

Учебно-методическая статья

УДК 621.039.6; 378.096

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

Кафедра физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета

Владимир Вадимович Анненков¹, Андрей Васильевич Аржанников²
Пётр Андреевич Багрянский³, Алексей Дмитриевич Беклемишев⁴
Владимир Иванович Давыденко⁵, Станислав Леонидович Сеницкий⁶
Дмитрий Иванович Сквородин⁷, Антон Вячеславович Судников⁸
Иван Сергеевич Черноштанов⁹, Эдуард Александрович Федоренков¹⁰
Андрей Александрович Шошин¹¹

¹⁻¹¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹⁻¹¹ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ annenkov.phys@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5577-8595>

² a.v.arzhannikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

³ P.A.Bagryansky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5388-0492>

⁴ bekl@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6297-1337>

⁵ V.I.Davydenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3250-1745>

⁶ S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>

⁷ D.I.Skvorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>

⁸ A.V.Sudnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2994-9899>

⁹ I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3801-4382>

¹⁰ E.Fedorenkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9475-4860>

¹¹ a.a.shoshin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-2377-5012>

Аннотация

В статье описана система подготовки научно-инженерных кадров на кафедре физики плазмы физического факультета НГУ с активным участием в этом процессе научных сотрудников плазменных лабораторий Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. В тексте дано представление о плазме, как о предмете, изучаемом на этой кафедре, и далее отражена следующая информация: история создания кафедры, читаемые по кафедре спецкурсы, тематика бакалаврских и магистерских диссертаций, достижения выпускников кафедры в последнем десятилетии. С учетом основной тематики научных исследований в плазменных лабораториях ИЯФ в тексте представлен обзор работ на работающих в Институте плазменных установках и обозначена перспектива создания линейной плазменной ловушки следующего поколения (ГДМЛ). Особое внимание уделено перспективе использования открытых магнитных систем для удержания горячей плазмы применительно к решению проблемы управляемого термоядерного синтеза, поскольку эти системы должны послужить полем основной деятельности будущих выпускников кафедры физики плазмы.

Ключевые слова

кафедра физики плазмы, магнитное удержание плазмы, пучок нейтральных атомов, релятивистский электронный пучок, пучково-плазменная система

Для цитирования

Анненков В. В., Аржанников А. В., Багрянский П. А., Беклемишев А. Д., Давыденко В. И., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И., Судников А. В., Черноштанов И. С., Федоренков Э. А., Шошин А. А. Кафедра физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 118–141. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

© Анненков В. В., Аржанников А. В., Багрянский П. А., Беклемишев А. Д.,
Давыденко В. И., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И., Судников А. В.,
Черноштанов И. С., Федоренков Э. А., Шошин А. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 118–141

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 118–141

Department of Plasma Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University

Vladimir V. Annenkov¹, Andrey V. Arzhannikov²
Peter A. Bagryansky³, Alexei D. Beklemishev⁴
Vladimir I. Davydenko⁵, Stanislav L. Sinitsky⁶
Dmitry I. Skovorodin⁷, Anton V. Sudnikov⁸
Ivan S. Chernoshtanov⁹, Eduard A. Fedorenkov¹⁰
Andrey A. Shoshin¹¹

¹⁻¹¹ Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation
¹⁻¹¹ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹ annenkov.phys@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5577-8595>
² a.v.arzhannikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>
³ P.A.Bagryansky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5388-0492>
⁴ bekl@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6297-1337>
⁵ V.I.Davydenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3250-1745>
⁶ S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>
⁷ D.I.Skovorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>
⁸ A.V.Sudnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2994-9899>
⁹ I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3801-4382>
¹⁰ E.Fedorenkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9475-4860>
¹¹ a.a.shoshin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-2377-5012>

Abstract

The article describes the system of scientific-engineering training at the Plasma Physics Department at the Physical Department, NSU with the active participation in this process of researchers from the plasma laboratories of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The text gives an idea of plasma as a subject studied in this department, and then consistently reflects the following information: the history of the department, the special courses taught in the department, the subjects of undergraduate and graduate theses, the achievements of graduates of the department in the last decade. Taking into account the main topic of scientific research in the plasma laboratories of the BINP SB RAS, the text gives an overview of the work at the plasma facilities operating at the institute and outlines the prospect of creating a next-generation linear plasma trap (GDMT). Particular attention is paid to the prospect of using open magnetic systems for hot plasma confinement in relation to solving the problem of controlled thermonuclear fusion, since these systems should serve as the field of primary activity for future graduates of the Department of Plasma Physics.

Keywords

Plasma Physics Department, magnetic plasma confinement, neutral atom beam, relativistic electron beam, beam-plasma system

For citation

Annenkov V. V., Arzhannikov A. V., Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Davydenko V. I., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Sudnikov A. V., Chernoshtanov I. S., Fedorenkov E. A., Shoshin A. A. Department of Plasma Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 118–141. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

Плазма, термоядерные исследования, история кафедры

Плазма – это «четвертое» состояние вещества, которое представляет собой газ, образованный положительными тяжелыми частицами – ионами и легкими электронами. Это состояние получается из обычного газа нейтральных атомов или молекул путем ионизации, т. е. отрывания от них одного или нескольких электронов. В обычном газе взаимодействие частиц происходит при их непосредственном столкновении – близкодействующее взаимодействие. В противоположность газу взаимодействие заряженных частиц плазмы происходит

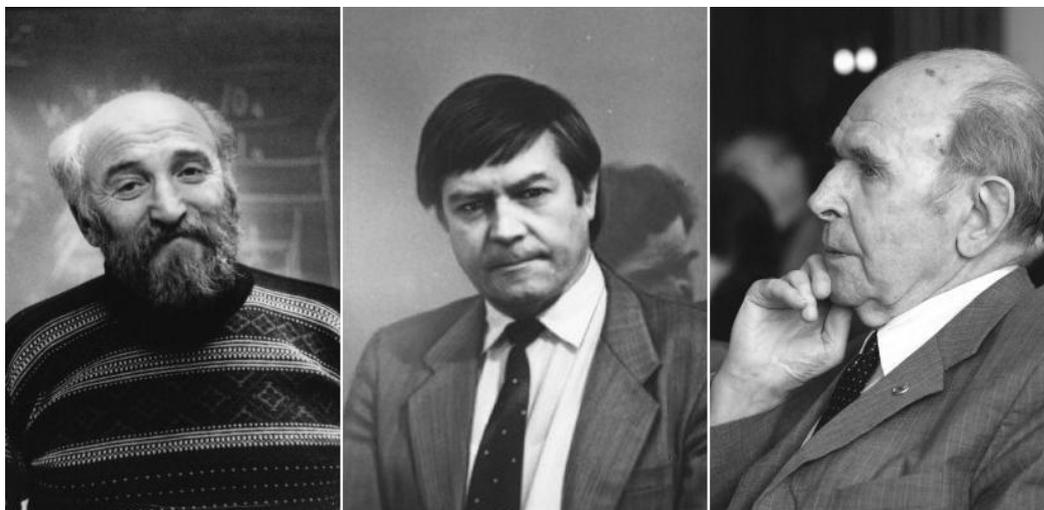
через пространственно распределенное электромагнитное поле, что соответствует понятию дальнего взаимодействия. Наряду с электромагнитным полем, создаваемом в плазме внешними по отношению к ней источниками, вклад в это поле вносят также ионная и электронная компоненты плазмы. Суперпозиция внешнего и собственного полей дает результирующее поле в плазме, которое определяет пространственное распределение обеих ее компонент, а также скорости движения ее частиц. В частности, при смещении электронов относительно ионов в локальной области плазмы возникает их взаимное притяжение с высокой напряженностью электростатического поля, которое препятствует дальнейшему разделению этих двух компонентов плазмы. Такое явление обеспечивает в плазменной среде низкий уровень плотности заряда в локальных пространственных областях, что обозначено термином «квазинейтральность» плазмы. В этих условиях движение электронов и ионов в плазме осуществляется в самосогласованном режиме через их взаимодействие посредством результирующего электромагнитного поля.

Поскольку сечение кулоновского взаимодействия отдельных частиц плазмы при столкновении между собой зависит от величины передаваемой энергии обратно пропорционально квадрату этой величины, то оказывается, что для плазмы с высокоэнергичными частицами требуется длительное время для достижения термодинамического равновесия. В этих условиях в неравновесной плазме развиваются различные виды присущих ей неустойчивостей, которые базируются на резонансных явлениях в системе «заряженные частицы – электромагнитное поле». Развитие неустойчивостей может приводить к сильно нелинейным колебаниям и, в конечном счете, к турбулентным процессам. Это обуславливает немислимо большое количество возможных состояний плазменных образований, что наблюдается в космическом пространстве и реализуется в лабораторных и промышленных установках. Оказывается, что вещество вселенной в подавляющем числе случаев находится в состоянии плазмы. А на Земле плазменная среда положена в основу большого разнообразия инженерных решений в создаваемых промышленных установках и технологических процессах.

Термин «плазма» применительно к ионизованному газу был введен в 1928 г. американским физиком Ирвингом Ленгмюром в статье «Колебания в ионизованных газах». Исходя из этого можно утверждать, что научные знания по физике плазмы начали формироваться 90 лет назад. К настоящему времени уже сложились научные школы, получены «классические» результаты. Обнаружено много сильно отличающихся состояний плазмы: слабо- и полностью ионизованная, идеальная и неидеальная, вырожденная и др. Придумано много методов исследования и описания плазмы. Изобретено множество технических устройств и технологических процессов с использованием плазмы. Однако до сих пор значительная часть явлений не поддается точному расчету (нет их полного понимания), постоянно обнаруживаются новые эффекты, многие цели не достигнуты. Есть большой простор для новых открытий, научных результатов и изобретений.

Середина 50-х гг. прошлого века была отмечена бурным развитием физики плазмы во всех ведущих странах, что связано с началом проведения систематических исследований, направленных на решение проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС). По инициативе первого директора Института ядерной физики академика Г. И. Будкера эти исследования были начаты в Институте в 1960 г., непосредственно при его создании, и продолжают до настоящего времени. В ходе исследований по проблеме УТС выяснилось, что плазма представляет собой весьма сложную субстанцию, и решение проблемы займет много десятков лет в рамках научно-исследовательских работ всех развитых стран. В этих условиях возникла острая необходимость подготовки научно-инженерных кадров именно по направлению физики плазмы. В 1972 г. академик Г. И. Будкер предложил молодому доктору физико-математических наук Д. Д. Рютову создать кафедру физики плазмы на физфаке НГУ, которая должна была сосредоточиться на подготовке физиков-исследователей для работы в плазменных лабораториях ИЯФ [1]. Начиная с создания и до 1997 г. кафедру физики плазмы возглавлял Д. Д. Рютов, затем до 2009 г. – Э. П. Кругляков, и далее до 2019 г. – А. А. Иванов.

Последние три года кафедра возглавлялась А. Д. Беклемишевым. С 2022 г. кафедрой руководит Д. И. Сковородин. Профессорско-преподавательский состав кафедры состоит главным образом из сотрудников термоядерных лабораторий ИЯФ. В ходе смены поколений состава работников кафедры и процесса накопления опыта и знаний на кафедре физики плазмы сложилась ведущая научная школа, имеющая высокий авторитет на мировом уровне.



Академики Г. И. Будкер, Д. Д. Рютов, Э. П. Кругляков
Academicians G. I. Budker, D. D. Ryutov, E. P. Kruglyakov

Основной научной задачей плазменных лабораторий ИЯФ остается разработка термоядерного реактора на основе линейной магнитной ловушки. Однако в настоящее время значительная часть усилий направлена также и на прикладные исследования, направленные на создание различных инженерно-технических устройств, предназначенных для создания и управления плазменными объектами или использующих плазму в технологических задачах. Плазму надо создавать, нагревать и исследовать с помощью зондовых, микроволновых, оптических или корпускулярных методов, а также моделировать с помощью аналитических методов и численно. Поэтому диапазон возможных специализаций студентов кафедры физики плазмы очень широк.

Система подготовки выпускников.

Базовые лаборатории и тематика проводимых в них исследований.

Практика в лабораториях и примеры квалификационных работ выпускников

С момента организации кафедры физики плазмы система подготовки на ней специалистов проходит по схеме, принятой на физфаке НГУ, а именно: на третьем году обучения происходит специализация студентов по направлениям подготовки, которая сопровождается их распределением по выпускающим кафедрам. При обучении на этих кафедрах значительная доля времени обучения студентов отводится их участию в научно-исследовательских работах в лабораториях институтов СО РАН. Для кафедры физики плазмы такими базовыми лабораториями являются плазменные лаборатории ИЯФ (Лаб. 9-0, 9-1, 10). На третьем курсе каждому студенту кафедры назначается научный руководитель, с которым он определяет тему дальнейшей научной работы. Этому предшествует важный и сложный процесс, который осуществляется кафедрой путем проведения экскурсий на установки, а также организацией встреч, обсуждений и собеседований с возможными научными руководителями. В этом про-

цессе важна собственная инициатива студентов. Предварительную информацию о базовых лабораториях кафедры и потенциальных научных руководителях студенты могут получить еще на первом-втором курсах в процессе выполнения курсовых работ на базе кафедры, а также в ходе экскурсий в Институт. В процессе дальнейшего обучения, специализация студента может измениться, например, при поступлении в магистратуру. Такие изменения всегда требуют значительной дополнительной работы как со стороны студента, так и со стороны научного руководителя, поэтому осознанный выбор специализации и научного руководителя на третьем курсе крайне важен.



Студент 3 курса ФФ НГУ Роман Иванов собирает диагностическую систему для установки КОТ

Roman Ivanov, a 3rd year student of Department of Physics, NSU, assembles a diagnostic system for CAT installation

Лаборатория 9-0 занимает лидирующие позиции в мире по разработке и созданию инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов изотопов водорода. Такие инжекторы нужны для диагностики и нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы. Инжекторы, разработанные и созданные в Институте ядерной физики, успешно применяются для нагрева и диагностики горячей плазмы в ведущих лабораториях России, США, Германии, Швейцарии, Италии, Испании.

Планируемая мощность инжекции в современных магнитных системах достигает уровня нескольких десятков мегаватт. Интенсивные пучки быстрых атомов получают нейтрализацией интенсивных ионных пучков, сформированных большими ионными источниками. Перезарядные инжекторы с энергией атомов до 100 кэВ должны обеспечивать ввод мощности в заданную область плазмы, кроме того, для оптимизации создания плазмы требуется контролируемое изменение мощности и энергии пучка во времени. Для инжекции в термоядерные системы с плотной плазмой большого размера энергия атомов пучка до 100 кэВ является

недостаточной из-за неглубокого проникновения атомов в плазму. Поэтому энергия инжектируемых атомов должна быть увеличена. Такое увеличение энергии может быть достигнуто за счет применения инжекторов пучков быстрых атомов, основанных на обдирке пучков интенсивных отрицательных ионов [2].

Лаборатория 9-0 в последние годы существенно продвинулась в развитии инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов водорода. Разработаны, испытаны и производятся перезарядные инжекторы пучков быстрых атомов водорода с мощностью 1 МВт и длительностью импульса до 2 с, а также импульсные инжекторы с мощностью пучка до 3 МВт. Ведутся работы по оригинальному инжектору пучка атомов водорода с энергией до 1 МэВ на основе отрицательных ионов [2]. Инжектор основан на раздельном формировании и ускорении пучка отрицательных ионов. В настоящее время разработан и испытан поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с током пучка свыше 1 А и энергией более 100 кэВ и ведутся успешные эксперименты по ускорению пучка. Также экспериментально исследованы и испытаны прототипы плазменной и фотонной мишеней для обдирки пучков отрицательных ионов водорода.



Стенд для испытаний инжектора пучка атомов водорода с энергией до 1 МэВ
на основе отрицательных ионов
Test site for hydrogen atom beam injector with energy up to 1 MeV based on negative ions

В лаборатории 9-0 работа по созданию и исследованию инжекторов пучков быстрых атомов водорода выполняется на экспериментальных установках и стендах. Для проведения работы требуется глубокое понимание физических процессов в элементах инжектора и проведение численного моделирования этих процессов с использованием современных кодов.

Установка БНЗТ (бор-нейтронозахватная терапия рака) включает в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией, и мишени для генерации нейтронов, фотонов, позитронов и α -частиц [3]. На установке получают мощные стационарные пучки протонов или дейтронов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА, мощные пучки нейтронов различного энергетического диапазона: холодные, тепловые, эпитепловые, над-эпитепловые, моноэнергетические и быстрые, яркие потоки 478 или 511 кэВ фотонов, α -частиц и позитро-

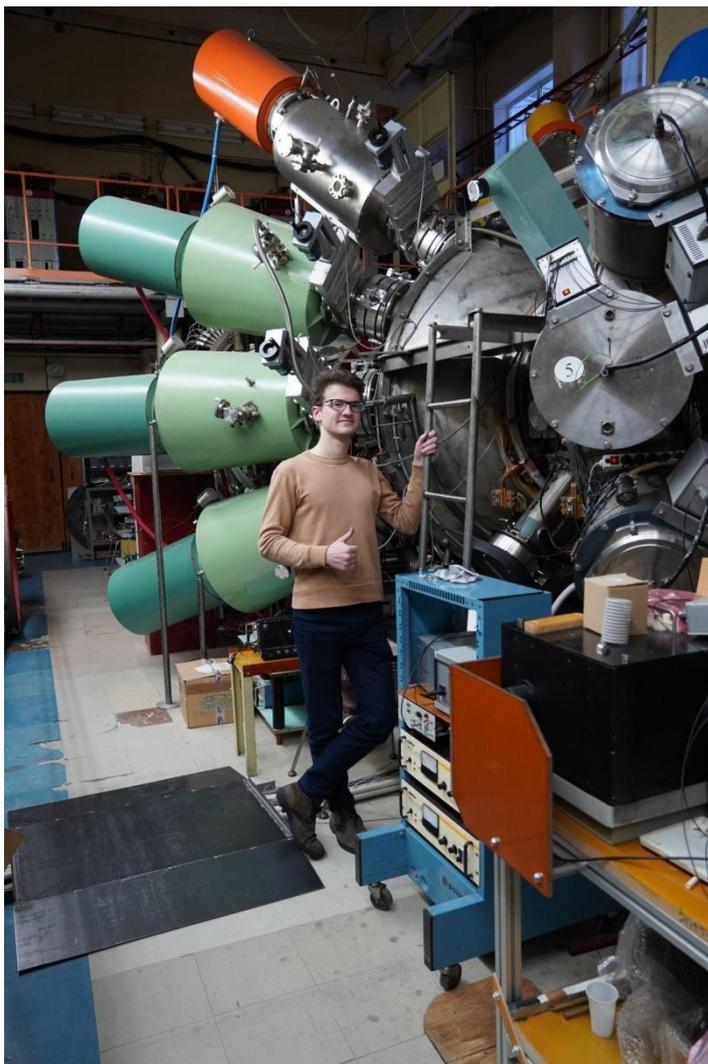
нов. Установку применяли для изучения радиационного блистеринга металлов при имплантации протонов, для измерения сечений реакций ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$, для развития методики бор-нейтронозахватной терапии, для активационного анализа карбида бора и стали [4], сделанных для Международного термоядерного реактора ИТЭР, для определения элементного состава поверхностей измерением энергетического спектра обратно-рассеянных протонов и планируют применять для радиационного тестирования материалов, разработанных для функционирования Большого адронного коллайдера в ЦЕРН в режиме высокой светимости, для детального изучения перспективной безнейтронной термоядерной реакции ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$, для нейтронной дифракции и для множества других приложений. Установка стала прототипом источника нейтронов, поставленного в Китай, в одну из первых шести построенных клиник БНЗТ в мире, и источников нейтронов, изготавливаемых для клиник в России и Италии. Сделанная своими руками установка стала уникальным центром по проведению научных исследований в различных областях знаний в тесной международной кооперации.

Основной объем исследований **лаборатории 9-1** в предшествующие годы был выполнен на установке «газодинамическая ловушка» (ГДЛ), магнитная система которой представляет собой соленоид с магнитными пробками – катушками, создающими сильное магнитное поле по торцам соленоида [5]. Плазма, удерживаемая в ГДЛ, содержит две компоненты ионов. Одна из компонент имеет изотропную в пространстве скоростей максвелловскую функцию распределения с температурой в несколько сотен электрон-вольт. Ее удержание в ловушке аналогично удержанию газа в сосуде с малым отверстием, что и определило название системы. Другая компонента ионов имеет энергию термоядерного диапазона в несколько десятков килоэлектрон-вольт и образуется в результате захвата плазмой мощных атомарных пучков.

В результате успешно проведенных экспериментальных кампаний на установке ГДЛ была продемонстрирована перспективность использования магнитных ловушек открытого типа с простейшей осесимметричной конфигурацией в качестве мощных нейтронных источников и драйверов для подкритических реакторов деления. В ходе работы решен ряд ключевых проблем физики газодинамической ловушки и, в целом, магнитных систем открытого типа для удержания плазмы. Принципиальный результат, определяющий перспективы данного направления исследований по управляемому термоядерному синтезу, был получен в экспериментах по комбинированному нагреву плазмы нейтральными пучками и мощным микроволновым излучением. В этих экспериментах с открытой ловушкой, работающей в квазистационарном режиме, достигнуты рекордные для нее значения температуры электронной компоненты плазмы – около 1 кэВ при средней энергии ионов более 10 кэВ. В результате впервые в магнитной ловушке открытого типа было продемонстрировано устойчивое удержание плазмы с параметрами, требуемыми для создания мощного нейтронного источника, необходимого для ряда актуальных приложений. При этом были решены следующие задачи.

- Экспериментально продемонстрирована возможность стабилизации плазмы высокого давления в магнитной ловушке открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией. Впервые в такой ловушке достигнуто значение параметра $\beta = 60\%$ в устойчивом режиме с дифференциальным вращением плазмы [5–8]. $\beta = 8\pi P_{\text{плазмы}}/B^2$ – отношение давления плазмы к эффективному давлению магнитного поля. Этот параметр характеризует эффективность использования магнитного поля для удержания плазмы. При $\beta = 1$ магнитное поле используется максимально эффективно.

- За счет использования наклонной инжекции мощных атомарных пучков достигнуто стабильное относительно развития ионно-циклотронных неустойчивостей удержание горячих ионов с энергиями термоядерного диапазона и плотностью до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [5]. Показано, что в этих условиях релаксация быстрых ионов определяется в основном кулоновскими соударениями с электронами, поэтому повышение электронной температуры является ключевым фактором, обеспечивающим увеличение времени удержания горячей компоненты плазмы.



Студент 4 курса ФФ НГУ А. В. Сандомирский рядом с газодинамической ловушкой (ГДЛ)
 A. V. Sandomirsky, 4th year student of Department of Physics, NSU, next to the Gas Dynamic Trap (GDT)

- Предложена и реализована новая схема электронного циклотронного нагрева, основанная на эффекте захвата излучения в неоднородной плазме. В результате в режимах с дополнительным ЭЦР нагревом была достигнута рекордная для квазистационарных магнитных ловушек открытого типа величина электронной температуры – около 1 кэВ [8]. В предыдущих экспериментах на открытых ловушках температура электронов была ограничена величиной менее 0,3 кэВ.

- Продемонстрирован связанный с увеличением электронной температуры рост времени удержания энергичных ионов и выхода термоядерных нейтронов; показано, что повышение электронной температуры вплоть до 1 кэВ не меняет газодинамический характер удержания в центральных областях плазменного столба [8; 9]. Экспериментально подтверждены теоретические представления о механизме поглощения СВЧ излучения в используемой схеме нагрева плазмы [10].

- Реализован новый способ инициации разряда с помощью пробоя нейтрального газа микроволновым излучением в условиях электронного циклотронного резонанса и создания мишенной плазмы для захвата мощных атомарных пучков, существенно улучшающий параметры плазмы на развитой стадии разряда.

- Предложен и реализован новый метод МГД-стабилизации разрядов с предельно высокими значениями электронной температуры, реализующихся при резонансном СВЧ нагреве плазмы с локализацией области поглощения в центре плазменного шнура [8].

Эти достижения позволяют кардинально пересмотреть возможности использования магнитных ловушек открытого типа, таких как ГДЛ, тандемная или многопробочная ловушки, в качестве источника нейтронов для материаловедческих исследований по программе управляемого термоядерного синтеза, реактора для «дожигания» радиоактивных элементов для глубокой переработки ядерных отходов и гибридного энергетического реактора, работающего по схеме «синтез-деление». Предложение по конфигурации такого реактора сформировано сотрудниками кафедры в работах [11; 12].

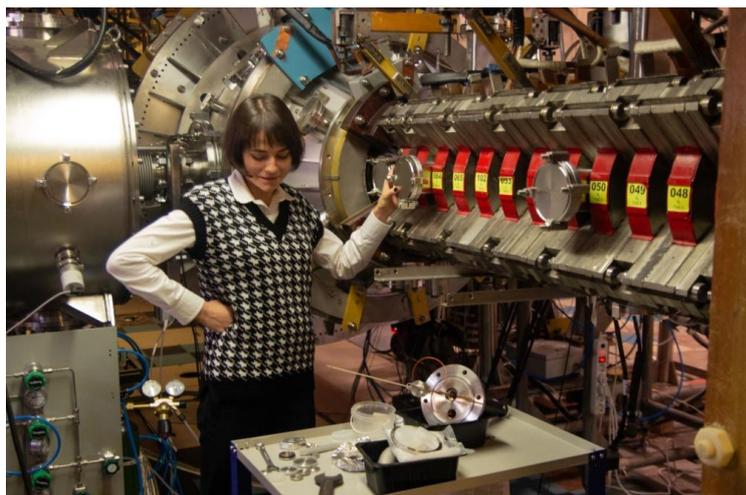
Сегодня одним из основных направлений исследовательской программы на установке ГДЛ является дальнейшее продвижение в сторону эффективного использования магнитного поля для удержания плазмы, т. е. демонстрация устойчивого удержания плазмы с $\beta \rightarrow 1$. С подобной же целью в 2021 г. введена в строй новая установка САТ (Compact axisymmetric toroid), или КОТ (компактный осесимметричный тороид). Эксперимент на этой установке должен продемонстрировать стабильное удержание плазмы с горячими ионами, энергия которых лежит в термоядерном диапазоне, а магнитное поле, созданное диамагнитными токами внутри плазмы, имеет величину сравнимую либо превосходящую магнитное поле ловушки, т. е. формируется конфигурация с обращенным полем. При этом частицы плазмы в основном должны удерживаться магнитным полем, созданным самой плазмой. В этой области мы конкурируем с коллегами из компании «ТАЕ Technologies, Inc.» (США), где проведена серия успешных экспериментов по удержанию горячей плазмы с предельно достижимым параметром на установке С2-W [13].

Направления научно-исследовательских работ, проводимых в **лаборатории 10**, сформировались в течение последних тридцати лет при решении задач удержания высокотемпературной плазмы с помощью многопробочной магнитной ловушки и нагрева этой плазмы путем накачки плазменных колебаний пучком релятивистских электронов с током в несколько десятков килоампер.

Использование многопробочного магнитного поля дает возможность подавления потоков частиц и энергии вдоль силовых линий магнитного поля, что обеспечивает сильное снижение продольных потерь термоядерной плазмы из такой магнитной ловушки. Многопробочная ловушка представляет собой цепочку коротких пробкотронов с небольшим пробочным отношением. Метод удержания плазмы в ней основан на том, что в пространственно периодическом магнитном поле значительная доля плазменных ионов оказывается запертой между двумя пробками отдельного пробкотрона, из которых составлена ловушка. При рассеянии эти ионы покидают отдельный пробкотрон через обои его концы случайным образом, что обеспечивает диффузионный характер их движения вдоль оси магнитной ловушки. Это приводит к значительному росту времени жизни иона в ловушке по отношению к случаю ловушки с однородным по длине магнитным полем [14]. Секции с многопробочным магнитным полем за счет многократного подавления продольных потерь частиц и энергии из центральной ловушки являются одним из ключевых элементов в концепции осесимметричных открытых ловушек реакторного класса. В лаборатории используются две установки, на которых ведутся исследования по многопробочному удержанию плазмы.



Студент 4 курса ФФ НГУ К. С. Колесниченко
около одного из инжекторов пучков атомов установки КОТ
K.S. Kolesnichenko, 4th year student of Department of Physics, NSU,
near one of the atom beam injectors of CAT



Студентка 3 курса ФФ НГУ П. А. Полозова рядом с установкой ГОЛ-НВ
P. A. Polozova, a 3rd year student of Department of Physics, NSU, near the GOL-NB installation

Установка ГОЛ-NB предназначена для непосредственной демонстрации многопробочного подавления продольных потерь из центральной ловушки газодинамического типа. Эта установка была создана за счет глубокой модернизации многопробочной ловушки ГОЛ-3. Первая плазма в ГОЛ-NB была получена в 2019 г. [15]. Установка включает в себя центральную ловушку длиной $\sim 2,5$ м и длинные пробочные секции с прямым либо гофрированным полем. Плазма плотностью $n \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ нагревается пучками нейтральных атомов мощностью до 2 МВт. Предполагается, что использование гофрированного поля приведет к существенному росту времени жизни и давления удерживаемой плазмы. Основными задачами установки являются определение зависимости эффективности удержания плазмы от конфигурации эксперимента, исследование различных методов стабилизации плазмы в осесимметричной магнитной конфигурации, а также проверка отдельных физических явлений, обнаруженных на установке ГДЛ.

Сравнительно недавно А. Д. Беклемишевым была выдвинута новая физическая идея динамического многопробочного удержания плазмы за счет винтового характера силовых линий магнитного поля. В этом случае торможение плазмы при ее распространении вдоль оси магнитной ловушки обеспечивается встречным движением магнитных пробочек при рассмотрении физического процесса в системе координат, движущейся вместе с потоком плазмы [16]. Во вращающейся синхронно с плазмой системе отсчета периодические вариации магнитного поля движутся вдоль оси плазменного шнура. Гофрированное магнитное поле передает импульс захваченным в отдельных пробочках ионам, и в результате за счет столкновений между ионами создается сила, тормозящая продольное течение плазмы. В теоретическом рассмотрении этого физического механизма торможения продольного течения плазмы продемонстрирован экспоненциальный закон снижения потерь в такой ловушке с увеличением ее длины. Следует отметить, что смена направления прокручивания силовых линий винтового магнитного поля на противоположное создает условия для эффективного ускорения ионов плазмы [17], что открывает перспективу создания плазменных реактивных двигателей с высокой тягой [18].

Для проверки концепции подавления продольных потерь из магнитной ловушки за счет прокручивания силовых линий магнитного поля в ИЯФ сооружена установка СМОЛА, на которой в 2017 г. проведена первая серия экспериментов. Поток плазмы с плотностью $10^{18} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$ пропускается через транспортную секцию с 12 периодами винтового магнитного поля. В ходе экспериментов уже подтверждена идея удержания плазмы винтовым магнитным полем [19]. Основными задачами исследований на этой установке являются детальное изучение процессов удержания и ускорения плазмы в винтовом магнитном поле, а также управление длиной свободного пробега ионов в такой системе.

Исследование взаимодействия мощных релятивистских электронных пучков (РЭП) с плотной плазмой проводилось ранее для осуществления быстрого ее нагрева (см. [14]), поскольку импульсная мощность этих пучков достигает 20 ГВт. В ходе исследований по пучковому нагреву плазмы был обнаружен ряд интересных физических эффектов, связанных с генерацией электромагнитных волн с длиной волны в области одного миллиметра [20; 21]. Активное научное и инженерное освоение этого нового спектрального диапазона электромагнитного излучения началось в последнее десятилетие, и это придает особую актуальность изучению механизмов генерации потоков субмм-излучения большой мощности [21]. Экспериментальные исследования по генерации субмм-излучения при пучково-плазменном взаимодействии проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ по схеме накачки пучком верхнегибридных колебаний в замагниченном плазменном столбе и последующей трансформации этих колебаний в направленный поток субмм-излучения, распространяющийся в атмосфере. Установлены закономерности формирования спектрального состава потока излучения и эволюции функции распределения электронов пучка при взаимодействии с плазмой [22]. Кроме рекордного энергосодержания (десятки джоулей в микросекундном импульсе), генерация потока излучения в системе «пучок – плазма» обеспечивает быструю перестройку частоты за

счет варьирования параметров плазмы. Важно отметить, что метод решения задачи о накачки колебаний в плазме вполне применим и для решения задач при возбуждении волн в других средах. Примером может служить решение задачи о возбуждении корабельных волн, которая была впервые рассмотрена в работе Уильяма Томсона (лорда Кельвина) в 1891 г. для случая движения корабля по водной поверхности. Методы, используемые при решении задачи о возбуждении плазменных колебаний, позволили построить решение по возбуждению корабельной волны объектом, движущимся глубоко под поверхностью воды [23; 24].



Установка СМОЛА для изучения течения плазмы в винтовом магнитном поле
SMOLA facility for the study of plasma flow in a helical magnetic field

Второе направление по созданию мощных источников субмм-излучения на основе килоамперных РЭП базируется на двухстадийной схеме, предложенной в [25]. В этих экспериментах один ленточный пучок накачивает электромагнитные колебания с частотой 75 ГГц [26], которые накапливаются в кольцевом планарном резонаторе. Через этот резонатор проходит также и второй ленточный пучок, рассеяние волн на котором обеспечивает преобразование мм-излучения в субмиллиметровую область на частоте в окрестности одного терагерца. Комплекс диагностик установки ЭЛМИ должен обеспечить получение информации об изменениях функции распределения используемых релятивистских пучков, а также детальные измерения спектрального состава как миллиметрового, так и субмиллиметрового излучения.

Также в лаборатории исследуются важные прикладные задачи взаимодействия мощных электронных пучков с металлическими мишенями. Важной для будущих термоядерных реакторов задачей является устойчивость материалов первой стенки к импульсному нагреву, вызванному потоками плазмы. Так, в токамаках импульсная потеря энергии при модах возмущений, локализованных на краю (ELMs – edgelocalized modes), может приводить к растрескиванию и плавлению тугоплавких вольфрамовых пластин, принимающих плазменный поток. Эти процессы моделируются на установке ВЕТА. Вольфрамовые образцы облучаются

электронным пучком с энергией до 100 кэВ и током до 100 А. Процессы, происходящие с вольфрамом во время микро- и миллисекундных импульсов нагрева с предельной плотностью мощности, изучаются набором оптических диагностик [27]. На основе этих данных ищутся возможности для повышения стойкости первой стенки плазменных установок к импульсным нагрузкам. Установка запущена в 2013 г. и сейчас серьезно модернизируется.

С 2013 г. ИЯФ СО РАН ведет работы в рамках проекта ИТЭР. Институт интегрирует и затем изготовит четыре диагностических порт-плага ИТЭР, разрабатывает и изготовит элементы трех российских диагностических систем для определения параметров плазмы в ИТЭР. ИТЭР (www.iter.org) – крупнейший международный проект по созданию экспериментального термоядерного реактора на основе токамака, который строится на юге Франции. Задача проекта – в демонстрации научно-технологической осуществимости использования термоядерной энергетики в промышленных масштабах, а также в отработке необходимых для этого технологических процессов.

Порт-плаг – это вставка в вакуумную камеру, которая позволяет диагностическим системам получить доступ непосредственно к горячей зоне реактора [28]. Задача интегратора – разместить многочисленные диагностические системы в портах, обеспечить их функциональность и совместимость, возможность дистанционного обслуживания элементов диагностик и обеспечить конструкционную прочность по отношению к большому количеству различных воздействий – большими тепловыми и нейтронными потоками, а также радиационными, механическими и электромагнитными нагрузками. Причем выполнять эти работы нужно в тесном сотрудничестве с разработчиками диагностик, которые разбросаны по всему миру. Для примера, в разрабатываемом ИЯФ СО РАН экваториальном порту № 11 ИТЭР располагается 8 диагностик плазмы [28]: рефлектометрия со стороны слабого поля (США); анализатор нейтральных частиц (Россия, Санкт-Петербург); спектрометрия водородных линий (Россия, Москва); рентгеновский кристаллический спектрометр (Индия); ВУФ спектрометр диверторной плазмы (Корея); анализатор остаточных газов (США); ВУФ спектрометр основной плазмы (Корея); система нейтронной активации (Корея). Разработка портов представляет большую сложность, так как комбинация жестких инженерно-физических требований (например, обеспечить высокое подавление нейтронного потока) встречается с суровыми законодательными ограничениями, так как ИТЭР, согласно законодательству, – ядерный реактор. В рамках работ над проектом ИТЭР в ИЯФ СО РАН создана интеграционная площадка, в которой есть большая «чистая» зона, удовлетворяющая условиям для сборки достаточного количества крупных элементов ядерных реакторов (длина порт-плагов до 6 метров).

Развитие термоядерных исследований в мире как место приложения сил будущих выпускников кафедры физики плазмы

Большая часть работ, проводимых плазменными лабораториями ИЯФ СО РАН, посвящена проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС). Прогресс в параметрах термоядерных установок в мире позволяет говорить о том, что исследования по УТС выходят на «финишную прямую»: на токамаке JT-60 (Япония) продемонстрированы режимы, в которых получено рекордное тройное Лоусоновское произведение (плотность плазмы * температура * время удержания), сооружается ИТЭР – международный токамак, нацеленный на демонстрацию режимов горения плазмы и отработку технологий, в Китае развивается проект ALIANCE, нацеленный на создание гибридной электростанции. В России продолжается строительство токамака T-15МД и разрабатывается проект ТРТ (токамак реакторных технологий). В разных странах развиваются проекты ДЕМО – демонстрационных реакторов, задачей которых будет демонстрация получения электроэнергии на основе термоядерного синтеза. Все проекты ДЕМО сейчас основаны на токамаках, так как токамаки имеют самые высокие параметры по температуре и времени удержания горячей плазмы.

В то же время на пути к коммерчески выгодному реактору до сих пор стоят серьезные трудности, такие как: обеспечение устойчивого горения плазмы в стационарном режиме; стойкость стенок реактора, подвергающихся экстремальным тепловым и механическим нагрузкам, и т. п. Коммерческие реакторы на основе токамаков могут работать только с DT-реакцией, т. е. должны работать с радиоактивным тритием, что резко усложняет постройку и лицензирование (получение разрешения на работу) реактора и, как следствие, сильно увеличивает его стоимость, что снижает его конкурентоспособность.

В перспективе будущее термоядерных реакторов видится на основе безтритиевых реакций (DD, DHe³, pB), но для этих реакций требуется более высокая энергия частиц, поэтому их нельзя реализовать в существующих замкнутых системах типа токамак, но теоретически это возможно реализовать в линейных магнитных системах. Особый интерес также представляют безнейтронные реакции, например ¹¹B(p,α)αα – в этой реакции рождаются три α частицы, и нет нейтронов. Нейтроны вызывают радиационные повреждения всех элементов реактора (стенки камеры, диагностик плазмы, магнитов, конструктивных элементов) и их активацию. Поток нейтронов в проектах коммерческих термоядерных реакторов настолько большой, что на данный момент просто нет сертифицированных материалов, из которых можно было бы изготовить стенку такого реактора.

Учитывая отмеченные особенности энергетических установок с термоядерной плазмой, можно утверждать, что линейные магнитные системы для удержания плазмы, которые создаются в ИЯФ в сотрудничестве с другими научными институтами, имеют неоспоримое преимущество перед тороидальными магнитными системами. Это преимущество – простая с инженерной точки зрения по геометрии магнитная система, допускающая модульный принцип сооружения реактора. В этих условиях обеспечивается быстрое и относительно недорогое строительство термоядерного реактора, а в дальнейшем, в ходе его эксплуатации, возможность удобного ремонта или замены этих модулей.

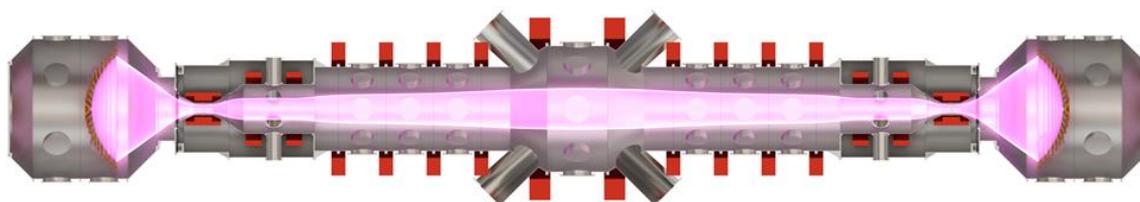
Как много времени нужно, чтобы построить большой токамак, мы можем проследить на опыте сооружения ИТЭР. В 2007 г. началась подготовка площадки для строительства комплекса зданий, сейчас активно ведется строительство токамака (в чем участвуют и ИЯФ СО РАН и выпускники кафедры физики плазмы [28]), а первый запуск по текущему расписанию запланирован на декабрь 2025 г. Но в 2025 г. запущены будут только вакуумная, криогенная и магнитная системы установки с небольшим набором диагностик. Полноценный запуск на изучение DT плазмы в ИТЭР запланирован в декабре 2035 г. Другими словами, постройка большого токамака может занять до 30 лет. На этом фоне линейные плазменные ловушки выгодно отличаются скоростью строительства и низкой ценой. Крупная линейная плазменная установка может быть построена за 4–5 лет.

В настоящее время проведение работ по УТС требует серьезных финансовых и материальных ресурсов, связанных как с необходимостью сооружения крупных установок, так и с их обслуживанием. Для ускорения развития термоядерных технологий в 2020 г. в России принята национальная программа термоядерных и плазменных исследований, предусматривающая сооружение нескольких плазменных установок класса Mega-science. В ИЯФ СО РАН в рамках национальной программы запланировано сооружение двух установок класса Mega-science: прототипа инжектора атомов водорода с энергией 500 кэВ и газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ). На основе прототипа инжектора будет разрабатываться одна из систем дополнительного нагрева для реактора ТРТ.

В настоящее время исследовательская программа на установках термоядерного направления ИЯФ СО РАН ориентирована на экспериментальное обоснование проекта ГДМЛ. Этот проект направлен на развитие достижений в области удержания плазмы в исследованиях на установках ГДЛ и ГОЛ-3, а также предполагает реализацию новых идей: диамагнитного и винтового удержания [29], которые недавно были предложены в ИЯФ СО РАН. Проект направлен на отработку термоядерных технологий, необходимых для создания относительно компактного энергетического реактора ядерного синтеза, способного работать с видами топ-

лива, не содержащими радиоактивный тритий и обладающими практически неисчерпаемым ресурсом добычи.

Установка ГДМЛ (длина плазмы в центральной секции 12 м, магнитное поле до 1,5 Тл в области удержания и до 20 Тл (на основе высокотемпературных сверхпроводников) в магнитных пробках) [29] нацелена на удержание плазмы с термоядерными параметрами в квазистационарном режиме и предназначена, с одной стороны, для отработки реакторных технологий (методы нагрева плазмы, системы стабилизации, ввод вещества и т. п.), а с другой – для моделирования и исследования процессов, происходящих в термоядерном реакторе на основе открытой ловушки. ГДМЛ имеет модульный дизайн, что позволяет начать эксперименты с плазмой и проверить работоспособность заложенных в нее идей по мере строительства установки.



Разрез проекта центральной секции установки ГДМЛ
(расстояние между магнитными пробками 10 м)



Проект установки ГДМЛ с секциями многопробочного удержания (длина 24 метра)
GDMT installation project with multimirror sections (length 24 meters)

В настоящее время разрабатывается техническая документация ГДМЛ. На четырех установках меньшего масштаба (ГДЛ, СМОЛА, ГОЛ-NB, КОТ) проводятся поддерживающие эксперименты по моделированию отдельных аспектов работы ГДМЛ. Проведение экспериментов на указанных стендах и на установке ГДМЛ и дальнейшее развитие программы УТС потребует труда большого количества квалифицированных физиков-плазмистов. Интенсивные исследования в области управляемого термоядерного синтеза и большое количество существующих и новых проектов плазменных установок гарантируют выпускникам кафедры трудоустройство как в России, так и за рубежом.

Кафедральные спецкурсы

Кафедра готовит физиков-исследователей, способных вести плодотворную научно-исследовательскую работу в различных областях физики плазмы, а также заниматься научно-педагогической деятельностью. Для этого студентам предлагается двухуровневая система кафедральных спецкурсов¹:

- в бакалаврской программе даются основы теории плазмы и методов исследования плазмы;

¹ <http://wwwold.inp.nsk.su/chairs/plasma/>.

• в магистратуре студенты более глубоко знакомятся с физикой плазмы применительно к самым современным существующим в мире и ИЯФ установкам по управляемому термоядерному синтезу, а также с использованием плазмы в промышленности.

Часть курсов читается с года основания кафедры, но это не означает, что их содержание остается неизменным. Каждое новое поколение преподавателей вносит в них свои модификации в соответствии с развитием физики плазмы и меняющимися программами смежных дисциплин, сохраняя всё лучшее, накопленное за предыдущие годы. Курсы являются авторскими, оригинальными и не имеют аналогов в России.

Достаточно подробное описание курсов кафедры физики плазмы приведено в статье [1], а также на сайте кафедры ².



Состав кафедры физики плазмы.

Сидят (слева направо): С. Л. Синицкий, А. А. Шошин, А. В. Аржаников, А. Д. Беклемишев.
 Стоят: В. В. Анненков, Э. А. Федоренков, И. В. Тимофеев, М. С. Христо, А. А. Лизунов,
 Т. Д. Ахметов, Д. И. Сковородин, В. В. Поступаев, И. С. Черноштанов, А. В. Судников
 Members of the department of plasma physics.

Sitting (from left to right): S. L. Sinitsky, A. A. Shoshin, A. V. Arzhannikov, A. D. Beklemishev.
 Stand: V. V. Annenkov, E. A. Fedorenkov, I. V. Timofeev, M. S. Christo, A. A. Lizunov,
 T. D. Akhmetov, D. I. Skovorodin, V. V. Postupstuyev, I. S. Chernoshtanov, A. V. Sudnikov

Спецкурсы для обучающихся в бакалавриате

Дисциплина «**Основы физики плазмы**» предназначена для обучения студентов-физиков теоретическим основам физики плазмы. Данный курс читается с 1972 г., структура курса была заложена акад. Д. Д. Рютовым, основной учебник написан проф. И. А. Котельниковым, сейчас лектор – А. Д. Беклемишев.

² <http://wwwold.inp.nsk.su/chairs/plasma/>; <http://www.phys.nsu.ru/department/index.php/chairs/fp>

В курсе дисциплины **«Магнитная гидродинамика»** знакомят с основными теоретическими моделями описания плазмы в гидродинамическом подходе. Данный курс читается с 1972 г., он также сложился под влиянием акад. Д. Д. Рютова, сейчас лектор и автор учебника – проф. И. А. Котельников.

Дисциплина **«Коллективные явления в плазме»** предназначена для ознакомления с иерархией моделей описания плазмы, с кинетическим и гидродинамическим подходами к исследованию волновых свойств плазмы. Курс читается с 1980-х гг., в 2014 г. переработан И. В. Тимофеевым. Сейчас лектор – Д. И. Сквородин.

«Техника плазменного эксперимента» предназначена для обучения основам экспериментальной техники, использующейся для постановки крупных экспериментов по физике плазмы. Основной целью освоения дисциплины является ознакомление с физическими принципами и техническими особенностями систем, оборудования, узлов и отдельных важных элементов, использующихся для создания крупной плазменной установки и проведения сложного эксперимента по физике плазмы и УТС. Курс читали А. Г. Пономаренко (1981–1984 гг.), В. Г. Дудников (1988 г.), В. С. Койдан (с 1989 по 2003 г.), В. И. Давыденко, сейчас лектор – С. В. Полосаткин.

Основной целью освоения дисциплины **«Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1»** является ознакомление с основными методами и оборудованием, используемыми для экспериментального исследования плазмы, принципом работы современных диагностических комплексов на плазменных установках, а также с методом обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных. Данный курс читается на кафедре физики плазмы более 35 лет. Первым лектором был Э. П. Кругляков (1972 г.), затем курс преподавали В. М. Лагунов, А. А. Иванов (с 1988 по 1999 г.), П. А. Багрянский (2000–2003 гг.), А. В. Аникеев (2004–2016 гг.), сейчас лектор – А. В. Судников.

Дисциплина **«Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 2»** посвящена некоторым разделам диагностики плазмы, которые не рассматривались в части 1 курса (главным образом это оптические диагностики плазмы, диагностики мощных пучков заряженных частиц и системы сбора данных крупных плазменных установок). Данный курс читается на кафедре физики плазмы более 30 лет. Его преподавали: Б. А. Князев (1988–1991 гг.), С. В. Лебедев (1994 г.), А. В. Бурдаков (1995–2001 гг.), В. В. Поступаев, И. А. Иванов, сейчас лектор – А. А. Лизунов.

Спецкурсы для обучающихся в магистратуре

Дисциплина **«Дополнительные главы теории плазмы»** предназначена для ознакомления студентов-физиков, специализирующихся в области физики плазмы, с терминологией и основными результатами теоретической физики плазмы, теории турбулентности и динамики сложных систем в приложении к физике горячей плазмы. Курс разработан и читается с 2002 г. А. Д. Беклемишевым.

Курс **«Инженерно-физические проблемы УТС»** знакомит слушателей с состоянием исследований на современных термоядерных установках разных классов. Рассматриваются основные направления: классические и «сферические» токамаки, стеллараторы, другие системы с магнитным удержанием, системы инерциального УТС. Данный курс читается более 30 лет, он преподавался В. Г. Дудниковым (1988–1991 гг.), А. А. Кабанцевым (с 1994 по 1998 г.). В 2000 г. курс полностью переработан В. В. Поступаевым, который читает его и в настоящее время.

Дисциплина **«Мощные электронные и ионные пучки»** предназначена для обучения студентов-физиков теоретическим и экспериментальным основам физики мощных электронных и ионных пучков. В курс входит ознакомление с принципами генерации и транспортировки мощных пучков заряженных частиц, устройствами для их реализации и теоретическими моделями для описания процессов, происходящих во время генерации и транспорти-

ровки. Курс разработал в 1993 г. А. В. Аржанников и читал до 2001 г., затем его сменил С. Л. Синицкий.

Главной целью освоения дисциплины «**Низкотемпературная плазма и газовый разряд**» является ознакомление с основными типами газового разряда и с рядом физических процессов, имеющих существенное значение для поддержания низкотемпературной плазмы. Данный курс читается с 1975 г. Его преподавали Б. А. Князев (1981–1988 и 1996–1999 гг.), В. И. Давыденко (1989–1996, 2000–2003, 2006–2012 гг.), Ю. И. Бельченко (в 2004–2005 гг.), сейчас лектор – Т. Д. Ахметов.

«**Плазма в космосе**» предназначена для ознакомления магистрантов с фундаментальными физическими процессами, происходящими в космосе, строением и эволюцией наблюдаемой части Вселенной, а также с экспериментальными методами и теоретическими моделями, используемыми для изучения и описания космической плазмы. Курс читается более 35 лет, основа заложена Д. Д. Рютовым, затем его преподавал И. А. Котельников, а с 1999 г. в полностью переработанном виде курс читает А. Д. Беклемишев, с 2018 г. его сменил В. В. Анненков.

Целью дисциплины «**Плазменные технологии**» является ознакомление студентов с плазменными технологиями обработки материалов и создания микроструктур, широко используемыми в производстве изделий микроэлектроники и микромеханики, а также с физическими явлениями, лежащими в их основе. Данный курс является оригинальным, в НГУ читается с 1995 г. Первым лектором был В. Г. Дудников, с 1996 г. его читал Ю. И. Бельченко, ему помогали А. С. Золкин (2001 г.) и И. Н. Чуркин (2004–2015 гг.), сейчас лектор – А. А. Шошин.

«**Физика открытых ловушек**» предназначена для ознакомления магистрантов-физиков с текущим состоянием исследований открытых магнитных ловушек для удержания высокотемпературной плазмы, а также с физическими принципами, определяющими работу открытых магнитных ловушек. В 1995 и 1996 гг. курс читал А. М. Кудрявцев, затем в 1996–1998 гг. – В. И. Давыденко, с 1999 г. – А. А. Иванов, с 2018 г. – В. В. Приходько.

Конкурсы и стипендии. Достижения студентов и выпускников кафедры

За последние 15 лет кафедрой подготовлено 119 бакалавров и 76 магистров. Уже на уровне бакалавриата студенты кафедры занимаются научными исследованиями, результаты которых они успешно докладывают не только на студенческих, но и на «взрослых» научных конференциях.

Полученные в рамках выполнения квалификационных работ результаты выпускников кафедры успешно публикуются в ведущих мировых журналах по физике плазмы, таких как «Nuclear Fusion», «Physics of Plasmas», «Plasma Physics and Controlled Fusion» и др.

Во время обучения на кафедре студенты постоянно занимают призовые места на Международной научной студенческой конференции и в Конкурсе молодых ученых ИЯФ СО РАН.

Студенты кафедры, проходящие практику в Институте ядерной физики, регулярно становятся лауреатами стипендий имени выдающихся ученых по соответствующим направлениям.

Отдельные выдающиеся студенческие работы получали признание на всероссийском уровне. Так, А. В. Судников и В. В. Анненков одерживали победы в конкурсе студентов-физиков фонда «Династия», А. А. Горн получил медаль Российской академии наук за работу «Инжекция электронного пучка в кильватерную волну в ограниченной аксиально симметричной плазме», являвшейся его магистерской диссертацией.

Основная часть выпускников магистратуры продолжает заниматься научной деятельностью, обучаясь в аспирантуре ИЯФ СО РАН или НГУ. Уже на данном этапе они успешно получают грантовую поддержку своих исследований. Так, например, были одобрены все заявки на поддержку научных исследований наших выпускников в рамках конкурса РФФИ «Аспиранты». Больше 15 выпускников кафедры удостоились именных стипендий Президен-

та РФ для аспирантов. В среднем около тридцати пяти процентов выпускников магистратуры успешно защищают кандидатские диссертации в конце обучения в аспирантуре.

Некоторые научные достижения выпускников кафедры последних лет:

- И. В. Тимофеевым совместно с учениками (В. В. Анненковым и Е. П. Волчок) открыты и исследованы новые механизмы генерации электромагнитного излучения в плазме с лазерными или электронными пучками. Полученные ими результаты актуальны в задачах разработки мощных источников узкополосного ТГц излучения, а также для интерпретации солнечных радиовсплесков;
- группой К. В. Лотова разрабатывается теоретический базис передовых экспериментов по плазменному кильватерному ускорению частиц. В частности, при их определяющем участии проводится первый в мире эксперимент по ускорению частиц длинным протонным пучком (проект AWAKE в ЦЕРНе);
- А. С. Аракчеевым и Д. И. Сквородиным проведены значительные теоретические и экспериментальные исследования процессов взаимодействия мощных потоков плазмы с поверхностью металлов. Такие исследования являются ключевыми в задаче разработки внутренних стенок будущих термоядерных реакторов;
- А. В. Аржанниковым с группой выпускников кафедры физики плазмы теоретически обоснованы и экспериментально доказаны различные физические механизмы генерации мощным релятивистским электронным пучком мегаваттных потоков излучения на первой и второй гармонике плазменной частоты [20; 22]. В потоке субмиллиметрового излучения микросекундной длительности достигнут рекордный уровень энергосодержания;
- с помощью теоретических и экспериментальных методов С. Л. Синицким и Е. С. Сандаловым были исследованы неустойчивости мощных релятивистских электронных пучков. Разработанные ими способы подавления поперечных неустойчивостей сыграли определяющую роль в успешном запуске новейших сильноточных линейных индукционных ускорителей, необходимых для задач скоростной рентгенографии;
- под руководством А. В. Судникова на установке СМОЛА [14] было осуществлено экспериментальное подтверждение идеи винтового удержания плазмы, предложенной А. Д. Беклемишевым. Системы такого рода позволяют не только улучшить удержания термоядерной плазмы в открытых магнитных ловушках, но также могут быть использованы в качестве плазменного двигателя на космических аппаратах;
- О. З. Сотниковым с коллегами из лаборатории 9-0 разработан и исследован новый ВЧ источник отрицательных ионов для инжектора высокоэнергетичных нейтралов. С помощью таких установок осуществляется основной нагрев плазмы до термоядерных температур [2];
- Д. В. Яковлевым совместно с командой ГДЛ исследована возможность ЭЦР нагрева плазмы в крупномасштабной открытой магнитной ловушке [8]. Была обнаружена возможность нагрева плазмы до температуры 1 кэВ, а также увеличение времени ее удержания в ловушке. Полученные результаты являются рекордными для систем открытого типа и демонстрируют перспективность развития данного направления.

Заключение

Коллектив кафедры физики плазмы НГУ приглашает студентов и магистрантов выбрать одну из наших специализаций, получить высокую квалификацию и незабываемый опыт работы в научном коллективе на передовых позициях науки. Мы уверены, что все студенты кафедры сделают основательные дипломные работы под квалифицированным руководством и найдут интересный вид деятельности после окончания университета.

Список литературы

1. **Кругляков Э. П., Лотов К. В., Шошин А. А.** Кафедра физики плазмы // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 13–22.

2. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 116017. DOI 10.1088/1741-4326/ac175a
3. **Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, no. 10, p. 350. DOI 10.3390/biology10050350
4. **Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al.** Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection. *Fusion Engineering and Design*, 2021, no. 168, p. 112426. DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112426
5. **Ivanov A. A., Prikhodko V. V.** Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, no. 6, p. 063001. DOI 10.1088/0741-3335/55/6/063001
6. **Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I.** Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 351–360. DOI 10.13182/FST10-A9497
7. **Иванов А. А., Приходько В. В.** Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы // Успехи физических наук. 2017. Т. 187, вып. 5. С. 547–574. DOI 10.3367/UFNr.2016.09.037967
8. **Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al.** Stable confinement of high-electron-temperature plasmas in the GDT experiment. *Nuclear Fusion*, 2018, vol. 58, p. 094001. DOI 10.1088/1741-4326/aacb88
9. **Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror. *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, no. 5, p. 053009. DOI 10.1088/0029-5515/55/5/053009
10. **Shalashov A. G., Solomakhin A. L., Gospodchikov E. D. et al.** Electron cyclotron emission at the fundamental harmonic in GDT magnetic mirror. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, p. 082506. DOI 10.1063/1.4994793
11. **Arzhannikov A. V., Anikeev A. B., Beklemishev A. D. et al.** Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 090004. DOI 10.1063/1.4964246
12. **Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V. et al.** Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, vol. 30 (181). DOI 10.1007/s41365-019-0707-y
13. **Gota H. et al.** Overview of C-2W: high temperature, steady-state beam-driven field-reversed configuration plasmas. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 106039. DOI 10.1088/1741-4326/ac2521
14. **Бурдаков А. В., Поступаев В. В.** Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору // Успехи физических наук. 2018. Т. 188, С. 651–671. DOI 10.3367/UFNr.2018.03.038342
15. **Postupaev V. V. et al.** Results of the first plasma campaign in a start configuration of GOL-NB multiple-mirror trap. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, p. 025008. DOI 10.1088/1361-6587/ab53c2
16. **Beklemishev A. D.** Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63 (1T), pp. 355–357. DOI 10.13182/FST13-A16953
17. **Beklemishev A. D.** Helical plasma thruster. *Phys. Plasmas*, 2015, no. 22, p. 103506.
18. **Аржаников А. В., Беклемишев А. Д.** Электрореактивный двигатель высокой тяги с гофрированным винтовым магнитным полем // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 1. С. 107–118.
19. **Sudnikov A. V. et al.** Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness. *Journal of Plasma Physics*, 2020, vol. 86, no. 5, p. 905860515.

20. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012, no. 54, p. 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
21. **Аржанников А. В. и др.** Патент RU 2501146С1. Заявка: 2012130121/07, 16.07.2012.
22. **Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A. et al.** Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, no. 62, p. 045002. DOI 10.1088/1361-6587/ab72e3
23. **Аржанников А. В., Котельников И. А.** Метод решения нестационарной задачи возбуждения корабельных волн подводным объектом // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4. С. 43–59.
24. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. *Phys. Rev. E*, 2016, no. 94, p. 023103.
25. **Аржанников А. В., Гинзбург Н. С. и др.** Разработка двухстадийного планарного МСЭ терагерцового диапазона на основе ускорителя ЭЛМИ // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2012, Т. 7, вып. 1. С. 5–14.
26. **Arzhannikov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A. et al.** Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a free – electron maser. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 117, no. 11, p. 114801.
27. **Vyacheslavov L., Vasilyev A., Arakcheev A. et al.** In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, no. 544, p. 152669. DOI 10.1016/j.jnucmat.2020.152669
28. **Sulyaev Yu. S., Alexandrov E. V., Burdakov A. V. et al.** Engineering Calculations and Preparation for Manufacturing of ITER Equatorial port #11. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 6, pp. 1631–1636. DOI 10.1109/TPS.2020.2985113
29. **Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Postupaev V. V.** Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 162–181. DOI 10.1007/s10894-018-0174-1

References

1. **Kruglyakov E. P., Lotov K. V., Shoshin A. A.** Department of Plasma Physics. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 13–22. (in Russ.)
2. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 116017. DOI 10.1088/1741-4326/ac175a
3. **Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, no. 10, p. 350. DOI 10.3390/biology10050350
4. **Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al.** Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection. *Fusion Engineering and Design*, 2021, no. 168, p. 112426. DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112426
5. **Ivanov A. A., Prikhodko V. V.** Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, no. 6, p. 063001. DOI 10.1088/0741-3335/55/6/063001
6. **Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I.** Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 351–360. DOI 10.13182/FST10-A9497
7. **Ivanov A. A., Prikhodko V. V.** Gas dynamic trap: experimental results and future prospects. *Phys. Usp.*, 2017, no. 60, pp. 509–533. DOI 10.3367/UFNr.2016.09.037967

8. **Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al.** Stable confinement of high-electron-temperature plasmas in the GDT experiment. *Nuclear Fusion*, 2018, vol. 58, p. 094001. DOI 10.1088/1741-4326/aacb88
9. **Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror. *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, no. 5, p. 053009. DOI 10.1088/0029-5515/55/5/053009
10. **Shalashov A. G., Solomakhin A. L., Gospodchikov E. D. et al.** Electron cyclotron emission at the fundamental harmonic in GDT magnetic mirror. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, p. 082506. DOI 10.1063/1.4994793
11. **Arzhannikov A. V., Anikeev A. B., Beklemishev A. D. et al.** Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 090004. DOI 10.1063/1.4964246
12. **Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V. et al.** Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, vol. 30 (181). DOI 10.1007/s41365-019-0707-y
13. **Gota H. et al.** Overview of C-2W: high temperature, steady-state beam-driven field-reversed configuration plasmas. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 106039. DOI 10.1088/1741-4326/ac2521
14. **Burdakov A. V., Postupaev V. V.** Multiple-mirror trap: a path from Budker magnetic mirrors to linear fusion reactor. *Phys. Usp.*, 2018, no. 61, pp. 582–600. DOI 10.3367/UFNr.2018.03.038342
15. **Postupaev V. V. et al.** Results of the first plasma campaign in a start configuration of GOL-NB multiple-mirror trap. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, p. 025008. DOI 10.1088/1361-6587/ab53c2
16. **Beklemishev A. D.** Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63 (1T), pp. 355–357. DOI 10.13182/FST13-A16953
17. **Beklemishev A. D.** Helical plasma thruster. *Phys. Plasmas*, 2015, no. 22, p. 103506.
18. **Arzhannikov A. V., Beklemishev A. D.** Electro-jet rocket engine with big thrust at helical corrugated magnetic field. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 107–118. (in Russ.)
19. **Sudnikov A. V. et al.** Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness. *Journal of Plasma Physics*, 2020, vol. 86, no. 5, p. 905860515.
20. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012, no. 54, p. 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
21. **Arzhannikov A. V. et al.** Patent RU 2501146C1. Application: 2012130121/07, 16.07.2012.
22. **Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A. et al.** Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, no. 62, p. 045002. DOI 10.1088/1361-6587/ab72e3
23. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Method for Solving the Unsteady Problem of Excitation of Ship Waves by an Underwater Object. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 43–59. (in Russ.)
24. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. *Phys. Rev. E*, 2016, no. 94, p. 023103.
25. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S. et al.** Development of the two-stage planar FEM for the terahertz band on the basis of the ELMI accelerator. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 5–14. (in Russ.)

26. **Arzhannikov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A. et al.** Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a free – electron maser. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 117, no. 11, p. 114801.
27. **Vyacheslavov L., Vasilyev A., Arakcheev A. et al.** In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, no. 544, p. 152669. DOI 10.1016/j.jnucmat.2020.152669
28. **Sulyaev Yu. S., Alexandrov E. V., Burdakov A. V. et al.** Engineering Calculations and Preparation for Manufacturing of ITER Equatorial port #11. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 6, pp. 1631–1636. DOI 10.1109/TPS.2020.2985113
29. **Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Postupaev V. V.** Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 162–181. DOI 10.1007/s10894-018-0174-1

Информация об авторах

Владимир Вадимович Анненков, кандидат физико-математических наук
WoS Researcher H-5894-2016
Scopus Author 55900762900
SPIN 9735-1501

Андрей Васильевич Аржанников, доктор физико-математических наук, профессор
WoS Researcher C-2443-2019
Scopus Author 7004910972

Пётр Андреевич Багрянский, доктор физико-математических наук
WoS Researcher ABB-3937-2020
Scopus Author 6603485573
SPIN 9779-7904

Алексей Дмитриевич Беклемишев, кандидат физико-математических наук
WoS Researcher F-7301-2014
Scopus Author 9532393600
SPIN 9163-4574

Владимир Иванович Давыденко, доктор физико-математических наук
Scopus Author 7005060978
SPIN 8195-1493

Станислав Леонидович Синицкий, кандидат физико-математических наук
WoS Researcher AET-9250-2022
Scopus Author 6603491134
SPIN 7327-3476

Дмитрий Иванович Сковородин, кандидат физико-математических наук
WoS Researcher AAD-7116-2019
Scopus Author 37041632600
SPIN 5215-1498

Антон Вячеславович Судников, кандидат физико-математических наук
WoS Researcher AAB-8348-2022
Scopus Author 37073449300
SPIN 5732-0541

Иван Сергеевич Черноштанов, кандидат физико-математических наук
Scopus Author 37072056100
SPIN 1191-6208

Эдуард Александрович Федоренков, секретарь кафедры
Scopus Author 57208029095
SPIN 8080-6364

Андрей Александрович Шошин, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher F-6338-2014

Scopus Author 6603339475

SPIN 7982-7407

Information about the Authors

Vladimir V. Annenkov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher H-5894-2016

Scopus Author 55900762900

SPIN 9735-1501

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

WoS Researcher C-2443-2019

Scopus Author 7004910972

Peter A. Bagryansky, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher ABB-3937-2020

Scopus Author 6603485573

SPIN 9779-7904

Alexei D. Beklemishev, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher F-7301-2014

Scopus Author 9532393600

SPIN 9163-4574

Vladimir I. Davydenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

Scopus Author 7005060978

SPIN 8195-1493

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AET-9250-2022

Scopus Author 6603491134

SPIN 7327-3476

Dmitry I. Skovorodin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AAD-7116-2019

Scopus Author 37041632600

SPIN 5215-1498

Anton V. Sudnikov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AAB-8348-2022

Scopus Author 37073449300

SPIN 5732-0541

Ivan S. Chernoshtanov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Scopus Author 37072056100

SPIN 1191-6208

Eduard A. Fedorenko, Secretary of Department

Scopus Author 57208029095

SPIN 8080-6364

Andrey A. Shoshin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher F-6338-2014

Scopus Author 6603339475

SPIN 7982-7407

Статья поступила в редакцию 25.05.2021;

одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021

The article was submitted 25.05.2021;

approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021