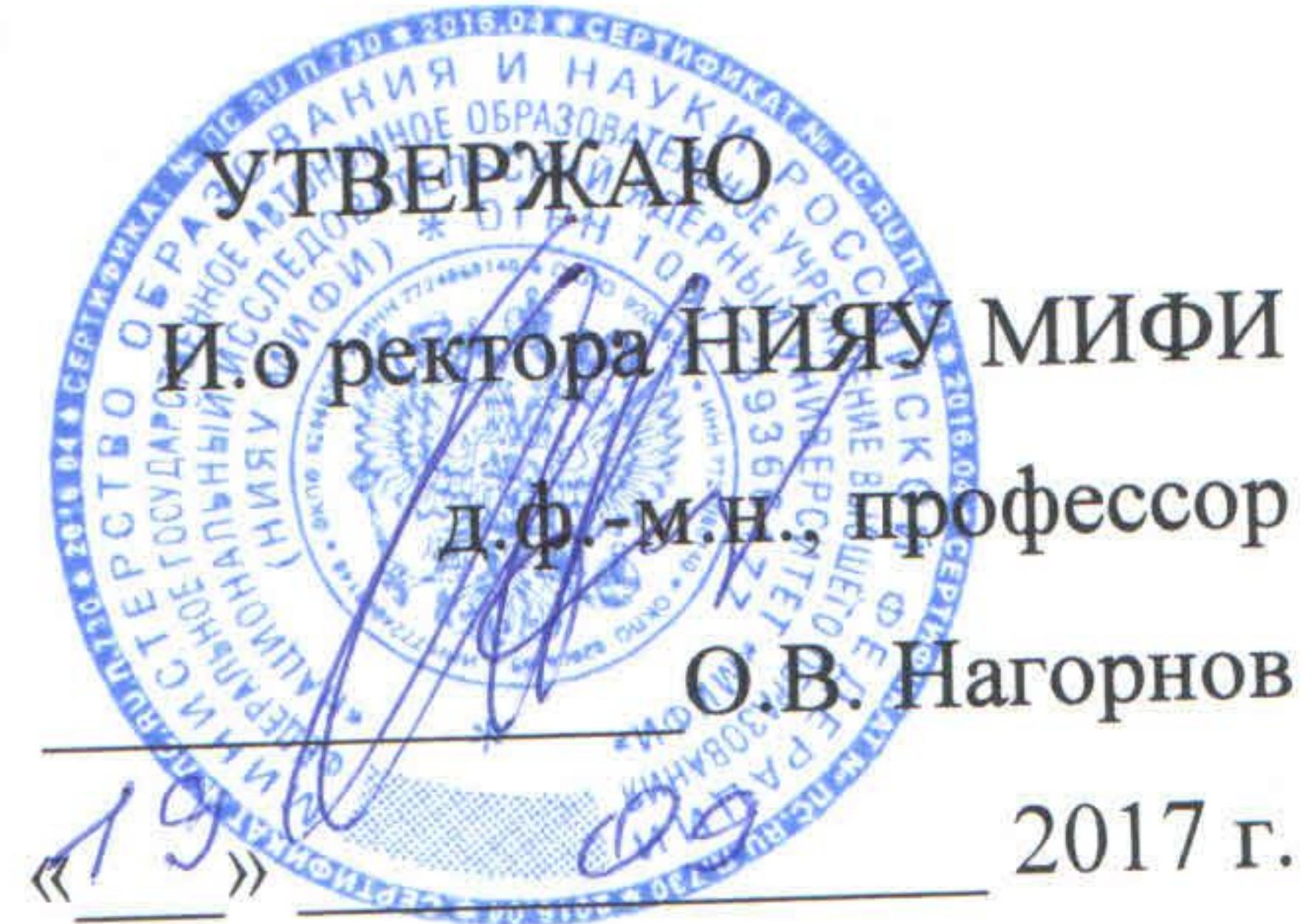


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11  
<http://www.mephi.ru>

19.09.2017 № 021/20  
На № 3058 от 06.07.2017



2017 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Бернацкого Антона Владиславовича "Спектроскопические методы детектирования примесей молекул воды и их производных в плазме инертных газов электровакуумных установок", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

В настоящее время термоядерные исследования динамично развиваются. Связано это, во многом, с международным проектом строительства крупнейшего в мире токамака ИТЭР. В данной установке, как и в других сложных электровакуумных камерах, остро стоит проблема своевременного обнаружения течей воды из систем охлаждения стенок в область разряда. Информация о ранней стадии трещинообразования необходима для предотвращения развития серьезных аварийных ситуаций.

Существующие на данный момент методы и подходы либо технически нереализуемы в условиях разряда, либо не удовлетворяют необходимой чувствительности. Наиболее перспективными методами для решения проблем диагностики воды в плазме представляются именно бесконтактные спектроскопические методики, которые нуждаются в развитии и расширении своих возможностей. В связи с этим, актуальность диссертационной работы А.В. Бернацкого не вызывает сомнений.

Текст диссертации содержит Введение, 8 глав, Заключение и список цитируемой литературы, включающий 115 наименований.

Во Введении приведены цели и задачи диссертационной работы, обоснована её актуальность, указаны новизна и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной различным методикам обнаружения, количественного определения потоков и концентраций молекул воды в электровакуумных установках. Описываются требования, предъявляемые разработчиками проекта ИТЭР к средствам раннего обнаружения появления микротечей из системы водяного охлаждения первой стенки реактора.

Во второй главе описывается созданное экспериментальное оборудование (установка «Течь»), его параметры, принципы работы отдельных элементов.

Третья глава посвящена подробной расшифровке и анализу спектров в области 300-900 нм, полученных в различных смесях инертных газов с добавками паров воды. При этом выделены группы линий, которые возможно использовать для диагностики поступления паров воды в плазму. Результаты расшифровки дополнены абсолютными измерениями интенсивностей линий, что позволяет оценить выделенные группы линий с позиции необходимого разрешения и чувствительности диагностической аппаратуры.

В четвертой главе подробно изложен и обоснован новый подход к измерениям концентрации молекул воды в условиях плазмы. В основе лежит процесс диссоциативного возбуждения молекул воды прямым электронным ударом. В результате чего в спектре электронно-колебательных полос гидроксила OH проявляются «горячие» по вращательным переходам группы. При этом важно отметить, что если в плазме уже каким-то образом образовался OH ранее и поступил в зону регистрации, его спектр будет характеризоваться «холодной» вращательной группой. Таким образом, наличие «горячей» группы в спектре OH однозначно свидетельствует о появлении молекул воды в зоне наблюдения. В этой главе приведены также результаты измерений предлагаемым способом концентраций молекул H<sub>2</sub>O в плазме установки «Течь», которые продемонстрировали лучшую чувствительность по сравнению со всеми известными спектроскопическими методами. Достигнутая чувствительность удовлетворяет требованиям реактора ИТЭР.

В пятой главе представлена новая схема актинометрических измерений в плазме, которая самосогласованно учитывает тушение излучающих состояний, используемых в измерениях. Разработанная схема не требует дополнительных зондовых измерений,

поскольку определение концентраций плазмы осуществляется также посредством спектральных измерений. Предложенная схема отработана на установке «Течь» для измерений концентраций молекул воды в плазме инертных газов. Измерения продемонстрировали глубокую диссоциацию молекул воды в плазме (97%).

Шестая глава посвящена исследованию процессов адсорбции и десорбции молекул воды на внутренних поверхностях вакуумных камер. Установлено, что наличие разряда значительно меняет динамику процессов адсорбции. Тем не менее, проделанные оценки показывают, что в условиях установки «Течь», при измерениях концентраций молекул воды в объеме плазмы, процессами адсорбции можно пренебречь.

В седьмой главе продемонстрирована возможность использования «промежуточных» актинометров. Показано, что атом дейтерия является идеальным актинометром для измерения концентраций атомов водорода. Установлена линейная зависимость между концентрацией образовавшегося в разряде с дейтерием водорода из молекул  $H_2O$  от начальной концентрации молекул воды. Это позволяет использовать атомы H в качестве «промежуточных» актинометров для определения концентраций молекул воды в дейтериевой плазме. Экстраполяция данного подхода на условия реактора ИТЭР демонстрирует рекордную чувствительность к определению потоков молекул  $H_2O$ .

В восьмой главе представлены результаты параллельных измерений концентраций молекул воды в плазме двумя независимыми способами: разработанным методом мультиспектральной актинометрии и методом лазерной спектроскопии по поглощению, выбранным в качестве контрольного. Измерения проводились на созданной в рамках диссертационной работы установке с кварцевой разрядной трубкой. Результаты независимых измерений демонстрируют хорошее согласование между собой.

В Заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы А.В. Бернацкого.

Достоверность результатов, представленных в работе А.В. Бернацкого, обеспечивается применением современного оборудования и методов измерений. Многократно воспроизводимые экспериментальные результаты, полученные на разных установках, находятся в соответствии между собой и с теоретическим обоснованием.

Результаты, изложенные в диссертации, нашли отражение, в частности, в 8 статьях в научных рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, в препринте и в монографии. Общее число публикаций – 25, все они соответствуют специальности 01.04.05 – «Оптика».

Результаты диссертационной работы имеют большую значимость для создания систем оптической диагностики в сложных электровакуумных установках, и, в целом, важны для развития термоядерной энергетики.

Полученные в работе результаты представляют несомненный интерес и могут быть рекомендованы в организациях, использующих термоядерные и другие сложные электровакуумные установки, таких как: НИЦ «Курчатовский институт», АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», НИИЭФА им.Д.В.Ефремова, ИЯФ СО РАН, ФТИ им.А.Ф.Иоффе, ИОФРАН, НИЯУ МИФИ.

Вместе с тем по диссертации можно высказать ряд замечаний:

1. В обзоре литературы не приведены отличные от спектроскопических способы обнаружения течей воды в электровакуумных установках.

2. Несколько вольным представляется использование термина «дублет» для обозначения изотопически сдвинутых линий  $H_{\alpha}$ - $D_{\alpha}$  (стр. 91-92), поскольку в спектроскопии под дублетом обычно понимаются линии, возникающие в результате дублетного расщепления энергетического состояния квантовой излучающей системы.  $H_{\alpha}$ ,  $D_{\alpha}$  – линии разных систем, хотя и очень близкие, они имеют собственное расщепление.

3. Не обсуждается применимость разрабатываемых спектроскопических методик высокого разрешения, в частности, с использованием актинометрической пары  $H_{\alpha}$ - $D_{\alpha}$  в условиях зеемановского расщепления в магнитном поле ИТЭР.

4. Несмотря на хорошее, в целом, литературное качество текста, отдельные опечатки все-таки встречаются.

Отмеченные замечания не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов, не снижают общую положительную оценку работы. Диссертация А.В. Бернацкого является законченной научно-квалификационной работой, новизна и достоверность работы не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В целом, диссертационная работа А.В. Бернацкого удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года. Её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика» за развитие количественных методов спектроскопии определения малых примесей в плазме при детектировании течей воды.

Диссертация и проект отзыва ведущей организации на докторскую работу заслушаны, обсуждены и одобрены на заседании кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ 29 августа 2017 года, протокол № 1-17/18. Отзыв подготовлен заведующим кафедры, д.ф.-м.н. Курнаевым В.А.

Заведующий кафедрой "Физика плазмы" (№ 21)  
НИЯУ МИФИ

доктор физико-математических наук,  
профессор



Валерий Александрович Курнаев

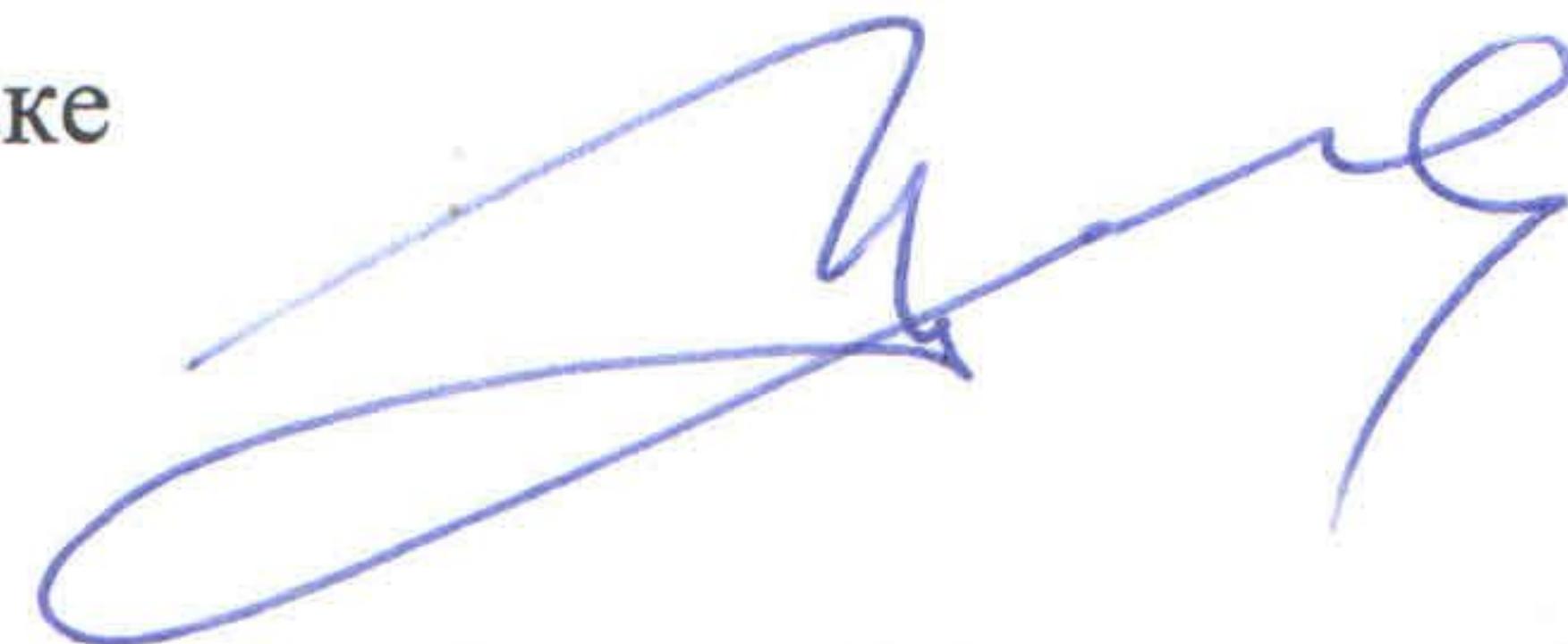
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);

115409, г. Москва, Каширское ш., 31;

e-mail: kurnaev@plasma.mephi.ru, +7(495)788-56-99, доб. 9657.

Председатель совета по аттестации и подготовке  
научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ

доктор физико-математических наук,  
профессор



Николай Алексеевич Кудряшев

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

сотрудников Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по тематике защищаемой диссертации Бернацкого Антона Владиславовича "Спектроскопические методы детектирования примесей молекул воды и их производных в плазме инертных газов электровакуумных установок", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – "Оптика", в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Voronov, G. S., Berezhetskii, M. S., Bondar', Yu. F., Vafin, I. Yu., Vasil'kov, D. G., Voronova, E. V., Grebenschikov, S. E., Grishina, I. A., Larionova, N. F., Letunov, A. A., Logvinenko, V. P., Meshcheryakov, A. I., Pleshkov, E. I., Khol'nov, Yu. V., Fedyanin, O. I., Tsygankov, V. A., Shchepetov, S. V., Kurnaev, V. A., Vizgalov, I. V., Urusov, V. A., Sorokin, I. A., Podolyako, F. S., Antipenkov, A., Pearce, R., Worth, L. Testing of the method for water microleakage detection from OH hydroxyl spectral lines at the L-2M // Plasma Physics Reports. 2013, Т. 39, № 4, P. 277-288.
2. Sorokin, I., Vizgalov, I., Gutov, K., Podolyako, F. Concerning feasibility of water microleakage diagnostics by auto-oscillating discharge // Phys. Procedia. 2015. № 71. P. 116-120.
3. Sorokin, I.A., Vizgalov, I.V., Gutov, K.M., Podolyako, F.S. Effect of water vapor on the ionic composition of the hydrogen beam-plasma discharge // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2015. № 42 (12). P. 350-355.
4. Vizgalov I.V., Sorokin I.A., Kurnaev V.A. Monitoring of the relationship between Ha and Da emission as a detection method for water microleaks into ITER // J. Phys. Conf. Ser. 2016. № 747 (1). P. 2-7.
5. Gasparyan, Y.M., Popkov, A.S., Krat, S.A., Pisarev, A.A., Vasina, Y.A., Lyublinski, I.E., Vertkov, A.V. Deuterium release from li-D films exposed to atmospheric gases // Fusion Engineering and Design. 2017. № 117, P. 163-167.
6. Krat, S.A., Popkov, A.S., Gasparyan, Y.M., Pisarev, A.A., Fiflis, P., Szott, M., Ruzic, D.N. Wetting properties of liquid lithium on lithium compounds // Fusion Engineering and Design. 2017. № 117, P. 199-203.
7. Kolodko, D.V., Mamedov, N.V., Vizgalov, I.V., Sinelnikov, D.N., Sorokin, I.A. Increase atom/molecular ratio of the hydrogen discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2016. № 768 (1), P. 012019.

8. Kirko, D.L., Savjolov, A.S. Investigation of electrolyte electric discharge characteristics // Journal of Physics: Conference Series. 2016. № 747 (1), P. 012002.

9. Kirko, D., Dodulad, E., Savjolov, A. Spectroscopic study of radiation from Low-inductance vacuum spark // Journal of Physics: Conference Series. 2016. 666 (1), P. 012019.