

*На правах рукописи*



**Сандалов Евгений Сергеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ  
НЕУСТОЙЧИВОСТИ КИЛОАМПЕРНОГО ПУЧКА  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В  
ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯМ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ – кандидат физико-математических наук  
РУКОВОДИТЕЛЬ Синицкий Станислав Леонидович

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Запевалов – доктор физико-математических наук, доцент,  
Владимир Федеральное государственное бюджетное науч-  
Евгеньевич ное учреждение «Федеральный исследователь-  
ский центр Институт прикладной физики им.  
А.В. Гапонова-Грехова Российской академии на-  
ук», заведующий лабораторией

Лебедев – доктор физико-математических наук, доцент,  
Валерий Международная межправительственная органи-  
Анатольевич зация Объединенный институт ядерных исследо-  
ваний, заместитель начальника отделения по на-  
учной работе

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учре-  
ОРГАНИЗАЦИЯ ждение науки Институт электрофизики Ураль-  
ского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «10» октября 2023 года в «16:30» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety24-1-162-02>.

Автореферат разослан «16» августа 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математи-  
ческих наук,  
профессор РАН



Лотов Константин  
Владимирович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

История развития физики ускорителей и физики плазмы привела к широкому использованию интенсивных пучков заряженных частиц в различных областях науки и техники. Исходная мотивация к созданию и модернизации линейных индукционных ускорителей (ЛИУ), начиная с начала 1960-х годов, была основана на возможности их применения для приложений, требующих генерацию импульсных электронных пучков с высокой яркостью (нормализованный эмиттанс  $\sim 1000 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ), с энергией электронов 10–20 МэВ, током пучка  $\sim 1\text{--}10$  кА и длительностью импульса  $\sim 0.1\text{--}1$  мкс. Этот диапазон по совокупности параметров практически недоступен как для высокочастотных (ВЧ-ускорителей) и циклических ускорителей, так и для ускорителей прямого действия. Линейные индукционные ускорители с различными параметрами пучка нашли свое применение во многих научных областях. Среди них можно выделить фундаментальные исследования в области термоядерного синтеза с магнитным удержанием, исследования транспортировки интенсивных электронных пучков в различных газах, исследования радиационной обработки материалов и пищевых продуктов, исследования генерации электромагнитного излучения лазерами на свободных электронах (ЛСЭ).

Последнее направление особенно актуально для нашего института и развития отечественной науки в целом. Поэтому в настоящее время одной из очень перспективных научно-исследовательских задач ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) в области физики и техники ускорителей является разработка, создание и вывод на проектные параметры комплекса ЛИУ, предназначенного для генерации сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП). Для выполнения поставленной задачи необходимо на этом ЛИУ получить пучок с током килоамперного уровня и энергией электронов до 10 МэВ, обладающий таким малым угловым разбросом скоростей электронов, чтобы его можно было сжать до диаметра 2 мм и менее для последующей инжекции в магнитную систему ЛСЭ. Указанные требования к характеристикам пучка приводят к необходимости изучения различного рода источников возмущения траекторий электронов пучка в ЛИУ, а также к необходимости поиска комплексных мер по подавлению этих источников.

В процессе отладки первой очереди нашего комплекса ЛИУ с энергией до 5 МэВ были обнаружены колебания пучка как целого с дискретными частотами в диапазоне 0.3 – 1 ГГц, возникающие при движении сильноточного РЭП с током  $\sim 1.5\text{--}2$  кА в ускорительной структуре. Основной причиной развития таких колебаний пучка является поперечная неустойчивость, известная в англоязычной литературе как Beam-BreakUp instability (BBU). Кратко можно пояснить, что механизм возбуждения такой неустойчивости

обусловлен раскачкой пучком дипольных электромагнитных колебаний отдельного ускорительного модуля и последующей модуляцией полями этих колебаний поперечного движения центроида пучка (центроидом пучка называют центр распределения плотности заряда в поперечном сечении пучка). Несмотря на то, что поперечная неустойчивость электронного пучка в ускорительной структуре ранее уже подробно исследовалась во многих теоретических и экспериментальных работах, выполненных на зарубежных установках, изучение такой неустойчивости с целью получения пучка высокой яркости по-прежнему имеет большую актуальность, особенно для отечественной науки, в рамках которой ведутся проекты по генерации сильноточных релятивистских электронных пучков.

### **Степень разработанности темы исследования**

Крайне важно отметить, что на данный момент не существует общей теории поперечной неустойчивости, и характер ее развития существенным образом определяется набором индивидуальных особенностей каждого ЛИУ. В связи с развитием в нашем институте научного направления по созданию линейных индукционных ускорителей требуется детальное исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в ЛИУ с дискретной магнитной системой. Исследование поперечной неустойчивости принципиально является одной из важнейших задач физики пучков заряженных частиц, радиофизики и физики плазмы. Поэтому актуальность исследований, результаты которых изложены в диссертации, можно считать обоснованной. Результаты работы, полученные в ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований по физике процессов, определяющих неустойчивость сильноточного РЭП при его транспортировке в ускорительной структуре комплекса ЛИУ, послужат надежным фундаментом для дальнейшего исследования устойчивости килоамперного электронного пучка, что в конечном итоге должно обеспечить стабильную транспортировку и ускорение пучка. Следует отметить, что дальнейшее совершенствование технологии создания ЛИУ для решения ряда прикладных задач требует знаний об основных особенностях поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ и методах ее подавления, что отражено в содержании диссертационных исследований.

**Целью** данной работы является проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов возбуждения и развития поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в ускорительных модулях линейного индукционного ускорителя, а также в поиске путей ее эффективного подавления в условиях конкретной конструкции ЛИУ. В конечном итоге это должно позволить достигнуть следующий результат: будут найдены условия, при которых транспортировка пучка в ускорительной структуре комплекса ЛИУ будет осуществляться с амплитудой колебаний его центроида на выходе ускорителя, не превышающей  $a \sim 2$  мм.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Построение теоретической (численной) модели для расчетов электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ с целью определения спектра возбуждаемых мод, их коэффициентов связи и добротностей;
2. Создание экспериментального стенда для измерения электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ в «холодных» экспериментах (без пучка);
3. Разработка методов калибровки и измерений на экспериментальном стенде, обработки и анализа полученных данных;
4. Разработка трехмерного численного кода, позволяющего осуществить моделирование инжекции, транспортировки и ускорения высокоэнергетического релятивистского электронного пучка в ЛИУ в условиях возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка;
5. Определение основных закономерностей развития поперечной неустойчивости пучка и разработка методов ее подавления, применимых к конструкции ускоряющих модулей комплекса ЛИУ;
6. Проведение экспериментов в различных условиях по транспортировке и ускорению пучка в комплексе ЛИУ при одновременной регистрации сигналов полей собственных мод и сигналов с пикапов. Разработка метода обработки и анализа данных, с помощью которого определяется инкремент поперечной неустойчивости.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые было проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование возбуждения поперечной неустойчивости пучка в созданном ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой.
2. В моделировании и серии «холодных» экспериментов на специально-разработанном стенде были получены электродинамические характеристики ускорительного модуля комплекса ЛИУ, в котором в отличие от зарубежных аналогов была применена ускоряющая трубка с градиентными кольцами.
3. Разработаны оригинальные и адаптированы к конструкции модуля известные методы подавления поперечной неустойчивости высокоэнергетического релятивистского электронного пучка в ЛИУ, в результате использования которых была экспериментально продемонстрирована устойчивая транспортировка пучка на всей протяженности вакуумного канала ускорителя.
4. Разработан программный комплекс для моделирования развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, который позволяет рассчитать: спектр и структуры полей собственных дипольных мод

отдельного ускорительного модуля, трехмерные распределения внешних ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей, а также динамику центра пучка во внешних полях с учетом взаимодействия пучка с собственными модами ускорительных модулей.

5. С помощью численного моделирования и сравнения с экспериментом впервые был исследован инкремент поперечной неустойчивости пучка в созданном ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой, а также получены зависимости инкремента от параметров пучка, электродинамических свойств модуля и внешних фокусирующих магнитных полей. На основе проведенного исследования была продемонстрирована эффективность применяемых методов подавления этой неустойчивости пучка в ЛИУ.

### **Теоретическая и практическая значимость**

В работе подробно рассмотрен механизм возбуждения поперечной неустойчивости электронного пучка с током килоамперного уровня в ЛИУ с дискретной магнитной системой. В расчетах и экспериментах с пучком было показано, что теория Нила-Купера-Холла качественно правильно предсказывает зависимость амплитуды колебаний центра пучка от параметров фокусирующей системы и электродинамических свойств модуля ЛИУ. Основы этой теории позволили разработать, исследовать и создать способы подавления неустойчивости сильноточного РЭП, применимые к созданному комплексу ЛИУ. Результаты «холодных» измерений электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ в совокупности с данными экспериментов с пучком и результатами моделирования развития поперечной неустойчивости позволяют не только интерпретировать результаты проведенных на комплексе ЛИУ экспериментов по формированию, транспортировке и ускорению электронных пучков, но и указывают путь к созданию новых ЛИУ для генерации сильноточных РЭП с улучшенными параметрами пучка. Далее эти пучки могут быть применены для решения задач в области создания эффективных лазеров на свободных электронах терагерцового диапазона, в которых такие пучки могут быть использованы в качестве драйверов для запитки электродинамических систем ЛСЭ на основе брэгговских отражателей или структур Тальбо. Таким образом, рассмотренные в данной работе механизмы возбуждения поперечной неустойчивости и факторы, влияющие на ее развитие, могут дать новое понимание в области физики и техники ЛИУ. К настоящему моменту результаты проведенных исследований поперечной неустойчивости и применение эффективных методов ее подавления позволили продемонстрировать возможность устойчивой транспортировки килоамперного релятивистского электронного пучка в ускорительном комплексе ЛИУ с дискретной магнитной структурой.

## Методология и методы исследования

Построение численной модели для расчета электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ проводилось на основе стандартного метода конечных элементов с привлечением коммерческих кодов. «Холодные» эксперименты (без пучка) по измерению электродинамических характеристик ускорительного модуля проводились с помощью специально разработанного экспериментального стенда, основным элементом которого являлся дипольный излучатель. Достоверность расчетов характеристик модуля проверялась на основе тестовых задач, имеющих аналитическое решение, а также из сопоставления с результатами «холодных» экспериментов, проведенных на стенде. Моделирование развития поперечной неустойчивости пучка проводилось с помощью разработанного собственного комплекса программ, использующего основные параметры мод и их структуры полей, рассчитанные с помощью коммерческих кодов. Определение инкремента поперечной неустойчивости и исследование влияния применяемых методов подавления неустойчивости на его величину проводились по результатам как численных расчетов, так и экспериментов с пучком, в которых регистрировались сигналы с имеющихся на ЛИУ диагностик: быстрых трансформаторов тока (ФСТ) и датчиков положения пучка (пикапов или BPM).

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Электродинамическая модель ускорительного модуля ЛИУ с секционированной ускорительной трубкой предсказывает наличие более двухсот собственных дипольных мод в интервале частот 0.3 – 1.1 ГГц. Расчет величины добротности и коэффициента связи с пучком этих мод обеспечивает выделение тех колебаний, которые наиболее опасны в отношении развития поперечной неустойчивости пучка.
2. Методика «холодных» (в отсутствии пучка) измерений электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ на основе дипольного излучателя, реализованная на экспериментальном стенде, обеспечивает регистрацию наиболее неустойчивых дипольных мод с добротностью  $Q \geq 10$ . Спектры дипольных мод, зарегистрированные в экспериментах, соответствуют результатам расчетов в рамках электродинамической модели.
3. Применение поглотителей колебаний электромагнитного поля существенно снижает добротности наиболее опасных дипольных мод ускорительного модуля ЛИУ, что однозначно подтверждено численным моделированием, а также в «холодных» (без пучка) и «горячих» (с пучком) экспериментах. Разработанные поглотители понижают добротности этих мод до значений  $Q = 10 - 15$ .
4. Программный комплекс для моделирования динамики поперечной неустойчивости, основанный на разложении возбуждаемых пуч-

ком колебаний по собственным модам ускорительных модулей, позволяет с точностью до 20% определить инкремент развития этой неустойчивости. Полученные в экспериментах и моделировании величины инкрементов продемонстрировали пропорциональную зависимость от тока пучка и обратно пропорциональную зависимость от магнитного поля в фокусирующих линзах.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается количественным соответствием результатов численной модели дипольных мод и результатов «холодных» экспериментов по измерению электродинамических свойств ускорительного модуля на созданном стенде. Кроме того, полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментов с пучком на действующем комплексе ЛИУ. Приведенные в тексте диссертации выводы сформулированы на основе большого массива данных, полученных в моделировании и экспериментальных сериях, проведенных автором работы на комплексе ЛИУ.

**Личный вклад.** Результаты работы, представленные в положении, выносимых на защиту, получены автором лично. Автор диссертации разработал модели для расчета электродинамических характеристик ускорительных модулей в различных конфигурациях, а также программный комплекс для моделирования динамики возбуждения и развития поперечной неустойчивости сильноточного электронного пучка в ЛИУ. Автор диссертации проводил «холодные» измерения характеристик электродинамической системы ускорительного модуля в его различных модификациях на специально разработанном автором экспериментальном стенде. Автор принимал активное участие в экспериментах по генерации электронного пучка в ЛИУ, в измерениях частотных спектров колебаний пучка, а также в определении инкремента поперечной неустойчивости. Подготовка к публикации полученных результатов работы проводилась при совместном обсуждении с соавторами. В постановке задач и обсуждении результатов исследований активное участие принимали Станислав Леонидович Синицкий и Дмитрий Иванович Сковородин. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведенный в конце автореферата, содержит 3 работы. Личный вклад автора в материалах статьи 1 и 2 заключается в разработке численной модели для расчета динамики поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка ЛИУ, а также в проведении экспериментов по измерению инкремента этой неустойчивости для сопоставления с результатами моделирования. На основе экспериментальных данных и результатов моделирования, полученных автором, были выявлены основные закономерности развития поперечной неустойчивости пучка в различных режимах работы ЛИУ, а также предложены несколько способов ее подавления. Авторский вклад соискателя в статье 3 заключается в проведении численного моделирования и «холодных» экспериментов (без пучка) по измерению электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ. По-

лученные автором результаты позволили определить спектр и структуры полей тех собственных дипольных мод ускорительного модуля, которые, обладая наибольшими коэффициентами связи с пучком, определяют развитие поперечной неустойчивости. Также в работе 3 рассмотрены способы уменьшения этих коэффициентов и добротностей указанных мод. Совокупность полученных автором результатов позволила найти условия и реализовать в эксперименте устойчивую транспортировку электронного пучка в ЛИУ с амплитудой его колебаний на выходе из ускорителя не более 2 мм. Такая величина амплитуды делает подобные пучки приемлемыми по характеристикам для применения в ЛСЭ-генераторе когерентных импульсов терагерцового излучения с субгигаваттным уровнем мощности.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ и ИПФ РАН, многократно докладывались на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН, а также представлялись на международных и всероссийских конференциях, в том числе:

1. 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (г. Сингапур, Республика Сингапур, 2020);
2. The Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD-2021) (г. Новосибирск, Россия, 2021);
3. «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений» (ЯЭФУ-2021) (г. Снежинск, Россия, 2021);
4. 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (г. Чэнду, Китай, 2021);
5. 2021 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (г. Стейтлайн, США, 2021);
6. XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (г. Нижний Новгород, Россия, 2022).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 141 страницу с 41 рисунком и 9 таблицами. Список литературы содержит 109 наименований.

## **Основное содержание работы**

Во **введении** представлен общий обзор научно-технической литературы, в рамках которого рассмотрены работы, посвященные предыдущим исследованиям и разработкам зарубежных и отечественных ЛИУ в контексте их исторического развития, приведены основные области применения электронных пучков, генерируемых в данных ЛИУ, а также показана

научная значимость исследований поперечной неустойчивости сильноточных электронных пучков для создания подобных комплексов. На основании проведенного анализа научной литературы была обоснована актуальность исследований, представленных в данной диссертационной работе, были сформулированы цели, задачи и методы исследований.

**В первой главе** рассмотрены теоретические основы механизма возбуждения поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейных индукционных ускорителях, приведены теоретические оценки ее инкремента, а также описаны основные элементы программного комплекса для моделирования динамики развития поперечной неустойчивости пучка в комплексе ЛИУ. Анализ основных факторов, влияющих на динамику развития поперечной неустойчивости, проведен для комплекса ЛИУ, разработанного в ИЯФ СО РАН. Структура этого комплекса, а также геометрия его ускорительных модулей, электродинамические характеристики которых определяют развитие поперечной неустойчивости электронного пучка, подробно описаны в главе 1.

В рамках диссертационных исследований решались две основные задачи: определение типа и механизма неустойчивости, возникающей при распространении пучка в комплексе ЛИУ, а также разработка способов ее подавления. Исходя из частотных спектров колебаний пучка и зависимостей их амплитуд от фокусирующего магнитного поля в ЛИУ был сделан вывод о возбуждении поперечной неустойчивости (ВВУ), описанной в опубликованных работах. Механизм возбуждения такой неустойчивости обусловлен раскачкой пучком дипольных электромагнитных мод в ускорительных модулях ЛИУ и последующей модуляцией полями этих мод поперечного движения центроида пучка. Согласно предыдущим работам в области исследования такой неустойчивости принято считать, что амплитуда колебаний центроида пучка приближенно определяется выражением (в СИ):

$$\xi_N = \xi_0 \cdot \left[ \frac{\gamma_0}{\gamma_N} \right]^{1/2} \cdot \exp \left( \frac{I[kA]N Z_{\perp} \left[ \frac{\Omega}{m} \right]}{3 \cdot 10^4 \langle B[kG] \rangle} \right), \quad (1)$$

$$Z_{\perp} = Q \cdot \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U} \cdot c, k = \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U}, \quad (2)$$

где  $\xi_N$  – амплитуда колебаний центроида пучка в  $N$ -ом ускорительном модуле,  $I$  – ток пучка,  $\langle B \rangle$  – среднее магнитное поле фокусирующей системы и  $Z_{\perp}$  – поперечный импеданс ускоряющего промежутка для конкретной дипольной моды, в который входит коэффициент связи моды с пучком и ее добротность. В формуле (2)  $Q$  – добротность колебаний,  $B_{\perp}$  – поперечная компонента магнитного поля дипольной моды,  $U$  – энергия моды,  $k$  –

коэффициент связи, интеграл в выражении (2) вычисляется вдоль оси ускорительного модуля.

На основе модельного представления физических процессов, составляющих механизм поперечной неустойчивости, был разработан программный комплекс, который состоял из нескольких модулей. В первом из них производился расчет спектров дипольных мод и их полей в ускорительных модулях ЛИУ, во втором — расчет ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей, а в третьем модуле осуществлялось моделирование распространения электронного пучка в ускорительной структуре ЛИУ с учетом его взаимодействия с дипольными модами, возбуждаемыми им в ускорительных модулях.

С помощью трехмерного моделирования был осуществлен анализ пространственных структур полей различных дипольных мод ускорительного модуля, в результате которого были определены области их преимущественной локализации в ускорительном модуле (см. рисунок 1). Для удоб-

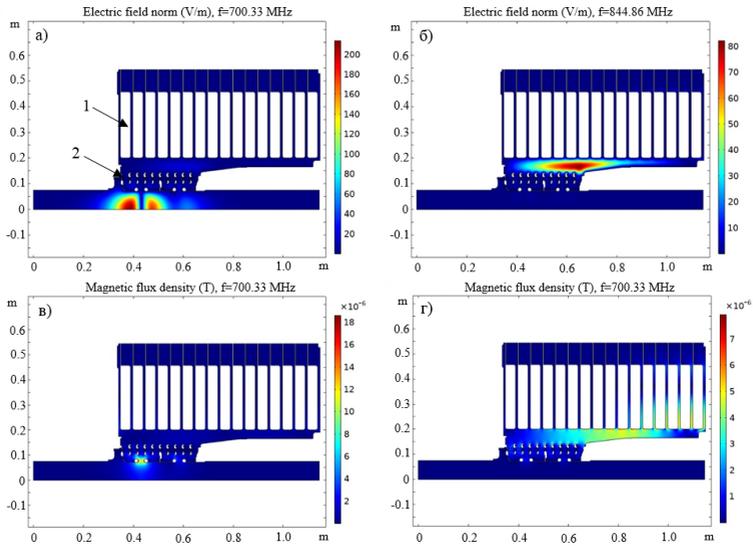


Рисунок 1 — Два типа дипольных мод в модели ускорительного модуля:

- (а) распределения в плоскости  $ZX$  электрического и (в) магнитного полей «вакуумной» моды с частотой  $f = 700.33$  МГц и (б) электрическое и (г) магнитное поля «газовой» моды с  $f = 844.86$  МГц. Цифрами указаны: 1-индукторы, 2-ускорительная трубка

ства анализа в соответствие с местом расположения этих областей нами была проведена классификация мод на две группы: «газовые» и «вакуумные». К первым относятся дипольные моды, у которых электромагнитные

поля в основном локализованы в области расположения первичных обмоток индукторов снаружи от ускорительной трубки. А ко второй группе — моды с концентрацией полей преимущественно в «вакуумной» части модуля, т.е. внутри трубки и в областях примыкания к ней вакуумных каналов. На рисунке 2 приведены полученные в расчетах спектры дипольных мод ускорительного модуля и соответствующие этим колебаниям коэффициенты связи и добротности.

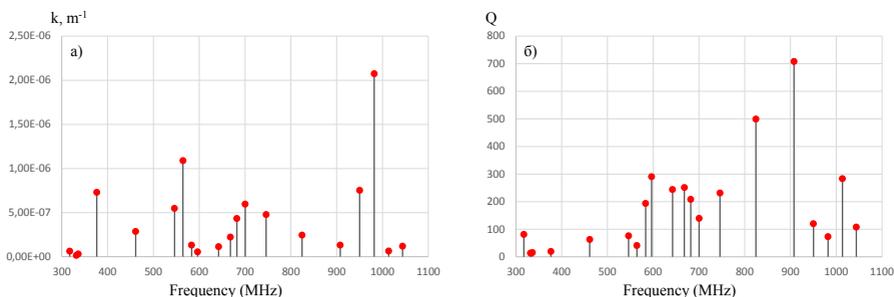


Рисунок 2 — (а) Коэффициенты связи дипольных мод ускорительного модуля и (б) их добротности

Следует отметить, что для уменьшения коэффициента связи мод с пучком были предложены и рассчитаны экранирующие электроды, отделяющие ускорительную трубку от области прохождения электронного пучка. Применение таких электродов согласно расчетам уменьшает протяженность области локализации полей основных вакуумных мод вдоль оси ускорительного модуля, а вместе с этим и значение коэффициента связи. В дальнейших разделах диссертации будут представлены результаты исследований в «холодных» и «горячих» экспериментах только модулей с установленными экранирующими электродами.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям электродинамических свойств ускорительных модулей ЛИУ. При проектировании таких модулей, зачастую большое внимание уделяют исследованиям в области минимизации поперечного импеданса (см. (2)), который существенным образом влияет на рост поперечной неустойчивости пучка. Целью нашей работы в этой области было измерение спектра частот и добротностей дипольных мод для верификации компьютерных моделей, с помощью которых определялись коэффициенты связи мод с пучком. Для проведения «холодных» измерений (без электронного пучка) нами был создан специальный стенд, на котором с помощью разработанных нами методик были измерены спектры дипольных мод всех модификаций ускорительных модулей комплекса ЛИУ. Подробные результаты этих измерений представлены

в работе. Общая схема и основные элементы стенда приведены на рисунке 3.

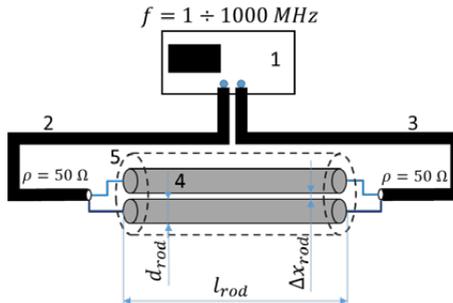


Рисунок 3 — Схема экспериментального стенда для проведения «холодных» измерений электродинамической системы модуля ЛИУ: 1-векторный анализатор цепей, 2 и 3-коаксиальные кабели, 4-отрезок двухпроводной линии (дипольный излучатель), 5-стенки канала для транспортировки пучка внутри ускорительного модуля

При проведении измерений дипольный излучатель монтировался своим центром посередине между ускоряющими зазорами в ускорительном модуле. На торцах дипольного излучателя выполнены порты для подключения к кабелям, идущим на входной и выходной порты векторного анализатора цепей. Таким образом, в результате измерений мы определяем S-параметры, которые равны коэффициентам пропускания волны от одного конца излучателя к другому при помещении излучателя в трубу  $-S_{12}^T(\nu)$  (калибровка) и ускорительный модуль  $-S_{12}^A(\nu)$ , соответственно. Измерения  $S_{12}^A(\nu)$  производились в двух вариантах расположения плоскости стержней дипольного излучателя по отношению к ускорительному модулю: вертикальном и горизонтальном. На рисунке 4(а) для этих двух случаев представлен измеренный частотный спектр. Эффективность возбуждения мод токами дипольного излучателя пропорциональна величине  $\left| \frac{\rho}{2Z_{eff}} \right|^2 = \left| \frac{1}{S_{12}^A(\nu)} - \frac{1}{S_{12}^T(\nu)} \right|^2$ , где  $\rho_0$  — волновое сопротивление двухпроводной линии излучателя, а  $Z_{eff}$  — импеданс ускорительного модуля, возникающий вследствие возбуждения в нем дипольных мод.

На рисунке 4(б) для тех же двух случаев представлено ослабление мощности сигнала  $S$  при прохождении им от одного конца дипольного излучателя до другого:  $S(\nu) = 20 \ln \left| S_{12}^{A,T}(\nu) \right|$ . Форма и положение резких провалов на синей и красной линиях этого рисунка характеризует положение и добротность возбуждаемых дипольных мод ускорительного модуля.

Созданный в результате работы экспериментальный стенд и разработанная методика измерений частотных свойств электродинамической си-

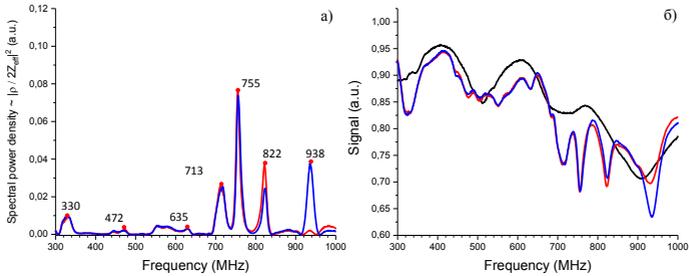


Рисунок 4 — Результаты «холодных» экспериментов по измерению электродинамических свойств ускорительного модуля с экранирующими электродами: (а) частотный спектр дипольных мод в модуле, (б) черная кривая — ослабление сигнала мощности при калибровке, когда излучатель располагался в трубе, красная и синяя — то же ослабление для горизонтального и вертикального положений дипольного излучателя в ускорительном модуле

стемы ускорительного модуля позволили нам определить спектр основных дипольных колебаний и их добротности. Сопоставление данных, полученных в этих измерениях, с результатами моделирования и спектрами колебаний, измеренных в экспериментах с пучком, продемонстрировали их хорошее согласие. Частоты основных вакуумных мод, полученные в моделировании, с точностью до 10 – 15 МГц совпадают с результатами «холодных» экспериментов, что означает: ошибка определения спектра собственных колебаний не превышает нескольких процентов.

**В рамках третьей главы** достаточно подробно изложены материалы исследований, направленных на решение одной из принципиально важных задач в области обеспечения устойчивости сильноточного электронного пучка в процессе его транспортировки и ускорения в многомодульном ЛИУ, а именно: задачи подавления собственных ЭМ-колебаний в каждом ускорительном модуле. Решение этой задачи включает в себя геометрические изменения внутренней структуры ускорительного модуля, применение специально разработанных поглотителей ЭМ-колебаний на основе ферритосодержащих материалов и материалов с низкой проводимостью, разведение модулей по частотам наиболее неустойчивых мод за счет изменения геометрии экранирующих электродов и т.д.

При проведении исследований решались три основные задачи: 1) выбор оптимальной геометрии размещения поглотителей на основе получения пространственной картины распределения электромагнитных полей этих мод по объему модуля и определения мест их преимущественной локализации, 2) разработка конструкций для крепления поглотителей, выбор материалов для эффективного поглощения энергии ЭМ-колебаний, описание

их физических и химических свойств, 3) расчеты электродинамических свойств конкретных конструкций ускорительных модулей с поглотителями и сравнение результатов расчетов с данными «холодных» измерений. Разработанные конфигурации поглотителей описаны в главе 3.

С помощью описанного выше экспериментального стенда были проведены измерения спектров дипольных мод в ускорительных модулях с применением поглотителей ЭМ-колебаний. В качестве примера на рисунке 5 представлены результаты измерения спектра мод для конфигурации ускорительного модуля с экранирующими электродами и дополнительными поглотителями между индукторами, выполненными в виде листов резины с ферритовым наполнением.

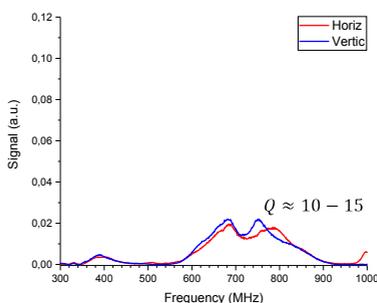


Рисунок 5 — Частотный спектр ускорительного модуля с экранирующими электродами и поглотителями в виде межиндукторных вставок радиопоглощающего материала

Как видно из рисунка, применение таких поглотителей ЭМ-колебаний является эффективным способом уменьшения добротности основных дипольных мод, сосредоточенных в области 700 – 850 МГц до уровня  $Q \approx 10 - 15$ , что в несколько раз меньше характерных значений добротности этих мод ( $Q \sim 100$ ) в ускорительном модуле без дополнительных поглотителей. Таким образом, на основе расчетной модели электродинамических свойств ускорительного модуля и разработанной методики «холодных» измерений его частотных свойств были предложены пассивные методы подавления дипольных мод этого модуля, рассчитана и разработана конструкция поглотителя энергии дипольных мод. Также на основе предложений по модификации конструкции ускорительных модулей с целью их разведения по частотам мод была сформирована архитектура действующего в настоящее время ЛИУ.

В четвертой главе задачей теоретических исследований являлось проведение моделирования динамики поперечной неустойчивости сильно-

точного релятивистского электронного пучка в комплексе ЛИУ на двух стадиях его развития, когда энергия пучка была 5 и 10 МэВ. В рамках этой задачи необходимо было провести серию расчетов для исследования влияния поперечной неустойчивости в различных условиях ее возбуждения на транспортировку и ускорение пучка в ЛИУ с дискретной магнитной системой. В этих расчетах предполагалось исследовать режимы развития поперечной неустойчивости и провести анализ влияния на ее инкремент таких параметров экспериментов с пучком как: ток пучка, спектр дипольных мод, возбуждаемых пучком в ускорительных модулях, их добротности, а также величина магнитного поля фокусирующей системы ускорителя.

Другим предметом исследований, представленных в данной главе, было сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования, чтобы на этой основе верифицировать достоверность расчета как всего пакета программ для описания развития поперечной неустойчивости, так и его отдельных модулей. Для сопоставления с экспериментальными данными было проведено моделирование развития поперечной неустойчивости электронного пучка в различных режимах работы ускорителя, исследованных в экспериментах на ЛИУ, в которых варьировали энергию и ток пучка, а также величину магнитного поля в линзах. Для регистрации дипольных колебаний в ускорительных модулях ЛИУ мы использовали быстрые трансформаторы тока (ФСТ-fast current transformer). Полученные зависимости логарифма амплитуды колебания полей наиболее неустойчивой моды от номера ускорительного модуля для различных режимов работы ускорителя с энергией до 10 МэВ в качестве примера приведены на рисунке 6.

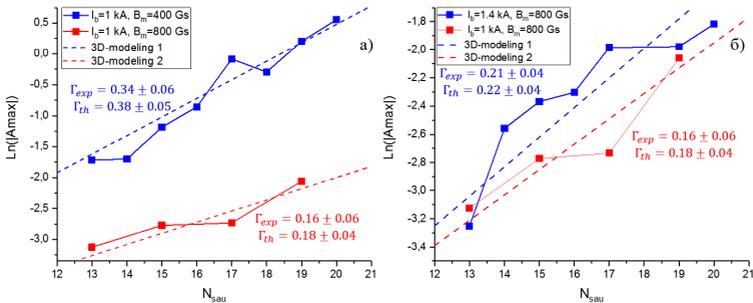


Рисунок 6 — Зависимости логарифма максимальной амплитуды колебаний полей моды от номера модуля ЛИУ в трех режимах работы ускорителя. (а) — модельные режимы с одинаковым током пучка 1 кА и разными полями в фокусирующей системе ЛИУ:  $B_m = 0.04$  Тл и  $B_m = 0.08$  Тл, (б) — модельные режимы в одинаковом поле  $B_m = 0.08$  Тл и разными токами пучка 1 кА и 1.4 кА. Пунктиром показаны линейные аппроксимации экспериментальных точек

Инкремент усиления колебаний  $-\Gamma_{exp}$  определялся из тангенса угла наклона линейной аппроксимации этих зависимостей. Обработка аналогичных зависимостей амплитуд поперечных колебаний центроида пучка от номера модуля продемонстрировала величины инкрементов неустойчивости, близкие к соответствующим значениям, полученным из обработки полей мод.

При моделировании динамики поперечной неустойчивости в ЛИУ было показано, что применение пассивных поглотителей приводит к существенному снижению инкремента усиления колебаний пучка от модуля к модулю, в результате чего амплитуда колебаний в каждом ускорительном модуле нарастает только в течение части импульса пучка, а затем затухает. Увеличение магнитного поля и уменьшение тока пучка приводят к уменьшению значения инкремента. Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, а также рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю  $-\Gamma_{th}$ , которое совпадает с его величиной, измеренной в эксперименте  $-\Gamma_{exp}$ , в пределах ошибки измерения этой величины  $\sim 20\%$ .

Помимо достижения требуемых значений инкремента, доказательством успешной проводки пучка является тот факт, что амплитуда колебаний его центроида в режиме транспортировки пучка с током 1.4 кА с энергией электронов до 10 МэВ в магнитном поле 0.8 Тл не превышает значения 1 мм. Зарегистрированная в этой серии экспериментов с помощью пикапов зависимость амплитуды колебаний пучка в поперечном сечении от номера пикапа, расположенного после соответствующего модуля, приведена на рисунке 7.

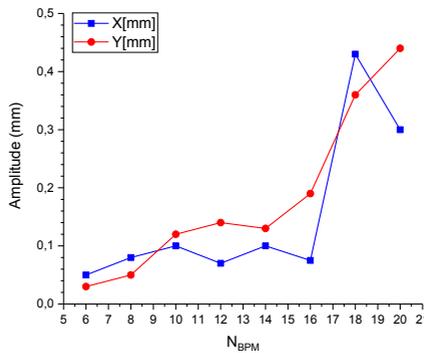


Рисунок 7 — Зависимость максимальной амплитуды колебаний пучка в поперечном сечении от номера пикапа (BPM)

**В пятой главе** обсуждается возможность применения пучка, генерируемого в ЛИУ, в качестве драйвера для лазера на свободных электронах ТГц диапазона, предложенного и создаваемого в ИЯФ СО РАН совместно с ИПФ РАН. Принципиальным отличием такого ЛСЭ-генератора от реализованных ранее является большая длительность импульса тока пучка, превышающая сотню наносекунд. Сочетание большой длительности импульса и килоамперного уровня тока пучка открывает возможность его использования для реализации длинноимпульсных ЛСЭ с субгигаваттным уровнем мощности и энергозапасом в импульсе  $\sim 10 - 100$  Дж и диапазоне частот от 0.3 до 1.2 ТГц.

На первом этапе реализации проекта ЛСЭ-генератора на основе результатов теоретического анализа и моделирования его работы, полученных нашими коллегами из ИПФ РАН, нами была спроектирована секция ЛСЭ, общий вид и эскиз которой представлены на рисунке 8. Одним из

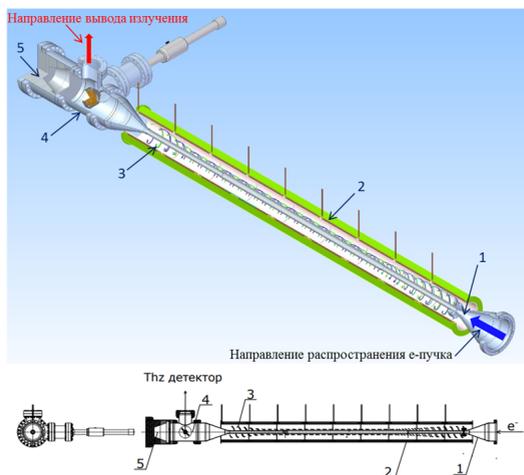


Рисунок 8 — Трехмерный вид секции ЛСЭ-генератора. Цифрами указаны: 1 — цилиндрическая вакуумная камера с коническими входом и выходом, 2 — магнитные линзы соленоида, 3 — спиральная намотка винтового (бифилярного) ондулятора, 4 — система вывода излучения под углом 90 градусов к направлению движения пучка, 5 — могильник для сброса пучка

основных вопросов к возможности реализации подобного ЛСЭ являются требования к однородности поперечных скоростей электронов, формируемых в винтовом ондуляторе, а также к качеству сжатого по сечению электронного пучка для обеспечения эффективной генерации ТГц-излучения. Для ответа на этот вопрос мы провели оценку ограничений сверху на раз-

брос исходных продольных скоростей электронов пучка с целью достижения максимальной эффективности генерации излучения. Если в качестве примера взять параметры пучка и резонатора для проекта ЛСЭ на длину волны  $\lambda = 0.3$  мм:  $E_e = 5$  МэВ,  $I_b = 1$  кА,  $r_t = 3$  мм,  $r_b = 1.5$  мм,  $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} = 10^{-2}$ ,  $\varepsilon_n = 1200$  п·мм·мрад, то получим произведение пространственного инкремента неустойчивости, обуславливающей излучение волны, на длину волны излучения, которое в несколько раз превышает разброс по продольным скоростям электронов вследствие энергетического и углового разбросов электронов пучка:  $\Gamma\lambda \sim 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta\beta_{\parallel}^{(1)} \sim 10^{-4}$ ,  $\Delta\beta_{\parallel}^{(2)} \sim 10^{-3}$ . Это подтверждает возможность достижения кпд генерации излучения 2 – 3%, рассчитанного для пучка с нулевыми начальными разбросами по энергиям и поперечным скоростям электронов пучка.

**В заключении** приведены основные результаты работы и даны рекомендации к дальнейшей разработке темы.

## Заключение

Сформулируем основные результаты работы:

1. Решена задача о нахождении частот и полей собственных ЭМ-колебаний ускорительного модуля в различных конфигурациях с помощью имеющегося пакета программ на основе метода конечных элементов. В ходе проведения исследований выявлены основные факторы, влияющие на количество дипольных мод, их добротность и коэффициент связи с пучком.
2. Создан и протестирован программный комплекс, позволяющий рассчитывать характеристики дипольных мод ускорительного модуля, конфигурацию ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей ускорительного комплекса ЛИУ, а также моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ускорительной структуре ЛИУ.
3. Создан экспериментальный стенд и разработана методика измерений частотных свойств электродинамической системы ускорительного модуля, которая позволяет определять спектр основных дипольных колебаний и их добротности. Данный способ измерения и применяемая методика обработки продемонстрировали хорошее согласие полученных с их помощью данных с результатами моделирования и экспериментов с пучком. Частоты основных вакуумных мод, полученные в моделировании, с точностью до 10 – 15 МГц совпадают с результатами «холодных» экспериментов.
4. Предложены пассивные методы подавления дипольных мод ускорительного модуля, рассчитаны и разработаны поглотители энергии дипольных мод в виде межиндукторных вставок на основе

расчетной модели электродинамических свойств ускорительного модуля.

5. С помощью разработанной методики «холодных» измерений частотных свойств ускорительного модуля, проведены измерения характеристик его наиболее опасных дипольных мод. В результате этого было продемонстрировано эффективное уменьшение добротностей вакуумных мод в диапазоне 700 – 850 МГц с величин  $\sim 100$  (для модуля без дополнительных поглотителей) до уровня  $Q \sim 10 - 15$  при применении поглотителей колебаний.
6. Проведены расчеты, на основе которых разработаны и изготовлены две различные конструкции экранирующих электродов ускорительного модуля с целью «разводки» двух типов модулей по частотам их наиболее опасных дипольных мод. Получены спектры мод таких модулей, их коэффициенты связи и добротности. По результатам проведенных исследований создана архитектура ускорительной структуры действующего комплекса ЛИУ на основе двух чередующихся типов ускорительных модулей, различающихся своими электродинамическими характеристиками.
7. Выявлены следующие основные закономерности развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной системой фокусировки пучка, наблюдаемые в ходе моделирования и подтвержденные в экспериментах с пучком:
  - а) В результате моделирования ЛИУ с энергией до 5 МэВ при одинаковой высокой добротности всех исследуемых мод  $Q = 100$  наибольшие значения инкремента усиления колебаний полей от модуля к модулю имеют моды с максимальными коэффициентами связи с пучком;
  - б) При низкой добротности всех мод  $Q = 20$  близлежащие моды с частичным перекрытием полос образуют широкую полосу усиления колебаний в первых восьми модулях ЛИУ, из которой по мере движения пучка вдоль ЛИУ в результате конкуренции мод выживают только моды с самыми высокими коэффициентами связи с пучком;
  - в) При моделировании ЛИУ с энергией 10 МэВ было продемонстрировано, что применение пассивных поглотителей приводит к снижению инкремента усиления колебаний пучка от модуля к модулю, в результате чего амплитуда колебаний в каждом ускорительном модуле нарастает только в течение части импульса пучка, а затем затухает.
8. Разработанный программный комплекс позволяет моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, а также рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю. Рассчитанное

значение совпадает с величиной инкремента, измеренной в экспериментах по транспортировке пучка в ЛИУ, в пределах ошибки измерения этой величины  $\sim 20\%$ .

9. В экспериментах показано и подтверждено моделированием, что увеличение магнитного поля фокусирующих линз в ЛИУ как и уменьшение тока пучка приводят к уменьшению инкремента поперечной неустойчивости, в результате чего амплитуда колебаний пучка на выходе из ускорителя существенно падает.
10. Получены ограничения на энергетический и угловой разбросы электронов пучка для применения его в качестве эффективного драйвера ЛСЭ-генератора в ТГц диапазоне. Показано, что электронный пучок с энергией до 10 МэВ, генерируемый в существующем ЛИУ, удовлетворяет полученным ограничениям.
11. Применение экранирующих электродов и поглотителей колебаний в конструкции модулей ЛИУ позволило осуществить транспортировку пучка с током килоамперного уровня при амплитуде поперечных колебаний пучка на выходе из ускорителя, не превышающей 2 мм.

Полученные результаты позволяют построить необходимый теоретический базис для разработки ускоряющих структур и их модулей в ускорителях килоамперных электронных пучков класса ЛИУ, если такие проекты появятся.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ / Е. С. Сандалов, С. Л. Сеницкий, Д. И. Сковородин [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 16–29. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29> (дата обращения: 16.01.2023).
2. Исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе / Е. С. Сандалов, С. Л. Сеницкий, Д. И. Сковородин [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 5–22. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22> (дата обращения: 24.05.2022).
3. Electrodynamics system of the linear induction accelerator module / E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A. V. Burdakov [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol.



Сандалов Евгений Сергеевич

**Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка  
релятивистских электронов в линейном индукционном  
ускорителе применительно к его приложениям**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 30.06.2023.

Подписано в печать 04.07.2023.

Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН  
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11