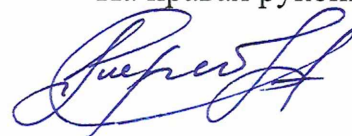


Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Терехов Святослав Алексеевич

**УСКОРЕНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ В
СКРЕЩЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

1.3.9 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

**Москва
2023**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: **Каримов Александр Рашатович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электрофизических установок НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

Долгов Александр Николаевич доктор физико-математических наук
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова», г. Москва, ведущий научный сотрудник

Помазан Юрий Викторович доктор технических наук
Секция прикладных проблем при президиуме РАН, г. Москва, главный научный сотрудник

Веденяпин Виктор Валентинович доктор физико-математических наук
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, г. Москва, ведущий научный сотрудник

Защита состоится «04» октября 2023 года в «15» часов на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МИФИ.1.01, кандидат физ.-мат. наук



А.А. Степаненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка современных плазменно-эмиссионных устройств подразумевает поиск новых способов генерации плазмы требуемой плотности, зарядового и массового состава ионов и формирования из нее плазменных потоков [1-5] или потоков нейтральных частиц [6] заданной энергии. Эта проблема включает: поиск наиболее эффективных способов генерации плазмы требуемой плотности, зарядового и массового состава ионов и ускорение потока заряженных частиц до заданных энергий.

Настоящая работа в основном касается второго вопроса, а именно развития коллективных методов ускорения многокомпонентной плазмы, когда ускорение зарядов противоположного знака происходит в одном том же направлении при компенсации заряда потока. Такой режим ускорения плазменного потока, состоящего из электронов и однозарядных ионов, может быть реализован, например, в скрещенных внешних электрическом и магнитном полях [7, 8]. В предложенной схеме азимутальное электрическое поле создается внешним аксиальным нестационарным магнитным полем, перпендикулярным к постоянному радиальному магнитному полю. В результате взаимодействия возбуждаемого азимутального тока с радиальным магнитным полем происходит ускорение плазменного потока в аксиальном направлении, т.е. ускорительный эффект возникает при передаче импульса от внешнего электромагнитного поля к ионной и электронной компоненте плазменного потока.

В этой связи возникает естественный вопрос, как данный эффект будет работать в многокомпонентной плазме, содержащей помимо электронов и легких однозарядных ионов, также многозарядные тяжелые макроскопические частицы (такие среды принято называть комплексными или пылевыми плазменными средами). Причем, как массы и заряды пылевых частиц, а также их концентрация в плазме могут меняться в

широких пределах. По-видимому, эти параметры должны влиять на процесс захвата тяжелых частиц основным потоком и динамику его ускорения в целом. Поэтому представляет несомненный интерес изучение динамики ускорения комплексной плазмы, установление условий реализации обсуждаемого коллективного механизма ускорения, обсуждение возможной технической реализации развиваемой схемы ускорения.

Особенно важны данные вопросы с точки зрения возможных приложений ускоренных потоков плазмы. В частности, при применении ускоренных потоков для уничтожения космического мусора, или использования космической пыли в качестве топлива плазменных двигателей.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является исследование механизма ускорения комплексной плазмы в скрещенных электрических и магнитных полях, установление физических и технических условий реализации развиваемого коллективного метода ускорения для многокомпонентных плазменных сред, а также обсуждение возможных приложений ускоренных потоков комплексной плазмы. Все это предполагает решение следующих задач:

1. анализ кинетики образования заряженных кластеров частиц в природных и техногенных условиях;
2. разработка модели генерации и ускорения комплексной плазмы в скрещенных электромагнитных полях с учетом нелинейного характера захвата и ускорения пылевых частиц;
3. численное моделирование динамики ускорения плазменных потоков в зависимости от состава, установление необходимых физических и технических условий для ускорения комплексных плазменных потоков;

4. разработка модели взаимодействия плазменных потоков с космическим мусором для оценки основных физико-технических параметров необходимого плазменного ускорителя;
5. анализ потенциального использования космической среды в качестве рабочего тела плазменных двигателей.

Научная новизна

Результаты работ, положенных в основу диссертации, способствовали расширению концепции коллективного ускорения в скрещенных полях на комплексные плазменные среды с последующим обсуждением возможных приложений, а именно:

1. разработана нелинейная математическая модель генерации и ускорения комплексной плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях;
2. показана принципиальная возможность ускорения потоков комплексных плазм в скрещенных электрическом и магнитном полях;
3. определены основные физико-технические характеристики ускорительной схемы и состав комплексной плазмы, при которых реализуется ускорение плазменного сгустка;
4. развита принципиально новая концепция утилизации космического мусора на основе плазменного ускорителя с использованием вещества и энергии околоземного пространства;
5. применительно к околоземному космическому пространству предложена схема плазменного двигателя, использующего межпланетную среду в качестве топлива.

Практическая значимость

Полученные результаты в целом могут быть полезны при разработке плазменно-эмиссионных устройств нового поколения, а именно:

1. установленные закономерности по нелинейной динамике комплексной плазмы в скрещенных полях могут быть использованы при разработке

- плазменных ускорителей, реализующих метод коллективного ускорения, в которых отсутствует предел по току;
2. предложена система утилизации космического мусора в верхних слоях атмосферы на основе плазменного ускорителя, использующего среду верхних слоев атмосферы и излучение Солнца для создания плазменных потоков требуемой интенсивности;
 3. предложенная концепция использования межпланетной среды для создания рабочего тела плазменных двигателей космических аппаратов представляет практический интерес для полетов в околоземном пространстве.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель генерации и ускорения комплексной плазмы в скрещенных электрических полях с учетом нелинейного характера захвата и ускорения пылевых частиц.
2. Результаты численного моделирования динамики ускорения плазменных потоков в зависимости от состава, установление необходимых физических и технических условий для ускорения комплексных плазменных потоков.
3. Установление механизма ускорения комплексной плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях.
4. Концепция электродинамической системы утилизации космического мусора с околоземных орбит.
5. Концепция плазменного двигателя, использующего межпланетную среду и солнечное излучение в качестве источников материи и энергии соответственно.

Апробация результатов

Результаты диссертации докладывались на научных конференциях: V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и

технологии» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2019); Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (Севастополь, 2019); XIII Международный научный семинар памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» 3-8 сентября 2019 года (Алушта, 2019); VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2020» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2020); AIAA Propulsion and Energy Forum (США, 2021).

Личный вклад автора

Автором проведено моделирование процессов формирования и ускорения потоков комплексной плазмы в скрещенных полях. Автор принимал участие в проведении оценки физико-технических характеристик, обеспечивающих ускорение плазменных потоков. Автор принимал участие в развитии и техническом обосновании концепций космического мусорщика и возможности использования космической среды в качестве топлива плазменных двигателей.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных работах, из них – 5 в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, 1 – в рецензируемом издании из перечня ВАК, 4 – в научных изданиях и сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка библиографии. Полный объем диссертации составляет 116 страниц текста с 27 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели, научная новизна, практическая значимость и апробация работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы. Дан обзор современного состояния работ по плазменным ускорителям, включая ускорители макротел.

В **первой главе**, следуя работам [9-11], обсуждаются основные механизмы зарядки макрочастиц в пылевой плазме. Даны основные характеристики макрочастиц пылевой плазмы, например, такие как размер, величина заряда, время зарядки. Проведенное рассмотрение позволяет выделить основные процессы зарядки макроскопических частиц, которые представляют интерес для настоящего исследования, а также определить параметры макрочастиц, применимых для ускорения в предлагаемой структуре.

В **п.1.1** описан общий подход к зарядке макрочастиц пылевой плазмы в приближении ограниченного орбитального движения (приближение ООД). Физическая суть используемого приближения заключается в следующем: зарядка макрочастиц в пылевой плазме происходит ввиду разницы в подвижностях электронов и ионов; при этом, в зависимости от того, подвижность каких частиц (электронов или ионов) выше, макрочастица может приобретать в итоге разный заряд (отрицательный или положительный соответственно). Приведены основные выражения, определяющие величину итогового заряда макрочастицы, а также проанализированы условия, накладывающие ограничения на параметры макрочастицы для успешной зарядки в условиях приближения ООД.

В **п.1.2** рассматривается возможность зарядки макрочастиц в условиях диффузионного режима зарядки. Такой режим зарядки наблюдается, когда длина свободного пробега электронов и ионов в газе много меньше

дебаевской длины соответствующих компонент. Даны основные выражения для определения потока электронов и ионов на поверхность макрочастицы. В условиях квазинейтральности плазмы на основе работ [9-11] приведено выражение для заряда макрочастицы, из которого можно сделать вывод, что в зависимости от того, чья подвижность выше – электронов или ионов – частица может приобретать как отрицательный, так и положительный заряд соответственно.

В **п.1.3** рассмотрен третий вариант зарядки макрочастиц в процессе фотоэмиссии с поверхности пылевого зерна [11], когда в процессе фотоэмиссии и фоторекомбинации электронов частица может приобрести положительный заряд. Приведены основные выражения для оценки величины заряда пылевой макрочастицы, а также фотоэмиссионного тока.

В **п.1.4** на основе работы [11] рассмотрена эволюция заряда макрочастицы для определения минимального времени зарядки в приближении ООД. Чтобы понять, как растет заряд пылевой частицы со временем, рассмотрена изолированная частица в плазме и определено время зарядки (время, характеризующее эволюцию заряда макрочастицы до его равновесного значения после некоторого возмущения). Рассматривается эволюционный процесс как для отрицательных (**п.п.1.4.1**), так и для положительных (**п.п.1.4.2**) макрочастиц. Представлены основные выражения для определения времени зарядки макрочастиц пылевой плазмы в приближении ООД для обоих сортов частиц.

На основе приведенной ранее информации в **п.1.5** определяются такие характеристики пылевой плазмы, необходимые для задания начальных характеристик плазменного сгустка, как радиус Дебая и размер пылевых частиц. Показано, что для того, чтобы происходили взаимодействия электронных и ионных компонент с макрочастицами в пылевой плазме, вследствие чего производилась бы зарядка частиц в пылевой плазме,

характерный размер данных макрочастиц a не должен превышать дебаевский радиус [9-11].

В п.1.6 дается выражение потенциала Юкавы, накладывающее ограничение на размер пылевой частицы для применимости приближения ограниченного орбитального движения в качестве механизма зарядки пылевого зерна в изотропной пылевой плазме [9,10]. Также показано асимптотическое поведение потенциала вблизи макрочастицы, а также на больших расстояниях от нее. Показано, что потенциал пылевой частицы также может отличаться от экранированного кулоновского потенциала и на малых расстояниях. Однако, насколько велико может быть данное различие на сегодняшний день исследовано слабо: существует несколько численных расчетов для определенного набора параметров плазмы. Например, электростатический потенциал вокруг сферических макрочастиц в изотропной плазме можно получить численно из самосогласованного решения уравнения Пуассона-Власова в бесстолкновительном режиме для плазменных компонент, электронов и ионов. При определенных условиях наличие захваченных ионов может приводить к еще лучшему согласию самосогласованного рассчитанного и экранированного кулоновского потенциалов на расстояниях вплоть до нескольких дебаевских радиусов.

В п.1.7, следуя работе [12], рассмотрено поведение потенциала пылевой макрочастицы в условиях анизотропности пылевой плазмы. Часто, особенно в лабораторных экспериментах, ионы имеют ненулевую скорость относительно покоящихся пылевых частиц. Пробная частица, помещенная в такую плазму, оставляет за собой возмущенную область – кильватерный след [12]. Показано, что в таком случае электростатический потенциал, создаваемый покоящимся точечным зарядом, не может определяться по аналогии с п.1.6. Рассматривается плазма, с заданной функцией диэлектрической проницаемости. Приведено выражение для распределения потенциала в окрестности пылевой частицы в условиях анизотропности

плазмы. Можно увидеть, что природа потенциала зависит от ограничений на волновое число, а также от числа Маха [12].

В п.1.8 производится расчет параметров макрочастиц, применимых для зарядки в условиях приближения ограниченного орбитального движения в изотропной пылевой плазме. В рамках данной работы был рассмотрен процесс зарядки небольших кластеров Ag. Заданы начальные параметры такие как масса кластеров, начальная концентрация электронов, а также соотношения концентраций ионов и макрочастиц по отношению к электронам. Соотношения были выбраны с учетом характерных для экспериментов, рассмотренных в предыдущих разделах главы. Полученные параметры, такие как размер макрочастицы, дебаевская длина и время зарядки удовлетворяют случаю зарядки макрочастицы в условиях приближения ООД. На основе анализа этой информации далее задаются параметры комплексной плазмы, используемой в модели коллективного ускорения в предположении, что на выходе из плазменного источника формируется плазменный сгусток, который далее подлежит ускорению.

Во второй главе на основе предложенной в работах [7,8] идеи коллективного ускорения двухкомпонентной плазмы в скрещенных электрических и магнитных полях исследуется ускорение комплексной плазмы, состоящей из электронов, однозарядных ионов и макроскопических кластеров.

В п.2.1 описываются физические аспекты ускорения потока комплексной плазмы, состоящей из электронов, ионов и макрочастиц в скрещенных электрических и магнитных полях, которые порождаются магнитными полями, чья конфигурация изображена на рис. 1. В данном случае соленоид будет генерировать переменное аксиальное магнитное поле $\mathbf{B}_{z_0}(t)$, а система на основе постоянного магнита обеспечивает постоянное радиальное магнитное поле \mathbf{B}_{r_0} (технические подробности о данной системе представлены в п.2.4).

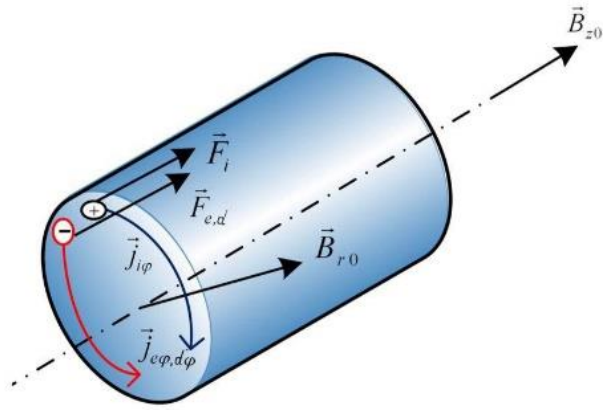


Рисунок 1 – Схема участка ускорения пылевой плазмы [7].

Полученная в источнике плазма поступает в участок ускорения, где действуют описанные скрещенные магнитные поля. Переменное аксиальное магнитное поле порождает азимутальное электрическое поле, которое закручивает потоки электронов $J_{e\varphi}$, ионов $J_{i\varphi}$ и отрицательно заряженных макрочастиц $J_{d-\varphi}$ в разные стороны, как это показано на рис. 1. За счет постоянного радиального магнитного поля происходит переброс момента в аксиальное направление, и таким образом, плазма начинает ускоряться. По физической сути предлагаемый метод ускорения следует отнести к классу индукционных ускорителей, где происходит межмодовый обмен энергией/импульсом между макроскопическими степенями свободы ускоряемого плазменного потока [13-15].

В п.2.2 описана нелинейная модель на основе уравнений холодной гидродинамики, описывающая динамику пылевой плазмы в ускорительной схеме, представленной на рис. 1. В рамках этой модели считается, что ток смещения компенсируется током проводимости. Такая ситуация может реализоваться, когда можно пренебречь пространственной зависимостью магнитного поля [13-15]. В этом случае пространственный масштаб ускоряющей зоны должен быть достаточно велик, чтобы минимизировать или вовсе исключить влияние краевых эффектов. азимутальной компонентой собственного электрического поля.

В принятых предположениях динамика плазменного сгустка происходит во внешних и собственных полях, порожденных самим плазменным сгустком. Полное электрическое и магнитное поле рассматриваемой системы есть суперпозиция внешних магнитного \mathbf{B}^0 и электрического \mathbf{E}^0 полей с собственными магнитным \mathbf{B}^* и электрическим \mathbf{E}^* полями:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^0 + \mathbf{E}^*,$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}^0 + \mathbf{B}^*.$$

При этом внешнее магнитное поле

$$\mathbf{B}^0 = B_{r0}\mathbf{e}_r + B_{z0}\mathbf{e}_z,$$

где $B_{r0} = const.$, а $B_{z0} = B_{z0}(t)$ – известная функция времени, согласно закону Фарадея порождает электрическое поле $\mathbf{E}^0 = E_{\varphi 0}\mathbf{e}_\varphi$, имеющее только азимутальную составляющую

$$E_{\varphi 0} = -\frac{r}{2}\partial_t B_{z0}. \quad (1)$$

Динамика плазменного сгустка совместно с генерацией собственных электрического и магнитного полей описываются уравнениями холодной гидродинамики и Максвелла, записанными в безразмерной форме

$$\partial_t n_s + \nabla(n_s \mathbf{v}_s) = 0, \quad (2)$$

$$\partial_t \mathbf{v}_s + \mathbf{v}_s \nabla \mathbf{v}_s = \mu_s (\mathbf{E} + [\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}]), \quad (3)$$

$$\partial_t \mathbf{E}^* = n_e \mathbf{v}_e + Z_d n_d \mathbf{v}_d - n_i \mathbf{v}_i, \quad (4)$$

$$\nabla \mathbf{E}^* = n_i - n_e - Z_d n_d, \quad (5)$$

$$\nabla \mathbf{B}^* \equiv 0, \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}^* = -\frac{\partial \mathbf{B}^*}{\partial t}, \quad (7)$$

где время и координаты обезразмерены на обратную плазменную частоту $\omega_{pe} = (4\pi n_0 e^2 / m_e)^{1/2}$ и начальный радиус плазменного потока R_0 , здесь e и m_e – заряд и масса электрона соответственно, а n_0 – начальная плотность электронов; скорости \mathbf{v}_s и плотности n_s -компоненты плазмы обезразмерены

на $R_0\omega_{pe}$ и n_0 (индекс $s = e, i, d$ относится к электронам, однозарядным легким ионам и массивным многозарядным макроскопическим частицам); при этом $\mu_e = -1$, $\mu_i = m_e/m_i$ и $\mu_d = -Z_d m_e/m_d$, здесь m_i – масса легких ионов, m_d – масса пылевых частиц. Электрические \mathbf{E} и магнитные поля \mathbf{B} обезразмерены $4\pi en_0 R_0$ и $4\pi en_0 R_0 c/(R_0\omega_{pe})$ соответственно, c – скорость света.

Согласно [7,13-15] пренебрегая пространственной зависимостью концентраций n_s , решение системы уравнений (1)-(6) с соответствующими начальными данными можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} n_s &= n_s(t); \quad \mathbf{v}_s = rA_s(t)\mathbf{e}_r + rC_s(t)\mathbf{e}_\varphi + rD_s(t)\mathbf{e}_z, \\ \mathbf{E}^* &= r\varepsilon_r(t)\mathbf{e}_r + r\varepsilon_\varphi(t)\mathbf{e}_\varphi + r\varepsilon_z(t)\mathbf{e}_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Подстановка (8) в (1)-(6) с использованием зависимости (1) позволяет перейти от системы уравнений в частных производных к системе нелинейных дифференциальных уравнений, которая будет описывать динамику ускорения потока трехкомпонентной пылевой плазмы в предложенной конфигурации скрещенных магнитных полей.

Из (7) следует:

$$\partial_t B_r^* = \partial_t B_\varphi^* = 0, \quad \partial_t B_z^* = -2\varepsilon_\varphi, \quad (9)$$

т.е. при начальных условиях

$$B_r^*(t=0) = B_\varphi^*(t=0) = B_z^*(t=0) = 0$$

только аксиальная компонента магнитного поля в плазменном цилиндре будет в итоге отличная от нуля.

Отметим следующую существенную физическую особенность развиваемой модели. Подстановка выражений для скорости и электрического поля из (8) в (4) дает нам соотношение для электронной и ионной концентраций:

$$n_i = n_e + Z_d n_d - 2\varepsilon_r, \quad (10)$$

т.е. в данном случае нет локальной квазинейтральности при $\varepsilon_r \neq 0$. Тогда как, в большинстве работ ускорение плазмы рассматривают в условиях соблюдения квазинейтральности плазменного потока, когда $n_i = n_e = n_0$. Отказ от условия локальной квазинейтральности может оказать существенное влияние на динамику захвата и ускорения пылевых частиц. При этом интегрально условие квазинейтральности в системе будет выполняться.

В п.2.3 проводится численное моделирование полученной в п.2.2 системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Установлено, что при определенных начальных параметрах макрочастицы пылевой плазмы испытывают не только захват основным потоком электронов и ионов в азимутальном направлении, но также и ускоряются в аксиальном направлении. При этом получены следующие результаты: найдены условия, при которых поток пылевой плазмы ускоряется в одном направлении совместно, т.е. ускорение испытывают все три типа частиц – электроны, ионы и пылевые частицы. В качестве иллюстрации на рис. 2. представлена зависимость полного аксиального импульса для электронной, ионной и пылевой компоненты плазмы

$$P_{zS} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_s} n_s v_{zS} r dr,$$

где $R_s = 1/\sqrt{n_s}$ – радиус границы сгустка для соответствующей компоненты плазмы. Данная ситуация наблюдается, когда начальные компоненты радиальной скорости направлены внутрь плазменного цилиндра. В остальных случаях можно получить ситуацию, когда либо одна из компонент, либо одновременно и электроны, и ионы будут тормозиться, при этом поток макрочастиц приобретает дополнительный импульс. С другой стороны, можно заметить, что именно направление и величина радиальной скорости оказывает наиболее сильное влияние на динамику ускорения плазменного кольца в предлагаемой ускоряющей структуре.

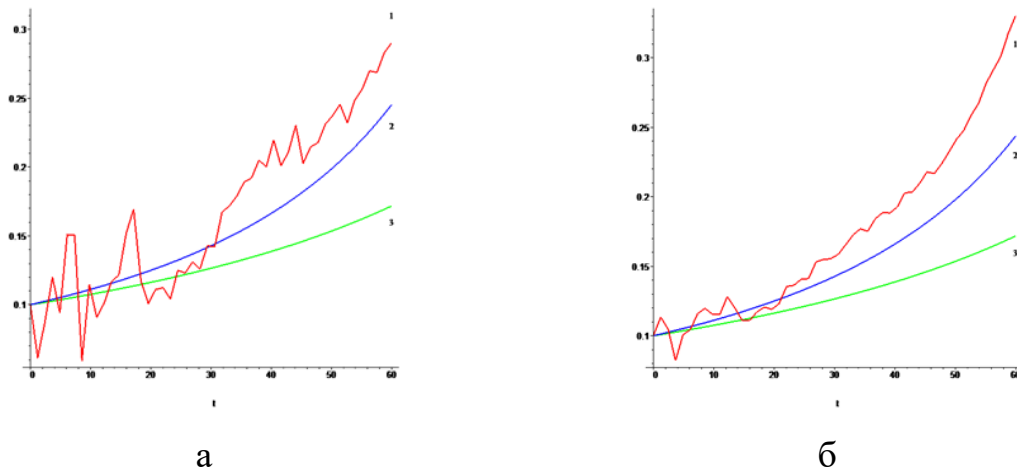


Рисунок 2 – Временные зависимости P_{z_e} (кривая 1), P_{z_i} (кривая 2) и P_{z_d} (кривая 3) для $A_e(0) = A_i(0) = -10^{-2}$, $A_d(0) = -7 \times 10^{-3}$, $-C_e(0) = -C_d(0) = C_i(0) = 10^{-3}$, $D_e(0) = D_i(0) = D_d(0) = 10^{-1}$ в случае $B_{r0} = -1$ и $B_{z0} = 1$ (а) и в случае $B_{r0} = -1$ и $B_{z0} = -0.25t$ (б).

В п.2.4 предварительно оценивается возможность технической реализации предлагаемого метода ускорения комплексной плазмы. В качестве возможной схемы реализации предлагается система, состоящая из постоянного магнита и катушки, которая генерирует переменное аксиальное магнитное поле (рис. 3) [16]. Даны основные выражения, определяющие вид магнитного поля, создаваемого в такой электродинамической системе. Для упрощения анализа ускорения потока в такой системе принято решение ограничиться азимутально-симметричной геометрией, предполагая, в начальный момент времени тем или иным образом в системе образуется плазменное кольцо. Например, это может быть плазменный сгусток, полученный в результате работы источника пылевой плазмы, рассмотренный в первой главе, или это может быть плазменное кольцо, которое формируется в результате разряда по поверхности диэлектрика за пренебрежимо малое время [16,17]. В настоящей работе вопрос о формировании плазменного сгустка не рассматривался.

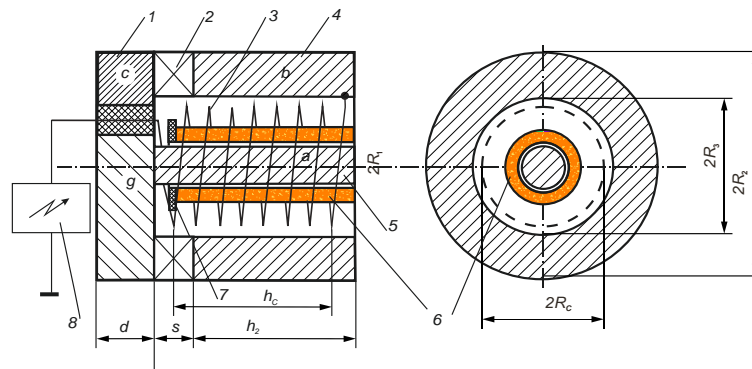


Рисунок 3 – Разрез ускорителя: 1 – дискообразный магнитопровод, 2 – постоянный магнит, 3 – спиральный электрод, 4 – трубчатый магнитопровод, 5 – цилиндрический магнитопровод, 6 – ускоряемая плазма, 7 – диэлектрическая шайба, 8 – генератор импульса тока [16].

Пренебрегая тепловыми эффектами для электронной и ионной компонент, а также полагая их концентрации постоянными, получено соотношение для скорости потока, которое показывает, что динамика ускорения в основном определяется величиной параметра Холла и изменением по времени магнитного поля в соленоиде. Полученные в итоге зависимости для аксиальной скорости ионов в случае двухкомпонентной электрон-ионной плазмы показывают ее рост в 60–80 раз (п.п.2.4.1), а в случае плазмы, состоящей из массивных многозарядных отрицательных макрочастиц и легких положительных ионов, в 12-16 раз (п.п.2.4.2), что показывает перспективность обсуждаемой схемы, однако полученные результаты носят предварительный характер и подлежат более детальному анализу.

В третьей главе в качестве одного из возможных приложений предлагаемого метода ускорения комплексной плазмы развита концепция электродинамической системы утилизации космического мусора с околоземных орбит, использующей верхние слои ионосферы и солнечное излучение в качестве возможных источников материи и энергии соответственно.

В п.3.1 обсуждаются физико-технические особенности создания предлагаемого устройства, чья схема представлена на рис. 4. Рассматривается случай удаления мелких объектов космического мусора (с

характерными массами объектов $m_{db} \leq 10$ кг) в атмосфере, а если точнее – торможение объектов с помощью плазменного потока, с переводом на более низкие орбиты, где будет происходить сгорание объектов космического мусора. При этом в качестве отметки более плотного слоя атмосферы принимается значение 100 км над уровнем моря (в аэрокосмической и авиационной отрасли соответствует линии Кармана). Также предполагается, что движение утилизатора будет происходить по орбитам Кеплера. Даются основные уравнения движения, соответствующие финитному движению на данных орбитах.

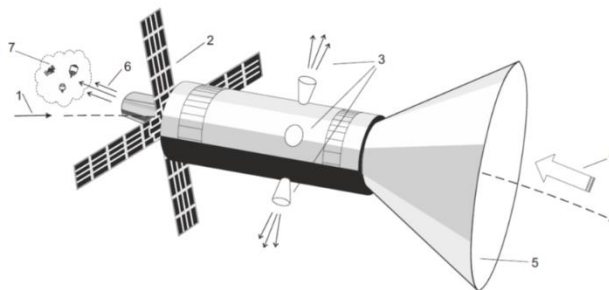


Рисунок 4 – Схема предлагаемого устройства: 1 – орбита устройства, 2 – солнечная батарея, 3 – система коррекции и стабилизации орбиты, 4 – поток набегающего газа, 5 – газодинамическая ловушка, 6 – поток плазмы, 7 – космический мусор.

В п.3.2 приведен анализ основных физико-химических характеристик верхних слоев атмосферы Земли, где предполагается размещение устройства, и оценка параметров газодинамической ловушки (см. рис. 4), которая позволяет захватывать необходимое количество материи для создания плазменных потоков с требуемыми характеристиками. Дается оценка времени накопления частиц в разрядной камере с учетом размеров камеры, концентрации частиц набегающего потока, геометрических параметров газодинамической ловушки, а также высоты, на которой находится устройство.

В п. 3.3 производится оценка основных энергетических характеристик предлагаемого устройства. Из условия, какая требуется энергия для того, чтобы объект перешел с заданной орбиты на линию Кармана, оценивается

характерное время воздействия потока плазмы с заданными параметрами. Величина этого времени зависит от расстояния до удаляемого объекта, энергии и плотности ускоренного пучка, а также его состава, что характеризуется массой частиц, входящих в него. Показано, что представленные в работе графики соответствуют случаю траекторий Гомана, где изменение траектории достигается путем изменения тангенциальной скорости космического аппарата.

Далее исследуется зависимость времени утилизации от доли плазменного потока α , воздействующей на удаляемый объект космического мусора. Показано, что реальный диапазон значений полученных результатов может претерпеть значительные изменения, так как доля плазменного потока, воздействующего на удаляемый объект, может находиться в диапазоне значений $\alpha = 0.3 \div 0.5$. Тем не менее, представленные зависимости показывают, что подобный метод удаления объектов космического мусора приемлем при текущем уровне развития плазменных ускорителей в достаточно широком диапазоне геофизических параметров окружающей среды.

Далее рассматривается процесс ионизации в предлагаемом устройстве: исследуется возможность использования солнечного излучения в качестве источника энергии и проводится оценка времени накопления энергии, необходимой для ионизации и последующего ускорения частиц в предлагаемом устройстве.

В п.3.4 проводится оценка энергетических потерь пучка, а также длины свободного пробега в зависимости от высоты орбиты, на которой находится утилизатор. Показано, что в зависимости от высоты длина свободного пробега частиц плазменного пучка меняется: от 600 м на высоте от 100 до 300 км над уровнем моря до практически бесстолкновительного пролета пучка на высотах свыше 500 км над уровнем моря. Связано это в первую очередь с тем, что на высотах более 500 км над уровнем моря плотность

частиц окружающей среды мала по сравнению с плотностью пучка плазмы на выходе из плазменного ускорителя. А если учитывать, что время утилизации имеет прямо пропорциональную зависимость от массы удаляемого объекта и расстояния до него, можно сделать вывод, что даже при увеличении данных параметров на порядок время утилизации будет лежать в приемлемом диапазоне, соизмеримым с другими методами очистки околоземного пространства от космического мусора.

В **п.3.5** рассматривается влияние распределения частиц среды на эффективность предлагаемой электродинамической системы утилизации объектов космического мусора. Полученные ранее параметры были определены для низких высот (порядок высот 2-3 линии Кармана над уровнем моря). Сделано это было, чтобы показать принципиальную возможность применимости данного способа утилизации объектов космического мусора. В связи с тем, что объекты космического мусора на высотах до 400 км могут самостоятельно упасть на земную поверхность, приводится такой параметр, как нормировочная функция, позволяющая делать быстрый пересчет необходимых параметров, полученных на более низких высотах, для конкретной высоты над уровнем моря. Также обосновывается, что стрельба по отдельным мишеням не имеет практической значимости ввиду высокой относительной скорости пролетающих космических объектов. Поэтому имеет смысл в дальнейшем рассматривать стрельбу не по отдельным объектам, а по некоторым площадям, где мусорные объекты могут располагаться.

В **четвертой главе** на основе результатов **третьей главы** рассматривается возможность создания плазменного двигателя буссардовского типа.

В **п.4.1** используя астрономические данные по распределению межпланетного вещества и интенсивности солнечной радиации, проводятся оценки энергетических и материальных характеристик межпланетной среды, пригодных для использования в предлагаемом плазменном двигателе.

В п.4.2 рассматривается ускорение космического аппарата за счет захваченного вещества, которое ионизируется и ускоряется до релятивистских энергий. Динамика космического аппарата (КА) в этом случае описывается уравнением Мещерского, содержащим как нерелятивистский член, описывающий захват вещества, так и релятивистский член, описывающий уход ускоренного плазменного потока, который создает ракетную тягу. Получены соотношения для скорости космического аппарата, а также времени ускорения, необходимого КА для набора максимальной скорости. Показано, что требуемое время ускорения напрямую зависит от величины ловушки, способа ускорения плазмы, ее компонентов и плотности ускоряемого потока, т.е. зависит от характеристик межпланетной среды и способов ускорения частиц.

П.4.3 посвящен развитию концепции двигателя Буссарда, использующего межпланетную среду в качестве топлива, на схему плазменного двигателя (см. рис. 5).

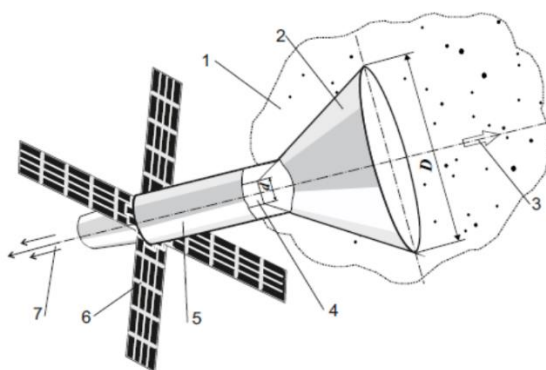


Рисунок 5 – Схема КА: 1 – межпланетная пыль, 2 – ловушка, 3 – направление движения КА, 4 – разрядная камера, 5 – корабль, 6 – солнечная панель, 7 – плазменный поток, создающий тягу корабля.

В двигателе Буссарда захваченное вещество предполагалось использовать в термоядерном реакторе. В этом случае, как и в варианте обычного химического двигателя, скорость отбрасываемого потока имеет верхний предел, обусловленный самим процессом реакции в реакторе. В плазменном двигателе верхний предел скорости отбрасываемого вещества совпадает со

скоростью света. Более того, при достижении ультрарелятивистских скоростей начинает проявляться эффект увеличения массы отбрасываемых частиц, что приводит к увеличению удельного импульса ракеты. По сути, в развиваемой концепции происходит обмен энергии на импульс.

Приводится оценка времени накопления частиц из межпланетной среды, и способы его оптимизации за счет изменения параметров геометрической ловушки (2 на рис. 5). Также приведена оценка времени накопления солнечной энергии, используемой в дальнейшем для ионизации и ускорения захваченного потока частиц межпланетной среды. Показано, что для самого простого случая, когда площадь солнечных батарей совпадает с размером геометрической ловушки и влияние паразитных эффектов велико, время набора энергии солнечного излучения составляет 300 мкс. Данные оценки свидетельствуют о практической реализуемости развиваемой концепции.

В п.4.4 проводится оценки тяги, создаваемой КА. Показано, что время разгона КА с массой порядка 1 т до величины скорости, соответствующей второй космической скорости, составляет порядка 1 часа. Также обсуждается вариант применимости подобного подхода при использовании плазменного двигателя предложенной конструкции при межпланетных перелетах. Показано, что величина импульса КА напрямую зависит от количества захваченной межпланетной среды. В таких условиях непрерывная работа плазменного двигателя невозможна, поэтому хорошей альтернативой может быть импульсный режим работы. Так как оценки были основаны на данных, полученных в пределах $r \sim 1$ а.е. от Солнца, предлагаемый подход может быть реализован в условиях перелетов Земля-Луна.

Основные результаты и выводы работы

В работе проведено исследование одного из возможных методов коллективного ускорения плазмы, основанного на передаче импульса от переменного электрического азимутального поля к закрученному плазменному потоку посредством постоянного радиального магнитного поля.

Показано, что подобный метод коллективного ускорения применим как для двухкомпонентной, так и для многокомпонентной плазмы, что представляет интерес для ряда приложений, рассмотренных в работе.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Развита метод коллективного ускорения плазмы в скрещенных магнитных полях для ускорения комплексной плазмы, состоящей из электронов, однозарядных ионов и массивных многозарядных макроскопических частиц. Установлены необходимые физические и технические условия для ускорения комплексных плазменных потоков.
2. В рамках модели холодной гидродинамики установлен механизм нелинейного захвата и ускорения многозарядных тяжелых кластеров в скрещенных магнитных полях. Определены необходимые условия для реализации данного механизма.
3. Предложена и обоснована концепция электродинамической системы утилизации космического мусора с околоземных орбит на основе захвата материи из верхних слоев атмосферы.
4. Предложена и обоснована схема плазменного двигателя, используемого в околоземном пространстве в пределах от Земли до Луны, использующего межпланетную среду и солнечное излучение в качестве источника материи и энергии соответственно.

Список цитируемых источников

1. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д., Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // УФН. 2002. Т. 172. С. 1225.
2. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А., Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов (Москва, Машиностроение, 2008).
3. Морозов А.И., Введение в плазмодинамику (Москва, Физматлит, 2006).
4. Месяц Г.А., Эктоны (Екатеринбург, Наука, 1993).

5. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов (Москва, Круглый год, 2001).
6. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А., Электрогидродинамический поток для активного управления течениями газов // УФН. 2017. Т. 187. С. 653.
7. Karimov A.R., Murad P.A., Acceleration of Rotating Plasma Flows in Crossed Magnetic Fields // IEEE TPS. 2017. V. 45(7). P. 1710.
8. Karimov A.R., Murad P.A., Plasma Thruster Using Momentum Exchange in Crossed Magnetic Fields // IEEE TPS. 2018. V. 46(4). P. 882.
9. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., и др., Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. С. 495.
10. Цытович В.Н., Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. С. 57.
11. Shukla P.K., Mamun A.A., Introduction to dusty plasma physics (London, IOP Publishing Ltd, 2002).
12. Ishihara O., Vladimirov S.V., Wake potential of a dust grain in a plasma with ion flow // Physics of Plasma. 1997. V. 4. P. 69.
13. Karimov A.R., Nonlinear waves in twirling plasmas. // J. Plasma Physics. 2009. V. 75(6). P. 817.
14. Karimov A.R., Stenflo L., Yu M.Y., Coupled azimuthal and radial flows and oscillations in a rotating plasma // Physics of Plasmas. 2009. V. 16(6). P. 062313.
15. Karimov A.R., Stenflo L., Yu M.Y., Coupled flows and oscillations in asymmetric rotating plasmas // Physics of Plasmas. 2009. V. 16(10). P. 102303.
16. Патент № 2696975 РФ, МПК H05H 5/00. Плазменный ускоритель / Вовченко Е.Д., Каримов А.Р., Козловский К.И. и др. (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – заявлено 2018143486, 07.12.2018; Оpubл. 08.08.2019, Бюл. № 22.

17. Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Schikanov A.E., et al. Compact induction accelerator of laser plasma for ion energies up to 1 MeV // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2020. V. 17(4). P. 497.

Статьи по теме диссертации

1. Karimov A.R., **Terekhov S.A.**, Shikanov A.E., Murad P.A., Acceleration of macroscopic clusters in crossed magnetic fields // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. V. 47. No 3. P. 1520. [WoS Q2]
2. Каримов А.Р., **Терехов С.А.**, Шиканов А.Е., Ускорение потока пылевой плазмы в азимутальном электрическом и радиальном магнитном полях // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46. No 7. С. 24. [WoS Q3]
3. Каримов А.Р., **Терехов С.А.**, Шиканов А.Е., Ямщиков В.А., Использование плазменных потоков для очистки околоземного пространства // *Успехи прикладной физики*. 2021. Т. 9. No 1. С. 3. [BAK] Karimov A.R., **Terekhov S.A.**, Shikanov A.E., Yamschikov V.A., Use of plasma flows to clean the near-Earth space // *Plasma Physics Reports*. 2021. Vol. 47. No 10. P. 1065. [WoS Q3]
4. Karimov A.R., Murad P.A., **Terekhov S.A.**, Yamschikov V.A., Electrophysical means in space research and applications for the near-Earth space // *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2021. AIAA 2021-3253. [WoS TOP10]
5. Karimov A.R., **Terekhov S.A.**, Yamschikov V.A., Pulsed plasma accelerator // *Plasma (MDPI)*. 2023. V. 6. P. 36. [WoS]

Выступления на конференциях по теме диссертации

1. Каримов А.Р., Булыгин А.М, Шиканов А.Е., Козловский К.И., Дерябочкин О.В., **Терехов С.А.**, Магнитная система импульсного плазменного ускорителя // VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2020» 11 февраля – 14 февраля 2020 года Сборник научных трудов Часть 2. С. 288.

2. Каримов А.Р., Ильинский А.В., **Терехов С.А.**, Кузнецов А.Ю., Баев В.К., Козловский К.И., Шиканов А.Е., Шиканов Е.А., О возможности создания электродинамической системы сбора космического мусора // сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (23 – 26 сентября 2019 г.), с. 742.
3. Вовченко Е.Д., Каримов А.Р., Шиканов А.Е., Козловский К.И., Дерябочкин О.В., **Терехов С.А.**, Ускорение плазмы в постоянном поперечном и продольном переменном магнитных полях // XIII Международный научный семинар памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» 3-8 сентября 2019 г., Алушта, Крым.
4. Каримов А.Р., **Терехов С.А.**, Шиканов А.Е., Мурад П.А., Козловский К.И., Ускорение многокомпонентной плазмы // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» 12 февраля – 15 февраля 2019 года Сборник научных трудов Часть 2. С. 71.