

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 Федеральному агентству научных организаций,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25.12.2017 № 9

О присуждении **СКЛЯРОВУ ВЛАДИСЛАВУ ФАТЫХОВИЧУ** ученой степени **кандидата физико-математических наук.**

Диссертация «Исследование эмиссии субмиллиметровых электромагнитных волн из плазмы при коллективной релаксации электронного пучка в многопробочной ловушке ГОЛ-3» по специальности **01.04.08 – физика плазмы** принята к защите 12.10.2017 г., протокол № 3 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, ФАНО России, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, созданного приказом Минобрнауки России № 385/нк от 27. 04. 2017 г.

Соискатель Скляров Владислав Фатыхович 1988 года рождения, работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

В 2011 году соискатель окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

В 2014 году соискатель ученой степени освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирского государственного технического университета».

Диссертация выполнена в лаборатории 10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук **БУРДАКОВ Александр Владимирович**, заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

Официальные оппоненты:

1. **Водопьянов Александр Валентинович** – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, заведующий лабораторией;
2. **Шапиро Давид Абрамович** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт сильноточной электроники СО РАН**, г. Томск, в своем **положительном заключении**, подписанном Ростовым Владиславом Владимировичем, д.ф.-м.н., заведующий отделом физической электроники ИСЭ СО РАН, указала, что диссертация отвечает требованиям п. 9 и 10 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Соискатель имеет 22 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации 15 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 15 работ.

1. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Sulyaev Yu. S., Vyacheslavov L. N. *Subterahertz Emission at Strong REB-Plasma Interaction in Multimirror Trap GOL-3* // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.74-77.
2. Postupaev V. V., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Batkin V. I., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Ivantsivsky M. V., Kuklin K. N., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Rovenskikh A. F., Shoshin A. A., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Sorokina N. V., Sudnikov A. V., Sulyaev Yu. S., Vyacheslavov L. N. *Experiments with "Thin" Electron Beam at GOL-3* // Fusion Science and Technology, V.59, No1T, 2011, p.144-149.
3. Бурмасов В. С., Бобылев В. Б., Иванова А. А., Иваненко С. В., Касатов А. А., Касатов Д. А., Кругляков Э. П., Куклин К. Н., Попов С. С., Поступаев В. В., Пурьга Е. А., Ровенских А. Ф., **Скляров В. Ф.** *Инфракрасный интерферометр для исследования субтермоядерной плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3* // Приборы и техника эксперимента, 2012, № 2, с.120-123.
4. Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Burdakov A. V., Ginzburg N. S., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Paulish A. G., Peskov N. Yu., Polosatkin S. V., Popov S. A., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sergeev A. S., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Vyacheslavov L. N., Zaslavsky V. Yu. *Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM* // Terahertz Science and Technology, Vol.5, No.1, 2012, p.18-39.

5. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Вячеславов Л. Н., Иванов И. А., Иванцовский М. В., Касатов А. А., Кузнецов С. А., Макаров М. А., Меклер К. И., Полосаткин С. В., Поступаев В. В., Попов С. С., Сеницкий С. Л., **Скляр В. Ф.**, Тумм М. К. А. *Диагностический комплекс для исследований генерации субтерагерцового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3* // Физика плазмы, 2012, т.38, №6, с.496-505.
6. Thumm M. K. A., Agafoncev A. M., Arzhannikov A. V., Aslrelin V. T., Bagryansky P. A., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., V.G. Makotchenko, Mekler K. I., A.N. Mikheev, N.B. Morozova, Paulish A. G., Pankrushina N. A., Polosatkin S. V., Popov S. A., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Trunev Yu. A., Vyacheslavov L. N., Zherikova K. V. *Megagrant Research Project: Laboratory of Advanced Research on Millimeter and Terahertz Radiation at Novosibirsk State University* // In book: Knowledge Transfer. The new Core Responsibility of Higher Education Institutions Practice and Perspectives in Russia and Germany. (Gabriele Gorzka, Ed.), Series: OST-WEST-DIALOG 13, 2012, Cassel University Press GmbH, Kassel, ISBN 978-3-86219-412-4, pp.131-156.
7. Burdakov A. V., Avrorov A. P., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Batkin V. I., Beklemishev A. D., Burmasov V. S., Bykov P. V., Derevyankin G. E., Ivanenko V. G., Ivanov I. A., Ivantsivsky M. V., Kandaurov I. V., Kasatov A. A., Kuznetsov S. A., Kurkuchekov V. V., Kuklin K. N., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., Stepanov V. D., Sudnikov A. V., Sulyaev Yu. S., Timofeev I. V., Trunev Yu. A., **Sklyarov V. F.**, Sorokina N. V., Shoshin A. A., and Vyacheslavov L. N. *Development of Extended Heating Pulse Operation Mode at GOL-3* // Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.29-34.
8. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Ivanov I. A., Mekler K. I., Popov A. A., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Timofeev I. V., Thumm M. K. A., Vyacheslavov L. N. *Experimental and Theoretical Investigations of High Power Sub-millimeter Wave Emission at Two-Stream Instability of High Current REB* // Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.82-87.
9. Burdakov A. V., Arzhannikov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Ivantsivsky M. V., Kandaurov I. V., Kasatov A. A., Kuznetsov S. A., Kurkuchekov V. V., Kuklin K. N., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., **Sklyarov V. F.**, Sudnikov A. V., Thumm M. K. A., Trunev Yu. A. and Vyacheslavov L. N. *Microwave Generation during 100 keV Electron Beam Relaxation in GOL-3* // Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.286-288.
10. Postupaev V. V., Burdakov A. V., Ivanov I. A., **Sklyarov V. F.**, Arzhannikov A. V., Gavrilenko D. Ye., Kandaurov I. V., Kasatov A. A., Kurkuchekov V. V., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Rovenskikh A. F., Sudnikov A. V., Sulyaev Yu. S., Trunev Yu. A., and Vyacheslavov L. N. *Temporal structure of double plasma frequency emission of thin beam-heated plasma* // Phys. Plasmas 20, 092304, 2013, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4821608>.
11. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Gavrilenko D. E., Ivanov I. A., Kasatov A. A., Kuznetsov S. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, and Vyacheslavov L. N. *Observation of*

- spectral composition and polarization of sub-terahertz emission from dense plasma during relativistic electron beam-plasma interaction* // Physics of Plasmas, Vol. 21, No. 8, 082106 (2014), doi: 10.1063/1.4891884.
12. Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kandaurov I. V., Kurkuchekov V. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. A., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Trunev Yu. A., Timofeev I. V., Vyacheslavov L. N. *Generation of high-power sub-THz Waves in magnetized turbulent electron beam plasmas* // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Vol. 35, Iss. 1, 2014, pp. 81-90, doi:10.1007/s10762-013-9969-3.
 13. Arzhannikov A. V., Thumm M. K. A., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ginzburg N. S., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kasatov A. A., Kurkuchekov V. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Peskov N. Yu., Polosatkin S. V., Popov S. S., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sergeev A. S., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Vyacheslavov L. N., Zaslavsky V. Yu. *Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams* // Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on, 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 478-485.
 14. Ivanov I. A., Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Gavrilenko D. E., Kasatov A. A., Kandaurov I. V., Kurkuchekov V. V., Kuznetsov S. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Popov S. S., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., **Sklyarov V. F.**, Sorokina N. V., Trunev Yu. A. and Vyacheslavov L. N. *MM-wave emission by magnetized plasma during sub-relativistic electron beam relaxation* // Physics of Plasmas, 2015, Vol. 22, Iss.12, 122302, doi: 10.1063/1.4936874, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4936874>.
 15. Arzhannikov A. V., Annenkov V. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Kasatov A. A., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., **Sklyarov V. F.**, Stepanov V. D., Timofeev I. V. and Thumm M. K. A. *Beam-plasma system as a source of powerful submillimeter and terahertz radiation (experimental and theoretical studies)* // AIP Conf. Proc. 1771, 070004 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964228>.

На диссертацию и автореферат дополнительных отзывов не поступало.

Выбор **официальных оппонентов** и **ведущей организации** обосновывается известностью их достижений в соответствующей отрасли науки (*физике плазмы, а также генерации электромагнитного излучения в плазменных, вакуумных и других системах*), 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:

- **разработаны** радиометрическая диагностика на квазиоптических элементах, а также метод восстановления данных, основанный на решении обратной задачи

(уравнение Фредгольма I-го рода) с использованием параметрической регуляризации и минимизации специально построенного функционала, что позволило выявить ряд новых закономерностей эмиссии электромагнитных волн из плазмы при релаксации электронного пучка в плазме;

- **предложена** качественная модель, связывающая величину мощности, а также число отдельных всплесков выходящего из плазмы электромагнитного излучения со скоростью изменения газокинетического давления плазмы. Также изложена гипотеза образования электромагнитного излучения в окрестности циклотронной частоты на ранней стадии релаксации интенсивного электронного пучка в плазме, значительно превышающего по мощности расчетное спонтанное излучение по магнитотормозному механизму;
- **показано**, что при релаксации пучка электронов с энергией 100 кэВ в плазме с плотностью $n_e = 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$, удерживаемой во внешнем магнитном поле, возможно достижение высокого значения коэффициента передачи энергии от электронов пучка электромагнитным волнам (до 4%);
- **доказано** наличие связи между параметрами эмиссии электромагнитных волн из плазмы, образующихся при коллективной релаксации электронных пучков в плазме, и внешними условиями системы (величины плотности плазмы, ведущего магнитного поля, параметров электронного пучка и др.).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **проведена модернизация** метода параметрической регуляризации для решения уравнения Фредгольма I-го рода на базисе полосовых θ -функций Хевисайда с целью получения новых данных о локальных значениях функционального решения, что обеспечило получение новых результатов по теме диссертационного исследования, а именно дало информацию о спектре излучения;
- **показана** слабая сходимость модифицированного метода решения обратной задачи (интегрального уравнения Фредгольма I-го рода) на основе параметрической регуляризации с выбором в качестве базисных функций набор полосовых θ -функций Хевисайда с фиксированными границами области восстановления.

Применительно к проблематике диссертации также результативно использован метод восстановления данных, основанный на теореме о среднем. В рамках диссертации, применительно к данному методу, также развит подход к коррекции внеполосовой чувствительности регистрирующей аппаратуры для восстановления данных;

- **исследована** мелкомасштабная (по времени, характерная величина $< 10 \text{ нс}$) структура электромагнитного излучения, выходящего из плазмы в окрестности верхнегибридной и удвоенной верхнегибридной плазменных частот, установлено наличие корреляции эмиссии электромагнитных волн с темпом нагрева плазмы;
- **изложена** гипотеза о том, что основным источником электромагнитного излучения являются локальные области плазмы, соответствующие динамическим провалам плотности. Данная гипотеза позволяет качественным образом объяснить наличие корреляции между мощностью выходящего из плазмы излучения, числом

отдельных всплесков излучения и скоростью роста диамагнитного давления плазмы;

- **выявлено**, что во время интенсивной релаксации электронного пучка в плазме изменяется степень поляризации выходящего из плазмы электромагнитного излучения, что может быть связано с изменением спектра плазменной турбулентности.

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

- **разработан и создан** комплекс радиометрических диагностик на квазиоптических элементах – 8-канальный полихроматор, а также двухканальный поляриметр, которые были **внедрены** в общий диагностический комплекс установки ГОЛ-3. При помощи данных диагностик получены новые экспериментальные данные, которые легли в основу диссертационной работы;
- **отработана** методика абсолютной калибровки разработанных радиометрических диагностик;
- **определены** экспериментальные условия, при которых во время релаксации пучка электронов с энергией 100 кэВ в плазме с плотностью $n_e = 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ происходит интенсивная генерация электромагнитного излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **экспериментальные результаты** были получены на установке ГОЛ-3, позволяющей изменять параметры эксперимента в широких пределах. Определение внешних параметров эксперимента при этом осуществлялось при помощи всего диагностического комплекса установки ГОЛ-3.

Для получения абсолютных величин мощности электромагнитного излучения, выходящего из плазмы проводилась обоснованная абсолютная калибровка экспериментального оборудования.

Эксперименты устойчиво воспроизводятся при идентичных внешних параметрах системы, что позволяет судить о статистической значимости полученных результатов;

- **идея** радиометрической диагностики **базируется** на анализе публикаций по методам регистрации излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, а также выделения наперед заданного спектрального состава регистрируемого излучения при помощи частотно-избирательных поверхностей (метаматериалов);
- **выдвигаемые гипотезы построены** на известных фактах, а также проверяемых данных, также **имеют согласие** с экспериментальными данными, полученными ранее на установках ГОЛ-М и ГОЛ-3;
- **установлено** качественное согласие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по тематике турбулентного нагрева плазмы и подавлению продольной электронной теплопроводности плазмы;
- **использованы** современные методики сбора и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя: все основные результаты по теме исследования получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в создании диагностического комплекса, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, проведении расчетов, подготовке публикаций.

На заседании от 25.12.2017 г. диссертационный совет принял решение присудить **Склярову Владиславу Фатыховичу** ученую степень **кандидата физико-математических наук**.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 19, против 1, недействительных бюллетеней 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 /

26.12.2017 г.