

*На правах рукописи*

*Черп*

**Черепанов Дмитрий Евгеньевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ  
ТЕРМИЧЕСКИМИ УДАРАМИ МАТЕРИАЛОВ  
ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, доцент Вячеслав Леонид Николаевич

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Мазуль Игорь Всеволодович – доктор технических наук, Акционерное общество Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, главный научный сотрудник

Позняк Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, руководитель проекта

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Защита диссертации состоится «11» февраля 2025 г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «20» ноября 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН

Лотов Константин  
Владимирович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Термоядерные установки нового поколения – это научные проекты, среди целей которых получение энергии, в несколько раз превышающей потребляемую, с использованием реакции термоядерного синтеза (например, дейтерий-тритиевой реакции). Чтобы реакционная смесь достигла условий, необходимых для протекания реакции, ее разогревают до температур  $\sim 10^8$  К, и образуется квазинейтральная плазма. В качестве наиболее перспективной конфигурации термоядерного реактора рассматривается установка типа токамак, где плазма удерживается внутри тороидальной камеры с помощью магнитного поля.

Одной из проблем, возникающих в ходе создания термоядерных установок, является воздействие плазмы на обращенные к ней компоненты (первая стенка и защита дивертора). Защитный материал обращенных к плазме компонентов должен не только выдерживать интенсивный нагрев, но и воздействие генерируемых в результате протекания реакции нейтронов, а также оказывать минимальное влияние на удерживаемую плазму в случае эрозии. Взаимодействие плазмы с обращенными к ней материалами связано, в частности, с импульсным нагревом (поверхностная плотность мощности  $\sim 1 - 10$  ГВт/м<sup>2</sup>, длительность  $\sim 0.1 - 1$  мс).

Данная работа посвящена исследованию эрозии вследствие экстремального импульсного нагрева материалов, которые применяются или рассматриваются в качестве защиты обращенных к плазме компонентов. В настоящее время для изготовления наиболее теплонагруженных компонентов выбирается вольфрам. Даже при значительном смягчении интенсивности импульсного нагрева и поддержании температуры вольфрама ниже порога плавления, ожидается растрескивание обращенной к плазме поверхности вследствие хрупко-вязкой деформации тонкого приповерхностного слоя и накопления остаточных механических напряжений. Растрескивание опасно тем, что снижает устойчивость металла к последующей нагрузке, приводя к более серьезному повреждению поверхности.

Для новых поколений термоядерных установок не прекращаются поиски альтернативных обращенных к плазме материалов. Перспективной идеей является предложение об использовании высокотемпературных керамик. Среди преимуществ керамик можно отметить высокую устойчивость к тепловой нагрузке и возможность получения составов с малым зарядовым числом  $Z$ . Недостатки – хрупкость, образование дефектов и существенная деградация теплопроводности из-за облучения нейтронами, а также возможный высокий коэффициент удержания трития.

В рамках данной работы на установке БЕТА в ИЯФ СО РАН была разработана и запущена система диагностики, позволяющая регистрировать динамику изгиба вольфрамовой пластины. Использование данной

системы вкупе с диагностическими системами БЕТА по наблюдению за температурой и модификацией нагреваемой поверхности позволило экспериментально зарегистрировать процесс тепловой деформации металла в результате импульсного нагрева, а также описать динамику напряжений в образце. В ходе выполнения работы было также проведено исследование повреждения поверхности карбида бора ( $B_4C$ ) в результате импульсного нагрева. Для этого была отработана *in situ* методика, позволяющая отслеживать процесс повреждения поверхности образца. Эксперименты помогли описать физику повреждения поверхности керамики вследствие импульсного нагрева. С использованием отработанной методики были дополнительно проведены испытания карбида кремния, который имеет более высокую теплопроводность по сравнению с карбидом бора.

### **Степень разработанности темы исследований**

На данный момент нет единого мнения относительно выбора материального состава вакуумной камеры токамаков. Большинство перспективных на роль обращенных к плазме материалов требуют изучения в условиях, ожидаемых в термоядерном реакторе. В частности, в условиях наиболее разрушительного импульсного нагрева с параметрами, характерными современным токамакам и термоядерным установкам нового поколения.

Исследование эрозии материалов в результате импульсной тепловой нагрузки является одной из важнейших задач физики плазмы. Поэтому **актуальность** исследований, результаты которых представлены в диссертации, можно считать обоснованной. Результаты работы, полученные в ходе экспериментальных исследований процессов эрозии вольфрама и керамики при импульсном нагреве, послужат надежным фундаментом для развития экспериментальных методов диагностики повреждения материалов, а также помогут в выборе наиболее удачного материального состава токамаков нового поколения.

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование процессов эрозии поверхности перспективных в качестве защиты обращенных к плазме компонентов материалов в результате термического удара с использованием методов *in situ* диагностики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Создание бесконтактной неразрушающей диагностики остаточных механических напряжений вольфрамовой пластины, подвергаемой интенсивным термическим ударам. Для этого требовалось разработать систему отслеживания динамики изгиба вольфрамовой пластины как во время ее импульсного нагрева, так и после его окончания.
2. Проведение экспериментов по облучению вольфрамовых пластин с последующими обработкой и анализом полученных *in situ* данных

относительно динамики изгиба пластин, температуры облучаемой поверхности и параметров импульсного нагрева.

3. Настройка системы диагностики для отслеживания динамики эрозии облучаемой поверхности образцов из высокотемпературной керамики для работы в условиях лазерного нагрева.
4. Проведение экспериментов по облучению образцов из высокотемпературной керамики с последующими обработкой и анализом полученных *in situ* данных относительно динамики эрозии, температуры облучаемой поверхности и параметров импульсного нагрева с целью определения критических параметров нагрева.
5. Проведение *post mortem* анализа с использованием сканирующего электронного микроскопа, а также профилометра до и после облучения образцов.

#### **Научная новизна:**

1. Была предложена оригинальная методика оценки остаточных механических напряжений в приповерхностной области вольфрамовой пластины по её изгибу во время импульсного нагрева ее поверхности. Продемонстрировано теоретически ожидаемое поведение пластины во время ее нагрева до температуры, превышающей температуру хрупко-вязкого перехода.
2. Была применена оригинальная методика мониторинга процесса эрозии поверхности керамики в ходе нагрева импульсным лазером. Впервые была экспериментально продемонстрирована динамика эрозии поверхности керамики во время импульсного нагрева, а также были определены критические параметры нагрева, при достижении которых начинается процесс эрозии.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Экспериментальные результаты, описывающие динамику деформации вольфрама при импульсном нагреве, имеют высокую фундаментальную значимость. Данные, полученные с использованием разработанной в ходе выполнения работы системы диагностики изгиба вольфрамовых пластин, позволяют экспериментально описать процесс деформации хрупко-пластичного материала во время нагрева выше температуры хрупко-вязкого перехода. Показанная в работе взаимосвязь между кривизной и температурой поверхности металла дает возможность судить о величине остаточных напряжений, возникающих при пластической деформации прогреваемого слоя и приводящих к растрескиванию облучаемой поверхности.

Работа по испытанию высокотемпературных керамик термическими ударами также имеет фундаментальную значимость и представляет интерес для ряда практических приложений. Данные, полученные с использованием созданного в ходе выполнения работы экспериментального стенда, позволили описать процесс эрозии поверхности керамик вследствие

импульсного нагрева. Кроме того, полученные в ходе экспериментов данные позволили охарактеризовать предельные параметры нагрева керамик при импульсном тепловом воздействии на поверхность. Таким образом, результат помогает сделать вывод о возможности применения высокотемпературных керамик для изготовления обращенных к плазме компонентов термоядерных установок с точки зрения их устойчивости к импульсному нагреву.

### **Методология и методы исследования**

Моделирование импульсного нагрева производилось с использованием электронного пучка в ходе экспериментов с вольфрамом и с помощью инфракрасного лазера во время работы с керамикой. Оба способа нагрева позволяют добиться тепловых потоков, ожидаемых во время переходных плазменных процессов при работе токамака ИТЭР. Основным преимуществом использованного подхода к моделированию нагрева является возможность применения *in situ* диагностических систем с целью анализа состояния образцов. Для определения температуры поверхности испытываемых образцов были реализованы диагностические системы, основанные на принципах пирометрии: температура определялась по регистрируемому тепловому излучению. Диагностика изгиба вольфрамовых образцов проводилась путем отслеживания изменения угла расходимости отражаемого от поверхности, обратной к нагреваемой, лазерного излучения. Анализ эрозии керамики проводился с использованием техники лазерного рассеяния: отслеживалось изменение распределения диффузно рассеиваемого облучаемой поверхностью образца лазерного излучения. Для анализа поверхности образцов после облучения использовались сканирующий электронный микроскоп, а также оптический профилометр.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Оптическая диагностическая система, основанная на мониторинге отраженного от поверхности обратной стороны тестовой вольфрамовой пластины лазерного излучения, позволяет дистанционно отслеживать динамику кривизны этой поверхности вплоть до величин порядка  $1 \text{ м}^{-1}$  с точностью до  $\pm 12(0.95)\%$  при импульсном нагреве лицевой части пластины (длительность  $\sim 0.1 - 1 \text{ мс}$ ).
2. Метод анализа механических напряжений с использованием теоретической модели и экспериментальных данных относительно остаточной кривизны и температуры ее поверхности, определяемых с точностью до  $\pm 12(0.95)\%$  и  $\pm 5(0.95)\%$ , соответственно, позволяет оценить величину остаточных напряжений, возникающих в вольфрамовой пластине после импульсного нагрева с длительностью  $\sim 0.1 - 1 \text{ мс}$ .
3. Экспериментальный стенд на основе импульсного лазера, создающего условия термического удара на поверхности керамических образцов, и оптических диагностик, измеряющих временной ход

мощности излучения, динамику повреждения и температуры поверхности, позволяет определять пороги повреждения высокотемпературных керамик.

4. Методика мониторинга эрозии поверхности высокотемпературных керамик, основанная на принципах лазерного рассеяния, позволяет определить предельные параметры импульсного нагрева (длительность  $\sim 0.1 - 1$  мс), которые способен выдержать до начала эрозии находящийся при комнатной базовой температуре горячепрессованный карбид бора (максимальная температура  $1310 \pm 80(0.95)$  К, максимальный параметр потока тепла  $10 \pm 0.7(0.95)$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0.5</sup>). Значение максимальной температуры согласуется с теоретической оценкой.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН, многократно докладывались на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН, а также представлялись на 6 международных и 3 всероссийских конференциях: 17th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (Эйнховен, Нидерланды, 2019); XLVII Международная Звенигородская Конференция по Физике Плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2020); 18th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (Юлих, Германия, 2021); 14th Carolus Magnus Summer School on Plasma and Fusion Energy Physics (Юлих, Германия, 2021); 25th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (Чеджу, Южная Корея, 2022); 2nd International Fusion and Plasma Conference & 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Пусан, Южная Корея, 2023); 53-я Школа ПИЯФ НИЦ КИ по физике конденсированного состояния (Санкт-Петербург, Россия, 2019); 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, Россия, 2021); XX Всероссийская конференция – Диагностика Высокотемпературной Плазмы (Сочи, Россия, 2023).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 печатных и электронных изданиях, из них 3 [1-3] изданы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

**Личный вклад.** Результаты работы, представленные в положениях, получены автором лично. Автор диссертации разработал, реализовал и настроил *in situ* систему диагностики изгиба вольфрамовых пластин, участвовал в калибровке пирометрической системы диагностики на установке БЕТА, произвел настройку инфракрасного лазера для моделирования импульсного нагрева поверхности высокотемпературной керамики, участвовал в наладке пирометрической системы диагностики на лазерном стенде, а также реализовал и настроил систему диагностики диффузно рассеиваемого лазерного излучения на экспериментальном стенде по

исследованию эрозии керамики. Автор принимал активное участие в экспериментах по изучению пластической деформации и растрескивания вольфрама в результате импульсного нагрева электронным пучком. Автор проводил экспериментальную работу по изучению эрозии карбида бора и, дополнительно, карбида кремния в ходе импульсного нагрева лазером. В постановке задач и обсуждении результатов исследований принимал активное участие научный руководитель Вячеслав Леонид Николаевич. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведенный во введении, содержит 3 работы. Личный вклад автора в материалах статьи [1] заключается в проведении экспериментов, обработке данных и описании экспериментально зарегистрированного процесса хрупко-пластичной деформации вольфрама во время импульсного нагрева. В статье продемонстрированы не только причины растрескивания вольфрама вследствие импульсного нагрева, но и предлагается неразрушающий бесконтактный *in situ* метод диагностики остаточных механических напряжений. Авторский вклад соискателя в статье [2] состоит в проведении экспериментов по изучению эрозии горячепрессованного карбида бора во время импульсного нагрева, исследовании поверхности образца после облучения, обработке экспериментальных данных и описании экспериментально зарегистрированного процесса эрозии при быстром нагреве до температур ниже порога плавления. Важнейшим выводом данной работы является характеристика предельной тепловой нагрузки, которую способен выдержать горячепрессованный карбид бора во время импульсного нагрева без потери вещества вследствие эрозии. Вклад в материалы статьи [3] заключается в проведении экспериментальной работы по испытанию образцов в виде вольфрамовых пластин с покрытиями из карбида бора, нанесенными разными методами. Образцы облучались на лазерном стенде и исследовались с использованием сканирующего электронного микроскопа, затем проводился анализ данных. Соискателем была выполнена вся эта работа и сделаны выводы относительно устойчивости образцов термическим ударам, ожидаемым в диверторной зоне токамака ИТЭР.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 142 страницы, включая 74 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 119 наименований.

## **Основное содержание работы**

Во **введении** приведено обсуждение проблемы выбора обращенных к плазме материалов термоядерных установок. Показана научная значимость исследований повреждения материалов вследствие импульсного нагрева, возможного в ходе магнитного удержания плазмы. На основании анализа научной литературы касательно проблемы взаимодействия



плазма-поверхность обоснована актуальность исследований, были сформулированы цели, задачи и методы исследований.

**Первая глава** посвящена описанию установки БЕТА, реализованных на ней *in situ* диагностических систем и процесса обработки данных. На данной установке проводились эксперименты по изучению деформации вольфрамовых пластин в результате импульсного нагрева одной из поверхностей. Основное внимание уделено описанию системы диагностики, разработанной для регистрации динамики изгиба вольфрамовых пластин.

На рисунке 1 показаны вертикальное и горизонтальное сечения установки БЕТА с ходом лучей оптических диагностических систем. Установка снабжена пирометрической системой диагностики (рисунок 1а) для отслеживания температуры облучаемой поверхности образцов. С целью *in situ* регистрации модификации облучаемой поверхности на установке собрана система диагностики диффузно рассеиваемого ею лазерного излучения с длиной волны 532 нм (рисунок 1б).

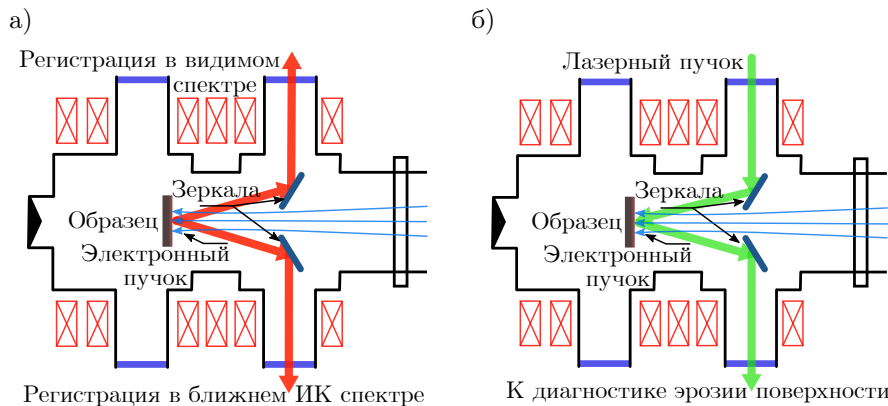


Рисунок 1 — Ход лучей в установке систем диагностики: а) температуры облучаемой поверхности образца; б) эрозии той же поверхности

Рисунок 2 демонстрирует принципиальную схему системы диагностики, позволяющей отслеживать динамику изгиба образца в виде вольфрамовой пластины по изменению точки фокусировки лазерного излучения, отражаемого от полированной поверхности пластины, обратной к облучаемой. Данная система диагностики была разработана с целью экспериментального изучения процесса хрупко-вязкой деформации вольфрама в результате импульсного нагрева. Расчет кривизны поверхности образцов производился в парааксиальном приближении геометрической оптики по изменению уровня сигнала, регистрируемого фотодетектором, к которому ведет световод, и исходя из характерного поперечного размера лазерного пучка, регистрируемого камерой на основе ПЗС-матрицы. Первый способ имеет высокое временное разрешение и позволяет зарегистрировать детали поведения образца во время нагрева и на стадии остывания. Однако

такой подход чувствителен к сдвигу лазерного пучка вследствие колебаний образца в мишенедержателе, а также неточности позиционирования электронного пучка. Способ определения кривизны с использованием камеры позволяет отследить поведение образца с меньшим временным разрешением (частота съемки  $\sim 1$  Гц), но и с меньшей зависимостью результата от сдвига лазерного пучка. Относительная систематическая ошибка определения кривизны поверхности образцов составляет  $\pm 1.3\%$ .

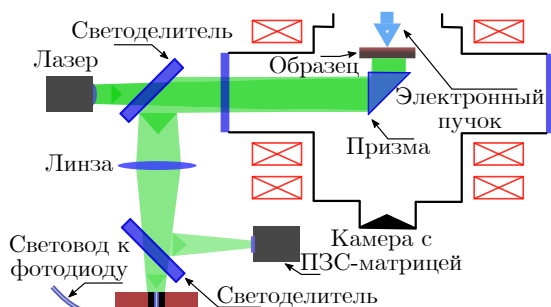


Рисунок 2 — Схема системы диагностики для изучения изгиба образца, подвергающегося импульсному тепловому воздействию

**Вторая глава** посвящена описанию результатов, полученных во время экспериментов по исследованию деформации вольфрама в ходе импульсного нагрева, возможного во время магнитного удержания плазмы в токамаке. Основные этапы процесса деформации тонкой вольфрамовой пластины в случае импульсного нагрева поверхности до температуры выше порога хрупко-вязкого перехода ( $\gtrsim 400$  °С) показаны на рисунке 3. На стадии нагрева происходит изгиб пластины в сторону источника тепла. Так как тонкий прогреваемый слой деформируется пластически, то он приобретает новую форму: становится эффективно толще и уже. Это приводит к тому, что в ходе остывания, сжимаясь, он заставляет пластину изгибаться в обратную сторону. Большая часть пластины не прогревается до температуры хрупко-вязкого перехода, деформируясь упруго, и после остывания стремится вернуться в исходное (плоское) состояние. В нагретом ранее слое возникают остаточные растягивающие напряжения. Если эти напряжения достигнут предела прочности вольфрама на растяжение, то произойдет растрескивание нагретой ранее поверхности. Растрескивание частично снимает остаточные напряжения и уменьшает остаточный изгиб.



Рисунок 3 — Динамика деформации вольфрамовой пластины в случае импульсного нагрева ее поверхности

Процесс деформации вольфрамовой пластины во время импульсного нагрева был экспериментально зарегистрирован с использованием системы диагностики для отслеживания изгиба, описанной в первой главе. На рисунке 4 продемонстрирован результат нагрева электронным пучком установки БЕТА длительностью 0.7 мс вольфрамовой пластины с размерами  $25 \times 25 \times 4$  мм. Хорошо видно, что зарегистрированная динамика изгиба пластины полностью соответствует качественным ожиданиям.

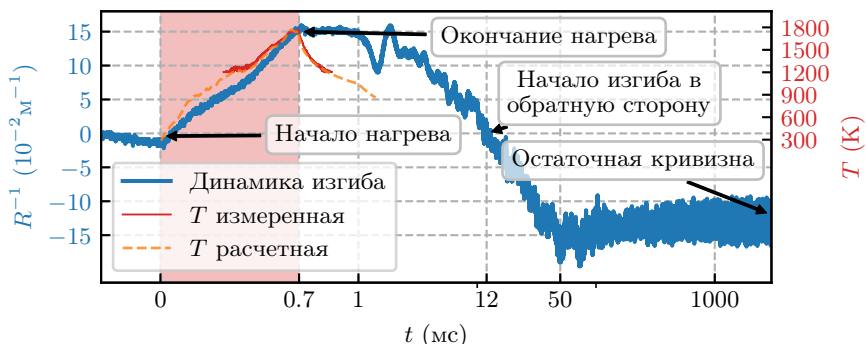


Рисунок 4 — Зависимости от времени  $t$  кривизны поверхности пластины, обратной к облучаемой,  $R^{-1}$  (синяя линия, шкала слева), температуры облучаемой поверхности  $T$ , измеренной во время эксперимента (сплошная красная линия, шкала справа), а также рассчитанной из токовых измерений (пунктирная оранжевая линия, расчет предоставлен Поповым В. А.). Логарифмический масштаб по времени для  $t > 1$  мс

Далее рассмотрим, как информация об изгибе поможет оценить остаточные напряжения, возникающие в результате пластической деформации вольфрама. Для описания процесса тепловой деформации вольфрамовых пластин Аракчеевым А.С. была разработана теоретическая модель. Сравнение остаточной кривизны, полученной в случае облучения вольфрамовой пластины несколькими импульсами со ступенчатым ростом тепловой нагрузки и одинаковой длительностью импульсов, со значениями, рассчитанными с использованием модели, показано на рисунке 5. Видно, что результат расчета с использованием модели хорошо согласуется с экспериментальными данными. В результате растрескивания, как и ожидалось, остаточный изгиб уменьшается. Кроме того, можно заметить, что значения остаточной кривизны группируются в соответствии с максимальной температурой, достигаемой за импульс. То есть данная величина коррелирует с поверхностной плотностью мощности нагрева. Если детально рассмотреть экспериментальные и смоделированные точки на рисунке 5, выделенные красными овалами, то можно отметить, что при одинаковых максимальных температурах величины остаточной кривизны

близки. В процессе моделирования выделенной точки на графике было обнаружено, что величина остаточных напряжений в центральной области пластины, как показано на рисунке 6, превосходит порог прочности вольфрама на растяжение ( $\sim 1$  ГПа). После повышения нагрузки произошло растрескивание облучаемой поверхности пластины. Это косвенно показывает возможность использования разработанной диагностической системы, работающей вкпе с теоретической моделью, для оценки остаточных механических напряжений, возникающих в металле вследствие тепловых нагрузок *in situ*. А оценка величины остаточных напряжений поможет понять, насколько образец близок к растрескиванию.

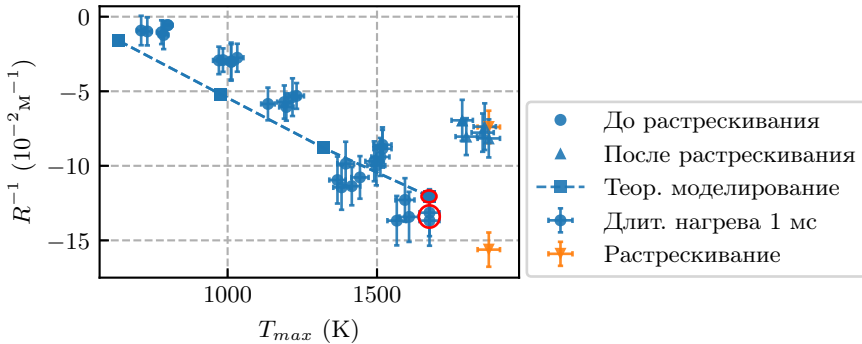


Рисунок 5 — Зависимости остаточной кривизны пластины  $R^{-1}$  от максимальной температуры  $T_{max}$ , полученные в ходе экспериментов и теоретического моделирования, для образца с размерами  $25 \times 25 \times 4$  мм<sup>3</sup>

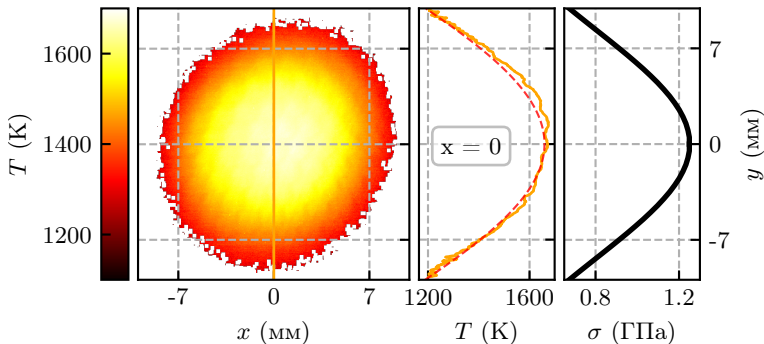


Рисунок 6 — Экспериментально зарегистрированное распределение температуры  $T$  по поверхности вольфрамовой пластины в конце нагрева для круглых точек из рисунка 5, выделенных красным овалом (слева и по центру), а также распределение остаточных напряжений  $\sigma$ , полученное в ходе моделирования (справа)

**Третья глава** посвящена описанию экспериментального стенда, разработанного с целью исследования устойчивости высокотемпературной керамики импульсному нагреву, возможному в ходе магнитного удержания плазмы в термоядерной установке. Моделирование нагрева производилось с использованием импульсного лазера ГОС-1001, позволяющего генерировать излучение с длиной волны 1.06 мкм импульсами длительностью 0.6 – 0.8 мкс с полной энергией до 200 Дж. Это позволяет с использованием линзы и рассеивателя добиваться поверхностной плотности мощности нагрева до  $10 \text{ ГВт/м}^2$ .

Стенд был снабжен системами диагностики для регистрации температуры облучаемой поверхности образцов, динамики ее эрозии, а также для определения плотности мощности нагрева (рисунок 7). На рисунке 7а показана принципиальная схема системы диагностики для регистрации теплового излучения облучаемой поверхности образца, созданной с целью определения температуры ее нагрева  $T$ , а также расположение ИК детектора, регистрирующего мощность излучения импульсного лазера. Данная система диагностики позволяет определять температуру  $T$  с точностью до  $\pm 5\%$ , и поверхностную плотность мощности нагрева  $W_s$  с точностью до  $\pm 6\%$ . Система диагностики теплового излучения защищена от инфракрасного излучения лазера ГОС-1001 с помощью узкополосного интерференционного фильтра-пробки, не пропускающего излучение с длиной волны 1.06 мкм, а также поглощающим оптическим фильтром.

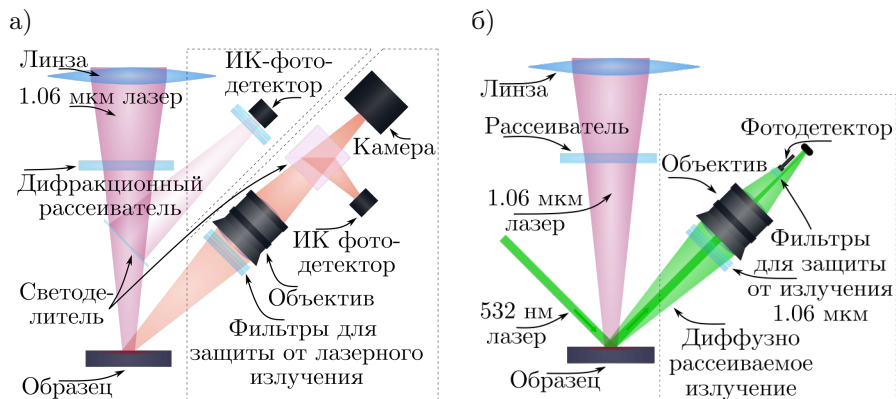


Рисунок 7 — Принципиальные схемы диагностических систем лазерного стенда: а) система диагностики теплового излучения поверхности образца и поверхностной плотности мощности ее нагрева; б) *in situ* система диагностики динамики повреждения облучаемой поверхности образца

Дифракционный рассеиватель, расположение которого указано на рисунке 7а, установлен с целью создания равномерного нагрева поверхности

внутри квадратного участка. Сделано это для упрощения пространственного профиля нагрева, чтобы было легче интерпретировать результаты экспериментов с использованием теоретических моделей. Линза необходима для увеличения поверхностной плотности мощности нагрева.

С целью *in situ* исследования эрозии образцов была собрана система диагностики для регистрации динамики диффузно рассеиваемого излучения зеленого лазера (длина волны  $\lambda = 532$  нм). Схема данной системы представлена на рисунке 7б. Во время эрозии поверхности происходит изменение ее шероховатости. Изменение шероховатости приводит к изменению углового распределения диффузно рассеиваемого поверхностью излучения. Таким образом, регистрируя изменение углового распределения рассеиваемого излучения, можно определить момент начала эрозии на поверхности образца. Данная система диагностики снабжена оптическими фильтрами для защиты от излучения инфракрасного лазера. Вблизи рабочей поверхности фотодетектора расположен узкополосный интерференционный фильтр, пропускающий излучение с длиной волны 532 нм.

В четвертой главе приводится обсуждение результатов испытаний высокотемпературной керамики импульсным нагревом. При импульсном нагреве поверхности горячепрессованного карбида бора ( $B_4C$ ) до температуры ниже порога плавления/декомпозиции было обнаружено образование кратеров вследствие отделения небольших объемов вещества (рисунок 8). Понятно, что такой процесс нежелателен в случае использования данной керамики в качестве обращенного к плазме материала, так как он может явиться причиной засорения плазмы. Таким образом, было решено провести работу по исследованию критических параметров импульсного нагрева, при достижении которых протекает наблюдаемый процесс.

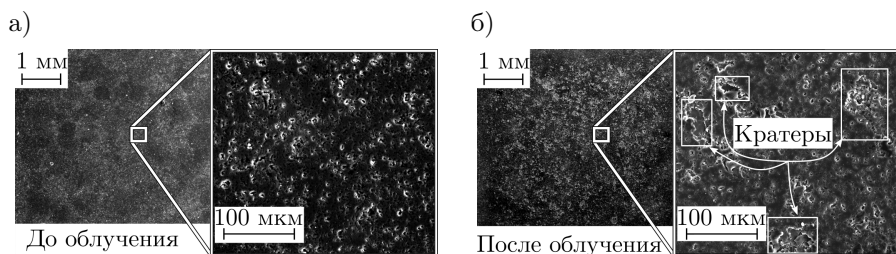


Рисунок 8 — СЭМ-изображения поверхности  $B_4C$  до и после импульсного нагрева лазером: а) до облучения; б) после облучения

Во время импульсного нагрева поверхности керамики происходит тепловое расширение прогреваемого объема вещества. Расширение происходит свободно в поперечном относительно плоскости поверхности направлении, в то время как в продольном возникают сжимающие напряжения.

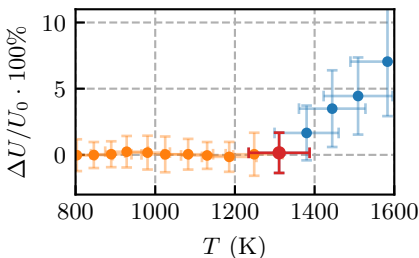
В таком случае повреждение керамики будет происходить по принципиально похожему механизму, как при двухстороннем сжатии. Когда величина сжимающих напряжений достигнет предела двухстороннего сжатия, произойдет зарождение трещин и выкрашивание керамики. Температуру нагрева поверхности, при достижении которой ожидается протекание такого процесса, можно оценить следующим образом:

$$T_{max} = T_0 + \frac{1 - \sigma}{\alpha \cdot E} \cdot \sigma_{max}, \quad (1)$$

где  $T_0$  – базовая температура,  $E$  – модуль Юнга,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона,  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения,  $\sigma_{max}$  – предел двухстороннего сжатия. Для горячепрессованного карбида бора  $T_{max} \approx 1200 - 1500$  К. Оценка сделана Поповым В.А. для случаев импульсного нагрева, когда глубина прогрева много меньше поперечного размера прогреваемой площади и размеров образцов вдоль каждой оси. Данная оценка требует проверки, поэтому на базе описанного в третьей главе экспериментального стенда было решено провести работу по определению температуры, при достижении которой начинается процесс выкрашивания.

В ходе экспериментов с  $V_4C$  было обнаружено, что изменение углового распределения диффузно рассеиваемого излучения начинается при импульсном нагреве до температуры  $T \approx 1310 \pm 80(0.95)$  К. Зависимость относительного изменения сигнала  $\Delta U/U_0$ , регистрирующего диффузно рассеиваемое излучение непрерывного лазера на длине волны 532 нм, от температуры  $T$  приведена на рисунке 9а. Полученный результат согласуется с теоретической оценкой, приведенной выше.

а)



б)

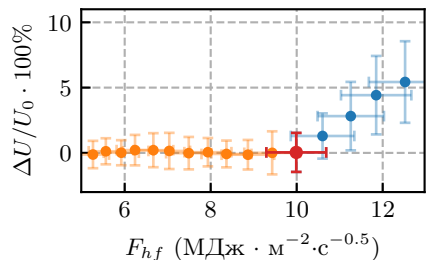


Рисунок 9 – Полученные в ходе 10 экспериментов данные для определения пороговых параметров нагрева поверхности  $V_4C$  до начала эрозии: а) зависимость относительного изменения сигнала системы диагностики рассеиваемого излучения  $\Delta U/U_0$  от температуры поверхности  $T$ ; б) зависимость  $\Delta U/U_0$  от параметра потока тепла  $F_{hf}$

Для возможности сравнения устойчивости к импульсному нагреву рассматриваемой керамики с другими материалами был определен параметр потока тепла  $F_{hf}$ , при достижении которого во время импульсного нагрева поверхность образца разогревается до критических температур. Данная величина определяется из поверхностной плотности мощности импульсного нагрева  $W_s$  с длительностью  $t$  следующим образом:  $F_{hf}(t) = \int_0^t \frac{W_s(t-t')}{2\sqrt{t'}} dt'$ . В случае постоянной по времени поверхностной плотности мощности нагрева  $F_{hf} = W_s \cdot \sqrt{t}$ . График зависимости  $\Delta U/U_0$  от  $F_{hf}$  показан на рисунке 9б, откуда видно, что повреждение поверхности  $V_4C$  начинается при  $F_{hf} \approx 10 \pm 0.7(0.95)$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0.5</sup>.

Абсолютно аналогичным образом были дополнительно определены температура  $T$  и параметр потока тепла  $F_{hf}$  начала эрозии горячепрессованного карбида кремния (SiC). Соответствующие зависимости приведены на рисунке 10. Выкрашивание карбида кремния вследствие термического удара начинается при нагреве поверхности до  $T \approx 1320 \pm 80(0.95)$  К с  $F_{hf} \approx 23.9 \pm 1.6(0.95)$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0.5</sup>. Оценка по формуле 1 дает результат  $T_{max} \approx 1300 - 1700$  К, что согласуется с экспериментальными данными.

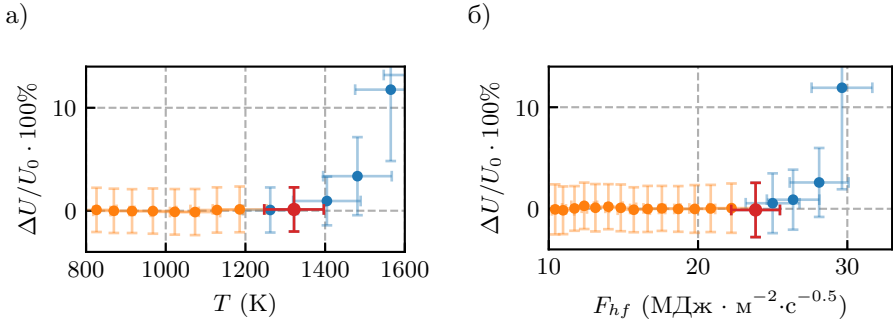


Рисунок 10 — Полученные в ходе 5 экспериментов данные для определения пороговых параметров нагрева поверхности SiC до начала эрозии: а) зависимость относительного изменения сигнала системы диагностики рассеиваемого излучения  $\Delta U/U_0$  от температуры поверхности  $T$ ; б) зависимость  $\Delta U/U_0$  от параметра потока тепла  $F_{hf}$

Знание величин параметра потока тепла  $F_{hf}$ , при достижении которых во время импульсного нагрева керамик начинается процесс выкрашивания, позволяют провести сравнение их устойчивости с другими материалами. На рисунке 11, наряду с  $F_{hf}$  выкрашивания керамик, показаны значения  $F_{hf}$ , при достижении которых происходит растрескивание вольфрама и бериллия, определенные различными научными группами. Рассмотренные в данной главе керамики составляют конкуренцию



металлам, выбранным на данный момент наиболее приемлемыми для изготовления обращенных к плазме компонентов токамаков.

Результаты, полученные в ходе исследований повреждения термическими ударами монолитных керамических образцов, показали перспективность продолжения работы. Помимо выбора обращенного к плазме материала важно определиться с тем, в каком виде он будет наиболее эффективно применен: в виде покрытия или моноблока с теплообменником. В силу того, что рассмотренная в данной работе керамика склонна к сильной деградации теплофизических свойств вследствие нейтронного облучения, ее, на первый взгляд, разумнее всего применять в виде покрытия. В реакторных условиях данный материал будет повреждаться, не становясь источником сильного загрязнения плазмы примесями с большим зарядовым числом. В таком случае необходимо выбрать наиболее эффективную технологию нанесения покрытия, которая не только будет способна обеспечить создание качественного покрытия, но и позволила бы в кратчайшие сроки восстановить его в случае сильного повреждения во время паузы в работе реактора. Для проведения исследований в данном направлении было выбрано три метода нанесения покрытий: детонационное напыление (ДН), атмосферное плазменное напыление (АПН) и электронно-лучевой синтез (ЭЛС). В качестве подложки был выбран вольфрам. Материалом покрытия был выбран карбид бора, так как он обладает достаточно высокой устойчивостью к тепловой нагрузке при низком зарядовом числе входящих в его состав элементов.

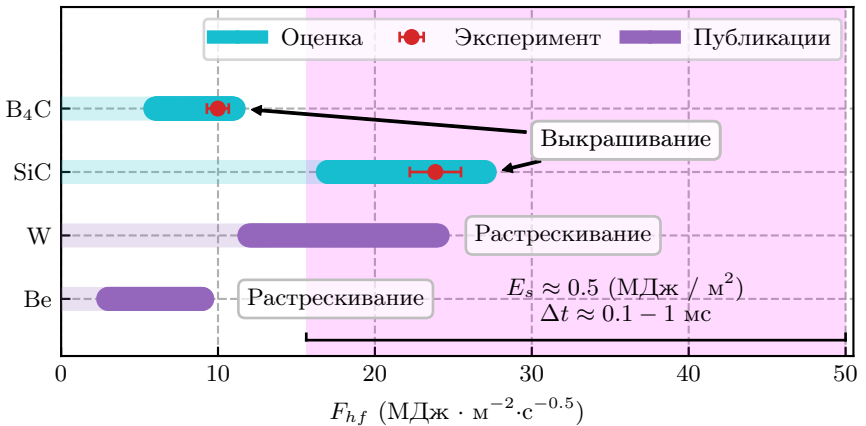


Рисунок 11 — Параметры потока тепла  $F_{hf}$ , ограничивающие применение карбида бора (B<sub>4</sub>C) и карбида кремния (SiC) в термоядерной установке, в сравнении с пороговыми  $F_{hf}$  растрескивания вольфрама (W) и бериллия (Be)

С использованием вышеописанного экспериментального стенда на основе инфракрасного лазера были проведены испытания образцов с покрытиями из карбида бора импульсной тепловой нагрузкой. Характер повреждений после однократного облучения импульсным лазером определялся с использованием СЭМ *post mortem*, а тепловая нагрузка характеризовалась температурой  $T$  и параметром потока тепла  $F_{hf}$ . Рисунок 12б демонстрирует значения параметров потока тепла  $F_{hf}$ , при достижении которых во время импульсного нагрева поверхности горячепрессованного карбида бора (ГП В<sub>4</sub>С), исследованных покрытий из В<sub>4</sub>С, вольфрама и бериллия начинаются эрозионные процессы с потерей вещества. Покрытия ДН В<sub>4</sub>С и АПН В<sub>4</sub>С демонстрируют хорошую устойчивость к импульсному нагреву, немного уступая вольфраму. Отслаивание с большой потерей вещества происходит при нагрузках, сравнимых с порогом растрескивания вольфрама.

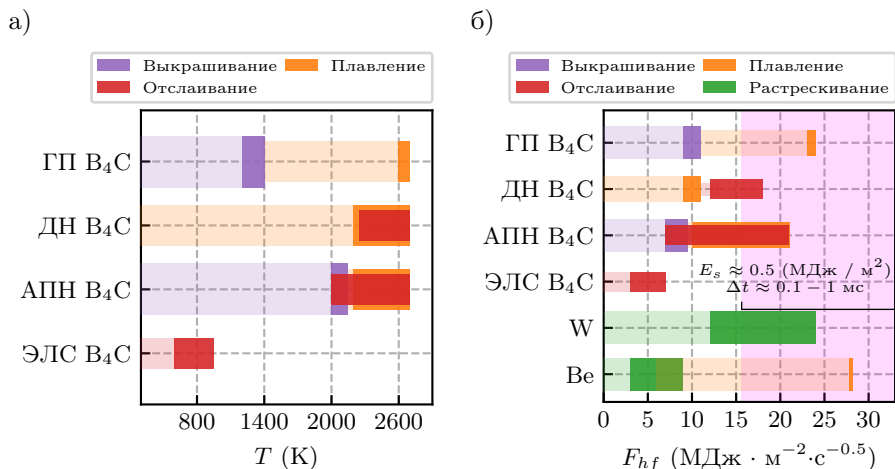


Рисунок 12 — Результаты испытания покрытий из В<sub>4</sub>С: а) значения температур  $T$ , соответствующие процессам эрозии поверхности покрытий из В<sub>4</sub>С и горячепрессованного В<sub>4</sub>С (ГП В<sub>4</sub>С); б) значения параметра потока тепла  $F_{hf}$ , соответствующие процессам эрозии поверхности покрытий из В<sub>4</sub>С, ГП В<sub>4</sub>С, вольфрама W и бериллия Be

В **заключении** приведены основные результаты работы и даны рекомендации к дальнейшей разработке темы.

## Заключение

Основные результаты работы:

1. В ходе работы, посвященной изучению тепловой деформации вольфрамовых пластин, была разработана уникальная методика для отслеживания их изгиба;
2. Совокупность экспериментальных данных, полученных с диагностических систем установки БЕТА, работающих вместе с диагностикой изгиба пластин, позволила качественно описать хрупко-пластичную природу деформации вольфрама, а также показать, как это приводит к растрескиванию поверхности в результате импульсного нагрева;
3. Количественные данные относительно температуры облучаемой поверхности и кривизны необлучаемой обратной к ней поверхности образцов, определяемые с точностью  $\pm 5(0.95)\%$  и  $\pm 12(0.95)\%$ , соответственно, помогли оценить величину остаточных напряжений, возникающих в тонком приповерхностном слое вольфрама в результате импульсного нагрева с длительностью  $\sim 0.1 - 1$  мс и последующего остывания;
4. Дополнительно было показано, что изменение шероховатости облучаемой поверхности вольфрама в результате импульсного нагрева связано с пластической деформацией металла в прогреваемом слое. Этот факт также может быть использован для создания неразрушающих методик, позволяющих оценивать механические напряжения в металлических образцах;
5. Результаты, полученные во время экспериментов с высокотемпературной керамикой, позволили проверить теоретическое описание процесса эрозии в ходе импульсного нагрева поверхности;
6. Была экспериментально определена критическая температура, при достижении которой во время импульсного нагрева поверхности керамики начинается процесс эрозии с потерей вещества: для карбида бора она составила  $1310 \pm 80(0.95)$  К;
7. Данные, полученные с использованием примененных *in situ* диагностических систем, позволили сделать выводы об устойчивости исследованной высокотемпературной керамики импульсному нагреву с длительностью  $\sim 0.1 - 1$  мс. Значение параметра потока тепла, при достижении которого начинается процесс эрозии, для карбида бора составило  $10 \pm 0.7(0.95)$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0.5</sup>;
8. Экспериментальный стенд на основе импульсного лазерного источника позволил провести эксперименты по испытанию образцов с керамическим покрытием, нанесенным разными методами, и выбрать технологию нанесения с наилучшей устойчивостью к импульсной тепловой нагрузке.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. In situ method for studying stresses in a pulse-heated tungsten plate based on measurements of surface curvature / D. E. Cherepanov, A. S. Arakcheev, A. V. Burdakov [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Materials and Energy. — 2021. — Vol. 26. — P. 100919. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100919> (дата публикации: 21.01.2021).
2. In situ study of thermal shock damage to high-temperature ceramics / D. E. Cherepanov, L. N. Vyacheslavov, V. A. Popov [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Materials and Energy. — 2023. — Vol. 36. — P. 101495. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101495> (дата публикации: 27.08.2023).
3. Испытания покрытий из карбида бора импульсной тепловой нагрузкой, возможной в диверторной зоне токамака ИТЭР / Д. Е. Черепанов, А. В. Бурдаков, Л. Н. Вячеславов [и др.]. — Текст : электронный // Вопросы атомной науки и техники, Серия Термоядерный синтез. — 2024. — Т. 47, № 1. — С. 89–98. — URL: [http://vant.iterru.ru/vant\\_2024\\_1/8.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2024_1/8.pdf) (дата обращения: 15.04.2024).

Черепанов Дмитрий Евгеньевич

**Экспериментальные методы исследования повреждения  
термическими ударами материалов первой стенки  
термоядерных реакторов**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 30.10.2024.

Подписано в печать 30.10.2024.

Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН  
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11