

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

---

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Казанцева Сергея Романовича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Измерение динамики дифракции синхротронного излучения на монокристалле вольфрама при импульсном нагреве и восстановление динамики распределения деформаций в образце

---

**«К защите допущена»**

**Заведующий кафедрой**

**Научный руководитель**

Беклемишев А.Д.

Аракчеев А.С.

к. ф.-м. н., в. н. с.,

к. ф.-м. н., с. н. с.,

ИЯФ СО РАН

ИЯФ СО РАН

...../.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

...../.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2020 г.

«.....».....2020 г.

Дата защиты: «.....».....2020 г.

Новосибирск, 2020

## Оглавление

Введение .....	3
Физические основы метода .....	6
Станция «ПЛАЗМА».....	12
Результаты .....	17
Заключение .....	24
Список литературы .....	25

## Введение

На сегодняшний момент токамаки являются наиболее перспективными термоядерными установками с магнитным удержанием плазмы [1]. Наиболее многообещающим режимом удержания плазмы в токамаке является H – мода, которая сопровождается периодическим воздействием мощных импульсных потоков плазмы на элементы вакуумной камеры, в том числе и на дивертор [2]. Каждый импульс плазменной нагрузки представляет собой короткий интенсивный поток частиц плазмы на стенку дивертора. Помимо более сложных эффектов взаимодействия энергичных частиц плазмы с материалом дивертора, плазменная нагрузка также приводит к импульсному нагреву материала. Резкое повышение температуры тонкого приповерхностного слоя вследствие импульсного нагрева является одной из причин повышения интенсивности эрозии и механического разрушения материалов, что остается одной из важнейших проблем реализации управляемого термоядерного синтеза [3].

Механическое разрушение материалов требует возникновения значительных механических напряжений. Основной причиной возникновения механических напряжений при импульсном нагреве является тепловое расширение в неоднородно нагретом теле. При превышении некоторого порога мощности тепловой нагрузки объемное механическое разрушение материала становится основным механизмом его эрозии вместо поверхностных процессов. На данный момент вольфрам является одним из самых перспективных материалов для стенок вакуумной камеры термоядерного реактора. Экспериментально наблюдалось растрескивание поверхности вольфрама под действием импульсных тепловых нагрузок [4-6]. Теоретическое моделирование показывает, что растрескивание обусловлено пластической деформацией, возникающей во время нагрева и приводящей к образованию растягивающих напряжений после остывания [7-8]. Также

необходимо отметить, что несколько длительных циклов нагрева – остывания также приводят к растрескиванию [9], и в этом случае механизм формирования растягивающих напряжений аналогичен случаю импульсной тепловой нагрузки [10]. Разница между стационарным и импульсным нагревом проявляется в толщине нагреваемого слоя. В случае импульсного нагрева тонкий нагретый слой вызывает более значительные остаточные напряжения при том же повышении температуры. Напряжения локализируются в нагретом приповерхностном слое из-за зависимости пластической деформации только от локального повышения температуры [7]. Таким образом, при импульсном нагреве, распределения напряжений и деформаций локализованы вблизи нагреваемой поверхности и резко уменьшаются по глубине образца. Параметры растрескивания детально зависят от распределения тепловой нагрузки по времени, а также от объемного механического разрушения. Следовательно, для изучения растрескивания, необходимо измерять распределения напряжений и деформаций по глубине с временным разрешением во время импульсных процессов.

Для решения данной задачи была предложена диагностика, основанная на дифракции синхротронного излучения [11]. Диагностика не требует измерений при нескольких различных углах наклона образца, как в классическом методе измерения остаточных напряжений в поликристаллических образцах [12]. Однако нужно отметить, что основным ограничением диагностики является то, что в качестве образца используется монокристалл, и поскольку настоящие диверторы в большинстве своем являются поликристаллическими, данное ограничение является значительным. Однако, по крайней мере, упругие свойства монокристаллического вольфрама являются почти изотропными [13], что означает, что пространственные распределения напряжений в случае упругой деформации при импульсном нагреве одинаковы и в монокристаллическом, и в поликристаллическом образце.

В работе [11] было продемонстрировано измерение динамики угла рассеяния, в то время как расчет динамики распределения деформаций и напряжений требует данных об изменении формы дифракционного пика. Целью данной работы являлось измерение динамики формы дифракционного пика при импульсной тепловой нагрузке на образец монокристалла вольфрама, а также восстановление распределения напряжений, как в случае стационарных дифракционных картин (стадий между циклами нагрева – остывания, при последовательных нагрузках на образец), так и в случае непосредственной динамики дифракционного пика между нагревом и остыванием образца.

## Физические основы метода

Метод измерения напряжений и деформаций в материале при импульсном нагреве основан на дифракции рентгеновского излучения в монокристалле. Деформация материала, вызванная импульсной тепловой нагрузкой, является результатом теплового расширения. Тепловое расширение вызывает поворот кристаллических плоскостей образца из-за локального повышения температуры. Согласно законам дифракции, угол падения рентгеновского излучения на кристаллическую плоскость равен углу отражения. Таким образом, вращение кристаллической плоскости из-за деформации приводит к изменению угла рассеяния. Для измерений деформаций в монокристаллах используется схема дифракции, представленная на рисунке 1.

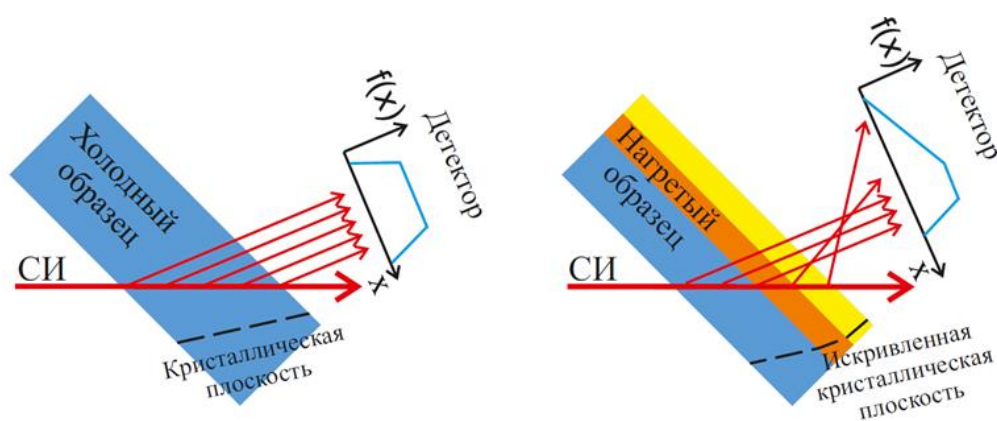


Рисунок 1. Схема изменения формы дифракционного пика при нагреве образца.

Согласно условию Вульфа-Брэгга, изменение угла рассеяния (как и межплоскостного расстояния) приводит к изменению энергии рентгеновских лучей, образующих дифракционный пик. Поэтому для наблюдения динамики дифракционного пика необходимо использование полихроматического синхротронного излучения (СИ) для предотвращения исчезновения дифракционного пика при импульсном нагреве. В случае импульсной нагрузки, деформация локализована вблизи облучаемой поверхности и

направлена перпендикулярно ей, а локальное значение напряжения определяется локальным повышением температуры. В приближении малой толщины нагреваемого слоя, характерном для случая импульсного нагрева, упругая деформация определяется следующим выражением

$$u_{zz} = \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \alpha (T(z) - T_0), \quad (1)$$

где  $u_{ij}$  - тензор деформации,  $z$  - координата нормали к облучаемой поверхности,  $\sigma$  - коэффициент Пуассона,  $\alpha$  - линейный коэффициент теплового расширения,  $T(z)$  - локальная температура,  $T_0$  - начальная температура. Поскольку данная деформация однозначно связана с изменением угла рассеяния, пространственное изменение температуры в образце приводит к возникновению разных углов рассеяния для полихроматического пучка СИ.

Найдём связь изменение угла рассеяния и остаточного напряжения. В первую очередь нужно связать деформацию и возникающие напряжения. Для начала найдем ответ для упругой деформации. Закон Гука имеет следующий вид:

$$u_{ik} = \frac{1}{E} \left( (1+\sigma) \sigma_{ik} - \sigma \sigma_{ll} \delta_{ik} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  - тензор напряжений,  $E$  - модуль Юнга. Отсутствие силы, действующей на поверхность, описывается следующим выражением:

$$\sigma_{zz} = 0, \quad (3)$$

Условия однородности и изотропности вдоль поверхности приводит к следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
u_{xx}^e &= u_{yy}^e, \sigma_{xx} = \sigma_{yy}, \\
\sigma_{xy} &= \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0, \\
u_{xy} &= u_{yz} = u_{xz} = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

Далее вычислим связь между напряжением и деформацией:

$$u_{xx}^e = \frac{1}{E} \left( (1 + \sigma) \sigma_{xx} - \sigma (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \right) = \frac{1 - \sigma}{E} \sigma_{xx}, \tag{5}$$

$$u_{zz}^e = \frac{1}{E} \left( -\sigma (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \right) = -\frac{2\sigma}{E} \sigma_{xx}, \tag{6}$$

Пластическая деформация имеет такую же структуру:

$$u_{xx}^p = u_{yy}^p, u_{xy}^p = u_{yz}^p = u_{xz}^p = 0, \tag{7}$$

При пластической деформации мало изменяется удельный объем:

$$\begin{aligned}
u_{xx}^p + u_{yy}^p + u_{zz}^p &= 0, \\
u_{zz}^p &= -2u_{xx}^p
\end{aligned} \tag{8}$$

Это соответствует  $\sigma = 1/2$  при упругой деформации.

Далее нужно выразить полную деформацию через напряжение. Из однородности вдоль поверхности следует, что:

$$\begin{aligned}
u_{xx} &= 0, \\
u_{xx}^e + u_{xx}^p &= 0
\end{aligned} \tag{9}$$

В итоге полная деформация поперек поверхности будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
u_{zz} &= u_{zz}^e + u_{zz}^p = -\frac{2\sigma}{E} \sigma_{xx} - 2u_{xx}^p = -\frac{2\sigma}{E} \sigma_{xx} + 2u_{xx}^e = \\
&= -\frac{2\sigma}{E} \sigma_{xx} + 2 \frac{(1 - \sigma)}{E} \sigma_{xx} = \frac{2\sigma_{xx}}{E} (1 - 2\sigma)
\end{aligned} \tag{10}$$



Для нахождения связи между возникающими напряжениями и изменением угла рассеяния воспользуемся геометрией задачи, указанной на рисунке 2.

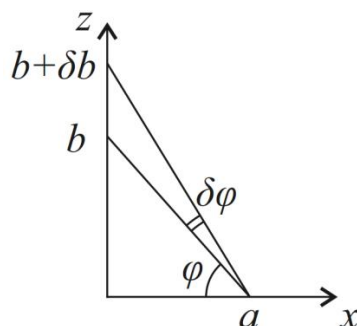


Рисунок 2. Связь деформации и изменения угла рассеяния

$\varphi$  - угол между кристаллической плоскостью образца и его поверхностью. В недеформированном состоянии:

$$\tan \varphi = \frac{b}{a} \quad (11)$$

После деформации противолежащий катет увеличивается на  $\delta b$  что приводит к соответствующему изменению угла  $\varphi$  на  $\delta\varphi$ , причем  $\delta b/b$  - ранее найденная деформация, описываемая выражением (10):

$$\tan(\varphi + \delta\varphi) = \tan(\varphi) + \frac{\partial \tan \varphi}{\partial \varphi} \delta\varphi = \frac{b + \delta b}{a} = \frac{b(1 + u_{zz})}{a} \quad (12)$$

Тогда:

$$\frac{\partial \tan \varphi}{\partial \varphi} \delta\varphi = \frac{b}{a} u_{zz} = u_{zz} \tan \varphi \rightarrow \delta\varphi = \frac{\tan \varphi}{\left( \frac{\partial \tan \varphi}{\partial \varphi} \right)} u_{zz} = \frac{\sin 2\varphi}{2} u_{zz} \quad (13)$$

Поскольку угол рассеяния  $2\theta$  меняется в два раза больше ( $\delta 2\theta = 2\delta\varphi$ ), то итоговое выражение для связи изменения угла рассеяния и напряжений будет иметь следующий вид:

$$\delta 2\theta = 2 \sin 2\varphi \frac{1 - 2\nu}{E} \sigma_{xx} \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что изменение угла рассеяния при одних и тех же значениях напряжений максимально при  $\varphi = 45^\circ$ . Измерение динамики дифракционного пика во время импульсного нагрева состояло в измерении смещения и изменения формы дифракционного пика непосредственно во время облучения образца лазером и в измерении смещения и изменения формы дифракционного пика после остывания, что имеет место в случае возникновения в образце остаточных напряжений. Ход измерений заключался в облучении лазером образца, измерении динамики дифракционного пика в процессе облучения лазером и последующем измерении дифракционного пика после остывания образца. В качестве образца использовался монокристалл вольфрама с ориентацией поверхности (100) и толщиной около 400 мкм. Был измерен наиболее интенсивный дифракционный пик 110, угол рассеяния  $2\theta$  был около  $4,5^\circ$ . Выбор такого образца был сделан для того, чтобы обеспечить наличие (110) плоскости наклоненной на  $45^\circ$  к поверхности и отсутствие выделенного направления пластической деформации вдоль поверхности. Выбранная ориентация образца относительно пучка СИ обеспечивает дифракцию с энергией около К-края поглощения вольфрама (69,525 кэВ) для минимизации поглощения в материале. Расстояние от источника СИ до образца около 40 м. Сечение исходного пучка СИ составило 1мм на 1мм, что обеспечило угловой разброс менее  $0,002^\circ$ . Облучаемая лазером площадь была больше сечения пучка СИ, поэтому нагрев лазером в пределах сечения СИ предполагается равномерным. Параметры нагрева позволяют оценить повышение температуры поверхности на  $2000^\circ\text{C}$ .

Схема эксперимента представлена на рисунке 3. СИ падает на образец и рассеивается, прямой пучок во избежание попадания на детектор обрезается ножом, дифракционный пик СИ регистрируется детектором. Во время импульсного лазерного облучения измеряется изменение формы дифракционного пика.

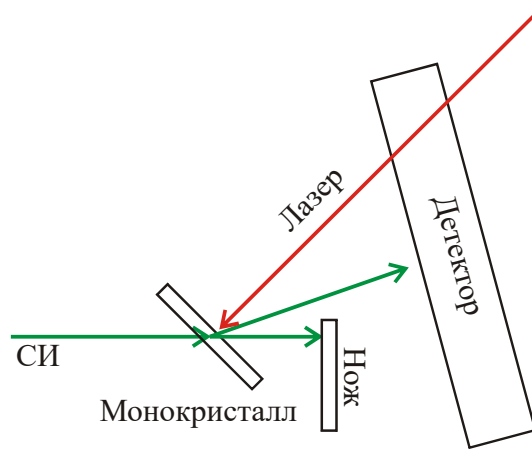


Рисунок 3. Схема эксперимента.

## Станция «ПЛАЗМА»

Для проведения измерений дифракции от кристаллических материалов при импульсном нагреве в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера (ИЯФ СО РАН) была разработана и введена в эксплуатацию станция рассеяния синхротронного излучения «ПЛАЗМА». Станция расположена на 8-м канале вывода пучка синхротронного излучения с коллайдера ВЭПП-4М.

Станция состоит из пяти основных узлов: 1) блок формирования пучка СИ; 2) вакуумная камера с держателем образца; 3) блок регистрации с однокоординатным рентгеновским детектором DIMEX; 4) лазер и его оптическая система и 5) оптические диагностики (см. рисунки 4 и 5).

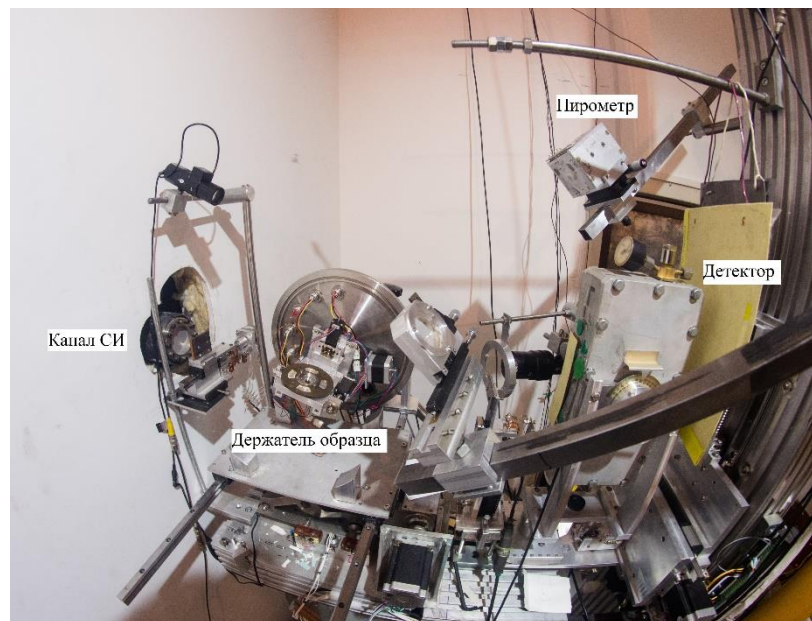


Рисунок 4. Внешний вид станции.

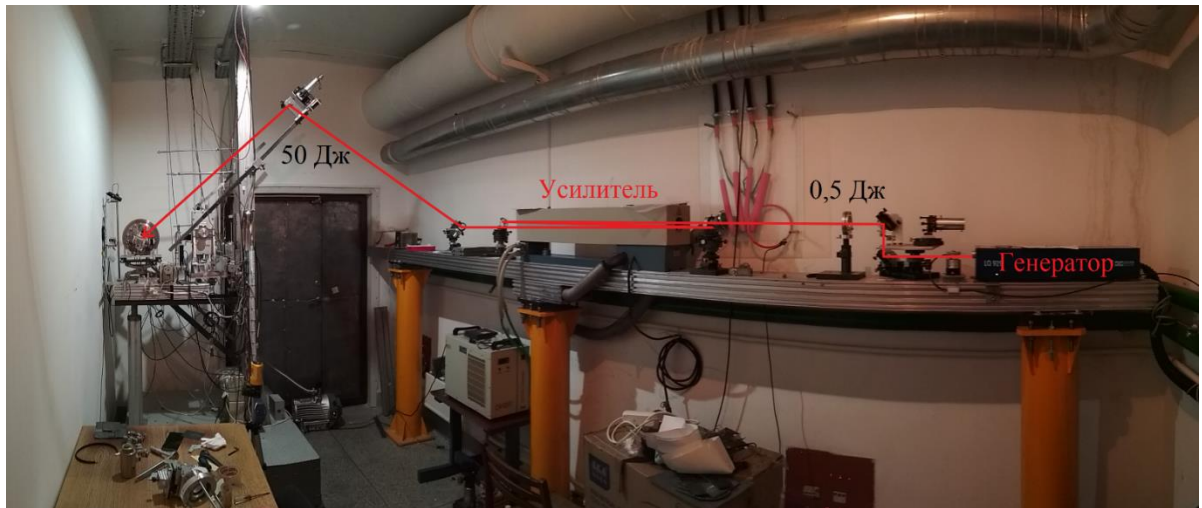


Рисунок 5. Импульсный лазер, усилитель и оптическая система.

### *Вакуумная камера с держателем образца*

Держатель образца фиксирует образец по периметру, что должно не позволять ему изгибаться при импульсном нагреве. Таким образом, должно подавляться паразитное смещение дифракционного пика при нагреве. Держатель образца оснащен пятью подвижками: 3 поступательные для позиционирования образца и 2 вращательные для вывода дифракционного пика в вертикальную плоскость и юстировки угла падения на кристаллическую плоскость (см. рисунок 6).

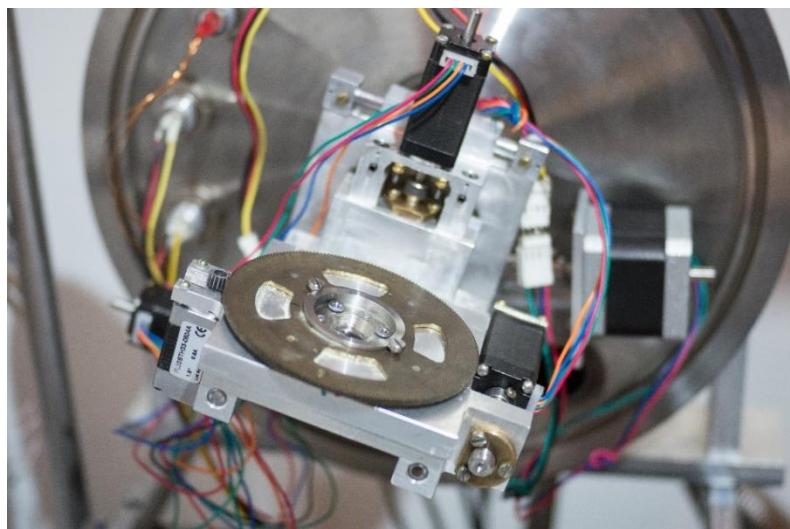


Рисунок 6. Держатель образца.

Во время импульсного нагрева держатель закрывается вакуумной камерой для предотвращения окисления поверхности (см. рисунок 7).

Основные характеристики вакуумной камеры:

- камера цилиндрическая, с боковыми круглыми фланцами;
- количество оптических портов – 10;
- два вертикальных порта для СИ;
- давление в камере – до 1Па;
- подстройка камеры по высоте.

Лазерное излучение вводится через диагностический порт 1. Пирометр смотрит на образец через симметричный порт 2. Порт 1 и порт 2 указаны на рисунке 7.

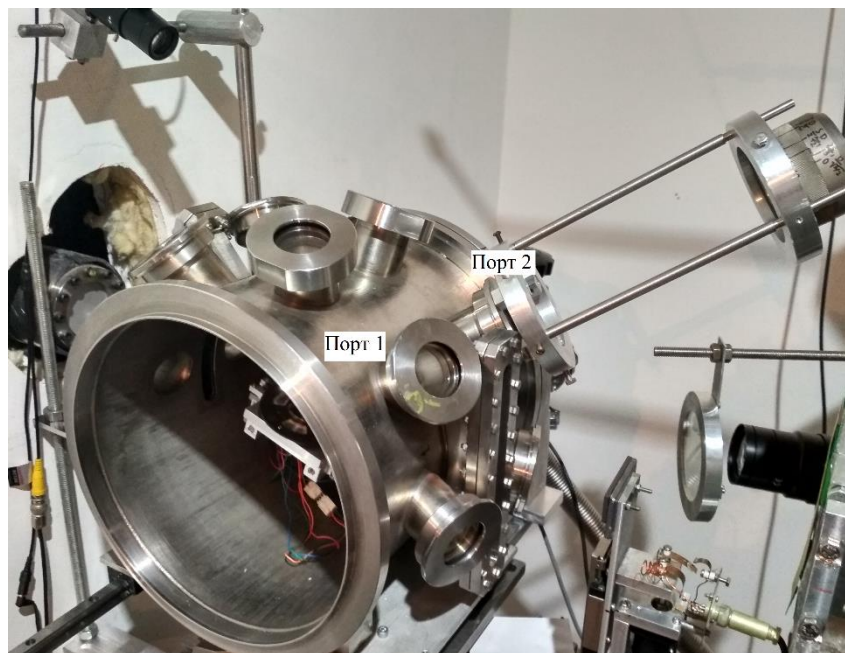


Рисунок 7. Вакуумная камера.

### *Детектор DIMEX*

Измерения дифрагированного СИ производится однокоординатным детектором DIMEX - G:

- ширина канала: 100 мкм;

- количество кадров: 100;
- используемое временное разрешение: 10 мкс.

### *Импульсный лазер*

Для нагрева образца на станции используется лазер Nd:YAG с длиной волны 1064нм в режиме свободной генерации и усилитель на основе ГОС-1000 со следующими параметрами:

- энергозапас импульса: 50Дж,
- длительность импульса: 140мкс,
- диаметр пятна на образце настраивается в диапазоне 1-100мм.

Внешний вид лазера и его оптической системы представлен на рисунке 5.

### *Оптические диагностики*

Для прицеливания инфракрасным лазером в образец используется камера SDU, которая снимает рассеянное на поверхности лазерное излучение (смотри рисунок 8). Для этого используется маломощный режим лазера, чтобы не повредить образец. По положению снятого пятна юстируется оптическая система доведения лазерного излучения до образца.

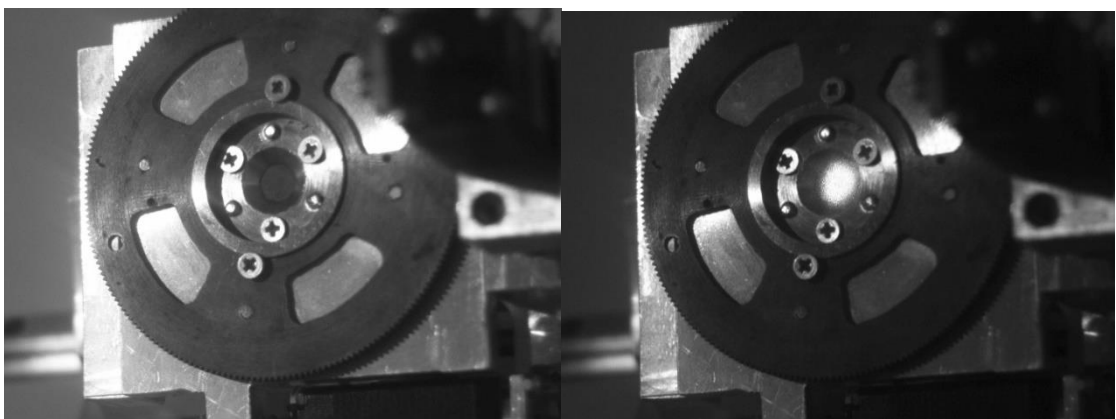


Рисунок 8. Держатель образца. Слева – изображение без рассеянного лазерного излучения, справа – с рассеянным лазерным излучением.





Рисунок 9. Пирометр на станции «ПЛАЗМА».

Для измерения зависимости от времени температуры нагреваемой поверхности образца разработан пирометр на основе инфракрасного фотодиода с трансимпедансным усилителем (рисунок 9). Измерения температуры поверхности необходимы для нормировки измерений деформации. Пирометр калибровался на вольфрамовой ленточной лампе.



## Результаты

Применение методики, описываемой в данной работе, требует анализа формы дифрактограмм, полученных при рассеянии полихроматического СИ на монокристалле. Поэтому для анализа экспериментальных данных нужно было калибровать чувствительность разных каналов детектора и чувствительность детектора к фотонам различной энергии. Измерение чувствительности детектора необходимо, так как при повороте атомной плоскости в кристалле, на которой происходит дифракция наблюдаемого дифракционного пика, по закону Брэгга-Вульфа меняется и энергия дифрагируемого излучения. Поэтому перед импульсной тепловой нагрузкой измерялись дифрактограммы при различных углах наклона образца (рисунок 10). На рисунке 10 чётко виден переход энергии дифрагируемого излучения через К-край поглощения вольфрама, при котором интенсивность резко изменяется. С другой стороны, интенсивность уменьшается и при уменьшении энергии из-за уменьшения дистанции поглощения в вольфраме. Именно эти ограничения определяют диапазон углов дифракции и энергии синхротронного излучения, которые можно использовать для измерений. Измеренные дифрактограммы далее становятся основой для используемых аппаратных функций для анализа формы дифракционного пика.

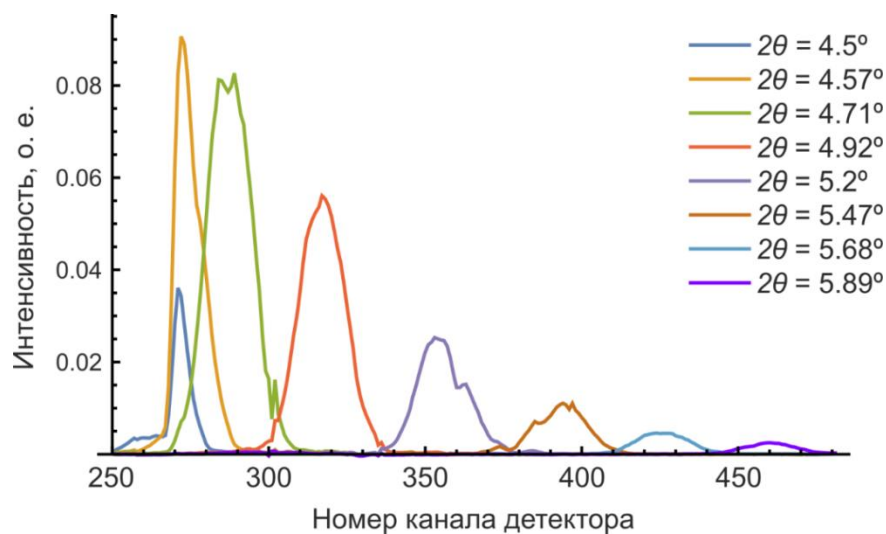


Рисунок 10. Дифрактограммы при различном угле наклона образца.

Результаты первых экспериментов по измерению динамики дифракции при импульсном нагреве на станции рассеяния синхротронного излучения «Плазма» подробно описаны в работе [14]. Главным отличием результатов данной работы, в отличие от [14], было использование более толстых вольфрамовых образцов (до 500 мкм вместо 200 мкм). Это стало возможным благодаря увеличению спектральной интенсивности излучения источника синхротронного излучения на 2 порядка после замены вигглера на комплексе ВЭПП-4. Увеличение толщины является принципиальным, так как при толщине 200 мкм образец прогревался на всю толщину за время облучения. При толщине 500 мкм температура задней стороны образца повышалась незначительно для существенной остаточной деформации. Поэтому угол рассеяния холодной стороной даже при наличии общего изгиба образца можно использовать в качестве реперной точки. Для измерения динамики дифракции на вольфрамовых монокристаллах во время импульсной тепловой нагрузки использовались два детектора: с газовым и кремниевым сенсором. Результаты первых экспериментов с газовым детектором рентгеновского излучения представлены на рисунке 11.

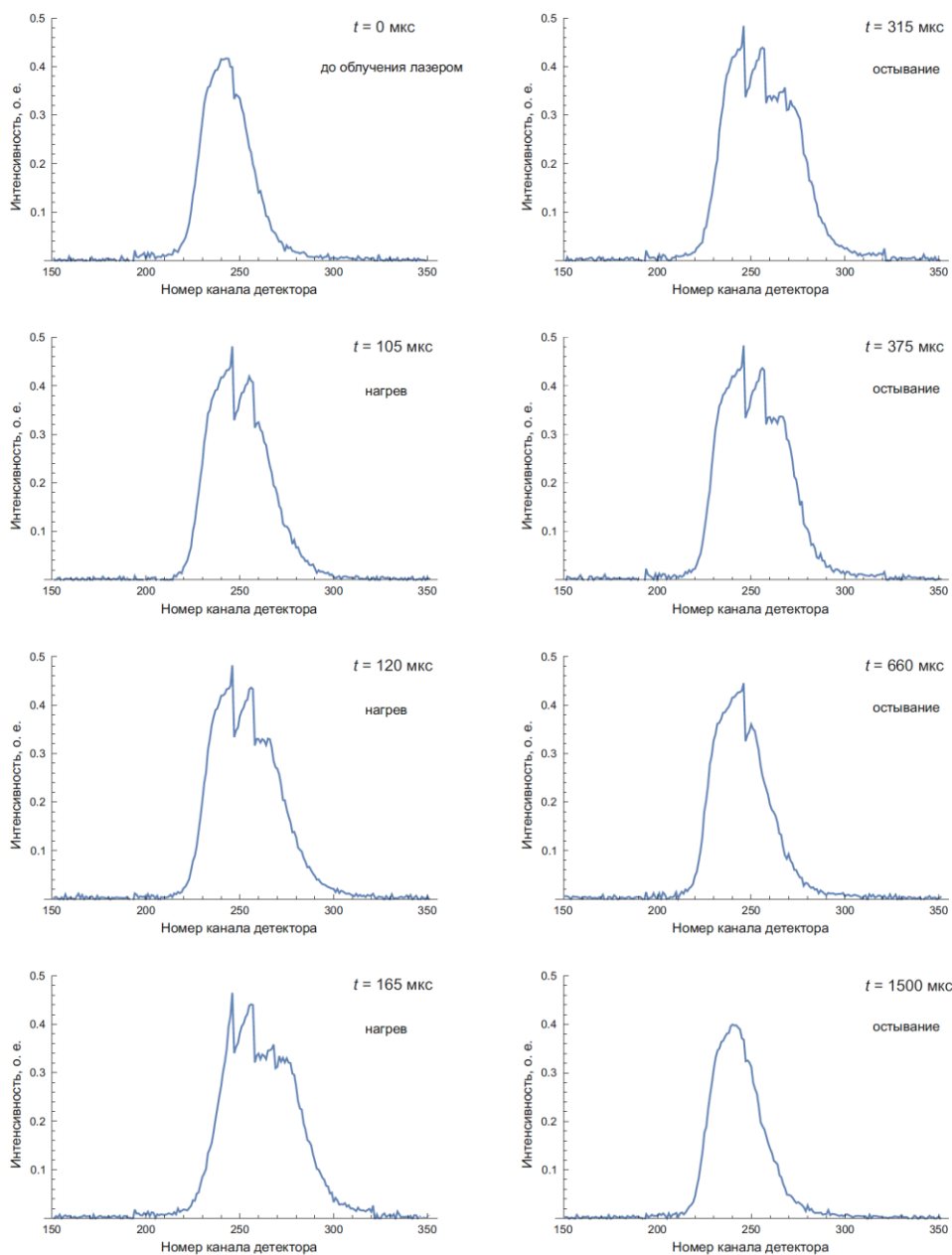


Рисунок 11. Дифрактограммы во время импульсного нагрева, полученные при использовании газового детектора.

Результаты измерений качественно согласуются с предсказанным поведением – уширение в сторону больших углов рассеяния за счёт изменения угла рассеяния в нагретых слоях материала. Однако из результатов измерения сразу видны две принципиальные проблемы, не позволяющие получить качественные данные о распределении деформаций и напряжений по глубине образца:

- Смещение дифракционного пика оказалось порядка ширины самого дифракционного пика, что осложняет интерпретацию результатов и уменьшает точность восстановления распределения по углам рассеяния и распределения деформаций и напряжений по глубине;
- Разрывы на измеренных дифрактограммах, связанные с различными паразитными сигналами на наборах каналов, измеряемых различными чипами.

Из-за данных проблем не было выполнено восстановление напряжений в случае динамики во время импульсного нагрева. Для решения обеих проблем был совершен переход на детектор рентгеновского излучения с кремниевым сенсором, первые испытания которого проводились в период выполнения данной работы. На рисунке 12 представлено сравнение дифрактограмм на необлучённом образце, полученных на разных детекторах. Ширина измеренного пика в разы меньше при измерении кремниевым детектором по двум причинам: уменьшенная диффузия зарядов в сенсоре, большая чувствительность детектора позволяет сильнее зажимать коллиматор.

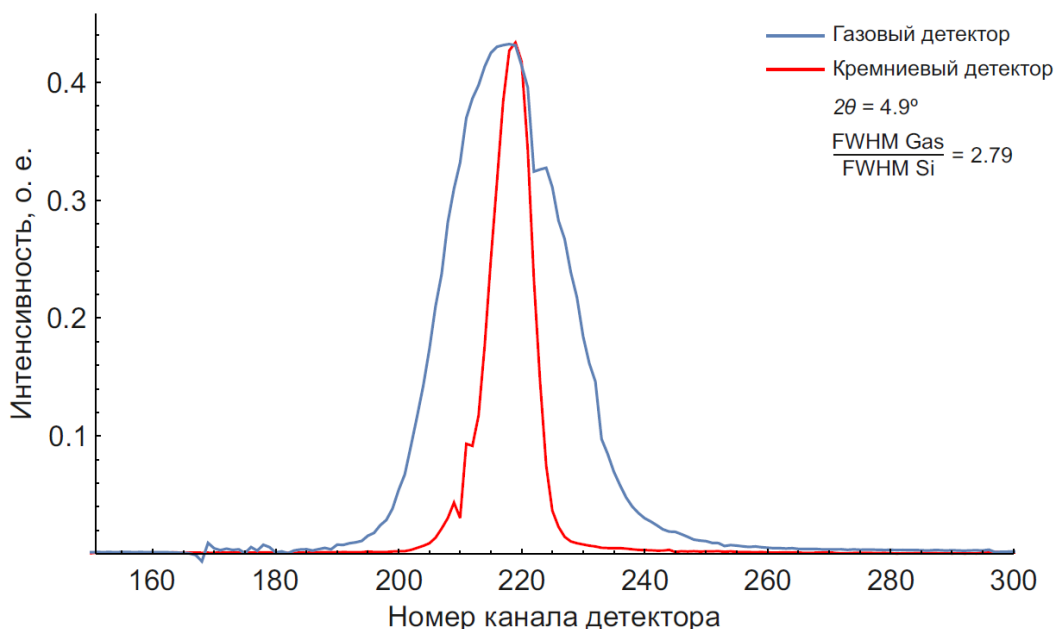


Рисунок 12. Сравнение дифрактограмм, измеренных газовым и кремниевым детектором.

В работе [14] было показано, что при одинаковых последовательных импульсных тепловых нагрузках достаточно малой длительности остаточная пластическая деформация возрастает. Однако этот результат был получен на образце толщиной всего 200 мкм, что сравнимо с глубиной прогрева во время импульсного нагрева. Поэтому основной наблюдавшийся эффект заключался в смещении дифракционного пика как целого и небольшом изменении формы (уширении). В данной работе представлены результаты экспериментов с образцом большей толщины (500 мкм). Из-за увеличения толщины противоположная сторона образца нагревалась слабо, и материал вёл себя аналогично поверхности толстого вольфрамового покрытия диверторных пластин в токамаке. Основным наблюдаемым эффектом было изменение формы дифракционного пика при слабом изменении положения левой границы дифракционного пика, соответствующее слабым остаточным деформациям и напряжениям на холодной стороне образца. На рисунке 13 представлена последовательность дифрактограмм, полученная с помощью газового детектора при многократном облучении.

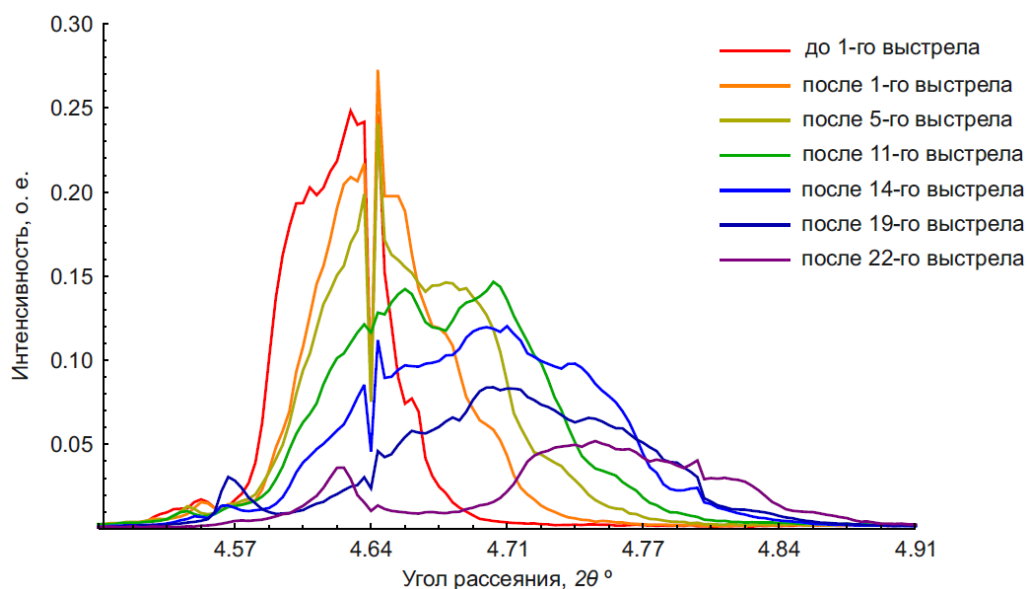


Рисунок 13. Измеренные статические дифрактограммы между импульсными нагревами.

Результаты измерения дифрактограмм при многократных импульсных тепловых нагрузках использовались для восстановления распределения деформаций и напряжений по глубине (рисунок 14). Наиболее значимые результаты были получены при восстановлении установившихся распределений деформаций и механических напряжений по глубине после нескольких последовательных импульсных тепловых нагрузок. Особенности обработки именно установившихся между импульсными нагревами дифрактограмм является, во-первых, возможность более точных измерений из-за отсутствия динамики, и, во-вторых, меньшее количество эффектов и зависимостей параметров от температуры, которые нужно учитывать. В установившихся состояниях между импульсными нагревами в плоском образце вдоль поверхности упругая и пластическая деформации строго компенсируют друг друга. Использование этого известного соотношения между упругой и пластической деформациями позволяет по изменению угла рассеяния восстановить локальную величину деформации и механических напряжений.

Выражение, описываемое формулой 14, связывает остаточное напряжение в слое и изменение угла рассеяния. Наблюдается постепенный рост остаточных напряжений в последовательных импульсных нагревах. Наибольшую погрешность при нахождении таких распределений вносит деконволюция. Планируется совершенствовать применяющиеся математические методы обработки данных. Также следует отметить, что ранее уже наблюдалось несколько меньшее превышение остаточными напряжениями после импульсного нагрева предела прочности в поликристаллическом вольфраме. Возможно, это связано с малой толщиной слоя с превышающими напряжениями.

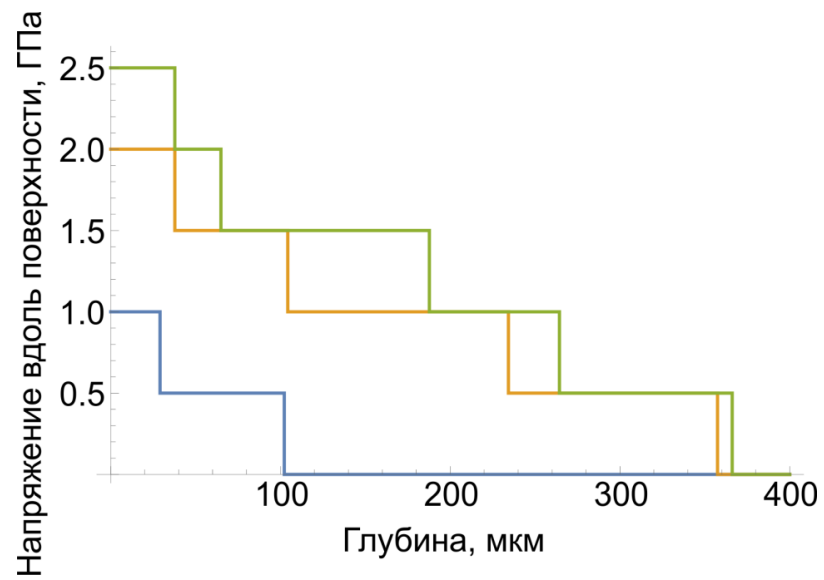


Рисунок 14. Вычисленные по экспериментальным данным распределения остаточных механических напряжений после последовательных импульсных нагревов.

## Заключение

В процессе выполнения данной работы были проведены измерения дифракции синхротронного излучения на монокристалле вольфрама при импульсной тепловой нагрузке на станции рассеяния СИ «ПЛАЗМА» на 8-м канале ВЭПП-4М. Результаты измерений динамики дифракционного пика во время одного цикла нагрева – остывания качественно согласуются с предсказанным поведением: уширение в сторону больших углов рассеяния за счёт изменения угла рассеяния в нагретых слоях материала. При этом была выявлена необходимость в использовании детектора рентгеновского излучения с кремниевым сенсором, для получения пригодных данных о распределении деформаций и напряжений по глубине образца. Из-за ограничений, вызванных использованием детектора рентгеновского излучения с газовым сенсором, провести расчеты напряжений и деформаций в образце во время импульсного нагрева не получилось. Результаты измерения дифрактограмм при многократных импульсных тепловых нагрузках использовались для восстановления распределения деформаций и напряжений по глубине. Наблюдался постепенный рост остаточных напряжений в последовательных импульсных нагревах.



**Список литературы**

- [1] Ongena, J., Koch, R., Wolf, R. et al. Erratum: Magnetic-confinement fusion. // *Nature Phys.* – 2016. – 12. – P.398–410.
- [2] Wagner, F. A quarter – century of H-mode studies. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2007. – 49. – B1–B33.
- [3] De Temmerman, G., Hirai, T. & Pitts, R. A. The influence of plasma – surface interaction on the performance of tungsten at the ITER divertor vertical targets // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2018. – 60. – 044018.
- [4] Linke, J., Akiba, M., Bolt, H. et al. Simulation of disruptions on coatings and bulk materials. // *J. Nucl. Mater.* – 1992. – Vol.196–198. – P.607–611.
- [5] Huber, A., Arakcheev, A., Sergienko, G., et al. Investigation of the impact of transient heat loads applied by laser irradiation on ITER-grade tungsten // *Phys. Scr.* – 2014. – T159. – 014005.
- [6] Loewenhoff, Th., Linke, J., et al. ITER – W Monoblocks under high pulse number transient heat loads at high temperature. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – Vol.463. – 202–205.
- [7] Arakcheev, A., Huber, A., et al. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – 463. – P.246–249.
- [8] Arakcheev, A., Skovorodin, D., et al. Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – 467. – P.165–171.
- [9] Panayotis, S., Hirai, T., et al. Self-castellation of tungsten monoblock under high heat flux loading and impact of material properties. // *Nucl. Mater. Energy.* – 2017. – Vol.12. – P.200–204.
- [10] Hirai, T., Panayotis, S., et al. Use of tungsten material for the ITER divertor. // *Nucl. Mater. Energy.* – 2016. – Vol.9. – P.616–622.

- [11] Arakcheev A., Ancharov A., et. al. Applications of synchrotron radiation scattering to studies of plasma facing components at Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Centre. // Phys. Procedia. – 2016. – 84. – P.184–188.
- [12] Makhraj V.A., Garkusha I.E., Malykhin S.V. et al. Residual stresses in tungsten underexposures with ITER ELM-like plasma loads // Phys. Scr. – 2009. – T138, 014060.
- [13] Anderson C. E., Brotzen F. R. Elastic Constants of Tantalum – Tungsten Alloys // J. Appl. Phys. – 1982. – v53. – №1. – 292–297.
- [14] A.S. Arakcheev et al. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load // J. Synchrotron Rad. – 2019. – 26.