

На правах рукописи



СТЁПИН ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД-ТЕЧЕНИЙ В
ПРОФИЛИРОВАННЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ
УСКОРИТЕЛЕЙ С ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук, профессор
Брушлинский Константин Владимирович*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Физического института имени
П.Н. Лебедева Российской академии наук
Подгорный Александр Игоревич*

*кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник Научно-исследовательского института
прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института
Дьяконов Григорий Александрович*

Ведущая организация: *Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана*

Защита состоится «6» октября 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.130.09 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте:
<http://ods.mephi.ru>

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор



Леонов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Разработка плазменных установок и исследование происходящих в них процессов представляют собой большой интерес благодаря широкому спектру их применений для решения актуальных и перспективных технологических задач.

Одним из важнейших направлений в этой области является создание и исследование плазменных ускорителей. Успешная разработка данных устройств была начата в 1950-е годы под началом Л.А. Арцимовича в созданном им Отделе плазменных исследований Института атомной энергии (ныне – НИЦ «Курчатовский институт»), а также в лаборатории Г.И. Будкера. Под руководством Л.А. Арцимовича была проведена I Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям в МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 году. В качестве первых открытых публикаций на тему плазменных ускорителей широко известны статьи [1] и [2]. Действующий ускоритель демонстрировался И.М. Подгорным на II Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в 1958 году. В течение последующих десятилетий разработка, исследование и создание нескольких разновидностей плазменных ускорителей велась в значительной мере по инициативе, под руководством и при участии А.И. Морозова. Благодаря высоким значениям скорости и энергии вытекающей из ускорителей плазмы, с точки зрения своего технологического применения данные устройства могут быть использованы для создания электрореактивных плазменных двигателей аппаратов для космических перелётов (см. [3]), имеющих ряд преимуществ по сравнению с жидкостными реактивными двигателями на химическом топливе. Первая установка на базе абляционного импульсного плазменного двигателя, получившая высокую оценку С.П. Королёва, была разработана и испытана при определяющем участии В.А. Храброва. Электрореактивные двигатели могут обладать высокими параметрами тяги, но для своей работы требуют наличия мощного и компактного источника электроэнергии. Рекордные значения скорости и энергии вытекающего плазменного потока были получены в двухступенчатом квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ), величина тяги в котором соизмерима с тягой ракетных двигателей (рис. 1).

Стационарные плазменные двигатели (СПД) (см. [4]) малой мощности (рис. 2), но с длительным ресурсом работы, впервые разработанные в СССР, применяются для корректировки орбит, манёвров и стабилизации космических аппаратов с 1971 года.

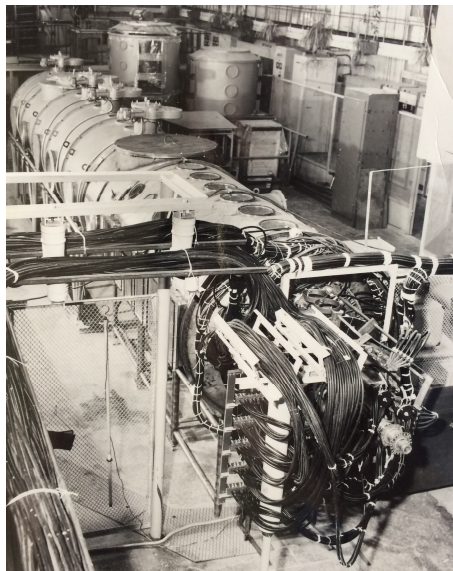


Рис. 1. Вакуумная камера КСПУ в ХФТИ.



Рис. 2. Стационарные плазменные двигатели.

Вообще говоря, спектр применения плазменных ускорителей достаточно широк. Они могут использоваться как магнитоплазменный компрессор (см. [5]), который служит для получения высокотемпературной плазмы, или для инъекции высокоэнергичных плазменных потоков в магнитные ловушки, создаваемые в связи с работой по программе управляемого термоядерного синтеза (см. [6]).

В успешных разработках нескольких поколений плазменных установок большую роль играет математическое моделирование происходящих в них процессов и численное решение соответствующих математических задач, что позволяет получить основные качественные закономерности и тенденции в характере и свойствах этих процессов и способствует их пониманию. Количественные результаты дают возможность снизить затраты на проведение дорогостоящих (а иногда и принципиально невозможных) экспериментов.

Темой диссертационной работы является математическое моделирование течений плотной плазмы в каналах плазменных ускорителей типа сопла, образованных двумя коаксиальными электродами. Течения плазменного потока в каналах данного типа при его взаимодействии с собственным поперечным

магнитным полем подробно исследованы теоретически (см. [7]) и реализованы экспериментально (см. [8, 9]) в упомянутом выше КСПУ. Существенную роль в этом сыграли численные исследования и расчёты, проведённые в основном в двумерных моделях, основанных на уравнениях магнитной газодинамики (МГД) (см., например, [10] с подробной библиографией).

Менее изучены течения в присутствии продольного (осевого) магнитного поля, которое в дополнение к основному (поперечному азимутальному) может быть создано, например, с помощью соленоида, окружающего установку.

Некоторые результаты, касающиеся стационарных течений в узких трубках, образованных близкими друг к другу траекториями, были получены в квазиодномерном (гидравлическом) приближении (см. [10, 11]). В обзоре [7] обращено внимание на существенные различия между течениями со сверхальфвеновскими и доальфвеновскими (по отношению к альфвеновской скорости, соответствующей продольному магнитному полю) скоростями и указаны особенности «пограничного» между ними течения с альфвеновской скоростью и постоянной («критической») плотностью. В [10, 11] приведены классификация всех возможных стационарных течений и результаты численных исследований основных свойств течений каждого типа. Тем не менее существование альфвеновских и близких к ним типов течений в реальных процессах вызывало ряд вопросов. Более того, эти результаты ограничены простейшим случаем трубок с постоянным средним радиусом траекторий. Более полные и содержательные исследования в терминах квазиодномерных задач должны учитывать криволинейную геометрию трубок с произвольно зависящим от продольной координаты средним радиусом траекторий (см., например, [12]).

Расчёты двумерных МГД-течений с продольным полем для одного варианта простейшей геометрии канала типа сопла со слабо профилированным центральным электродом изложены в работах [13, 14]. Двумерным моделям течений с продольным полем, учитывающим эффект Холла и конечную проводимость плазмы, посвящены, например, работа [15] и цитируемые в ней статьи.

Таким образом, актуальность настоящей работы определена потребностью в развитии теории процессов в каналах плазменных ускорителей с ярко выраженной геометрией электродов в присутствии продольного магнитного поля.

Цель диссертационной работы

Математическое моделирование и численное исследование течений плотной плазмы в каналах плазменных ускорителей типа сопла, образованных заметно профилированными коаксиальными электродами, в присутствии продольного магнитного поля.

Задачи

- Исследование альфвеновских и близких к ним МГД-течений в каналах плазменных ускорителей в присутствии продольного магнитного поля;
- Исследование влияния геометрии электродов, образующих каналы плазменных ускорителей, на параметры течений;
- Исследование влияния продольного магнитного поля на параметры течений в каналах плазменных ускорителей различной геометрии.

Методы исследования

Исследование течений плазменного потока в каналах плазменных ускорителей в присутствии продольного магнитного поля строилось на основе математического моделирования и численного решения соответствующих математических задач. Математические модели основаны на уравнениях магнитной газодинамики (МГД). Численное решение нестационарных осесимметричных МГД-задач проведено разностным методом FCT с коррекцией потоков по Борису-Буку и его обобщением, основанном на «полностью многомерном» (не требующем расщепления по направлениям) разностном алгоритме Залесака. Стационарные решения задач получены методом установления во времени. Некоторые детали стационарных течений рассмотрены в квазиодномерном приближении с помощью первых интегралов. Программная реализация численных алгоритмов проводилась с помощью объектно-ориентированного языка программирования C++ в среде программирования Microsoft Visual Studio с подключением графической библиотеки OpenGL для визуализации процессов установления. Часть результатов расчётов была получена с помощью системы компьютерной математики Maple.

Научная новизна

Ускорение плазмы в собственном поперечном магнитном поле в коаксиальных каналах достаточно хорошо исследовано в более ранних работах, процитированных во **введении**, в связи с разработкой и созданием плазменных ускорителей. Роль продольного магнитного поля рассмотрена в небольшом числе недавних работ и охватывает каналы с постоянным средним радиусом.

Новизна представленных в диссертационной работе результатов относится к исследованиям роли криволинейной геометрии электродов и продольного магнитного поля. Сочетание этих двух направлений рассматривается впервые. Научный интерес также представляет альфвеновский режим течения плазмы в каналах и процесс его установления.

На защиту выносятся

1. **Математические модели** нестационарных и стационарных течений плазмы в каналах, образованных двумя коаксиальными электродами различной геометрии, в присутствии продольного магнитного поля. Постановка МГД-задач, выбор и реализация численных методов их решения, соответствующие программные комплексы. В расчётах реализованы следующие модели:

- а. Квазиодномерная модель установления стационарных альфвеновских и близких к ним МГД-течений в узком канале постоянного среднего радиуса;
- б. Квазиодномерные модели течений в узких каналах произвольной геометрии;
- в. Двумерные модели установления трансзвуковых течений с ускорением в каналах различной геометрии в присутствии продольного магнитного поля.

2. **Результаты** численных решений поставленных задач, полученные в процессе реализации перечисленных моделей:

- а. В процессе установления течений в узком канале получены альфвеновский режим течения плазмы с постоянной плотностью и близкие к нему доальфвеновские и сверхальфвеновские течения и определены условия их формирования. Альфвеновский режим характеризуется высокой чувствительностью к изменениям параметров задачи;

- б.** Исследованы все возможные типы течений (сверхзвуковые, дозвуковые, трансзвуковые с ускорением и трансзвуковые с замедлением) поперёк азимутального магнитного поля в узких каналах криволинейной конфигурации. По сравнению с каналами постоянного среднего радиуса в трансзвуковом ускорительном режиме течения могут возникать зоны сжатия и разрежения плазмы и связанные с ними области локального торможения и генерации электрического тока;
- в.** В двумерной МГД-модели исследовано установление стационарных трансзвуковых сверхальфвеновских течений с ускорением в присутствии продольного магнитного поля в каналах с профилированными отдельно центральным и внешним электродами. В обоих вариантах геометрии продольное магнитное поле отжимает плазму к внешнему электроду, отклоняет электрический ток в сторону входа в канал и вызывает вращение плазмы вокруг оси симметрии канала. Переход через скорость быстрого магнитного звука происходит в сечениях канала, смещённых относительно минимального. Ускорение плазмы более эффективно в каналах с выпуклым внутрь центральным электродом.

Теоретическая значимость

Результаты и выводы, полученные в диссертационной работе, вносят вклад в теорию МГД-течений в коаксиальных каналах плазменных ускорителей и их математических моделей.

Практическая значимость

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в разработке новых поколений плазменных ускорителей и в развитии их дальнейшей технологической модернизации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием математических моделей различной степени сложности и детализации и применением зарекомендовавших себя

методов численного решения. Проверка полученных результатов осуществлялась на основе сопоставления результатов расчётов, полученных с помощью разных математических моделей. Измельчение расчётной сетки в контрольных расчётах не оказывало существенного влияния на получаемые результаты, что говорит о внутренней сходимости численного метода. Некоторые полученные результаты совпадают с результатами предыдущих исследований других авторов.

Апробация

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва, 2015 год;
- V Международная конференция «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование», Москва, 2016 год;
- VI International Conference «The Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling», Moscow, 2017.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 8 материалов в период с 2014 по 2017 год. Из них 3 статьи (в том числе и 1 препринт) в журналах, включённых в перечень ВАК, 2 статьи в журналах, включённых в перечень ВАК и индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 3 публикации в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Личный вклад автора

Результаты и выводы, представленные для защиты, получены автором лично или с его определяющим участием.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертации 105 страниц, включая 43 рисунка. Список литературы содержит 88 наименований.

Краткое содержание работы

Во **введении** даётся обзор современного состояния разработки и применения плазменных установок, обсуждается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, приводится её общая характеристика.

В **первой главе** диссертационной работы приводится физическое описание исследуемого процесса течения плазмы в каналах плазменных ускорителей и производится постановка соответствующей задачи математического моделирования. Канал ускорителя в форме сопла образован двумя коаксиальными электродами, которые питаются от конденсаторных батарей (рис. 3а). Втекающая в канал плазма замыкает образованную электрическую цепь, и в ней возникает разрядный ток. Ускорение плазмы осуществляется за счёт взаимодействия возникающего тока с порождаемым им поперечным магнитным полем (рис. 3б). Продольное магнитное поле, индуцированное внешними по отношению к установке проводниками, вызывает вращение плазмы в поперечном направлении.

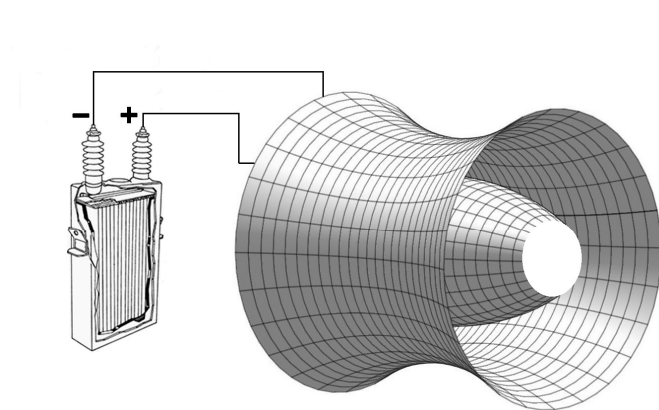


Рис. 3а. Схематический вид коаксиального плазменного ускорителя.

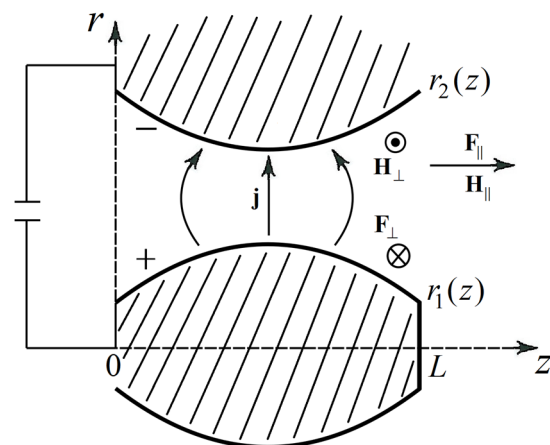


Рис. 3б. Схема коаксиального плазменного ускорителя. Сечение плоскостью $\varphi = \text{const}$.

Приводится система уравнений магнитной газодинамики в общем виде и в цилиндрических координатах в случае осевой симметрии. Формулируется информация о граничных и начальных условиях. С помощью заданных на входе в канал параметров потока формируются единицы измерения физических величин,

описывающих исследуемый процесс. Для упрощения дальнейших расчётов вводится криволинейная система координат, преобразующая расчётную область канала в квадрат.

Задачи решаются численно до установления стационарных режимов течения. В качестве численного метода решения нестационарных МГД-задач был выбран метод FCT с коррекцией потоков по Борису-Буку (см. [16]) и его обобщение, основанное на «полностью многомерном» (то есть не требующем расщепления по направлениям) разностном алгоритме Залесака (см. [17]).

Во **второй** главе диссертационной работы приводится одномерная математическая модель МГД-течений плазменного потока в каналах плазменных ускорителей в квазиодномерном (гидравлическом) приближении. Данный подход применяется в исследовании течений в узких трубках, в которых основной интерес представляет зависимость искомых величин от продольной пространственной координаты z и отсутствует зависимость от поперечной координаты r в результате их усреднения по сечению трубки (см. [10, 18]). В случае рассматриваемых в диссертационной работе ускорителей речь идёт о коаксиальных щелях кольцевого сечения, в которых расстояние между электродами $h(z)$ существенно меньше продольного размера и радиуса канала, или о трубках в области двумерного течения, образованных двумя близкими траекториями (рис. 4).

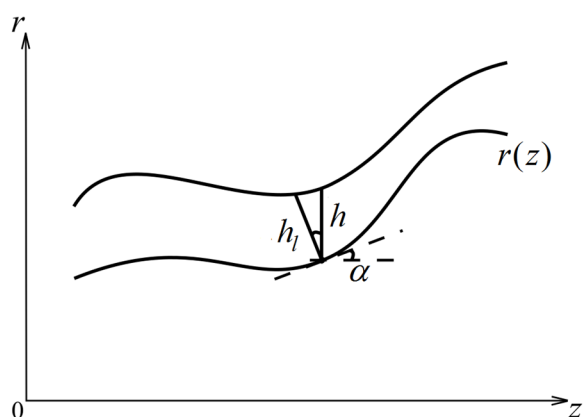


Рис. 4. Схема коаксиальной узкой трубки.

Приведена постановка задачи в этом приближении: соответствующим образом преобразованная система уравнений магнитной газодинамики, а также граничные и начальные условия. Формулируются основные закономерности в характере и свойствах стационарных течений, полученные из анализа квазиодномерной стационарной системы уравнений, разрешённой относительно производных, которая представлена в нескольких вариантах в зависимости от условий задачи. Приводятся следующие из неё первые интегралы, выражающие основные законы сохранения. Для расчёта стационарных течений в узких трубках даётся описание метода, который использует уравнение для плотности, следующее из первых интегралов.

В **третьей главе** диссертационной работы представлены результаты численного решения поставленных математических задач, соответствующих исследуемым процессам, и их анализ.

В **разделе 3.1** рассматриваются течения в узком коаксиальном канале типа сопла постоянного среднего радиуса в присутствии продольного магнитного поля. Основное внимание раздела уделено исследованиям процессов установления альфвеновского и близких к нему типов течения – трансзвукового с ускорением и дозвукового сверхальфвеновских и сверхзвуковой доальфвеновского. Исследования заключаются в решении соответствующих нестационарных квазиодномерных МГД-задач с учётом заданных граничных и начальных условий до установления стационарных режимов течения. Результаты расчётов сопоставляются с выводами, полученными во **второй главе** из анализа стационарной системы уравнений в квазиодномерном приближении.

Дозвуковой сверхальфвеновский, сверхзвуковой доальфвеновский и альфвеновский режимы течения получены методом установления с граничным условием на продольную скорость плазмы на выходе из канала. Они крайне чувствительны к выбору величины скорости вытекания, лежащей в очень узком диапазоне допустимых значений, при которых эти режимы могут быть ещё получены.

Отмечено, что в начале процесса установления дозвуковой сверхальфвеновский режим стремится своим поведением к ускорительному трансзвуковому сверхальфвеновскому (рис. 5), то есть граничное условие на скорость вытекания плазмы воспринимается моделью постепенно. Те же рассуждения касаются и процессов установления сверхзвукового доальфвеновского и альфвеновского режимов течения.

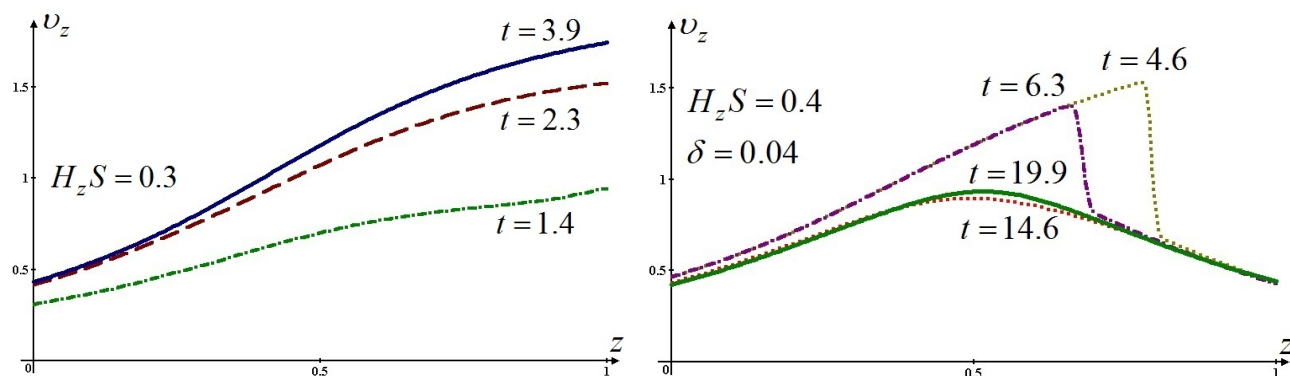


Рис. 5. Процессы установлений трансзвукового с ускорением (слева) и дозвукового (справа) сверхальфвеновских режимов течения.

Приводятся распределения основных параметров плазменного потока в установившихся режимах течения при различных значениях величины продольного магнитного поля. В альфвеновском и близких к нему неускорительных типах течения свойства и характеристики втекающей и вытекающей из канала плазмы идентичны. Главной особенностью альфвеновского течения является то, что продольная скорость плазмы совпадает с альфвеновской на всей длине канала, а плотность плазменного потока, и следовательно, его температура и давление постоянны и равны заданным на входной границе установки значениям.

Продольное магнитное поле снижает ускорительные характеристики канала в трансзвуковом режиме течения и вызывает вращение плазмы во всех рассматриваемых типах течения.

Установлено, что все рассмотренные в разделе типы течений могут быть получены, когда величина продольного магнитного потока не превышает некоторого критического значения.

В разделе 3.2 рассматриваются течения плазменного потока в узком коаксиальном канале типа сопла криволинейной формы при его взаимодействии с собственным поперечным магнитным полем. Основное внимание раздела уделено стационарным типам течений: дозвуковым (по отношению к единственной в этом случае скорости быстрого магнитного звука), трансзвуковым с ускорением, трансзвуковым с замедлением и сверхзвуковым. Исследования заключаются в решении соответствующих стационарных квазиодномерных МГД-задач с учётом заданных граничных условий с помощью уравнения для плотности, следующего из первых интегралов, а именно, основаны на анализе поведения функции $\Phi(\rho, z, C_1)$ при изменении параметра $C_1 = v_{z0}$ — скорости втекания плазменного потока в канал (рис. 6). Линия, образованная пересечением поверхности $\Phi = \Phi(\rho, z)$ и плоскости $\Phi = 0$ при заданном значении v_{z0} , представляет собой искомое распределение плотности плазмы $\rho(z)$ вдоль оси канала, а остальные параметры легко выражаются через неё с помощью приведённых во второй главе первых интегралов.

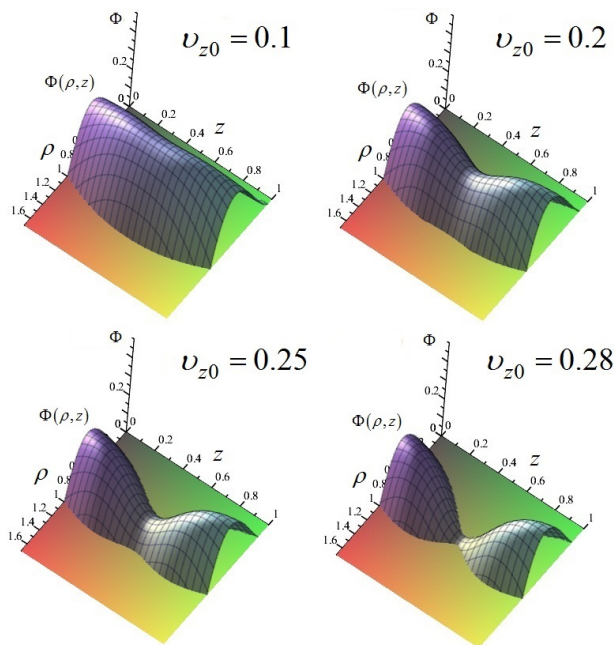


Рис. 6. Функция $\Phi(\rho, z)$ в дозвуковом типе течения при изменении скорости втекания v_{z0} .

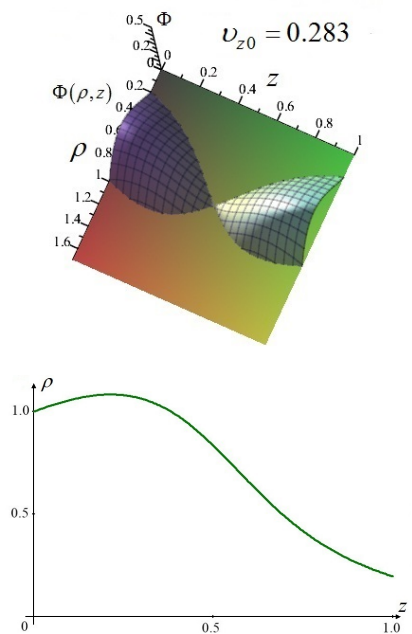


Рис. 7. Функция $\Phi(\rho, z)$ (сверху) и плотность плазмы (снизу) в трансзвуковом типе течения с ускорением.

Трансзвуковому течению соответствует такое значение C_1 , при котором совпадают экстремумы функции Φ по переменным ρ и z . Это связано с тем, что непрерывный переход искомого решения $\rho(z, C_1)$ на соответствующую ускорению (или замедлению – в зависимости от вида исследуемого трансзвукового течения) ветвь кривой $\Phi(\rho, z) = 0$ происходит в особой точке типа седла (рис. 7).

Установлено, что, в сравнении с каналом-соплом с постоянным средним радиусом, криволинейная конфигурация вносит существенный вклад в характер распределений основных параметров плазменного потока, а именно, в дозвуковых и трансзвуковых течениях плотность плазменного потока может иметь дополнительные экстремумы.

При достаточно больших значениях скорости втекания скорость плазмы вдоль канала криволинейной конфигурации практически не меняется по всей его длине, а все другие параметры стремятся к постоянным распределениям.

В разделах 3.3, 3.4 рассматриваются трансзвуковые ускорительные течения в коаксиальных каналах плазменных ускорителей типа сопла в двух вариантах конфигурации электродов – с профилированными отдельно центральным и внешним.

Основное внимание раздела 3.3 уделено отдельно влиянию криволинейной геометрии электродов на характер и свойства ускорительных течений, поэтому продольное магнитное поле здесь отсутствует. Свойства и параметры течений плазмы определяются в узких трубках, на которые разбивается область канала, при этом границы трубок соответствуют координатным линиям канала (рис. 8 и 9).

Исследования заключаются, как и в разделе 3.2, в решении соответствующих стационарных квазиодномерных МГД-задач с учётом заданных граничных условий с помощью уравнения для плотности, следующего из первых интегралов.

Увеличение по модулю параметра a – кривизны нижней границы трубок – соответствует «перемещению» узкой трубки, в которой в данный момент исследуется течение плазмы, от одного электрода к другому.

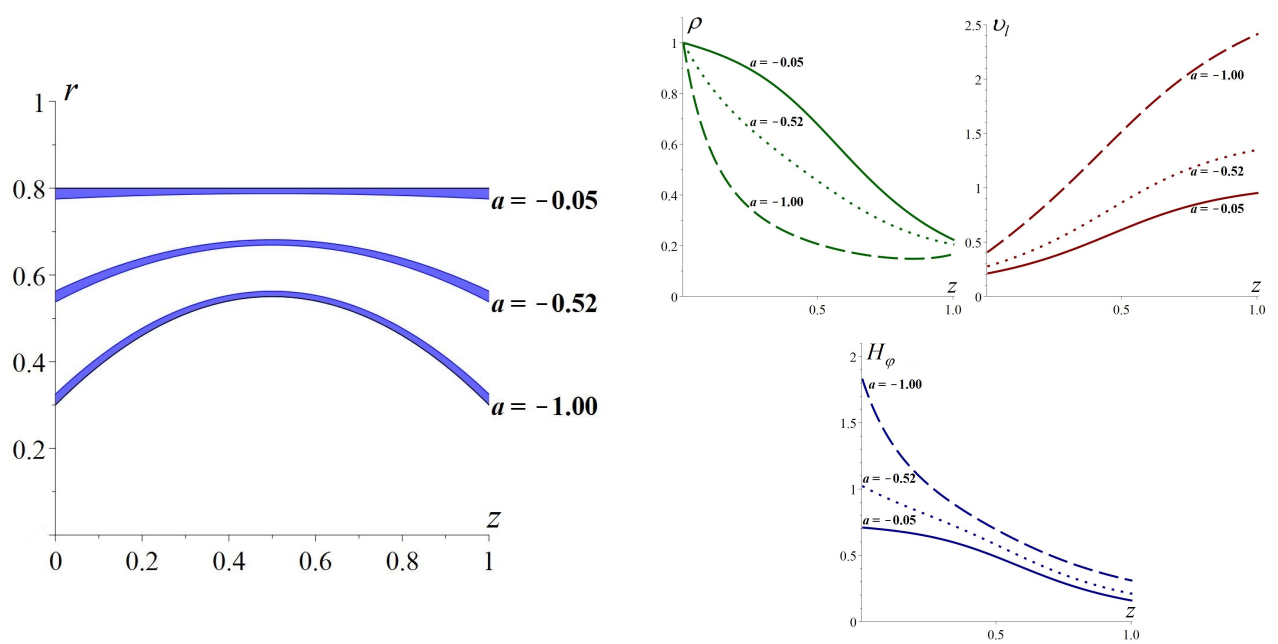


Рис. 8. Разбиение канала с профилированным центральным электродом на узкие трубки (слева) и распределения в них основных параметров плазмы (справа).

Падение плотности плазмы (а значит, расход тепловой энергии) и расход электромагнитной энергии у центрального электрода более интенсивны по сравнению с областью внешнего прямого электрода (рис. 8). Рассмотренные закономерности положительным образом сказываются на ускорительных характеристиках канала: в области центрального электрода плазма ускоряется заметно интенсивнее, нежели чем в области внешнего электрода.

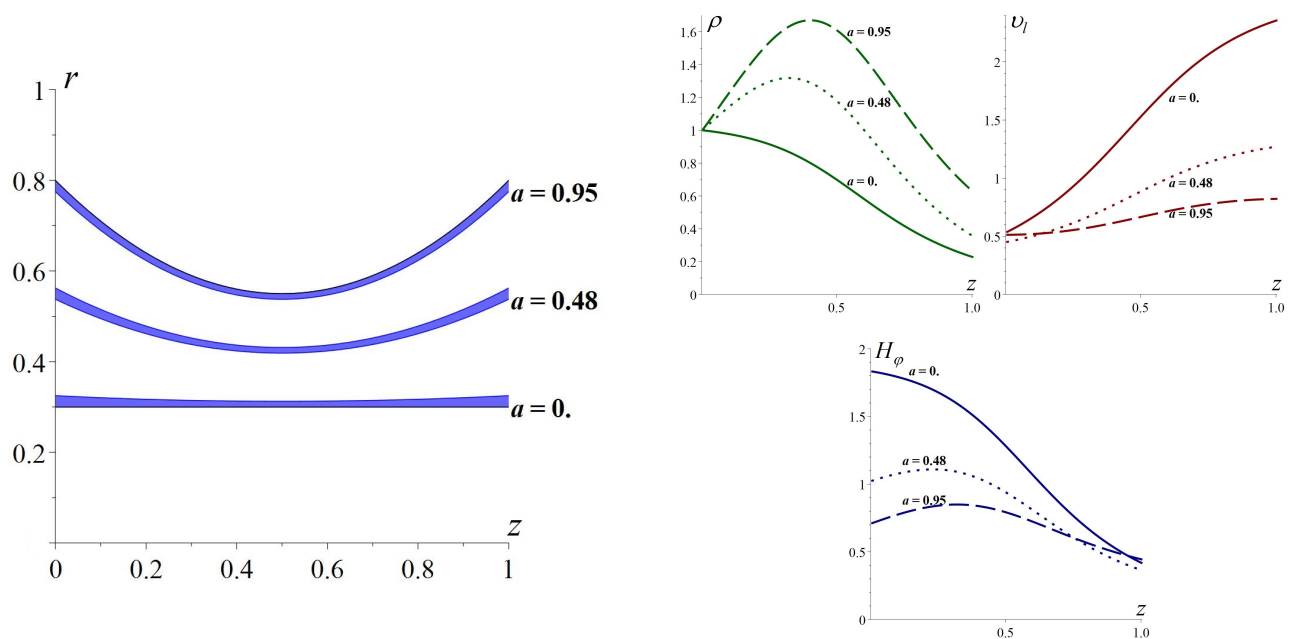


Рис. 9. Разбиение канала с профилированным внешним электродом на узкие трубки (слева) и распределения в них основных параметров плазмы (справа).

В областях, близких к профилированному внешнему электроду (рис. 9), появляется, а затем усиливается при возрастании кривизны зона компрессии потока: в распределении плотности плазмы возникает уплотнение, максимум которого смещается к центру канала. Следовательно, и возрастает температура потока. Ускорительные характеристики канала падают, что выражается в уменьшении скорости вытекания плазмы. В области внешнего электрода возникают обратные токи, при этом величина расходуемого в системе тока уменьшается. Таким образом, с точки зрения эффективности ускорения плазменные ускорители с профилированным внешним электродом, по-видимому, менее предпочтительны по сравнению с ускорителями с профилированным центральным электродом ввиду возникновения рассмотренных выше эффектов.

В разделе 3.4 представлены результаты исследования ускорения плазмы в наиболее полной из рассмотренных моделей: расчёты двумерных течений в присутствии продольного магнитного поля. Основное внимание раздела уделено совокупному влиянию криволинейной геометрии электродов и продольного магнитного поля на свойства ускорительных течений. Исследования заключаются в решении соответствующих нестационарных двумерных МГД-задач с учётом заданных граничных и начальных условий до установления стационарного режима течения.

В расчётах получены распределения основных параметров плазменного потока, которые обеспечивают режим ускорения. Дополнительно исследована зависимость свойств и параметров течения от продольного магнитного поля, созданного в канале внешними проводниками с током (рис. 10).

Более подробно эти величины представлены в узких трубках, границы которых образованы близкими траекториями течений, полученными из результатов двумерных расчётов (рис. 10в). Исследования свойств и параметров в трубках проведены в квазиодномерном приближении, где уделено внимание их кривизне и величине продольного магнитного поля. Полученные таким образом решения хорошо совпадают с решениями, взятыми непосредственно из расчётов

двумерной МГД-задачи. Это говорит в пользу адекватности обеих моделей – двумерной и квазиодномерной.

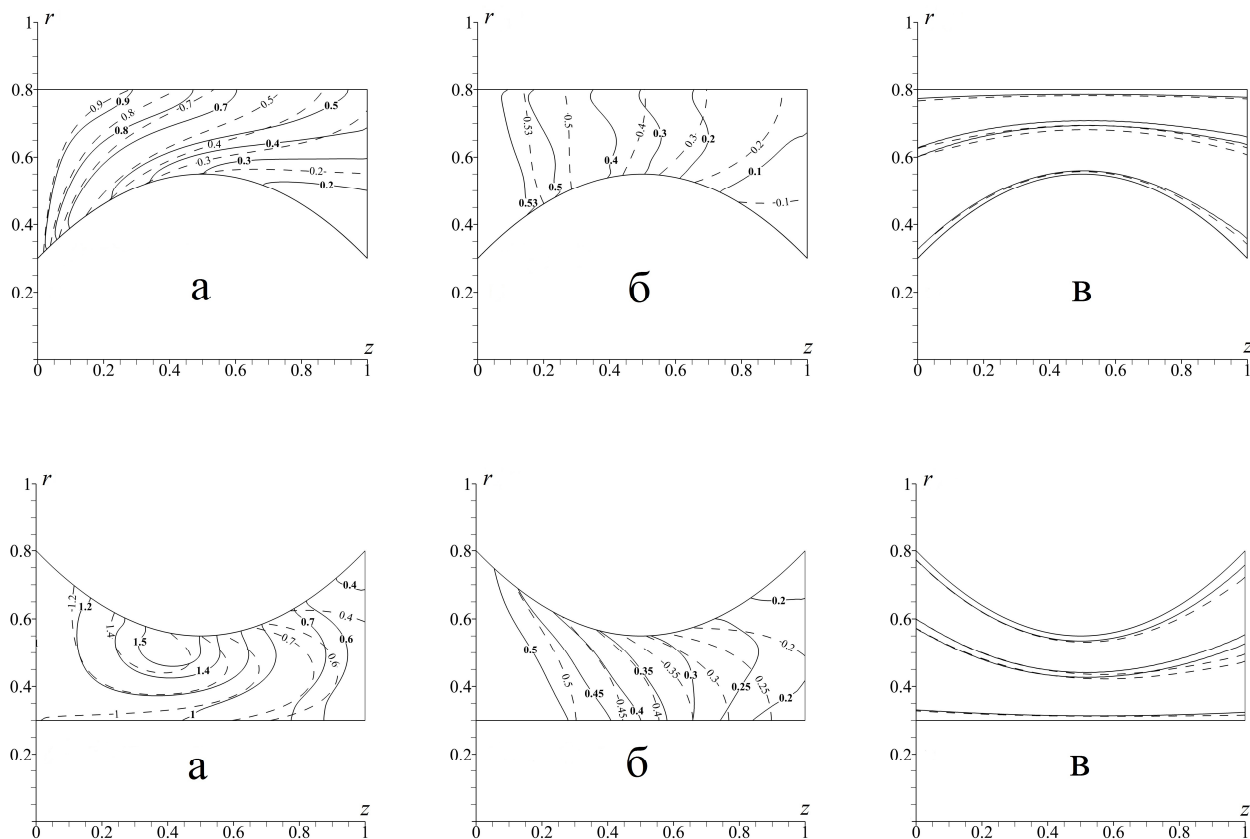


Рис. 10. Распределения плотности (а) и электрического тока (б) и узкие трубки течения (в) в каналах с профилированным центральным электродом (сверху) и профилированным внешним электродом (снизу) в присутствии продольного магнитного поля (сплошные линии) и без него (штриховые).

Продemonстрировано, что продольное магнитное поле в обеих конфигурациях плазменного ускорителя «отжимает» плазменный поток к внешнему электроду, отклоняет линии электрического тока в сторону входа в ускоритель, незначительно снижает его ускорительные характеристики и вызывает вращение плазменного потока в поперечном направлении.

Установлено, что продольное магнитное поле и криволинейная конфигурация каждого из электродов плазменного ускорителя заметно влияют на переход скорости плазменного потока через скорость магнитного звука в трансзвуковом ускорительном течении. Преодоление скорости магнитного звука происходит в сечениях канала, смещённых относительно минимального.

Заключение

Диссертационная работа посвящена численным моделям и расчётам течений плазмы в коаксиальных каналах плазменных ускорителей. Основное внимание уделено исследованию влияния геометрии канала и внешнего продольного магнитного поля на характеристики течений. В работе рассмотрены и реализованы в расчётах следующие математические МГД-модели:

- Квазиодномерная модель установления стационарных течений в узком канале постоянного среднего радиуса;
- Квазиодномерная модель течений в узких каналах произвольной геометрии, которая, в частности, может быть использована в анализе двумерных течений и дополнять результаты их расчётов;
- Двумерная модель установления трансзвуковых течений с ускорением в каналах различной геометрии во внешнем продольном магнитном поле.

В работе представлены результаты, которые вносят вклад в теорию МГД-течений в каналах и разработку плазменных ускорителей:

- Исследованы особенности альфвеновского и близких к нему режимов течения в узком канале постоянного среднего радиуса и определены условия их формирования;
- В расчётах получены свойства всех возможных типов течений в узком канале криволинейной конфигурации в собственном поперечном магнитном поле;
- Изучено совокупное влияние геометрии профилированного канала и внешнего продольного магнитного поля на свойства и параметры трансзвуковых сверхальфвеновских ускорительных течений.

Полученные результаты отвечают выполнению поставленных в диссертационной работе задач.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему научному руководителю, профессору К.В. Брушлинскому за внимание, поддержку, понимание и за данные им бесценные знания, советы и опыт, без которых эта работа не могла быть выполнена, а также А.Н. Козлову за полезные замечания к

тексту одной из публикаций и А.И. Подгорному за напоминание ценных сведений по истории создания плазменных ускорителей.

Автор благодарен сотрудникам кафедры «Прикладная математика» НИЯУ МИФИ и лично профессору Н.А. Кудряшову за внимание и поддержку, проявленные в процессе подготовки этой работы и во время всего обучения в целом.

Результаты диссертационной работы использованы в качестве материалов в исследованиях в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10278).

Публикации автора по теме диссертации

В журналах, включённых в перечень ВАК:

1. *Стёпин Е.В.* Численная модель установления стационарных альфвеновских и близких к ним МГД-течений в коаксиальных каналах в присутствии продольного магнитного поля // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2014. – Т. 3, № 5. – С. 517-528.
2. *Стёпин Е.В.* Стационарные МГД-течения в коаксиальных каналах криволинейной конфигурации // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2015. – Т. 4, № 5. – С. 407-420.
3. *Брушлинский К.В., Жданова Н.С., Стёпин Е.В.* Ускорение плазмы в коаксиальных профилированных каналах с продольным магнитным полем // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2017. – № 42. – 19 с.

В журналах, включённых в перечень ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science:

4. *Styopin E.V.* Numerical simulation of near-Alfven MHD flows relaxation with a longitudinal magnetic field // J. Plasma Physics. – 2015. – V. 81. – 905810309.
5. *Brushlinskii K.V., Styopin E.V.* On the magnetohydrodynamics flows in curved coaxial channels // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V. 788. – 012009.

В сборниках трудов конференций:

6. *Стёпин Е.В.* Численная модель установления стационарных альфвеновских и близких к ним МГД-течений в коаксиальных каналах в присутствии продольного

магнитного поля // Научная сессия НИЯУ МИФИ. Аннотации докладов. – 2015. – Т. 2. – С. 265.

7. *Стёпин Е.В.* О магнитогазодинамических течениях в криволинейных коаксиальных каналах // Сборник докладов V Международной конференции «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование». – Москва. – 2016. – С. 97-99.

8. *Brushlinskii K.V., Styopin E.V.* Numerical simulation of plasma flows in curved coaxial ducts with a longitudinal magnetic field // Book of abstracts of VI International Conference «The Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling». – Moscow. – 2017. – P. 22-23.

Список цитируемой литературы

1. *Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А.* Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // ЖЭТФ. – 1958. – Т. 33, Вып. 1. – С. 3-8.
2. *Морозов А.И.* Об ускорении плазмы магнитным полем // ЖЭТФ. – 1957. – Т. 32, Вып. 2. – С. 305-310.
3. *Морозов А.И.* Физические основы космических электрореактивных двигателей. – М.: Атомиздат, 1978. – 328 с.
4. *Morozov A.I., Savelyev V.V.* Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory // Reviews of Plasma Physics / Ed. by B.B. Kadomtsev and V.D. Shafranov. – NY: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2000. – V. 21. – P. 203-391.
5. *Morozov A.I.* Steady-state plasma accelerators and their possible applications in thermonuclear research // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research: Special Supplement. – 1969. – P. 111-119.
6. *Podgorny I.M., Sumarokov V.N.* The injection of plasmoids into a magnetic trap with a field which increases towards the periphery // J. Nucl. Energy, Part C Plasma Phys. – 1960. – V. 1. – P. 236-239.
7. *Морозов А.И., Соловьёв Л.С.* Стационарные течения плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. – М.: Атомиздат, 1974. – Вып. 8. – С. 3-87.

8. Волков Я.Ф., Кулик Н.В., Маринин Н.В., Морозов А.И., Терёшин В.И. и др. Анализ параметров потока плазмы, генерируемых полноблочным КСПУ Х-50 // Физ. плазмы. – 1992. – Т. 18, Вып. 11. – С. 1392-1402.
9. Асташинский В.М., Маньковский А.А., Минько Л.Я., Морозов А.И. Исследование физических процессов, обуславливающих режимы работы КСПУ // Физ. плазмы. – 1992. – Т. 18, Вып. 1. – С. 90-98.
10. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 200 с.
11. Брушлинский К.В., Жданова Н.С. Стационарные МГД-течения в соплах с внешним продольным магнитным полем // Изв. РАН. МЖГ. – 2004. – № 3. – С. 135-146.
12. Горшенин К.П. Об особенностях осесимметричных течений плазмы в узкой трубке потока // ПМТФ. – 1991. – № 5. – С. 3-10.
13. Брушлинский К.В., Жданова Н.С. Расчёт осесимметричных МГД-течений в канале с внешним продольным магнитным полем // ЖВМиМФ. – 2006. – Т. 46, № 3. – С. 550-559.
14. Брушлинский К.В., Жданова Н.С. МГД-течения в каналах плазменных ускорителей с продольным магнитным полем // Физ. плазмы. – 2008. – Т. 34, № 12. – С. 1120-1128.
15. Козлов А.Н. Исследование приэлектродных процессов в квазистационарных плазменных ускорителях с непроницаемыми электродами // Физ. плазмы. – 2012. – Т. 38, № 1. – С. 15-25.
16. Oran E., Boris J. Numerical Simulation of Reactive Flow. – NY, Amsterdam, London: Elsevier, 1987. – 601 p. (Перевод: Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. – М.: Мир, 1990. – 660 с.)
17. Zalesak S.T. Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids // J. Comput. Phys. – 1979. – V. 31. – P. 335-362.
18. Брушлинский К.В. Математические основы вычислительной механики жидкости, газа и плазмы. – М.: ИД Интеллект, 2017. – 272 с.