

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.016.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
подведомственного Минобрнауки России, по диссертации
на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.04.2021 № 3

О присуждении АРАКЧЕЕВУ АЛЕКСЕЮ СЕРГЕЕВИЧУ ученой степени
доктора физико-математических наук.

Диссертация «Теоретическое и экспериментальное исследование
плавления, испарения и образования трещин на вольфраме при мощной
плазменной нагрузке» по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и
01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 22.01.2021г.,
выписка из протокола заседания № 2 диссертационным советом Д 003.016.03 на
базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, подведомственного Минобрнауки России, 630090, проспект академика
Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, Приказ о создании диссертационного совета №
105/нк от 11.04.2012г., приказ о частичном изменении состава совета № 569/нк от
01.07.2019 г.

Соискатель, Аракчеев Алексей Сергеевич 1987 года рождения, работает
ученым секретарём в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России. В 2010 году
соискатель окончил Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Новосибирский государственный университет».
Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук «Особенности поведения материалов при мощной плазменной нагрузке»
защитил в 2013 году в диссертационном совете Д 003.016.03, созданном на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, подведомственного Минобрнауки России.

Диссертация выполнена в лаборатории 9-0 Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного
Минобрнауки России.

Научный консультант – доктор физико-математических наук Бурдаков
Александр Владимирович, главный научный сотрудник лаборатории 10
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, подведомственного Минобрнауки России.

Официальные оппоненты:

1. **Будаев Вячеслав Петрович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий отдел токамака Т-10 Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”»,
2. **Бурдовицин Виктор Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
3. **Ляхов Николай Захарович** – доктор химических наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории 2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество “Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований” (г. Троицк) в своем положительном заключении, составленном кандидатом физико-математических наук начальником лаборатории плазмодинамики Отделения магнитных и оптических исследований Позняком Игорем Михайловичем и подписанным кандидатом физико-математических наук ученым секретарем Ежовым Александром Александровичем, указала, что «Диссертация Аракчеева А.С. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором лично разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики взаимодействия плазмы с материалами, позволяющее значительно улучшить представления о механизмах эрозии материалов под действием интенсивных потоков тепла и частиц. Представленная к рассмотрению диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Научного совета Государственного научного центра Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, протокол № 2 от 24 марта 2021 г».

Соискатель имеет более 100 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 12 работ.

Научные работы соискателя опубликованы в высокорейтинговых научных журналах («Physics of plasmas», «Fusion engineering and design», «Journal of nuclear materials», «Nuclear material and energy», «Journal of synchrotron radiation» и другие). Авторский вклад соискателя является определяющим. Общий объем опубликованных работ составляет более 100 журнальных страниц. Основные идеи диссертации изложены в следующих работах:

1. Skovorodin D.I., Pshenov A.A., Arakcheev A.S. et al. Vapor shielding models and the energy absorbed by divertor targets during transient events // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 022501.
2. Arakcheev A.S., Apushkinskaya D.E., Kandaurov I.V., et al. Twodimensional numerical simulation of tungsten melting in exposure to pulsed electron beam // Fusion Eng. Des. 2018. Vol. 132. P. 13-17.
3. Arakcheev A.S., Chernoshtanov I.S., Popov V.A., et al. Shape evolution of surface molten by electron beam during cooling stage // Fusion Eng. Des. 2018. Vol. 128. P. 154157.
4. Arakcheev A.S., Huber A., Wirtz M., et al. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads //J. Nucl. Mater. -2015. - Vol. 463. - P. 246-249.
5. Arakcheev A.S., Skovorodin D.I., Burdakov A.V., et al. Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications //J. Nucl. Mater. -2015. - Vol. 467. - P. 165-171.
6. Arakcheev A.S., Arakcheev S.A., Kandaurov I.V., et al. On the mechanism of surface-parallel cracks formation under pulsed heat loads // Nucl. Mater. Energy. - 2019. - Vol. 20. - P. 100677.
7. Vasilyev A.A., Arakcheev A.S., Burdakov A.V., et al. Continuous laser illumination for in situ investigation of tungsten erosion under transient thermal loads // Fusion Eng. Des. - 2019. - Vol. 146(B). -P. 2366-2370.
8. Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Balash I.I., et al. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load //J. Synchrotron Radiat. - 2019. - Vol. 26, N 5. - P. 1644-1649.

На автореферат поступил отзыв доктора физико-математических наук, профессора, профессора Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Мышкина Вячеслава Федоровича. В отзыве отмечается несомненная научная новизна и практическая значимость результатов исследований. По содержанию автореферата указаны следующие замечания:

1. В автореферате не указан личный вклад соискателя в результаты исследования. Для соискателя это очень актуально, так как из 17 статей лишь в 3 небольшое количество соавторов (4 или 6).

2. В 3-х главах излагаются результаты моделирования. В автореферате слабо представлены математические модели, использованные при моделировании различных процессов.

3. Выводы не содержат количественных характеристик, что странно для результатов физического исследования.

4. Хотелось бы, чтобы такие фразы, как «часть исходного дифракционного пика сдвигается вправо» (стр. 22 строки 2, 3 снизу); «с ростом их номера по норме максимума модуля» (стр. 17 строка 3 снизу) соискатель излагал в более строгой научной формулировке. Такие фразы затрудняют восприятие содержания исследований (см. также стр. 24 строка 11 сверху).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их достижений в соответствующей области науки, их компетентностью, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и

способностью определить научную и практическую ценность защищаемой диссертации, а также дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Предложена модель для описания экранирования поверхности при облучении потоком плазмы. Модель позволила показать логарифмическую зависимость уровня насыщения поглощенной материалом энергии от интенсивности взаимодействия потока плазмы с газом над поверхностью материала.
- Подтверждена справедливость использовавшейся модели учета охлаждения за счет испарения по сравнению результатов расчетов с измеренной в эксперименте на установке ВЕТА динамикой размера расплавленной области. Показано, что охлаждение за счет испарения существенно влияет на динамику температуры материала при экспериментальном моделировании мощного импульсного воздействия плазмы на материалы с помощью электронного пучка.
- Получены времена колебаний и затухания капиллярных волн на расплаве вольфрама при импульсном нагреве. Показано их влияние на интерпретацию формы затвердевшей поверхности расплава после импульсного нагрева для анализа процессов во время облучения.
- Разработана модель для описания образования перпендикулярных поверхности трещин при импульсном нагреве. Разработанная модель учитывает упрочнение материала и непрерывный переход между хрупким и вязким состояниями при изменении температуры. Эти особенности позволяют описывать материалы, которые нельзя считать абсолютно хрупкими или абсолютно вязкими.
- Показано, что влияние армирования материала вдоль облучаемой поверхности на энергетический порог образования трещин мало как отношение толщины нагретой области к размеру облучаемой области.
- Получен способ расчета напряжений и деформаций вокруг перпендикулярной поверхности трещины, появившейся в результате импульсной тепловой нагрузки. Указанный способ основан на методе граничных интегральных уравнений. Расчеты показали, что рядом с перпендикулярной поверхностью трещиной появляются механические напряжения, которые могут привести к образованию параллельных поверхности трещин. Кроме того, была вычислена форма подъема поверхности рядом с перпендикулярной поверхности трещиной. На основе этого предложены идеи методик определения наличия трещин по форме поверхности.
- Разработана методика измерения динамики распределения деформаций по глубине при импульсной тепловой нагрузке на монокристаллы на основе рентгеновской дифрактометрии. Методика основана на изменении при импульсном нагреве угла поворота атомарной плоскости, на которой происходит дифракция.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Построены относительно простые теоретические модели механизмов ограничения нагрева материалов интенсивным импульсным потоком плазмы, позволяющие прозрачным образом вывести базовые параметры этих ограничений.
- Проведена модернизация модели образования остаточных напряжений в материале в результате импульсного нагрева для учета упрочнения и непрерывного перехода между хрупким и вязким состояниями.
- Решена задача линейной теории упругости в области вокруг перпендикулярной поверхности трещины, появившейся в результате импульсного нагрева.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Получены выражения для уровня насыщения поглощенной материалом энергии и количества испаренного материала, которые могут использоваться для проверки комплексных численных кодов для моделирования воздействия потока плазмы на конструкции термоядерного реактора.
- Разработана модель для определения условий образования трещин после импульсного нагрева.
- Предложена идея методики измерения момента времени образования трещин по обнаружению изменения формы поверхности рядом с трещинами.
- Разработана и реализована методика измерения динамики распределения деформаций по глубине при импульсной тепловой нагрузке на монокристаллы, которая может использоваться для измерения накопления приводящих к механическому разрушению механических напряжений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- теоретические модели построены на основе известных проверяемых данных и построены на основе фундаментальных и распространённых эмпирических физических уравнений,
- для экспериментальных работ полученные результаты качественно совпадали с полученными заранее теоретическими предсказаниями,
- для подтверждения основных результатов экспериментальных исследований проводились дополнительные эксперименты по проверке качественного и количественного совпадения с поведением в теоретических моделях.

Личный вклад соискателя состоит в создании математических моделей описания воздействия импульсных плазменных и тепловых нагрузок на материалы и получении общих закономерностей такого взаимодействия с помощью этих моделей, сравнении результатов теоретических расчетов с результатами экспериментов, разработке методики измерения динамики деформации и напряжений в монокристаллах по дифракции синхротронного излучения и ее реализации на станции рассеяния.

На заседании 27.04.2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Аракчееву А.С. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 25 человек (не включая научного консультанта), в том числе 12

человек присутствовали лично (не включая научного консультанта) и 13 – в удаленном интерактивном режиме, из них 11 докторов наук по специальностям рассматриваемой диссертации (6 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы, не включая научного консультанта соискателя, а также 5 докторов наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния), участвовавших в заседании, из 29 человек, входящих в состав совета на данное заседание, проголосовали: за – 25 (не включая научного консультанта), против - 0, воздержался - 0.

Председатель диссертационного
совета Д 003.016.03,
д.ф.-м.н.



А.А. Иванов

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 003.016.03,
д.ф.-м.н.



П.А. Багрянский

28.04.2021 г.

