

В. Д. СЕЛЕМИР, А. Е. ДУБИНОВ, В. И. КАРЕЛИН,
П. Б. РЕПИН, Н. В. СТЕПАНОВ

Научно-технический центр физики высоких плотностей энергии и направленных потоков излучения (НТЦФ) существует уже 20 лет и представляет собой крупное подразделение РФЯЦ-ВНИИЭФ, в котором основные направления работ лежат в области мощной импульсной электрофизики.

За это время НТЦФ приобрел заслуженную репутацию как признанный мировой лидер в области физики и применения магнитной кумуляции, в области создания сильноточных циклических ускорителей электронов для радиографии быстротекущих процессов, в прикладных исследованиях по физике плазмы и газового разряда, в релятивистской СВЧ-электронике и в других направлениях.

Сейчас здесь работают более 300 специалистов. В НТЦФ входят два научно-исследовательских отделения и комплексный научно-исследовательский отдел, полигон для проведения взрывных работ, конструкторский отдел и собственное производство. Такая организационная структура позволяет решать самые разнообразные научно-производственные задачи в области электрофизики – от задумки и конструкторской проработки идеи до создания и ее применения.

О работах НТЦФ уже много говорили и писали (см., напр., Атом, 2011 г., № 50). В данной статье мы расскажем о новых разработках и достижениях НТЦФ за последние 5 лет.

Отделение магнитной кумуляции

Основное направление работ отделения – разработка и применение в физических экспериментах магнитокумулятивных генераторов (МКГ, другое название – взрывомагнитные генераторы, ВМГ), принцип действия которых основан на сжатии начального магнитного потока проводящей оболочкой, приводимой в движение продуктами взрыва. В зависимости от конструкции и функционального назначения МКГ могут служить мощными источниками энергопитания в физических экспериментах или обеспечивать генерацию сверхсильных магнитных полей для фундаментальных и прикладных исследований свойств веществ.

Например, для понимания физики Земли и планет-гигантов Солнечной системы, постро-

ения моделей структуры и эволюции этих объектов требуются надежные сведения о физических свойствах водорода в мегабарном диапазоне давлений. Получение новых данных позволит, в частности, измерить возможную границу металлизации Юпитера. Ранее в НТЦФ уже были получены экспериментальные результаты для кривой «холодного» сжатия протия (основного изотопа водорода) в интервале от 0,1 до 2,2 Мбар, а еще две точки легли уже вблизи 5 Мбар. В 2014 г. методом изоэнтропического сжатия веществ давлением сверхсильного магнитного поля генератора МК-1 (рис. 1) проведены дополнительные исследования конденсированного протия для прояснения хода нулевой изотермы в диапазоне давлений от 1,7 до 4,1 Мбар.

Анализ полученных данных не выявил каких-либо аномалий несмотря на предсказания некоторых теоретиков. В поведении нулевой изотермы протия все полученные точки согласуются с кривой, аппроксимирующей ранее полученные результаты. Недостаточно исследованными пока остаются небольшой участок кривой вблизи 3,5 Мбар, а также область давлений более 5 Мбар. Планируемые эксперименты позволят в ближайшем будущем закрыть это вопрос.

Одна из решаемых в последние годы задач – разработка источника импульса тока ~50 МА



Рис. 1. Генератор сверхсильного магнитного поля МК-1 во время экспериментов по изоэнтропическому сжатию протия

с временем нарастания тока $\sim 0,5\text{--}1$ мкс для питания мощных источников мягкого рентгеновского излучения (МРИ), генерируемого при токовом схлопывании многопроволочных цилиндрических лайнеров. Такие импульсы должны обеспечивать устройства на основе многоэлементных дисковых МКГ, снабженных размыкателями выходного токового контура генератора. Исследуются генераторы с дисковыми зарядами взрывчатого вещества диаметром 240 и 480 мм.

В качестве источника первичного питания дисковых генераторов используются спиральные МКГ. Ранее в отделении были разработаны различные спиральные МКГ со спиралью с внутренним диаметром от 50 до 240 мм, которые применяются и как самостоятельные источники питания физических экспериментов. В их ряду следует отметить, например, автономные МКГ, имеющие собственные источники начальной энергии и постоянно сохраняющие готовность к работе.

Продолжаются разработки формирователей тока на основе многоэлементных дисковых МКГ с размыкателями тока различных типов: электровзрывными и взрывными. Такие формирователи тока на основе спиральных и дисковых МКГ с электровзрывными и взрывными размыкателями успешно используются в экспериментах с мощными источниками МРИ. В них генерация импульсов МРИ осуществляется традиционным способом в конфигурации Z-пинча, когда с помощью электромагнитных сил реализуется радиально направленный разгон к оси цилиндрического многопроволочного лайнера с последующей термализацией его кинетической энергии на оси системы.

Совместно с сотрудниками технологического отделения ВНИИЭФ была разработана уникальная технология изготовления многопроволочных лайнерных нагрузок из микропроводников диаметром до 6 мкм, сохраняющих свою геометрию независимо от пространственной ориентации и при транспортировке на значительные расстояния к взрывной позиции. Созданы средства диагностики токовых импульсов в различных сечениях устройств, в том числе и непосредственно в лайнерной системе, а также средства диагностики основных параметров лайнерной плазмы и генерируемого МРИ. Экспериментально показана эффективность и перспективность генерации импульсов МРИ при использовании в качестве источников питания формирователей тока на основе современных МКГ.

В экспериментах получено, что 10-элементный дисковый генератор с диаметром заряда ВВ 240 мм и электровзрывным размыкателем тока обеспечивает в двухкаскадной лайнерной системе (рис. 2, 3; внешний каскад состоит из 720, внутренний – из 360 вольфрамовых проволочек диаметром 11 мкм и длиной 25 мм) импульс тока амплитудой 14 МА с временем нарастания ~ 1 мкс (рис. 4). В конце импlosionи лайнерной нагрузки происходит генерация импульса мяг-

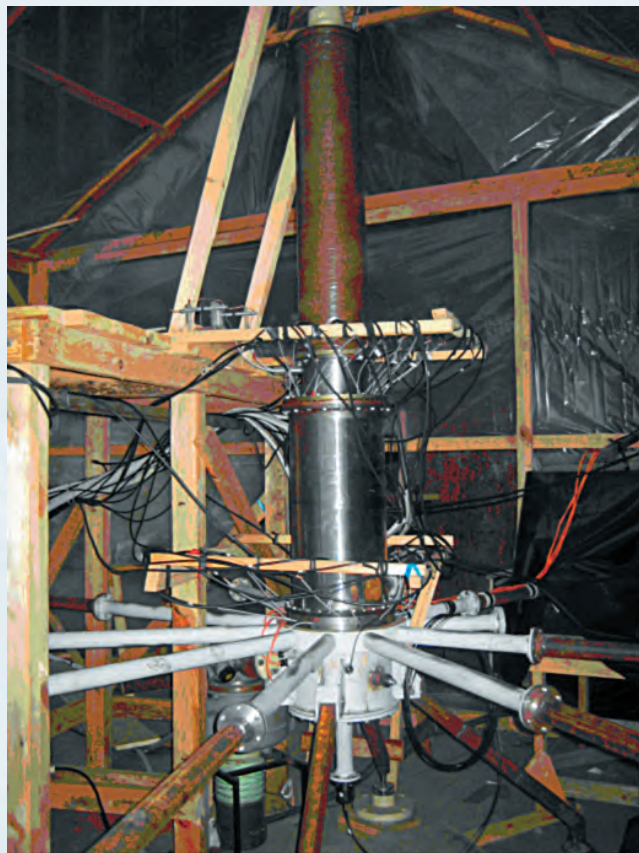


Рис. 2. Установка для экспериментов по генерации МРИ в многопроволочном лайнере

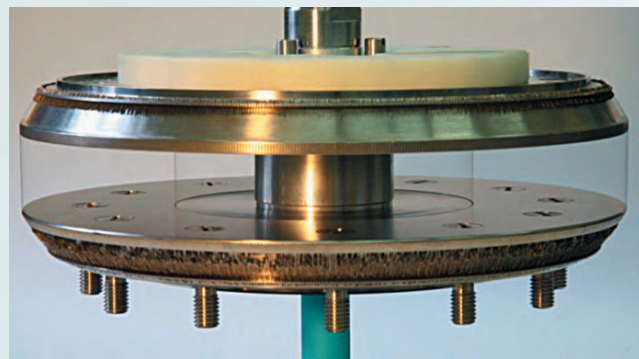


Рис. 3. Двухкаскадный многопроволочный лайнер для экспериментов по генерации МРИ

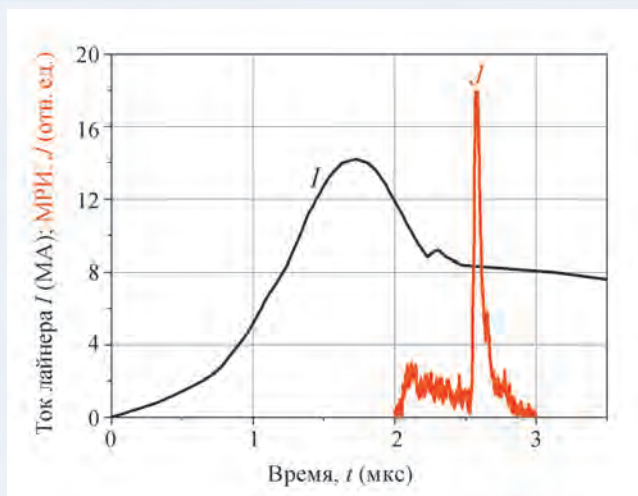


Рис. 4. Осциллограммы токового импульса и импульса МРИ, полученные в эксперименте

кого рентгеновского излучения длительностью 53 нс с энергосодержанием ~800 кДж при температуре плазмы пинча 55 эВ. Достигнутые параметры (малая длительность импульса и высокая пиковая мощность излучения) значительно превосходят результаты аналогичных экспериментов, проведенных в США на взрывной установке Прозион.

Отделение моделирования и испытаний воздействия импульсных излучений

Отделение развивает несколько направлений, среди которых создание циклических ускорителей электронов для радиографии быстропротекающих процессов, физика космической плазмы, геофизические исследования, фундаментальные и прикладные исследования газового разряда, безопасность электроэнергетики.

Здесь разрабатываются уникальные методики исследования быстропротекающих процессов в веществах, подвергаемых мощному воздействию продуктов взрыва. Развитие радиографической методики обеспечивается совершенствованием техники безжелезных бетатронов, которые умеют делать только в НТЦФ и больше нигде в мире. Сейчас коллектив создает рентгенографические комплексы нового поколения. Среди них мобильный радиографический комплекс – прототип специализированной установки для лаборатории Центрального полигона РФ – и другие.

В 2013 г. в отделении был сдан в эксплуатацию крупномасштабный электрофизический стенд НПМ-01, предназначенный для моделирования нестационарных физических процессов

в космической плазме (рис. 5). Сейчас на стенде изучаются процессы распространения МГД-волн в магнитоактивной плазме (рис. 6) и динамики разлета плотного плазменного облака в фоновой замагниченной плазме.

Проводимые в отделении исследования геоэлектрических явлений сосредоточены, в основном, на изучении влияния теллурических токов на безопасность электроэнергетических систем. Установлено, что воздействие квазипостоянных токов, возбуждаемых геоэлектрическими источниками, на объекты электроэнергетики является новым, не исследованным ранее, фактором. Совместно с Тольяттинским государственным университетом выполнены анализ и моделирование аварии, происшедшей 17 августа 2009 г.

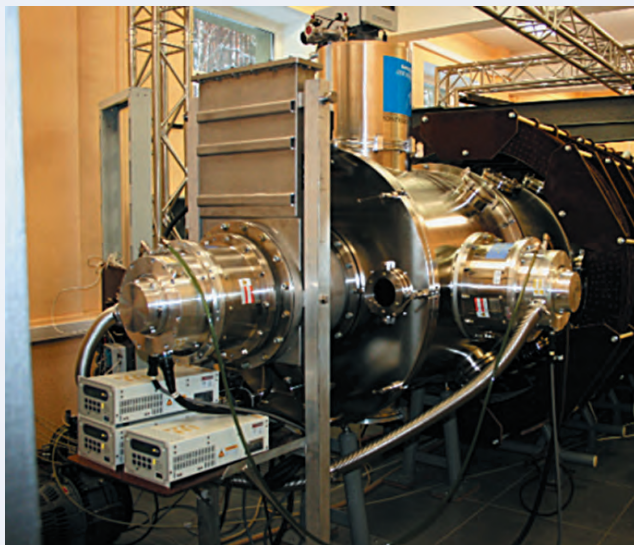


Рис. 5. Стенд НПМ-01 для моделирования нестационарных физических процессов в космической плазме

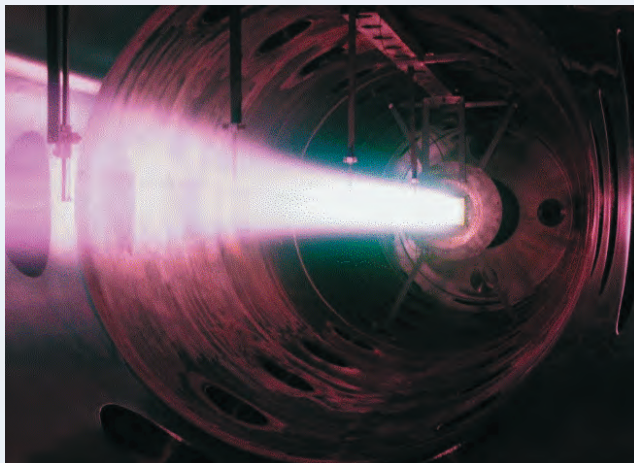


Рис. 6. Столб замагниченной плазмы внутри НПМ-01 для исследования МГД-волн

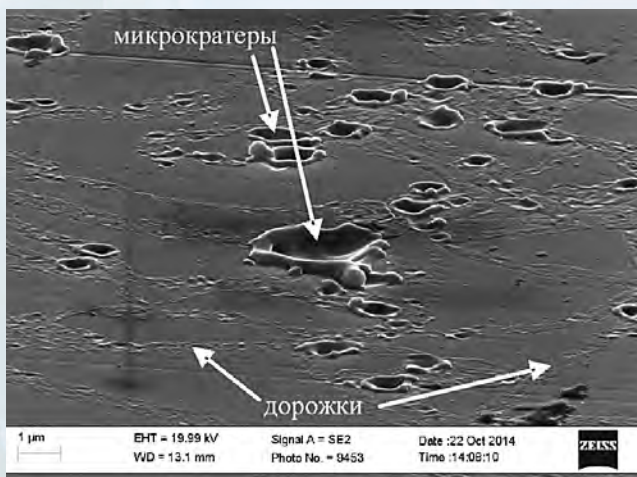


Рис. 7. Фрагмент автографа канала разряда

на Саяно-Шушенской ГЭС. Показано, что наиболее вероятная причина аварии – воздействие квазипостоянного тока в ЛЭП, возбуждаемого природным геоэлектрическим источником.

Среди фундаментальных исследований в области физики газового разряда следует отметить, например, исследования морфологии отпечатков токовых каналов микросекундного и наносекундного искрового разрядов (рис. 7). Установлено, что отпечатки каналов представляют собой области, содержащие морфологические изменения в виде совокупности большого количества микрократеров диаметром 0,3–5 мкм и дорожек. Все микрократеры расположены на дорожках, образующих сложную сетчатую структуру. Дорожки и их наноструктура автографа канала в искровых разрядах обнаружены впервые.

В отделении создано и испытано новое аналоговое устройство тлеющего разряда для решения лабиринтов. Устройство состоит из газоразрядной камеры и лабиринта-трансформера радиально-азимутального типа, позволяющего опе-



Рис. 8. Решение тлеющим разрядом лабиринта с потенциальным барьером: а – схема лабиринта, стрелками показан единственный путь, светлая стрелка – на участке с потенциальным барьером; б – свечение плазмы тлеющего разряда вдоль найденного пути

ративно, в течение нескольких минут изменить схему путей в лабиринте. Устройство испытано в воздухе пониженного давления. Показано, что тлеющий разряд с первой попытки его включения может находить кратчайший путь в лабиринте. Проведено исследование работы устройства (рис. 8). Устройство может представлять интерес для создания систем навигации роботов. Эта разработка была отмечена в 2014 г. на ежегодном собрании отделения физики плазмы Американского физического общества в Новом Орлеане как одна из наиболее выдающихся по физике плазмы.

Выдающимся результатом в области прикладных исследований можно назвать разработку технологии и создание плазмохимической установки для синтеза монооксида азота (NO) из воздуха. Монооксид азота широко используется в зарубежной медицинской практике. Получают его химическим способом на стационарных станциях и к месту проведения лечебных процедур доставляют в баллонах. Высокая стоимость, сложность доставки и ограниченный срок хранения NO, а также практически отсутствие стационарных станций синтеза ингаляционного оксида азота сдерживают применение NO-терапии в России. По мнению медицинских специалистов, плазмохимическими установками, подобными созданной в НТЦФ, должны быть оснащены все блоки интенсивной терапии и отделения анестезиологии – реанимации, начиная с уровня районных стационаров и выше, а также мобильные средства для оказания неотложной помощи.

Отдел релятивисткой СВЧ-электроники

Отдел занимается созданием мощных СВЧ-генераторов на основе сильноточных релятивистских пучков электронов. В качестве примера одной из таких разработок можно привести релятивистский клистрон, превосходящий по параметрам все известные мировые аналоги (рис. 9). Он обладает рекордным значением по выведенной в атмосферу величине энергии радиочастотного излучения как за счет высокой мощности (сотни мегаватт), так и за счет большой длительности импульса излучения. Учитывая, что клистронный генератор, созданный в НТЦФ, может работать в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения больше 100 Гц, этот прибор можно назвать уникальным.



Рис. 9. Релятивистский клистрон

Разработки НТЦФ для внешних организаций

Многие приборы и установки, созданные коллективом НТЦФ, востребованы в организациях ГК «Росатом», РАН, Минобороны РФ и др.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ уже несколько лет существует и успешно работает исследовательский радиографический комплекс на основе трех безжелезных бетатронов серии БИМ-234.2000, позволяющий делать 9 изображений. Подобный комплекс понадобился и коллегам из РФЯЦ-ВНИИТФ. Недавно комплекс РГК-Б1 на базе двух более современных бетатронов БИМ-234.3000 (рис. 10) был нами разработан, изготовлен и собран в Снежинске.

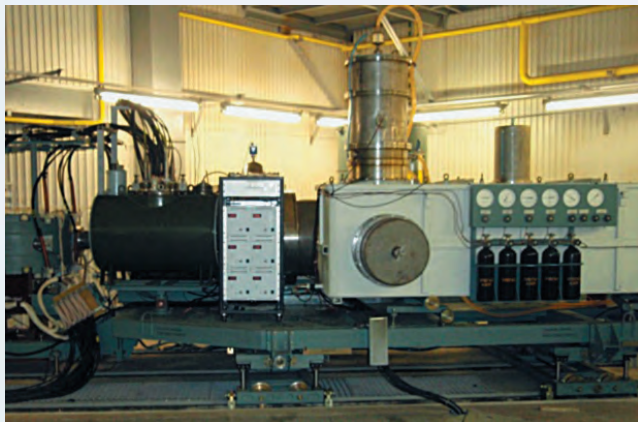


Рис. 10. Бетатрон БИМ-234.3000 комплекса РГК-Б1

В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) создается ионный коллайдер NICA. Специалисты НТЦФ приняли участие в создании для него источника многозарядных ионов «Крион-5Т», работающего по схеме электронной ловушки. В НТЦФ была разработана конструкция источника ионов, разработана и изготовлена вакуумная камера для ловушки, рассчитана динамика электронного облака. В настоящее время установка запущена и на ней получают $\sim 4 \cdot 10^7$ ионов золота за импульс с кратностью заряда +51.

Заключение

Таким образом, последние 5 лет показали, что НТЦФ обладает всеми возможностями осуществления крупных научных разработок и проведения уникальных экспериментов в области мощной импульсной электрофизики. Это не может не привлекать молодых специалистов, посвятивших себя экспериментальной физике. Для подготовки специалистов в области электрофизики в СарФТИ НИЯУ МИФИ существует кафедра «Экспериментальной физики», которая уже сделала почти 20 выпусков. Накопленный многолетний опыт исследований мирового уровня и постоянный приток молодых специалистов является основой успешного будущего НТЦФ.

СЕЛЕМИР Виктор Дмитриевич – директор НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, лауреат премии Правительства РФ

ДУБИНОВ Александр Евгеньевич – зам. директора НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук

КАРЕЛИН Владимир Иванович – начальник отделения НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук

РЕПИН Павел Борисович – начальник отделения НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

СТЕПАНОВ Николай Владимирович – начальник отдела НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ