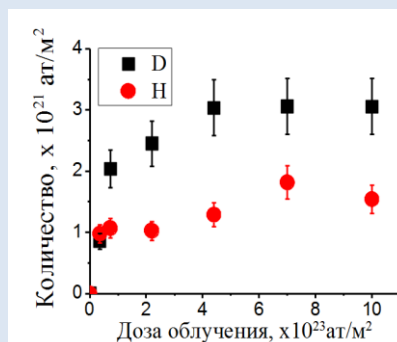


**При облучении ионами с энергией 100 и 650 эВ/ат:**

- дейтерий захватывается в графит тайлов токамака Т-15МД в ловушки в приповерхностной области (температура десорбции – ТД 400-600К), в зоне торможения ионов основной захват (ТД 700-1000К) и глубине графита (ТД 1100-1400К);
- водород захватывается в ловушки с ТД 400-600К, с ТД 700-1000К и с ТД 1100-1400К (основной захват);
- при дозе облучения  $4,4 \times 10^{23}$  ат/м<sup>2</sup> захват дейтерия в графите выходит на насыщение при энергии ионов как 100 эВ/ат ( $1 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>), так и 650 эВ/ат ( $3 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>). При энергии ионов 100 эВ/ат захват водорода в графите выходит на насыщение ( $6,8 \times 10^{20}$  ат/м<sup>2</sup>) при дозе облучения  $7 \times 10^{23}$  ат/м<sup>2</sup>.

## Зависимость захвата ионов от дозы облучения в плазме.

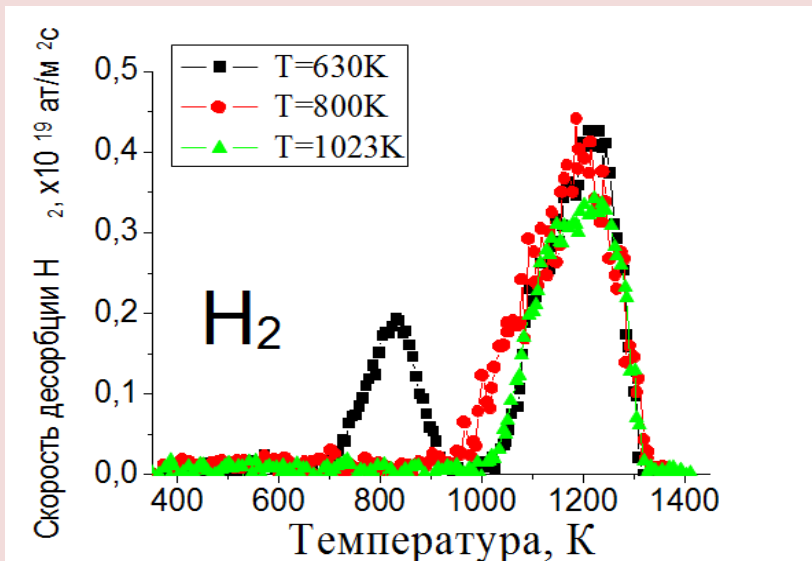
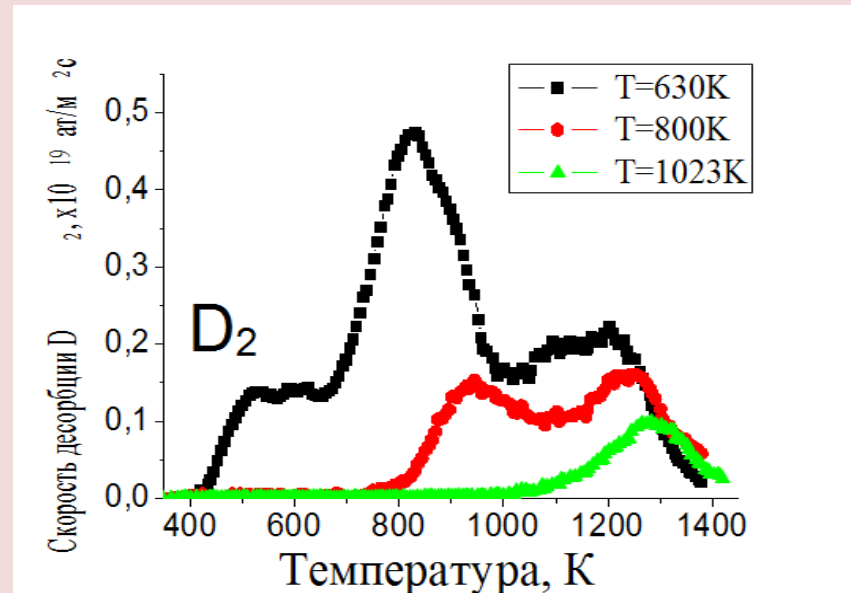
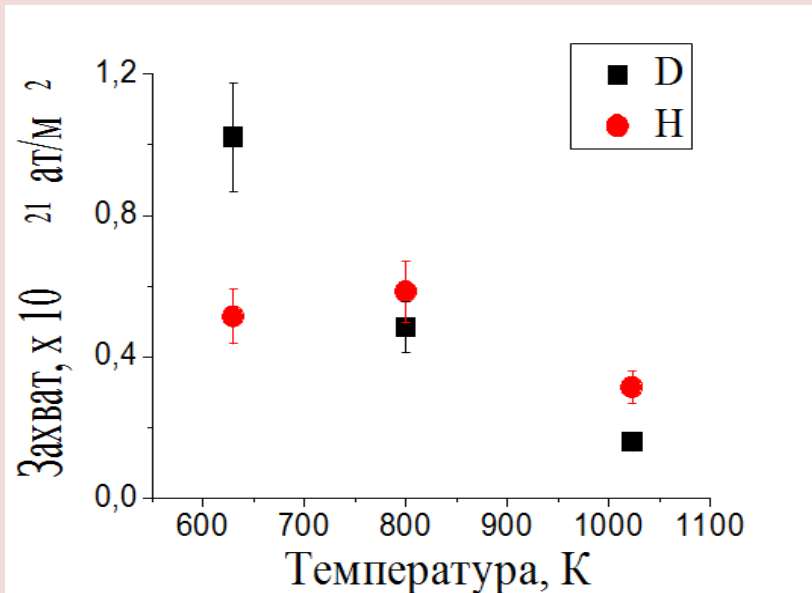
### Энергия ионов 650 эВ/ат





# Зависимость захвата ионов от температуры облучения.

Энергия ионов 100 эВ/ат



Повышение температуры облучения с 630 К до 1023 К приводит к **шестикратному уменьшению захвата дейтерия** и **двукратному уменьшению захвата водорода**.

Это связано с тем, что при температуре облучения 1023К атомы водорода могут диффундировать и захватываться только в глубине графита (ловушки с ТД 1100-1400К).

## Заключение

- ❑ Исследованы закономерности захвата, удержания и десорбции изотопов водорода из графита для токамака Т-15МД, а также проведено их сравнение с графитом марки МПГ-8;
- ❑ Показано, что при облучении ионами с энергией 100 и 650 эВ/ат дейтерий из плазмы и водород из остаточного газа захватываются в ловушки в приповерхностной области, в зоне торможения ионов (основной захват дейтерия) и глубине графита (основной захват водорода);
- ❑ Обнаружено, что уровень насыщения захвата дейтерия в графит Т-15МД в  $\approx 3$  раза больше, чем в графит МПГ-8. Поэтому при термическом обезгаживании графита Т-15МД потребуются более высокая температура и более длительное время прогрева, чем при обезгаживании графита МПГ-8.

[1] A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, et al. "Deuterium trapping in carbon fiber composites exposed to D plasma" *Journal of Nuclear Materials*, vol. 390-391, pp. 589-592, 2009.

[2] A. Airapetov, L. Begrambekov, S. Bremond, et al. "Glow discharge cleaning of carbon fiber composite and stainless steel " *Journal of Nuclear Materials*, vol. 415, pp. 1042-1045, 2011.