ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 74 за 2020 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Плеханов А.В.

О предельной скорости
разгона плазменного сгустка
в магнитоплазменном
ускорителе

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Плеханов А.В. О предельной скорости разгона плазменного сгустка в магнитоплазменном ускорителе // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 74. 18 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-74>
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-74>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

А.В. Плеханов

**О ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ
РАЗГОНА ПЛАЗМЕННОГО СГУСТКА
В МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ
УСКОРИТЕЛЕ**

Москва — 2020

А.В. Плеханов

О предельной скорости разгона плазменного сгустка в магнитоплазменном ускорителе

В данной работе рассматриваются некоторые особенности разгона плазменного сгустка в рельсовом электромагнитном ускорителе (магнитоплазменном ускорителе - МПУ), связанные с ограничением величины экспериментально достигнутой дульной скорости по сравнению с теоретически ожидаемой. Проблема рассматривается с двух точек зрения: 1) на основе качественного изучения уравнений одномерного стационарного течения идеального проводящего газа в электромагнитном поле и 2) с точки зрения разгона токового контура с осредненными параметрами.

Показано, что результаты качественных исследований уравнений стационарного течения газа неприменимы к случаю разгона плазменных сгустков в импульсных магнитоплазменных ускорителях, так как теория предполагает непрерывное воздействие, в частности электромагнитного поля, на электропроводный газ на всей длине устройства.

Использование модели подвижного токового контура, подразумевающей, что ток течет только в узком токовом слое (плазменном поршне), позволяет качественно верно отражать процесс его разгона в магнитоплазменном ускорителе до того момента, пока плазменный поршень остается компактным. Расслоение плазменного поршня, вторичные пробой в пространстве между казенной частью ускорителя и поршнем приводят к прекращению процесса ускорения и переходу к процессу, описываемому моделью, близкой к модели стационарного течения.

Ключевые слова: *магнитоплазменный ускоритель, плазменный сгусток, ограничение дульной скорости, скорость звука в плазме, стационарная модель течения, модель подвижной токовой перемычки.*

A.V. Plekhanov

On the limiting throwing velocity of a plasma bunch in a magnetoplasma accelerator

In this paper, we consider some features of plasma bunches throwing in a rail electromagnetic accelerator (magneto plasma accelerator-MPA) associated with the limitation of experimentally achieved muzzle velocity compared to the theoretically expected one. The problem is considered from two points of view: 1) on the basis of a qualitative study of the equations of the one-dimensional steady – state flow of an ideal conductive gas in electromagnetic field and 2) from the point of view of accelerating a current bridge with lumped parameters.

It is shown that the results of qualitative studies of the steady-state gas flow equations are not applicable to the case of plasma bunches throwing in pulsed MPAs, since the theory assumes a continuous effect, in particular of an electromagnetic field, on conductive gas over the entire length of the device.

Using a model of the moving current bridge, implying that the current flows only in a narrow current layer (plasma piston), allow you to accurately reflect the process of its throwing in a MPA until the plasma piston remains compact. Stratification of the plasma piston, secondary breakdowns in the space between the accelerator breech and the piston lead to the cessation of the acceleration process and the transition it to the process described by the model similar to the steady-state flow model.

Key words: *magnetoplasma accelerator, plasma bunch, muzzle velocity limitation, sound plasma speed, stationary flow model, model of moving current bridge.*

1. Введение

Для решения многих научных и прикладных задач, связанных с исследованием уравнения состояния материалов при сверхвысоких давлениях, развиваемых при высокоскоростном соударении, моделированием воздействия микрометеоритов на элементы конструкции космических аппаратов, изучением ударного термоядерного синтеза и др., необходимы установки по разгону макрочастиц массой в несколько граммов до гиперскоростей (8 км/с и выше). Одним из возможных устройств, способных обеспечить макрочастицам гиперскорости, является рельсовый электромагнитный ускоритель, интерес к которому возродился во второй половине 20-го века после работ Рашлея и Маршалла [1]. Им удалось в рельсовом ускорителе длиной 5 м разогнать тело массой 3 г до дульной скорости 5,9 км/с, используя в качестве якоря плазменный поршень. Рельсовые электромагнитные ускорители с плазменным поршнем иногда называют магнитоплазменными ускорителями (МПУ).

Достигнутый результат вызвал энтузиазм у исследователей и породил несколько проектов, нацеленных на получение более высоких скоростей. Так, например, в работе [2] планировалось разогнать метаемое тело массой 1 г до скорости выше 12 км/с, а в [3] – до скорости выше 10 км/с. Однако была достигнута максимальная скорость около 6,6 км/с. Получение более высоких дульных скоростей с использованием плазменного поршня вызвало затруднения, связанные с расслоением поршня в процессе движения в канале ускорителя, возникновением вторичных дуг в пространстве канала позади поршня, прорывом плазмы в пространство перед метаемым телом, что в конечном итоге приводило к прекращению процесса ускорения якоря с метаемым телом. После этого стали искать способы устранения указанных явлений, препятствующих дальнейшему росту дульной скорости макрочастиц, в том числе за счет замены межрельсовых изоляторов из пластмасс на изоляторы из керамик, повышения жесткости конструкции ствола, откачивания части газа из заснарядного пространства в процессе

выстрела и прочих мероприятий. Процесс совершенствования конструкции ствола и улучшения процесса разгона продолжается до настоящего времени.

Одновременно с этим некоторыми исследователями высказано предположение о том, что скорость разгона плазмы в МПУ ограничена скоростью звука в плазме [4],[5]. Для обоснования гипотезы рассматривалась классическая задача об обращении воздействия при стационарном течении электропроводного газа в электромагнитном поле в условиях совместного действия расходного, механического, теплового, геометрического и электромагнитного механизмов. Вязкостью и теплопроводностью пренебрегали. Авторами сделано предположение о том, что а) так как сечение канала магнитоплазменного ускорителя постоянно, то за счет профилирования канала (сопло Лаваля в обычной газодинамике) преодолеть скорость звука невозможно и 2) другие механизмы (расход, электромагнитные силы и тепловой поток) не изменяют своего знака по длине ускорителя и, следовательно, «в канале магнитоплазменного ускорителя весьма сложно получить сверхзвуковое течение плазмы» [5].

На наш взгляд, второе утверждение ошибочно и противоречит выводам, полученным ранее в классических работах И.Л. Повха, П.М. Колесникова и др. (см., например, [6],[7]), и результатам экспериментальных исследований [8],[9].

2. Качественный анализ стационарного течения одномерного электропроводного газа в канале магнитогидродинамического устройства

Если рассматривать воздействие на стационарный одномерный идеальный поток электропроводного газа только электромагнитного поля, то можно получить следующие уравнения, описывающие изменение скорости и числа Маха вдоль электродинамического устройства [6],[7]:

$$(M^2 - 1) \frac{du}{dx} = - \frac{\sigma B^2}{p} (u - u_3)(u - u_1),$$

$$(M^2 - 1) \frac{dM}{dx} = - \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \frac{\sigma B^2}{ap} (u - u_3)(u - u_2),$$

где введены следующие обозначения: u, p, ρ – компонента скорости в направлении движения (координата x), давление и плотность потока соответственно, $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты, M – число Маха, σ – электропроводность газа, B – индукция магнитного поля, $a = \gamma p/\rho$ – вспомогательная переменная,

$$u_1 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{E}{B}, \quad u_2 = \frac{(1 + \gamma M^2)u_1}{2 + (\gamma - 1)M^2}, \quad u_3 = \frac{E}{B}.$$

Здесь E – напряженность электрического поля. Все величины берутся в системе СИ. Из определения величины u_3 видно, что она является дрейфовой скоростью движения плазмы в скрещенных электромагнитных полях [6].

Качественное исследование приведенных выше уравнений позволяет получить зависимость u от числа Маха, которая представлена на рис. 1 [7]. Необходимо сделать некоторые пояснения к рис. 1. Если ввести понятие коэффициента нагрузки, равного отношению напряженности электрического поля к произведению скорости на индукцию магнитного поля, $k = E/(uB) = u_3/u$, то режим $u = u_3$ соответствует режиму работы ускорителя с коэффициентом нагрузки, равным 1. Следовательно, условие течения $u > u_3$ эквивалентно условию $k < 1$, что соответствует генераторному режиму работы устройства [10] (режим магнитогидродинамического генератора), а $u < u_3$ – режиму ускорителя ($k > 1$), который мы рассматриваем. Тогда, при $u = u_1$, $k = k_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$, а при $u = u_2$, $k = k_2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}$.

Рис. 1. Зависимость скорости потока от числа Маха в гипотетическом магнитоплазменном ускорителе [7].

Из рис. 1 видно, что вся область изменения $u = f(M)$ разбивается на восемь подобластей, в которых возможны различные режимы течения, как с положительными, так и с отрицательными градиентами скорости и числа Маха, что зависит от выбора начальных значений скорости u_0 и числа Маха M_0 . Интересно отметить, что теоретически существуют возможности за счет электромагнитного воздействия как безударного торможения потока и перехода из сверхзвукового режима течения в дозвуковой (из области A_2 в область B_1 в точке $u = u_3$, $M = 1$), так и из дозвукового режима течения в сверхзвуковой (из областей C_1 , D_1 в области B_2 , C_2 в точке $u = u_1$, $M = 1$). Также возможен выбор таких начальных значений скорости и числа Маха, которые позволяют сразу же попасть в области B_2 , C_2 , в которых поток будет ускоряться. Причем в областях B_2 , C_2 скорость потока ограничена и стремится к величине u_3 при длине ускорителя, стремящейся к бесконечности. То есть сверхзвуковой разгон потока с помощью воздействия электромагнитных полей возможен двумя способами, и он определяется выбором начальных значений скорости и числа Маха и соответствующей организацией дальнейшего электромагнитного воздействия.

Рассмотрим характерные особенности наиболее интересных для рассматриваемого нами случая областей из упомянутых выше [7].

Область C_1 : $M_0 < 1$, $u_2 < u_0 < u_1 < u_3$. Следовательно, $du/dx > 0$, $dM/dx < 0$. Этот случай движения характерен тем, что скорость потока приближается к

значению u_1 , а число Маха стремится к нулю за счет неограниченного роста температуры. То есть мы не выполним условие перехода через скорость звука ($u = u_1, M=1$) одновременно в одном сечении.

Область D_1 : $M_0 < 1, u_0 < u_2 < u_1 < u_3$. Следовательно, $du/dx > 0, dM/dx > 0$. Этот случай движения характерен тем, что возможно такое электромагнитное воздействие, которое обеспечит условие, при котором значение $u = u_1$ достигается в том же сечении, в котором достигается значение $M = 1$. То есть из области D_1 путем соответствующего электромагнитного воздействия на поток возможно ускорение потока с плавным переходом через скорость звука.

Область B_2 : $M_0 > 1, u_1 < u_2 < u_0 < u_3$. Следовательно, $du/dx > 0, dM/dx > 0$. Этот режим движения соответствует случаю асимптотического приближения u к u_3 при длине устройства $x \rightarrow \infty$.

Область C_2 : $M_0 > 1, u_1 < u_0 < u_2 < u_3$. Следовательно, $du/dx > 0$; в начале $dM/dx < 0$. Этот режим движения характерен тем, что производная по числу Маха вначале области уменьшается, достигая некоторого минимального значения, после чего меняет свой знак на противоположный, и течение переходит в область B_2 . Пример работы магнетогидродинамического (МГД) ускорителя в таком режиме показан на рис. 2 [11].

Наиболее предпочтительным является выбор таких начальных условий (u_0, M_0), которые обеспечат попадание в область D_1 или области B_2, C_2 . В последующем необходимо поддерживать соответствующее электромагнитное воздействие, обеспечивающее в первом случае достижение условий $u = u_1, M = 1$ в одном и том же сечении, способствующих плавному переходу из области D_1 в области B_2, C_2 , а во втором – непрерывный рост скорости в областях B_2, C_2 .

Естественно, другие воздействия (геометрическое, расходное и прочие) могут оказывать влияние на организацию процесса движения, но важным, на наш взгляд, является изменение расхода газового потока, вызванное эрозией материала электродов и абляцией материала межрельсовых изоляторов. В

случае разгона макротел геометрически воздействовать на процесс разгона очень сложно в связи с необходимостью обеспечения обтюрации тела в канале переменного сечения.

Рис. 2. Распределение электрических и газодинамических параметров вдоль канала МГД-ускорителя [11]. Результаты эксперимента: 1 – статическое давление $p \times 10^{-5}$ Па, 2 – падение напряжения на электродах $V \times 10^{-3}$ В, 3 – токи на электродах $I \times 10^{-2}$ А, 4 – скорость, вычисленная по измеренной разности потенциалов $u \times 10^{-4}$ м/с. Светлые точки соответствуют измерениям при работающем МГД-ускорителе, темные – при выключенном МГД-ускорителе. Результаты расчета: 5 – давление $p \times 10^{-5}$ Па, 6 – температура $T \times 10^{-4}$ К, 7 – скорость $u \times 10^{-4}$ м/с, 8 – число Маха $M \times 10$. Сплошные кривые – работающий МГД-ускоритель, штриховые – выключенный.

В любом случае максимальная скорость движения ограничена величиной u_3 , которая никак не связана со скоростью звука, как утверждалось в работе [5]. Также предположение об ограничении скорости движения электропроводного газа в канале электродинамического ускорителя противоречит достигнутым результатам экспериментов с помощью импульсных магнитоплазменных ускорителей.

3. Анализ некоторых экспериментов по разгону плазмы в электродинамическом рельсовом ускорителе

В качестве примера рассмотрим результаты двух экспериментов по разгону свободного плазменного разряда (без метаемого тела) в МПУ.

В работе [8] приводятся результаты опытов по разгону плазменного сгустка до гиперскоростей. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Она включала в себя батарею конденсаторов емкостью 57 мкФ, соединенную через сферический воздушный разрядный зазор с массивными медными электродами («рельсами»). Последние размещались в непрерывно откачиваемой стеклянной цилиндрической камере. Вакуум в разрядной камере в момент взрыва проволоочки составлял $(1-2) \times 10^{-6}$ мм ртутного столба (0,133-0,267) мПа. Скорость движения плазмы вдоль рельсов измерялась двумя способами: 1) по показаниям высокоскоростной камеры (2×10^6 кадров в секунду с выдержкой кадра 0,2 мкс), фиксирующей движение фронта свечения, и 2) на основании сигналов индукционных датчиков (K_1 и K_2 на рис. 3), определяющих время пролета токового слоя известного расстояния между ними. Образование газоразрядной плазмы обеспечивалось взрывом медных проволоочек различного диаметра (от 0,02 мм до 0,27 мм). Начальное напряжение батареи составляло 30 кВ.

Обработка опытных данных, полученных с помощью индукционных датчиков и высокоскоростной киносъемки, показала, что экспериментальная скорость плазменного сгустка достигала 110 км/с и 120 км/с соответственно.

Одновременно с этим разработана модель установки, предполагающая, что ток течет только в узком слое, масса сгустка плазмы эквивалентна первоначальной массе проволоочки и не меняется в процессе разгона, трение и тепловые потери отсутствуют. Эту модель можно условно назвать моделью подвижного токового контура. Согласно ей идеализированное ускорение плазмы можно описать следующей системой уравнений [8]:

Рис. 3. Схема элементов установки и расположения магнитных измерительных датчиков K_1 и K_2 [8].

$$m \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} L' I^2,$$

$$\frac{dx}{dt} = u,$$

где, u – компонента скорости в направлении движения, m – масса плазменного сгустка (поршня), L' – градиент индуктивности ускорителя, I – ток в цепи ускорителя. Уравнение для источника электрической энергии будет зависеть от его типа и здесь не приводится.

Сравнительный анализ результатов экспериментов и расчетов показал их сильное расхождение, что заставило признать авторов работы, что физика явлений гиперскоростного ускорения плазмы намного сложнее, чем они предполагали при написании модели. В частности, экспериментально зафиксировано, что ток течет не в узком слое, а область его протекания расширяется в процессе разгона плазменного сгустка вдоль рельсов. Также отмечено, что масса ускоряющейся плазмы в процессе разгона может меняться за счет того, что не весь материал проволоочки преобразуется в плазму в момент взрыва и возможно поступление материала стенок канала ускорителя в плазму за счет их эрозии и абляции в результате взаимодействия с плазмой.

Отдельно обращено внимание на тот факт, что ввиду малых размеров установки (длина рельсов около 35 см, как можно понять из рис. 8 работы [8]) возможно существенное влияние взрыва проволоочки на процесс разгона плазменного сгустка, особенно на начальном участке.

В целом авторы работы пришли к выводу, что модель подвижной токовой перемычки качественно верно отражает процесс разгона токового слоя в МПУ, и не обнаружили каких-либо физических ограничений, препятствующих достижению скоростей выше 100 км/с в канале постоянного сечения.

В работе [9] экспериментально и теоретически исследовано влияние плотности газа на ускорение плазменного сгустка в канале МПУ, заполненном различными газами (ксенон, воздух, гелий) при атмосферном давлении.

Экспериментальная установка представляла собой рельсовый ускоритель длиной 600 мм квадратного сечения со стороной 12 мм. Электроды выполнены из меди (большинство опытов) и дюралюминия (при опытах с воздухом). Межрельсовые изоляторы изготавливались из прозрачного плексигласа. В качестве источника питания использовалась батарея конденсаторов емкостью 100 мкФ. СФР-камера, работающая в режиме покадровой съемки, фиксировала движение фронта свечения вдоль канала. Результаты киносъемки используются для определения скорости движения фронта свечения. Авторами работы утверждается, что погрешность измерения скорости составляла 2-3%. Специальные эксперименты, проведенные авторами, показали, что скорость токового слоя, измеренная индуктивными датчиками, совпадает со скоростью движения фронта свечения с погрешностью менее 5%, что согласуется с результатами работы [8] (4,3%).

Анализ экспериментальных данных показал, что во всех опытах фронт свечения быстро набирает скорость на начальном участке разгона, затем достигает скорости насыщения при выходе тока в цепи ускорителя на плато

(примерно за 20 мкс на уровень 450 кА), и далее скорость остается постоянной до окончания протекания тока. Для гелия эта скорость составила 17,5 км/с, для воздуха – 9,8 км/с, для ксенона – 4,6 км/с. Длина, на которой происходит насыщение скорости, составляет несколько сантиметров и много меньше длины рельсового ускорителя.

Для описания движения плазменного сгустка авторы разработали модель, которую они называли моделью подвижного токового контура с переменной массой, движущейся под действием силы Лоренца и силы сопротивления среды. От модели Л.А. Арцимовича она отличается тем, что учтено увеличение массы плазменного поршня за счет прихода материала со стенок канала, его вовлечение в движение поршня и аэродинамическое сопротивление среды.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета показало, что максимальная скорость движения плазменного сгустка соответствует теоретически предсказанному пределу, обусловленному сопротивлением среды и ростом ускоряемой массы за счет присоединения части материала, испаренного с электродов. На основании этого делается вывод, что измеренные скорости плазменного сгустка заметно превосходят скорость звука в плазме, по оценкам составляющую величину 5-7 км/с.

Таким образом, эксперименты показывают, что скорость плазменного сгустка в МПУ с каналом постоянного сечения намного превышает скорость звука в плазме и предельную скорость u_3 , полученную из качественного анализа уравнений стационарного течения электропроводного газа в электродинамическом устройстве.

4. Анализ причин расхождения результатов экспериментов и расчетов по модели токового слоя с результатами качественного анализа стационарного течения

На наш взгляд, причина расхождений между экспериментальными результатами по ускорению плазменных сгустков и теоретическими результатами, следующими из рассмотрения стационарного течения электропроводного газа в электродинамическом устройстве, заключается в неприменимости стационарного подхода к импульсным ускорителям.

При качественном анализе уравнений стационарного движения электропроводного газа вдоль электродов предполагается, что электромагнитное воздействие (в данном случае) на поток производится по всей длине устройства. То есть в каждом сечении устройства создаются условия, обеспечивающие непрерывное ускорение электропроводного газа вдоль электродов. В том числе обеспечивается непрерывное электродинамическое воздействие на поток. Следовательно, ток течет через весь объем, занимаемый газом. Это иллюстрируется рис. 2, где, в частности, показано распределение тока, текущего через электрод, по всей длине МГД-ускорителя. В экспериментах с электродинамическим ускорением плазменных сгустков в МПУ с самого начала процесса стремятся обеспечить компактность плазменного поршня. Вторичные пробои в пространстве ускорителя между его казенной частью и плазменным поршнем, расслоение поршня увеличивают зону протекания тока и приближают режим ускорения к случаю стационарного течения с соответствующим прекращением процесса разгона. Если плазменный поршень остается компактным в течение разгона, то его ускорение продолжается, что соответствует результатам численных расчетов по модели с сосредоточенными параметрами типа токовой перемычки.

Аналогичная картина наблюдается и при разгоне макрочастиц в магнитоплазменном ускорителе – при сохранении компактности плазменного

поршня за счет организации положительного градиента тока в цепи ускорителя в течение всего процесса разгона удалось достичь дульной скорости 6,8 км/с метаемого тела массой 3,8 г [12]. Получение более высокой дульной скорости на упомянутой в [12] установке было невозможно из-за конструкции источника электропитания и ограничения величины запасаемой энергии.

Заключение

Рассмотрена задача разгона плазменного поршня в магнитоплазменном ускорителе рельсового типа с двух точек зрения: а) на базе качественного исследования уравнений стационарного одномерного течения идеального электропроводного газа в электромагнитных полях и 2) с точки зрения разгона токового контура с сосредоточенными параметрами (модель подвижного токового контура).

Показано, что при анализе импульсных магнитоплазменных ускорителей первый подход неприменим, так как он подразумевает непрерывное воздействие, в частности электромагнитного поля, на электропроводный газ на всей длине устройства. Использование модели подвижного токового контура, подразумевающей, что ток течет только в узком токовом слое, позволяет качественно верно отражать процесс разгона токового слоя в магнитоплазменном ускорителе до того момента, пока плазменный поршень остается компактным. Расслоение плазменного поршня, вторичные пробой в пространстве между казенной частью ускорителя и поршнем приводят к прекращению ускорения и переходу к процессу, описываемому моделью 1.

Не обнаружено принципиальных физических ограничений, позволяющих экспериментально получить скорости плазменных сгустков выше 100 км/с.

Список литературы

1. Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities // *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2540-2543.
2. Hawke R.S., Nellis W.J., Rego J., Susoeff A.R., Newman G.H. Rail accelerator development for ultra-high pressure research // *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 291-293.
3. Usuba S., Kondo K., Sawaoka A. Development of railgun accelerator combined with two-stage light gas gun // *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 260-263.
4. Kozlov A.V., Luzganov S.N., Polistchuk V.P., Shurupov A.V., Electromagnetic launchers – the new concept / XIIth International Symposium on Launch Technology, USA, Snowbird, Utah, 25-28 May, 2004, Selected papers, pp. 65-69. DOI: 10.1109/ELT.2004.1398048.
5. Kozlov A.V., Kotov A.V., Polishtchuk V.P., Shurupov A.V. Electromagnetic launcher with massive light-plasma initiator // *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 9, pp. 1298-1307. DOI: sci-hub.se/10.1134/S106378421909007X.
6. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971, 390 с.
7. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1976. 502 с.
8. Artsimovich L.A., Luk`anov S.Iu., Podgornyi I.M., and Chuvatin S.A. Electrodynamic acceleration of plasma bunches // *Soviet Physics-JETP*, 1958, vol. 6, no. 1, pp. 1-244.
9. Жуков Б.Г., Резников Б.И., Куракин Р.О., Розов С.И. Влияние плотности газа на движение свободного плазменного поршня в канале рельсотрона // *Журнал технической физики*, 2007, том 77, вып. 7, стр. 42-49.
10. Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970. 672 с.
11. Алферов В.И. Современное состояние и потенциальные возможности аэродинамических труб с МГД-ускорением // *ТВТ*, 2000, том 38, выпуск 2, стр. 321–334.

12. Babakov Yu.P., Plekhanov A.V., Zheleznyi V.B. Range and railgun development results at LS&PA “SOYUS” // IEEE Transactions on Magnetics, 1995, vol. 31, no. 1, pp. 259-262.

Оглавление

1. Введение	3
2. Качественный анализ стационарного течения одномерного электропроводного газа в канале магнитогидродинамического устройства	4
3. Анализ некоторых экспериментов по разгону плазмы в электродинамическом рельсовом ускорителе	9
4. Анализ причин расхождения результатов экспериментов и расчетов по модели токового слоя с результатами качественного анализа стационарного течения	13
Заключение	14
Список литературы	15