

На правах рукописи

Березуцкий Артем Григорьевич

**Преобразование импульсно-периодического лазерного излучения в
низкочастотные волны в замагниченной плазме с применением механизма
объединения волн**

Специальность 1.3.19 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в лаборатории Энергетики мощных лазеров Отдела лазерной плазмы «Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук»

Научный руководитель: **Тищенко Владимир Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Стародубцев Михаил Викторович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

Вшивков Виталий Андреевич
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительной математики и математической
геофизики Сибирского отделения Российской академии
наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. С. А.
Христиановича Сибирского отделения Российской академии
наук

Защита состоится «02» декабря 2022 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета 24.1.070.01, созданного на базе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института лазерной физики СО РАН <http://www.laser.nsc.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Доктор физико-математических наук

О.Н. Прудников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Взаимодействие лазерного излучения с веществом [1, 2] является отдельным направлением в физике, в рамках которого проведено и активно реализуется в настоящее время большое количество теоретических и экспериментальных работ [3-5]. Направление имеет широкий спектр практических применений в физике, химии, биологии, приборостроении, медицине, в науках о жизни, обработке и создании новых материалов, фотонике и т.д. Благодаря исследованиям по взаимодействию лазерного излучения с веществом, еще в конце 60-х годов появилась возможность генерировать лазерную плазму, обладающую уникальными свойствами. Лазерная плазма открыла много новых областей фундаментальных исследований и практических применений и, в том числе, для лабораторного моделирования нестационарных процессов протекающих в космической плазме [6-17]. Начиная с [18], лазерная плазма также стала инструментом для генерации волновых возмущений в магнитной силовой трубке лабораторной плазмы. Это открыло потенциальные возможности применения лазеров нового поколения для моделирования генерации волновых возмущений в замагниченной плазме, что является актуальной задачей. Ее решение необходимо как для развития задач экспериментов, нацеленных на получение знаний о структуре ионосферы, для приложений, связанных с космическими каналами радиосвязи и в задачах лазерно-плазменных технологий.

Начиная с 1990-х годов в ИЛФ СО РАН развивается уникальная технология импульсно-периодических лазеров с высокой частотой повторения до 100 кГц и мегаваттной пиковой мощностью. Такое лазерное излучение позволило создавать тип лазерной плазмы – оптический пульсирующий разряд (ОПР) [19, 20]. ОПР открыл принципиально новые возможности применения лазерного излучения в лазерно-плазменных технологиях и аэрокосмических приложениях [19]. С применением импульсно-периодического лазерного излучения в ИЛФ СО РАН было впервые показано [21, 22], что периодические сгустки плазмы, создаваемые в газе при определенном соотношении между энергией и частотой повторения лазерных импульсов (“резонанс” сгустков лазерной плазмы с окружающей средой) генерирует в окружающем газе протяженную волну, которая имеет характерные частоты в инфразвуковом диапазоне. Данная волна является результатом объединения ударных волн, создаваемых отдельными оптическими пробоями газа и получил название механизм объединения волн (МОВ). Длина единой волны линейно зависит от количества лазерных импульсов, а амплитуда – от энергии одиночного импульса, что позволяет со сравнительно малыми затратами энергии формировать низкочастотные волны, частота которых зависит от количества лазерных импульсов.

Результаты численного моделирования [23, 24] показали, что в замагниченной плазме механизм объединения формирует низкочастотную волну, длина которой линейно зависит от количества лазерных импульсов, создающих сгустки. Длина волны от одиночного сгустка слабо зависит от его энергии. При определенном соотношении (критерии) между параметрами сгустков лазерной плазмы и фона волна переносит более $\sim 50\%$ энергии сгустков вдоль узкой магнитной силовой трубки. Это открыло возможность применения механизма объединения волн и лазерного излучения для генерации возмущений в геомагнитной плазме [25].

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию нового метода генерации протяженных волн в замагниченной лабораторной плазме сгустками лазерной плазмы создаваемых на облучаемой мишени импульсно-периодическим лазерным излучением. Метод основан на механизме объединения волн. С использованием численного моделирования и экспериментов на крупномасштабном лазерном стенде КИ-1 определены соотношения между параметрами сгустков лазерной плазмы и фона, при выполнении которых генерируются не только магнитозвуковые (МКВ), но и квазистационарные крутильные альфвеновские волны (АКВ), переносящие момент импульса вращающейся плазмы фона.

Преимущество метода, исследуемого в диссертационной работе по сравнению с генерацией альфвеновских волн традиционными методами, основанными на использовании ВЧ излучения, рамочных антенн и нагревных стенов [12, 14, 18] заключается в том, что длина генерируемых волн пропорциональна количеству лазерных импульсов и затратам энергии на создание сгустков лазерной плазмы, а амплитуда волн в десятки раз превышает уровень, достижимый в данных методах $B_{\phi} < 10^{-2}$ [12, 18]. В диссертационной работе определены безразмерные критерии механизма объединения волн, которые позволяют определить параметры сгустков лазерной плазмы в зависимости от свойств окружающей среды. Аналогов предложенного метода воздействия лазерного излучения на плазменную среду не существует.

Цель диссертационной работы. Поиск условий эффективного преобразования импульсно-периодического лазерного излучения в низкочастотные волны в силовой трубке замагниченной плазмы с применением механизма объединения волн.

Задачи

1. Нахождение условий, при которых цуг лазерных импульсов генерирует в магнитную силовую трубку низкочастотные альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны, содержащие более 50% энергии сгустков.

2. Исследование влияния частоты повторения лазерных импульсов на структуру и спектр альфвеновской квазистационарной волны.
3. Исследование формирования импульсно-периодическим лазерным излучением потока вращающейся плазмы в магнитном поле.
4. Определение условий перехода из режима генерации альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн к генерации электромагнитных волн вистлерного диапазона частот.

Научная новизна

Впервые получены следующие результаты.

1. Показана применимость механизма объединения волн для генерации низкочастотных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн, импульсно-периодическим лазерным излучением в замагниченном фоне.
2. Определены критерии механизма объединения волн, при выполнении которых импульсы CO_2 -лазера создают периодические сгустки лазерной плазмы, позволяющие генерировать квазистационарные низкочастотные волны, распространяющиеся вдоль силовой трубки магнитного поля, и содержащие ~50 % вложенной энергии.
3. Механизм объединения волн действует в магнитном поле, что позволяет создавать квазинепрерывный поток вращающейся плазмы.
4. Определены условия, при выполнении которых сгустки лазерной плазмы, создаваемые импульсно-периодическим лазерным излучением, генерирует интенсивные вистлерные волны.

Методы исследования. Лабораторные эксперименты на лазерном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН с использованием мощных импульсов CO_2 -лазеров для создания лазерной плазмы в замагниченной плазме. Численное моделирование на мощных суперкомпьютерах позволяло исследовать формирование и распространение низкочастотных волн большим количеством сгустков лазерной плазмы на больших пространственных масштабах.

Достоверность результатов

Результаты по исследованию механизма объединения волн для генерации интенсивных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн в замагниченной плазме, основаны на комплексном использовании экспериментальных данных и численного моделирования.

Результаты численного моделирования по генерации волн большой амплитуды верифицированы результатами лабораторных экспериментов с

применением мощных лазеров на установках КИ-1 ИЛФ СО РАН и большой плазменной установки (LAPD) университета Калифорнии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Механизм объединения волн действует в узком диапазоне частот повторения сгустков лазерной плазмы создаваемых импульсно-периодическим лазерным излучением и позволяет генерировать в силовой трубке замагниченной плазмы низкочастотные волны, содержащие более 50 % энергии сгустков.
2. В магнитном поле, в отсутствие фоновой плазмы, последовательность сгустков лазерной плазмы, создаваемых импульсно-периодическим лазерным излучением на облучаемой мишени, состоящей из ионов разной массы, генерирует в силовой трубке поток лазерной плазмы, содержащий альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волну.
3. Цуг последовательных лазерных импульсов эффективно генерирует альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волну, если отношение ионно-плазменной длины к характерному размеру торможения сгустка средой лежит в диапазоне $0.05 \div 0.3$, в то время как при большем соотношении формируются вистлерные волны.

Научная и практическая значимость результатов

Полученные в диссертации результаты является научной основой для разработки и применения новых методов формирования направленных потоков энергии, импульса, момента импульса и электромагнитного излучения, которые переносят устойчивые и протяженные низкочастотные волны. Результаты исследования так же актуальны в задачах лазерно-плазменных технологий с применением высокоскоростных потоков лазерной плазмы и для лабораторного моделирования процессов в космической плазме.

Представленные в диссертационной работе исследования проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН и проектов РФФИ № 18-32-00029, № 18-42-543019.

Личный вклад автора включает в себя участие в проведении серии экспериментов на стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН, обработке и обсуждении полученных результатов, подготовке публикаций по теме диссертационной работы и участия в российских и международных конференциях. Параллельно с экспериментами, автором были проведены серии численных расчетов на крупнейших суперкомпьютерных центрах России.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на семинарах отдела Лазерной Плазмы ИЛФ СО РАН, Института Прикладной Физики РАН.

Результаты работы были представлены на 17 конференциях:

Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых ВНКСФ-21, Омск 2015; Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», ИТПМ СО РАН, Новосибирск, 2015; международная конференция «Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергий», ВНИИЭФ, Саров (2016, 2018); International symposium “Modern problem of laser physics”, ILP SB RAS, Novosibirsk (2016, 2018, 2021); конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, ИКИ РАН, Москва (2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); конференция «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», ИТПМ СО РАН, Новосибирск, (2017, 2019); XIV International scientific-technical conference “Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering”, NSTU, Novosibirsk, 2018; 19th international conference on the methods of aerophysical research, Novosibirsk, (ICMAR 2018, 2020).

Диссертант был руководителем одного проекта РФФИ №18-32-000-29 и является лауреатом стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам 2022-2024 г.

Публикации

Основной материал диссертации опубликован в **13** печатных изданиях, **5** из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК, **8** - в трудах конференций.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 133 страницы, 46 рисунков и библиографический список из 165 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** описывается актуальность темы диссертационного исследования, цели и задачи, методы исследования, показана научная новизна полученных результатов, приводятся научные положения, выносимые на защиту.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена обзору и анализу литературных данных по теме диссертационного исследования. Описываются основные исследования, связанные с лазерной плазмой и ее применением для лабораторного моделирования космических процессов. В разделе 1.2 описывается механизм объединения волн, исследования которого начиналось с преобразования импульсно-периодического лазерного излучения в низкочастотные акустические волны в условиях оптического пульсирующего разряда (ОПР). В лабораторных экспериментах с использованием CO₂-лазера, импульсно-периодического со средней мощностью $W \sim 1-2$ кВт и с высокой частотой повторения ~ 100 кГц, либо импульсного с двумя независимыми лучами с энергией ~ 150 Дж каждый, было показано, что ОПР эффективно генерирует ударные волны в газе [20], либо на твердой мишени [21], с формированием низкочастотных волн с регулируемым спектром. Раздел 1.3 посвящен обзору работ, связанных с наблюдением и моделированием альфвеновских волн в замагниченной плазме. Космические эксперименты с использованием генераторов плазмы выполнялись в [26, 27]. Лабораторные эксперименты, близкие к теме диссертации, проводятся на лазерном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН, на большой плазменной установке LAPD (США, University of California Los Angeles, с участием представителей Los Alamos National Laboratory и Lawrence Livermore National Laboratory), и установке KROT [12] и PEARL [10] (ИПФ РАН). В экспериментах LAPD [14, 18] исследовалось возбуждение альфвеновских волн одиночным сгустком лазерной плазмы, создаваемый лазерным импульсом с энергией 25 Дж. Медленная магнитозвуковая волна не регистрировалась. На стенде КИ-1 впервые реализовано взаимодействие двух последовательных сгустков лазерной плазмы, создаваемых лазерными импульсами с энергией $Q \sim 200$ Дж [25]. Осуществлена генерация крутильной альфвеновской и медленной магнитозвуковой волны двумя последовательными лазерными импульсами. На стендах КИ-1 и LAPD применялись принципиально разные подходы. Если на LAPD используется традиционная постановка эксперимента по генерации магнитных возмущений при разлете струи плазмы поперек магнитного поля, то на КИ-1 на начальной стадии сферическое облако лазерной плазмы разлетается как поперек, так и вдоль внешнего магнитного поля. В результате, энергия сгустков лазерной плазмы преобразуется в единую крутильную альфвеновскую волну, содержащую вращающуюся плазму фона и азимутальное магнитное поле, медленную магнитозвуковую волну и поток плазмы, которые эффективно закачиваются в силовую трубку [25]. В Разделе 1.4 приведены краткие результаты активных экспериментов по возбуждению МГД возмущений в условиях околоземной среды различными источниками плазмы и нагревных стендов ВЧ диапазона. В разделе 1.5 представлены выводы к первой главе.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена методам исследования низкочастотных волн, создаваемых импульсно-периодическим лазерным излучением. Раздел

2.1 описывает экспериментальный стенд КИ-1, основными узлами которого являются вакуумный объем ($L=5$ м, $\varnothing=1.2$ м, остаточное давление в камере $<10^{-6}$ Торр) с источником магнитного поля в диапазоне $B_0=50-500$ Гс. Для заполнения камеры фоновой плазмой используется индукционный генератор θ -пинч. Сгустки лазерной плазмы создаются при последовательном облучением твердой мишени (пластинка из полиэтилена радиусом ~ 1.2 см), расположенной на оси камеры, двумя лазерными импульсами с энергией ~ 200 Дж в каждом. Используется модульная энергетическая схема CO_2 лазерной усилительной системы ЛУИ-2М [28] (**раздел 2.2**) с электроионизационным способом накачки оптически активной среды в газовых смесях атмосферного давления. На рисунке 1 показана типичная форма импульса излучения. Энергия импульса $Q = 190$ Дж.

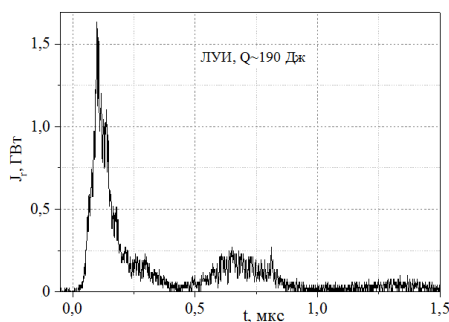


Рисунок 1– Форма лазерного импульса с мощным пиком ~ 50 нс.

В разделе 2.3 приведены основные параметры плазмы и используемой в экспериментах мишени. **Раздел 2.4** содержит описание МГД уравнений, используемых в численном моделировании генерации низкочастотных волн цугом лазерных импульсов. Численное моделирование на мощных суперкомпьютерах позволяло исследовать генерацию низкочастотных волн с использованием десятков периодических сгустков лазерной плазмы, а также распространение волн на большие расстояния – сотни поперечных размеров волны. Модель рассматривает динамику разлета периодически генерируемых плазменных сгустков в замагниченный плазменный фон. Задача решается в магнитогидродинамическом (МГД) приближении. Рассматриваются три жидкости: ионы замагниченной фоновой плазмы, ионы плазмы сгустков и общая электронная жидкость.

В качестве фоновой плазмы рассматривается бесконечный объем однородной, квазинейтральной, бесстолкновительной, полностью ионизованной замагниченной плазмы. В заданные моменты времени в фиксированной точке происходят периодические выбросы горячей плазмы (сгустков), каждый из которых сосредоточен в малом сферическом объеме, имеет энергию Q и число ионов с массой и зарядом. Система уравнений Эйлера для каждого сорта плазмы рассматриваются отдельно, также как и общая электронная жидкость. Система уравнений Эйлера дополняются уравнениями

Максвелла, при этом учитывается нерелятивистский случай (ток смещения бесконечно мал).

Уравнения решаются в цилиндрических координатах в осесимметричном случае. Расчет ведется на смещенных сетках, что обеспечивает второй порядок аппроксимации по пространству. Второй порядок аппроксимации по времени достигается за счет схемы предиктор-корректор. Конвективная часть уравнений рассчитывается с использованием donor-cell схемы.

В разделе 2.5 сравниваются результаты численного моделирования, с экспериментальными данными по генерации альфвеновских волн на установках КИ-1 ИЛФ СО РАН и LAPD США. На установке LAPD, альфвеновская волна генерировалась с использованием одного плазменного сгустка при облучении графитовой мишени лазерным импульсом в гелиевой плазме [14]. Внешнее магнитное поле принято равным $B_0=275$ Гс, а энергия лазерного сгустка $Q=25$ Дж. На рисунке 2 (а) показан профиль азимутальной компоненты магнитного поля B_ϕ , зарегистрированный зондами, установленными на расстояниях $\Delta z=0.3\div 7$ м от мишени. На вставке рисунка 2 (а), показан профиль B_ϕ , полученный в расчетах с использованием МГД модели, описанной в разделе 2.4.

Для сравнения результатов численной модели с экспериментальными данными, полученными на стенде КИ-1, на рисунке 2 (б) показана азимутальная компонента магнитного поля. В модели использовались параметры эксперимента по исследованию генерации низкочастотных волн на основе МОВ и лазерного излучения в замагниченной плазме [24-25].

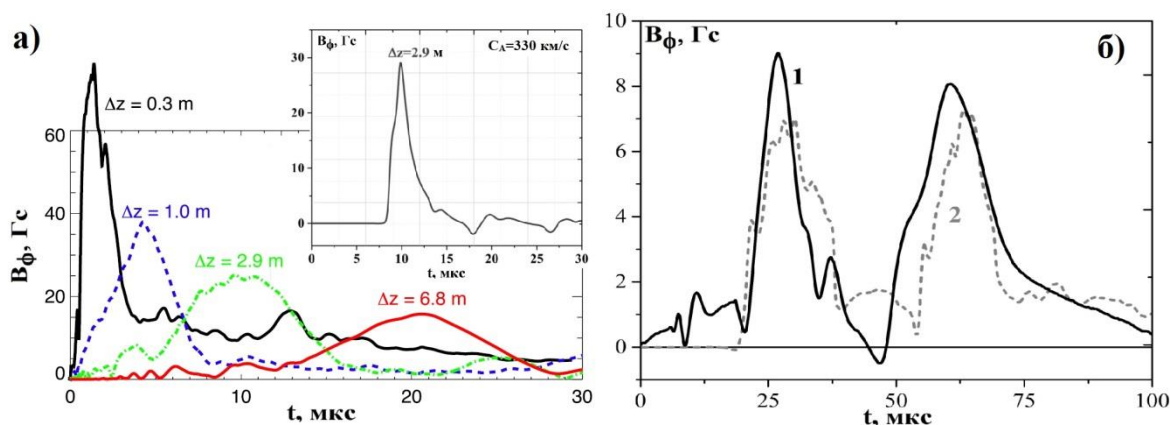


Рисунок 2 – а) Азимутальная компонента магнитного поля B_ϕ , созданная одним плазменным сгустком и измеренная на расстояниях $z=0.3, 1, 2.9$ и 6.8 м. На вставке показан расчет с использованием параметров эксперимента на установке LAPD для датчика, установленного на расстоянии $\Delta z=2.9$ м. б) Азимутальная компонента магнитного поля B_ϕ . Два импульса создают две альфвеновских волны, которые объединяются в единую волну при уменьшении задержки между импульсами. 1- экспериментальные данные; 2- расчет. Расстояние от мишени до регистрирующего сигнала датчика $\Delta z=1.9$ м.

В эксперименте LAPD, скорость альфвеновской волны, при числе Альфвена - Маха $M_A=1.5$, равна $C_A = 333$ км/с, что с хорошей точностью промоделировано с использованием МГД модели. В расчетах альфвеновская скорость вычислялась как отношение координаты зонда к времени прихода на него сигнала: $V = z/t$. В экспериментах на стенде КИ-1 амплитуда сигнала в два раза меньше относительно сигналов полученных в [14], что связано с использованием внешнего магнитного поля $B_0 = 175$ Гс. Таким образом, результаты численной модели хорошо согласуются с результатами экспериментов проводимых на лабораторных установках.

В разделе 2.6 представлены выводы по второй главе.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены результаты численного моделирования генерации альфвеновских и магнитозвуковых волн, сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме. Раздел 3.1 описывает параметры среды и лазерной плазмы, а так же схему формирования квазистационарных волн. Рассматривается неподвижная область, длиной ΔZ с радиусом R , где в фиксированной точке поглощается цуг из N лазерно-плазменных сгустков с энергией q , следующих с частотой f . Такие условия реализуются, например, при оптических пробоях в парах мишени, облучаемой короткими лазерными импульсами. Предполагается, что длительность импульсно-периодических лазерных импульсов мала по сравнению со временем расширения нагреваемой области. Каждый сгусток создает скачок давления, превышающий давление фона в сотни раз. В результате теплового расширения формируются сильные возмущения фоновой среды и каверна с высокой температурой и низкой плотностью плазмы.

Расширение сгустка лазерной плазмы приводит к вытеснению внешнего магнитного поля и образованию каверны, на границе которой протекает электрический ток. Магнитная сила, приложенная на границе каверны, тормозит плазму источника и ускоряет фоновую плазму. В трехжидкостном описании, ионы фоновой плазмы также ускоряются азимутальным электрическим полем в системе отчета ионов лазерной плазмы, т.е. силу Лоренца. На обратной стадии схлопывания магнитной каверны ионы фоновой плазмы двигаются к центру каверны и, взаимодействуя с лазерной плазмой за счет силы Лоренца закручиваются. При этом сжатие к оси симметрии приводит к росту давления и истечению плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. При периодическом процессе формируется узкая ($\sim R_d$, динамический радиус торможения облака плазмы) квазистационарная волна (КВ), на границе которой протекает круговой ток J_ϕ , и в центре магнитное поле понижено. Суммарное давление в КВ равно давлению фона, что обеспечивает локализацию волны в силовой трубке.

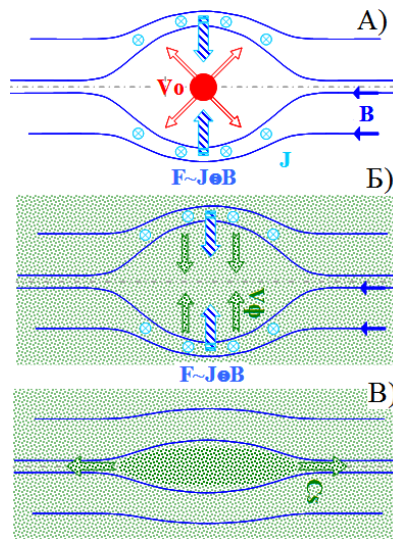


Рисунок 3 – Стадии формирования продольных плазменных потоков и волн. А) расширение сгустка лазерной плазмы и вытеснение магнитного поля; Б) схлопывание камеры и сжатие плазмы вокруг оси симметрии; В) распространение вдоль силовых линий магнитного поля и генерация квазистационарной волны.

В разделе 3.2 показана пространственная структура квазистационарной волны, которая содержит сжатую плазму фона, имеющей аксиально-симметричную форму, длина которой много больше радиуса. В КВ локализована альфвеновская и медленная магнитозвуковая волна. Скорость альфвеновской волны больше медленной магнитозвуковой, поэтому после «выключения» источника альфвеновская волна отделяется от магнитозвуковой волны (рисунок 4).



Рисунок 4 – Источник пульсирующей плазмы формирует альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волну, которые движутся вдоль силовых линий магнитного поля

В разделе 3.3 рассматривается основной критерий механизма объединения волн. МОВ формирует АКВ и МКВ при определенных соотношениях между энергией сгустков Q , их частотой f и скоростью волн C_i .

Как и в газах [20], условие объединения волн в замagnetиченной плазме определяется безразмерной частотой повторения плазменных сгустков:

$$\omega_i = \frac{f \cdot R_d}{C_i},$$

Здесь C_i – скорость альфвеновских (C_A) или магнитозвуковых (C_M) волн, f – частота повторения сгустков, R_d – динамический радиус зависит от энергии одиночного сгустка Q и внешнего магнитного поля B_0 . Критерий позволяет определить частоту f для заданной энергии Q , которая в свою очередь выбирается с учетом других критериев, определяющих эффективную генерацию волн.

При малых частотах повторения лазерных импульсов $\omega < 0.2$ (рисунок 5), альфвеновские волны, создаваемые отдельными сгустками, не взаимодействуют между собой. При больших значениях $\omega > 0.4$ отдельные альфвеновские волны объединяются, и суммарная длина пакета уменьшается. Оптимальная частота $\omega \sim 0.3 \div 0.4$. Преимущество МОВ проявляется при большом числе импульсов, когда длины МКВ и АКВ много больше, чем у волн от одного импульса с большой энергией.

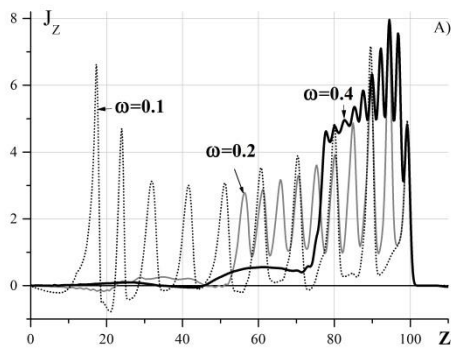


Рисунок 5 – Модуляция АКВ, выраженная как распределение плотности тока вдоль оси распространения, при различной частоте источника, создающего десять сгустков.

В Разделе 3.4 рассматривается преимущества механизма объединения волн и генерации низкочастотных волн цугом лазерных импульсов, по сравнению с генерацией одиночным импульсом. Скорость затухания альфвеновских волн увеличивается при повышении их частоты, которая обратно пропорциональна длине волнового пакета $f \sim 1/L$. Для одного сгустка длина равна $L \sim (Q)^{1/3}$. Для волны, создаваемой из N сгустков плазмы с энергией q , $L \sim N \cdot (q)^{1/3} / \omega$, где q энергия одного сгустка, а $\omega \approx 0.3$ – оптимальная безразмерная частота пульсаций плазмы. Рисунок 6 иллюстрирует спектр пакета альфвеновских волн, создаваемого $N=10$ и 50 плазменными сгустками.

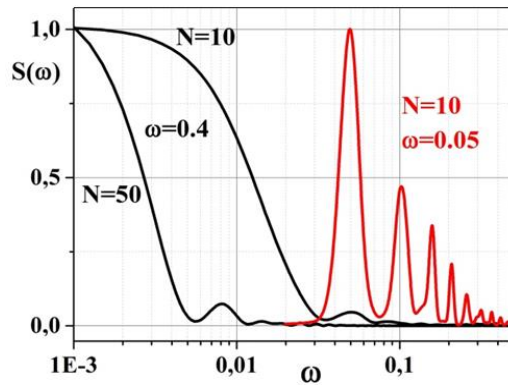


Рисунок 6 – Спектры альфвеновских волн для $N=10$ и $N=50$. Красная кривая - спектр волны, при частоте повторения сгустков $\omega=0.05$.

При увеличении количества лазерных импульсов растет длина квазистационарной альфвеновской волны, а ее спектр смещается в область низких частот. При частотах $\omega \ll 0.2$ пуг из N сгустков создает N отдельных волн, в спектре которых преобладают линии, на частоте повторения сгустков и их обертоны. Таким образом, увеличивая число импульсов можно создать альфвеновскую волну, длина, которой много больше, чем для волны созданной одним импульсом. Это позволяет более чем на порядок снизить характерную частоту альфвеновской волны и, тем самым значительно снизить затухание.

Раздел 3.5 описывает условия эффективного формирования низкочастотных волн в замагниченной плазме. Основное условие – давление в сгустках лазерной плазмы много больше суммарного давления плазмы и магнитного поля фона. Амплитуда АКВ максимальна при выполнении следующих условий:

1. Отношение ларморовского радиуса ионов источника к ионно-плазменной длине фона: $\alpha > 5$. При $\alpha < 5$, амплитуда АКВ уменьшается.
2. Ларморовский радиус R_L ионов лазерной плазмы примерно равен динамическому радиусу R_d .

При нарушении этих условий АКВ не формируется или амплитуда волны мала и нестабильна.

3. Отношение ионно-плазменной длины к динамическому радиусу плазменного сгустка $L_{pi} = 0.1 \div 0.3$. При значениях $L_{pi} > 0.3$, амплитуда альфвеновской волны уменьшается, и сгустки генерируют вистлеры.

4. Плазменный параметр, характеризующий отношение теплового давления плазмы фона к давлению внешнего магнитного поля, $\beta < 1$. Из расчетов следует, что в широком диапазоне значений $\beta \sim 0.001 \div 1$, волна локализована в силовой трубке магнитного поля радиусом $\sim R_d$.

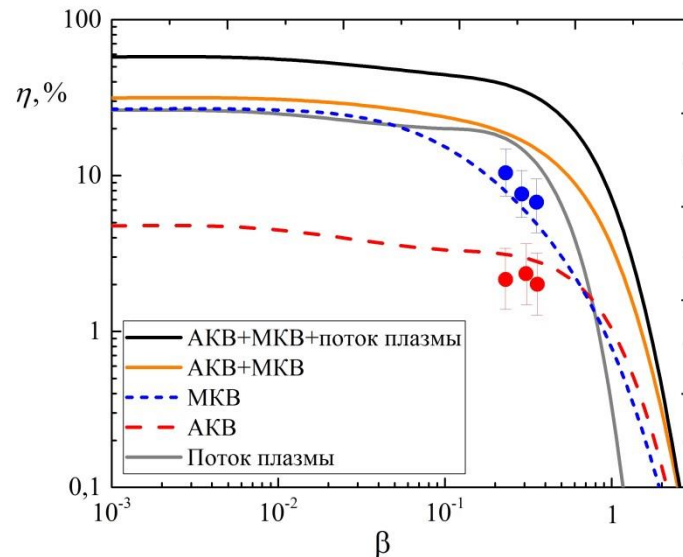


Рисунок 7 – Влияние плазменного β на КПД преобразования энергии лазерной плазмы в волны и струю плазмы сгустков, распространяющиеся в силовой трубке магнитного поля. Символами (●) показаны экспериментальные значения.

В разделе 3.6 исследуется влияние содержания нейтральных частиц в замагниченной фоновой плазме на интенсивность квазистационарных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн, генерируемых сгустками лазерной плазмы в силовой трубке магнитного поля. Рассмотрено влияние нейтралов на структуру квазистационарных волн, скорость и предельное содержание нейтральных частиц в замагниченном фоне. Низкая концентрация нейтралов в фоне оказывает слабое влияние на амплитуду и скорость распространения АКВ. При высоком содержании нейтралов, происходит «торможение» АКВ и МКВ на начальной стадии движения. Основная часть АКВ локализована в МКВ и движется вместе с ней. Ток и другие параметры АКВ максимальны на переднем фронте МКВ, где концентрация плазмы максимальна.

В разделе 3.7 исследуется генерация волн в условиях, когда ионно-плазменная длина приближается к $L_{pi} > 0.4$. В этом случае в замагниченной плазме импульсно-периодическое лазерное излучение генерирует преимущественно вистлерные волны. Расчеты показывают (рисунок 8), что характерные амплитуды волн достигают больших значений $V_{\phi}/V_0 \sim 0.1 \div 0.25$. Основная часть волнового пакета вистлеров локализована в силовой трубке, радиус которой примерно равен R_d . Интенсивность достигает максимума вблизи оси при $R_d \sim 0.1$. Подтверждением вистлерной природы возмущений служит годограф компонент магнитного поля (Рисунок 8б), который имеет правостороннюю круговую поляризацию.

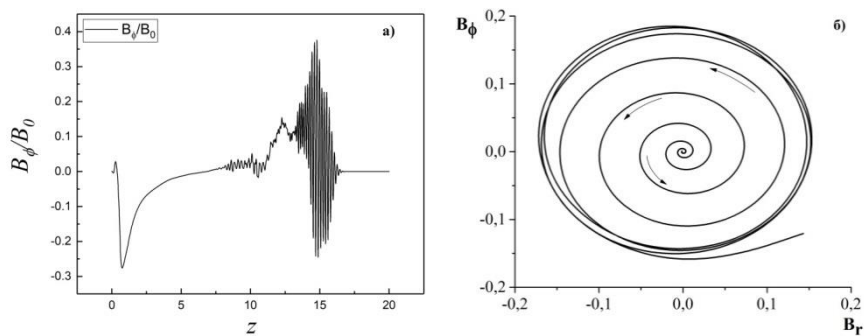


Рисунок 8 – а) отношение азимутальной компоненты магнитного поля к величине внешнего магнитного поля вдоль оси z ; б) годограф магнитного поля.

В разделе 3.8, с использованием численного моделирования определены параметры лазерной плазмы и замагниченного фона, при которых в экспериментах на КИ-1 возможна генерация вистлеров с амплитудой $\sim 20\%$ от величины внешнего магнитного поля. В разделе 3.9 приводятся выводы по главе 3.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА. В экспериментах на лазерном стенде КИ-1 с использованием микросекундных лазерных импульсов с энергией сотни джоулей решаются следующие задачи. Проверка критериев объединения волн и эффективного преобразования импульсно-периодического лазерного излучения в альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны с последующей закачкой в силовую трубку. В разделе 4.1 приведены безразмерные критерии генерации потока лазерной плазмы, альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн в замагниченной плазме, полученные из данных измерений (рисунок 9).

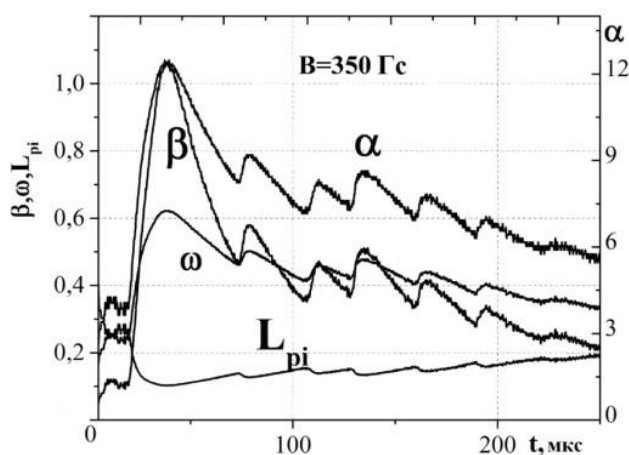


Рисунок 9 – Изменение безразмерных параметров во времени в фоновой плазме.

В Разделе 4.2 описывается эксперимент по генерации альфвеновских и магнитозвуковых волн сгустками лазерной плазмы. В эксперименте фон и задержка лазерных импульсов τ выбраны с использованием условий, полученных в разделе 4.1 и с учетом возможностей стенда – энергия сгустков, начальная скорость разлета и радиус камеры. На рисунке 10 (а) представлен пример формирования единой АКВ и единой МКВ, создаваемых сгустками в магнитном поле $B_0=350$ Гс. Концентрация фоновой плазмы $\sim 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³, задержка между лазерными импульсами $\tau = 7.5$ мкс соответствует частотам $\omega_A=0.29$, $\omega_M=0.64$, удовлетворяющим проявлению МОВ для АКВ и МКВ. Рисунок 10 (б) иллюстрирует случай, когда условие объединения выполнено для МКВ ($\omega_M=0.37$), но не выполнено для АКВ $\omega_A=0.15$. В результате формируется единая МКВ (N и B_Z) и отдельные АКВ (B_ϕ). Амплитудная модуляция МКВ уменьшается по мере распространения волны. АКВ движется впереди МКВ, что связано с различием их скоростей.

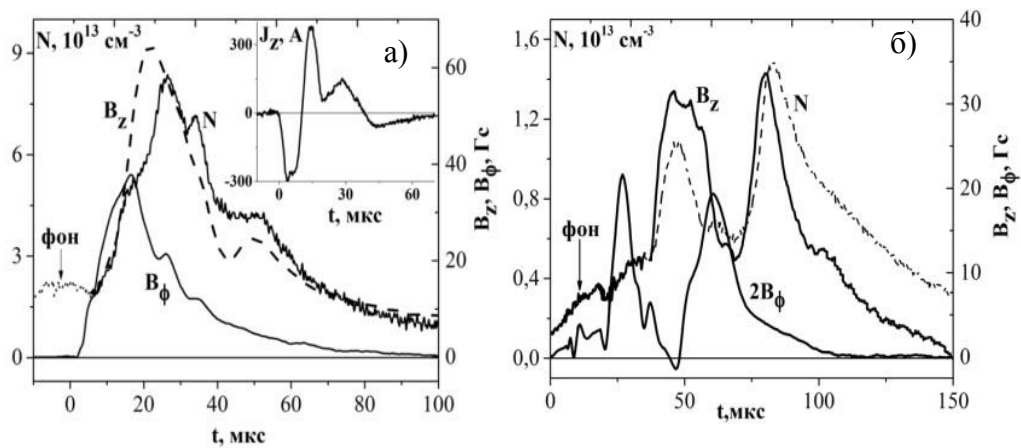


Рисунок 10 – Концентрация плазмы N и возмущение магнитного поля B_Z в медленной магнитозвуковой волне. Азимутальное магнитное поле B_ϕ и продольный ток J_Z в альфвеновской волне, создаваемые двумя сгустками лазерной плазмы в фоновой плазме с магнитным полем $B_0=175$ Гс (а) и $B_0=350$ Гс (б).

Разделы 4.3-4.3.1 описывает схему и параметры, а раздел 4.3.2 результаты эксперимента по генерации потока вращающейся лазерной плазмы в магнитном поле без фоновой плазмы (вакуум). Показано, что генерируемые потоки и возмущения обладает признаками АКВ и МКВ, а длина потока линейно зависит от количества лазерных импульсов. В разделе 4.3.3 сравниваются измеренные и рассчитанные скорости АКВ и МКВ в магнитной силовой трубке, заполненной лазерной плазмой. В разделе 4.3.4 показано, что критерии МОВ в потоке лазерной плазмы имеют тот же вид, что и для случая наличия замагниченной плазмы фона в камере. Рисунок 11 иллюстрирует концентрацию, продольный ток и компоненты магнитных полей (n , B_Z , B_ϕ , J_Z), создаваемые двумя сгустками. Из измерений и расчетов следует, что плазма, поля и ток локализованы в силовой трубке, диаметр которой равен

динамическому радиусу. Ток J_Z максимален в центре потока. При $\tau \leq 10$ мкс два лазерных импульса создают единый поток, возмущения поля и ток. На рисунке 11 вторые максимумы сигналов (B_ϕ , J_Z) и (n , B_Z) соответствуют АКВ и МКВ от второго импульса. Скачок δn в трубке качественно такой же, как для МКВ в замагниченной плазме. АКВ опережает МКВ, что характерно для замагниченной плазмы с малым β и указывает на волновую природу АКВ и МКВ.

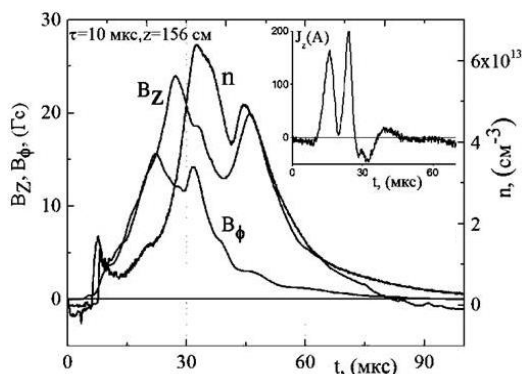


Рисунок 11 – Два сгустка с задержкой $\tau=10$ мкс в отсутствие плазмы фона. Концентрация n , продольное B_Z , азимутальное B_ϕ магнитное поле и продольный ток J_Z . Внешнее магнитное поле $B_0=350$ Гс. Измерено в точке $Z \approx 90$ см.

В разделе 4.3.5, с использованием критериев, полученных в разделе 4.3.4, приведено обоснование параметров сгустков лазерной плазмы для формирования потока в силовой трубке магнитного поля в отсутствие фоновой плазмы. В разделе 4.3.6 определяется импульс и момент импульса, переносимые АКВ и МКВ в силовой трубке магнитного поля из параметров, найденных в разделе 4.3.5. В разделе 4.4 приводится краткий обзор по генерации вистлеров и наблюдению их в ионосферно-магнитосферной плазме и основные результаты экспериментов, по генерации и распространению вистлеров. В разделе 4.4.1 описывается основная задача и параметры эксперимента, реализованного при ионно-плазменной длине $L_{pi} > 0.4$, лазерные импульсы генерирует преимущественно вистлерные возмущения. В экспериментальных результатах, которые описаны в пунктах 4.1- 4.4 параметр L_{pi} не превышал значения 0.3, что оптимально для генерации АКВ и МКВ.

В разделе 4.4.2 приводятся экспериментальные результаты по генерации вистлеров сгустками лазерной плазмы, создаваемые импульсно периодическим излучением в замагниченной плазме. Важный результат экспериментов состоял в регистрации характерных свойств вистлеров: азимутального магнитного возмущения с правосторонней круговой поляризацией, распространяющегося с высокими сверх-альфвеновскими скоростями ($V > 200$ км/с). На рисунке 12 (а) показана типичная осциллограмма азимутальной компоненты магнитного поля $B_\phi(t)$. Возмущения имеют правостороннюю круговую поляризацию и

характерную понижающуюся частоту от 10^6 Гц в начале пакета до $2 \cdot 10^5$ Гц в конце. Параметр L_{pi} составил ~ 1 .

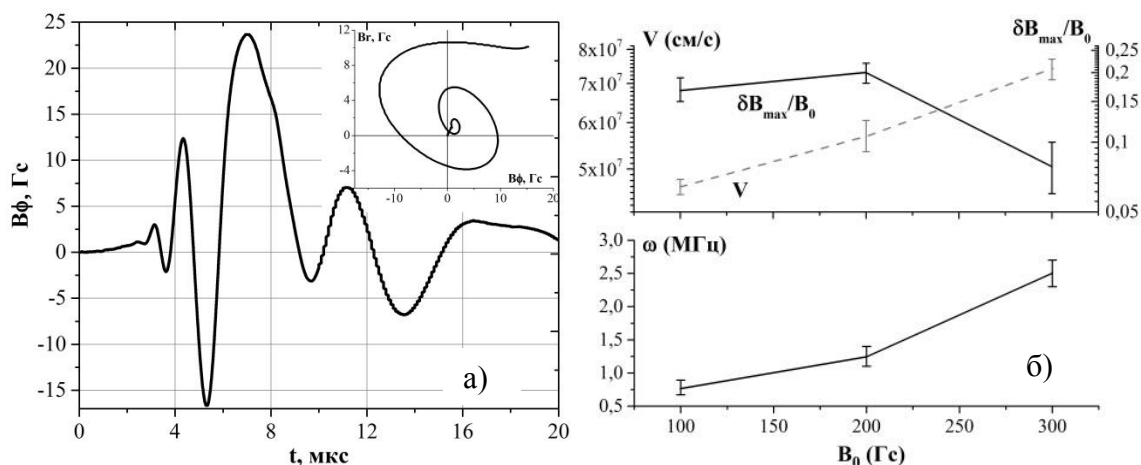


Рисунок 12 – а) Азимутальное магнитное поле $V\phi(t)$ вистлеров. На вставке представлен годограф магнитного поля. Расстояние $z=140$ см от мишени. Внешнее магнитное поле $B_0=200$ Гс. б) Зависимость скорости V вистлеров, максимальной амплитуды $\delta V_{max}/B_0$ и частоты возмущений ω от величины внешнего магнитного поля. Фоновая плазма состоит из ионов аргона.

Зависимость амплитуды, скорости и периода осцилляций вистлеров от внешнего магнитного поля иллюстрирует рисунок 12(б). Максимальная амплитуда вистлеров $\delta V_{max}/B_0=0.25$ достигается в поле $B_0=200$ Гс. При $B_0=300$ Гс, величина δV_{max} резко уменьшается, что связано с изменением концентрации фона за счет сжатия внешним магнитным полем и уменьшения параметра L_{pi} . Экспериментально, скорость возмущений измерялась как отношение расстояния зондов от мишени к времени прихода сигналов на зонды: $V=(z_2-z_1)/(t_2-t_1)$. Скорость практически линейно зависит от величины магнитного поля. Частота возмущений $\omega=0.76$ МГц в поле 100 Гс, $1 \div 1.25$ МГц при 200 Гс и 2.5 МГц в поле 300 Гс соответственно.

В узком диапазоне $0.3 < L_{pi} < 0.4$ наблюдались одновременно альфвеновская волна и вистлеры, как показано на рисунке 13. На вставке представлен годограф магнитного поля. При концентрации водородной плазмы $n_0=5 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, в среде распространяется вистлер со скоростью $V=220$ км/с, и альфвеновская волна со скоростью $V=70$ км/с). Этот факт подтверждается годографом магнитного поля, который имеет правостороннюю круговую поляризацию, характерную для вистлеров до момента времени $t=12$ мкс. После этого времени поляризация трансформируется в левостороннюю, что связано с приходом альфвеновской волны.

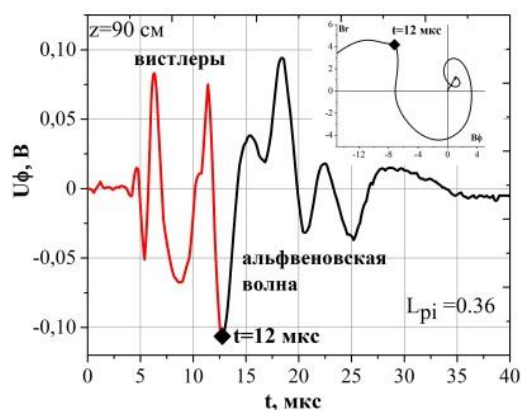


Рисунок 13 – Сигнал производной азимутального магнитного поля при воздействии одного плазменного сгустка. Измерено на расстоянии $z=90$ см от мишени, внешнее магнитное $B_0=175$ Гс. Точкой на графиках показано время прихода ($t=12$ мкс) альфвеновской волны.

В разделе 4.4.3 представлена научная и практическая значимость критериев резонансного взаимодействия сгустков плазмы с фоном. В разделе 4.5 приводятся выводы по главе 4.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы в экспериментах на стенде КИ-1 и в расчетах на суперкомпьютерах.

На основе экспериментальных данных с лазерной плазмой и численного моделирования:

1. Механизм резонансного объединения волн, создаваемых периодическими сгустками лазерной плазмы, действует не только в газах, но и в магнитном поле, и в замагниченной плазме.

2. Импульсно-периодические сгустки плазмы позволяют генерировать низкочастотные волны, распространяющиеся вдоль магнитной силовой трубки и содержащие $\sim 50\%$ от вложенной энергии.

3. Найдены критерии, которые позволяют управлять типом генерируемых волн и формой переноса энергии. Показано, что возможны следующие типы низкочастотных и высокочастотных волн и их сочетания.

- Медленная магнитозвуковая волна, переносящая продольный импульс сжатой плазмы фона.

- Альфвеновская волна, переносящая сильные вариации магнитного поля и момент импульса вращающейся в волне плазмы фона.

- Вистлерная волна, переносящая высокочастотные колебания и электромагнитное излучение.

4. Критерии позволяют управлять спектром волн, который может содержать низкие частоты, низкие и высокие, или высокие на частоте повторения сгустков.

5. В магнитном поле альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны создаются двухкомпонентной лазерной плазмой, заполняющей силовую трубку. При этом критерии имеют тот же вид, что и в замагниченной плазме.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. *Tishchenko V. N., Zakharov Yu. P., Shaikhislamov I. F., Berezutskii A. G., Boyarintsev E. L., Melekhov A. V., Ponomarenko A. G., Posukh V. G., Prokopov P. A.* Torsional Alfvén and slow magnetoacoustic waves generated by a plasma in a magnetic field // *JETP letters*. – 2016. – Vol. 104. – №. 5. – P. 293-296.
2. *Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Захаров Ю. П., Мелехов А. В., Мирошниченко И. Б., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Шайхисламов И. Ф.* Объединение волн, создаваемых оптическими пробоями в разреженной плазме с магнитным полем. Лабораторное моделирование // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47. – №. 9. – С. 849-852.
3. *Березуцкий А. Г., Тищенко В. Н., Захаров Ю. П., Мирошниченко И. Б., Шайхисламов И. Ф.* Генерация крутильных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн периодическими сгустками лазерной плазмы в замагниченном фоне // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49. – №. 2. – С. 178-180.
4. *Березуцкий А. Г., Ефимов М. А., Захаров Ю. П., Мирошниченко И. Б., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Тищенко В. Н., Чибранов А. А., Шайхисламов И. Ф.* Низкочастотные вистлеры, создаваемые сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2020. – Т. 84. – №. 7. – С. 973-976.
5. *Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Дмитриева Л. Р., Мирошниченко И. Б., Шайхисламов И. Ф.* Генерация альфвеновских волн в замагниченной плазме сгустками лазерной плазмы при числах Маха много меньше единицы // *Солнечно-земная физика*. – 2022. – Т. 8. – №. 2. – С. 101-107.

Публикации в трудах конференций:

1. *Тищенко В. Н., Захаров Ю. П., Шайхисламов И. Ф., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Мелехов А. В., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Прокопов П. А.* Волновая транспортировка энергии, импульса и момента импульса в космической плазме с магнитным полем. Лабораторное и численное

- моделирование // Проблемы физики высоких плотностей энергии. – 2017. – С. 466-472.
2. *Tishchenko V. N., Zakharov Yu. P., Posukh V. G., Berezutsky A. G., Boyarintsev E. L., Melekhov A. V., Miroshnichenko I.B., Shaikhislamov I.F.* Mechanism of merging of torsional Alfvén and slow magnetosonic waves produced by train of laser pulses upon irradiation of a target located in a space plasma with a magnetic field. Laboratory modeling // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – Vol. 1893. – №. 1. – P. 030117.
 3. *Tishchenko V. N., Zakharov Yu. P., Berezutsky A. G., Boyarintsev E. L., Melekhov A. V., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko I.B.* Momentum and angular momentum of laser plasma produced by irradiation of the target located in a magnetic field in vacuum // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – Vol. 1893. – №. 1. – P. 030066.
 4. *Tishchenko V. N., Berezutsky A. G., Boyarintsev E. L., Zakharov Yu. P., Melekhov A. V., Miroshnichenko I. B., Ponomarenko A. G., Posukh V. G., Shaikhislamov I. F.* Wave transport of momentum and angular momentum, created by a pulsed laser plasma in space. Numerical and laboratory modeling // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Vol. 2027. – №. 1. – P. 030134.
 5. *Tishchenko V. N., Berezutsky A. G., Boyarintsev E. L., Zakharov Yu. P., Miroshnichenko I.B., Posukh V.G., Ponomarenko A.G., Shaikhislamov I.F.* Whistler waves generated by periodically repeating laser plasma bunches in magnetized plasma. Numerical simulation // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2098. – №. 1. – P. 020014.
 6. *Tishchenko V. N., Berezutsky A. G., Boyarintsev E. L., Zakharov Yu. P., Miroshnichenko I. B., Posukh V. G., Ponomarenko A. G., Chibrinov A. A. and Shaikhislamov I. F.* Low-frequency waves produced by a package of laser plasma clouds in a magnetized background // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1404. – №. 1. – P. 012100.
 7. *Tishchenko V. N., Berezutsky A. G., Dmitrieva L. R., Miroshnichenko I. B., and Shaikhislamov I. F.* Influence of the expansion velocity of laser plasma bunches on the intensity of a plasma jet and quasistationary waves generated in a magnetic tube // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Vol. 2288. – №. 1. – P. 030047.
 8. *Berezutsky A. G., Tishchenko V. N., Chibrinov A. A., Miroshnichenko I. B., Zakharov Y. P., Shaikhislamov I. F.* Controlling the type and intensity of low-frequency waves generated by laser plasma clots in a force tube of magnetized plasma // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2067. – №. 1. – P. 012019.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров А. М., Конов В. И., Урсу И., Михэилеску И. Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М: Наука. – 1988.
2. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. – М.: Наука, 1974. – 308 с.
3. Гейнц Ю. Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А.. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля //Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 1999. – Т. 260. – С. 9.
4. Зудов В. Н., Грачев Г. Н., Крайнев В. Л., Смирнов А. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В. Инициирование горения оптическим разрядом в сверхзвуковой метановоздушной струе //Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49. – №. 2. – С. 144-147.
5. Гольшев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б. Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и СО₂-лазеров //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 9. – С. 873-878.
6. Бахрах С. М., Губков Е. В., Жмайло В. А., Терехин В. А. Разлет плазменного облака в однородном магнитном поле //ПМТФ. – 1974. – №. 4. – С. 146.
7. Антонов В. М., Захаров Ю. П., Максимов В. В., Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Посух В. Г. Создание облаков лазерной плазмы с числом частиц $N \sim 10^{19}$ //Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23. – №. 4. – С. 649-652.
8. Вишнев В. А., Дудникова Г. И., Захаров Ю. П. Особенности структуры плазменных возмущений, генерируемых при бесстолкновительном взаимодействии потоков с умеренными числами $Ma = 1-1, 25$ //Физика космической и лабораторной плазмы. – 1989. – С. 135-145.
9. Zakharov Y. P. Laboratory simulation of plasma releases into space and astrophysical magnetized media // J. Techn. Phys. – 2000. – Vol. 41. – P. 125-132, 200.
10. Пикуз С. А., Скобелев И. Ю., Алхимова М. А., Покровский Г. В., Колган Д., Пикуз Т. А., Фаенов А. Я., Соловьев А. А., Бурдонов К. Ф., А. А. Еремеев, А. Д. Сладков, Р. Р. Османов, М. В. Стародубцев, Гинзбург В. Н., А. А. Кузьмин, Сергеев А. М., Фукс Дж., Хазанов Е. А., Шайкин А. А., Шайкин И. А., Яковлев И. В. Формирование плазмы с определяющей ролью радиационных процессов при облучении тонких фольг импульсом субпетаваттного лазера PEARL //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2017. – Т. 105. – №. 1. – С. 15-20.
11. Марков Г. А., Чугунов Ю. В. Резонансный плазменно-волновой разряд в ионосфере Земли //Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2001. – Т. 9. – №. 2. – С. 60-75.
12. Айдакина Н. А., Гуцин М. Е., Зудин И. Ю., Коробков С. В., Костров А. В., Стриковский А. В. Кроссмодуляция волн свистового диапазона частот

- в магнитоактивной плазме // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 101. – №. 4. – С. 254-257.
13. *Shaikhislamov I. F., Zakharov Y. P., Posukh V. G., Melekhov A. V., Boyarintsev E. L., Ponomarenko A. G., Terekhin V. A.* Experimental study of collisionless super-Alfvénic interaction of interpenetrating plasma flows // *Plasma Physics Reports*. – 2015. – Vol. 41. – №. 5. – P. 399-407.
 14. *Niemann C., Gekelman W., Constantin C. G., Everson E. T., Schaeffer D. B., Clark S. E., Winske D., Zylstra A. B., Priby P., Tripathi S. K. P., Larson D., Glenzer S. H., Bondarenko A. S.* Dynamics of exploding plasmas in a large magnetized plasma // *Physics of Plasmas*. – 2013. – Vol. 20. – №. 1. – P. 012108.
 15. *Коротаева Т. А., Фомин В. М., Яковлев В. И.* Режимы лазерного энергоподвода в газовый поток // *Вестник НГУ. Серия Физика*. – 2007. – Т. 2. – №. 1. – С. 19-35.
 16. *Kostrov A. V., Starodubtsev M. V., Krafft C., Matthieussent G., Volokitin A. S.* Interaction of a modulated electron beam with a magnetoactive plasma // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. – 1998. – Vol. 67. – №. 6. – P. 400-404.
 17. *Kiseleva T. A., Korotaeva T. A., Yadrenkin M. A., Yakovlev V. I.* Laser breakdown model in the absorption mode behind a light supported detonation wave // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1698. – №. 1. – P. 012021.
 18. *VanZeeland M., Gekelman W., Vincena S., Dimonte G.* Production of Alfvén waves by a rapidly expanding dense plasma // *Physical review letters*. – 2001. – Vol. 87. – №. 10. – P. 105001.
 19. *Третьяков П. К., Гаранин А. Ф., Грачев Г. Н., Крайнев В. Л., Пономаренко А. Г., Тищенко В. Н., Яковлев В. И.* Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда // *Доклады Академии Наук. – Российская академия наук*. – 1996. – Т. 351. – №. 3. – С. 339-340.
 20. *Тищенко В. Н., Аполлонов В. В., Грачев Г. Н., Гулидов А. И., Запрягаев В. И., Меньшиков Я. Г., Смирнов А. Л., Соболев А. В.* Взаимодействие оптического пульсирующего разряда с газом: условия стабильной генерации и объединения ударных волн // *Квантовая электроника*. – 2004. Т.34. № 10. – С. 941–947.
 21. *Тищенко, В. Н., Посух, В. Г., Гулидов, А. И., Запрягаев, В. И., Павлов, А. А., Бояринцев, Э. Л., Голубев М. П., Кавун И. Н., Мелехов А. В., Голобокова Л. С., Мирошниченко И. Б., Павлов Ал. А., Шмаков, А. С.* Критерии формирования низкочастотного звука при облучении твердых тел широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным излучением // *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41. – №. 10. – С. 895-900.

22. Тищенко В. Н., Шайхисламов И. Ф. Механизм объединения ударных волн в замагниченной плазме: критерии и эффективность формирования низкочастотных магнитозвуковых волн // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 5. – С. 464-469.
23. Тищенко В. Н., Шайхисламов И. Ф. Механизм объединения волн: формирование низкочастотных альфвеновских и магнитозвуковых волн в космической плазме //Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №. 2. – с. 98-101.
24. Тищенко В. Н., Захаров Ю. П., Шайхисламов И. Ф., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Мелехов А. В., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Прокопов П. А. Торсионная альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны, создаваемые плазмой в магнитном поле // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 104. – №. 5-6. – С. 303-305.
25. Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Захаров Ю. П., Мелехов А. В., Мирошниченко И. Б., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Шайхисламов И. Ф. Объединение волн, создаваемых оптическими пробоями в разреженной плазме с магнитным полем. Лабораторное моделирование //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 9. – С. 849-852.
26. Адушкин В. В., Зецер Ю. И., Гаврилов Б. Г., Грыцькив И. В., Киселев Ю. Н., Романовский Ю. А., Стоянов Б. Активные эксперименты" Флакрус 1, 2": исследование взаимодействия плазменной струи с геофизической средой на высоте 140 км //ДАН РФ. – 1998. – Т. 361. – №. 6. – С. 818.
27. Гаврилов Б. Г., Зецер Ю. И., Подгорный И. М., Собянин Д. Б., Менг Ч. И., Эрландсон Р. Е., Стейнбек-Нилсен Х.К., Пфафф Р.Ф., Линч К. А. Движение плазменной струи поперек геомагнитного поля в активном геофизическом эксперименте" North Star" //Космические исследования. – 2003. – Т. 41. – №. 1. – С. 33-45.
28. Оршич А. М., Посух В. Г., Снытников В. Н. Влияние инъекции внешнего излучения на генерацию ТЕА лазера с неустойчивым резонатором // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13. – №. 6. – С. 1292-1294.