

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ «КРОТ»

А.С. Николенко, М.Е. Гущин, С.В. Коробков, И.Ю. Зудин, А.В. Стриковский

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия,  
nikolenko@ipfran.ru

## LABORATORY MODELING OF NEAR-EARTH AND ASTROPHYSICAL PLASMA JETS ON A LARGE-SCALE PLASMA DEVICE «KROT»

A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, A.V. Strikovskiy

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russia,  
nikolenko@ipfran.ru

**Аннотация.** Представлены результаты лабораторных экспериментов на стенде «Крот» по инъекции плазменных струй в магнитное поле в вакууме. Параметры плазменного стенда «Крот» позволяет изучать динамику плазменных потоков с магнитным полем и фоновой средой на масштабах порядка одного метра поперек и вдоль квазиоднородного магнитного поля — фактически в «безграничном» режиме, что необходимо для моделирования активных экспериментов в околоземной плазме и для ряда астрофизических задач. В качестве источника плазмы использовалось несколько электроразрядных коаксиальных генераторов, формирующих плазменные потоки с различными скоростями (20–300 км/с) и энергиями (0.01–1 Дж), а также эквивалентный по этим параметрам источник лазерной плазмы. В ходе экспериментов изучалась динамика взаимодействия плазменных струй с магнитным полем – эволюция диамагнитных каверн, развитие структурных неустойчивостей, особенности коллимированного струйного течения вдоль и поперек направления внешнего магнитного поля.

**Ключевые слова:** лабораторное моделирование, активные эксперименты, диамагнитная каверна, неустойчивость.

**Abstract.** The results of laboratory experiments on the injection of plasma flows into a magnetic field in vacuum are presented. The parameters of the plasma device Krot allows us to study the dynamics of plasma flows with magnetic field and background medium on scales of the order of one meter across and along the quasi-uniform magnetic field — actually in the «boundless» mode, which is a necessity for modeling active experiments in near-Earth plasma and for a number of astrophysical problems. Several electric-discharge coaxial generators forming plasma with different velocities (20–300 km/s) and energies (0.01–1 J), as well as a laser plasma source with similar parameters, were used as a plasma source. During the experiments we studied the dynamics of the interaction of plasma jets with the magnetic field, that involve the evolution of diamagnetic caverns, the development of structural instabilities, and the features of collimated jet flow along and across the direction of the external magnetic field.

**Keywords:** laboratory modeling, active experiments, diamagnetic cavity, instability.

### ВВЕДЕНИЕ

Лабораторное моделирование космической плазмы — перспективный подход, который, по современным представлениям, позволяет существенно продвинуться в понимании различных астрофизических и геофизических явлений. В сочетании с непрерывно совершенствующейся наблюдательной техникой и развитием методов и возможностей численного моделирования, эксперименты в лабораториях, специально поставленные на основании правил подобия, могут служить источником ценной научной информации, применяться для верификации моделей различного уровня сложности, использоваться для демонстрации различных физических эффектов.

В данной работе представлены результаты экспериментов по разлету плазменных струй в вакуум или в фоновую плазму во внешнем магнитном поле. Такие процессы реализуются в околоземной плазме при проведении активных экспериментов с инъекцией ионизированного вещества [Haerendel, 2019; Winske et al., 2019] в ионосфере и магнитосфере Земли, так и в дальнем космосе, включая формирование астрофизических джетов [Spruit et al., 1997],

аккреция вещества на молодых звездах [Giannini et al., 2017], динамику остатков сверхновых [McKee and Hollenbach, 1980]. Разлет плотной высокоскоростной плазмы во внешнем магнитном поле в вакууме или в менее плотной фоновой плазме представляет собой задачу, богатую физическими эффектами. Интересующими вопросами, как правило, являются: предельные размеры расширяющейся плазмы, скорость и динамика плазмы в целом; топология и механизмы генерации магнитных возмущений; возникающие неустойчивые структуры плазмы облака и их влияние на динамику плазмы; возбуждение волновых возмущений и разрывов при распространении плазменной струи через замагниченную фоновую среду, в том числе – генерация бесстолкновительных ударных волн.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ИПФ РАН для моделирования активных ионосферных экспериментов используется крупномасштабная установка – плазменный стенд «Крот», в состав которой входят вакуумная камера объёмом 170 м<sup>3</sup> с источниками фоновой плазмы с

концентрацией вплоть до  $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  с размерами до  $5 \times 1,5 \text{ м}$  и источником квазиоднородного магнитного поля с индукцией до 1000 Гс.

Плазменные потоки создаются коаксиальными генераторами, выполненными на основе отрезков коаксиальных линий с полиэтиленовой изоляцией [Коробков и др., 2019; Николенко и др., 2024], использовано три вида таких источников. Длительность инжекции плазменной струи определяется длительностью импульса тока и составляет 10–100 мкс в зависимости от параметров источника питания, причем доступны режимы разовой инжекции, так и последовательности сгустков плазмы. Параметры плазменных струй определялись различными контактными и бесконтактными диагностиками, включая электрические и магнитные зонды, СВЧ-интерферометр, скоростную ICCD фотокамеру. По данным диагностик, концентрация плазмы в основном объеме составляет  $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , температура электронов  $T_e \sim 1 \text{ эВ}$ , начальная скорость разлета основного «тела» облака  $V_0$ , определяемая по свечению лежит в диапазоне 20–50 км/с, передний фронт распространяется со скоростями вплоть до 100 км/с. По данным спектроскопических измерений, плазма облака в основном представлена ионами углерода невысокой зарядности ( $\text{C}^{1+}$ ) и водородом ( $\text{H}^+$ ) [Коробков и др., 2023]. Оценки показывают, что начальная энергия плазменного облака составляет величину порядка 0.1 Дж, либо 1 Дж в зависимости от типа коаксиального генератора [Николенко и др., 2024]. Схема экспериментов по продольной и поперечной инжекции представлена на рис. 1.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При инжекции плазменных облаков наблюдается диамагнитный эффект, при котором внешнее магнитное поле в объеме облака ослабляется вплоть до полного вытеснения. В экспериментах с плазменными струями, создаваемыми коаксиальными генераторами низкой энергии  $E_0 \sim 0.1 \text{ Дж}$  [Николенко и др., 2023], облако плазмы полностью поле вытесняет до 200 Гс, а с источниками,

создающими плазменные потоки с  $E_0 \sim 1 \text{ Дж}$  – вплоть до 300 Гс. На переднем крае каверны наблюдается электромагнитная неустойчивость, проявляющаяся в виде интенсивных пульсаций магнитного поля в каверне; частоты неустойчивости соответствуют нижнегибридному диапазону. Облако плазмы при инжекции вдоль магнитного поля расширяется в форме эллипсоида вращения, размер которого вдоль  $V_0$  определяется начальной скоростью и временем инжекции,  $L \sim V_0 t$ . Размер поперек внешнего поля определяется начальной энергией облака плазмы  $E_0$  и величиной индукции  $B_0$ , фактически совпадая с классическим радиусом торможения идеальной плазмы  $R_B = \sqrt{\frac{3E_0}{B_0^2}}$ , расширяющейся

в магнитном поле. В эксперименте показано, что размер плазменных струй вдоль внешнего поля действительно масштабируется с  $E_0$  и  $V_0$ . Изменяя величину индукции  $B_0$ , наблюдается уменьшение поперечного размера облака – эффект коллимации плазмы магнитным полем.

На стадии торможения облака на его границе развивается неустойчивость желобкового типа. На рис. 2 (а)–(г) приведены серии фотографии плазменных облаков с энергией 0.1 и 1 Дж в экспериментах, расширяющихся вдоль магнитного поля в направлении на наблюдателя. Желобки начинают формироваться на стадии торможения и распада облака, и в случае большей начальной энергии и продолжительности инжекции неустойчивость развивается быстрее и проявляется более контрастно.

При поперечной инжекции плазмы, формируется устойчивое коллимированное струйное течение – плазменный лист, плазменный поток имеет топологию слоя, лежащего в плоскости, образованной направлением инжекции  $V_0$  и внешнего поля  $B_0$  (рис. 2(д)–(е)); данная структура способна распространяться на расстояние до  $L \sim 1 \text{ м}$  от коаксиального ускорителя поперек  $B_0$ . Установлено, что толщина листа обратно пропорциональна индукции  $B_0$  для разных энергий  $E_0$  и порядка гирорадиуса легких ионов ( $\text{H}^+$ ).

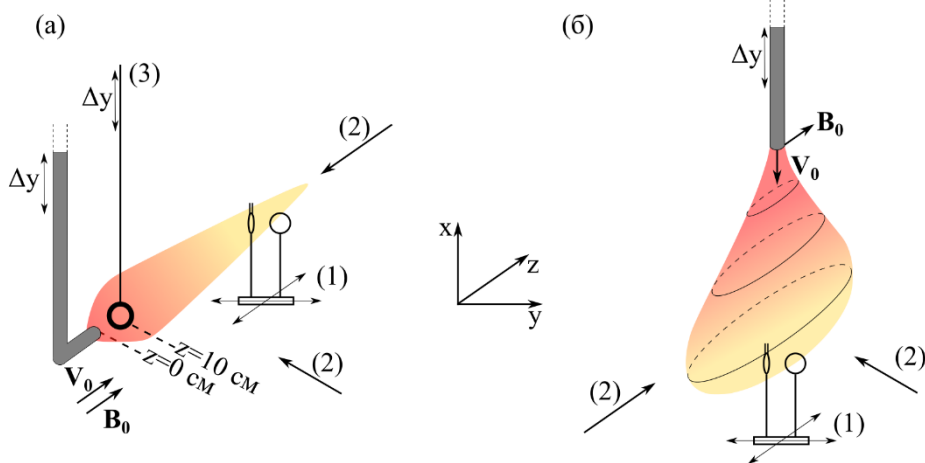


Рис. 1. Схема эксперимента по продольной (а) и поперечной (б) инжекции плазмы и расположение диагностик в типичном эксперименте: (1) — электрические и магнитные зонды, установленные на двухкоординатной платформе с электромеханическим приводом, (2) — ракурсы фотосъемки, (3) — магнитный зонд на штанге, вводимой по радиусу

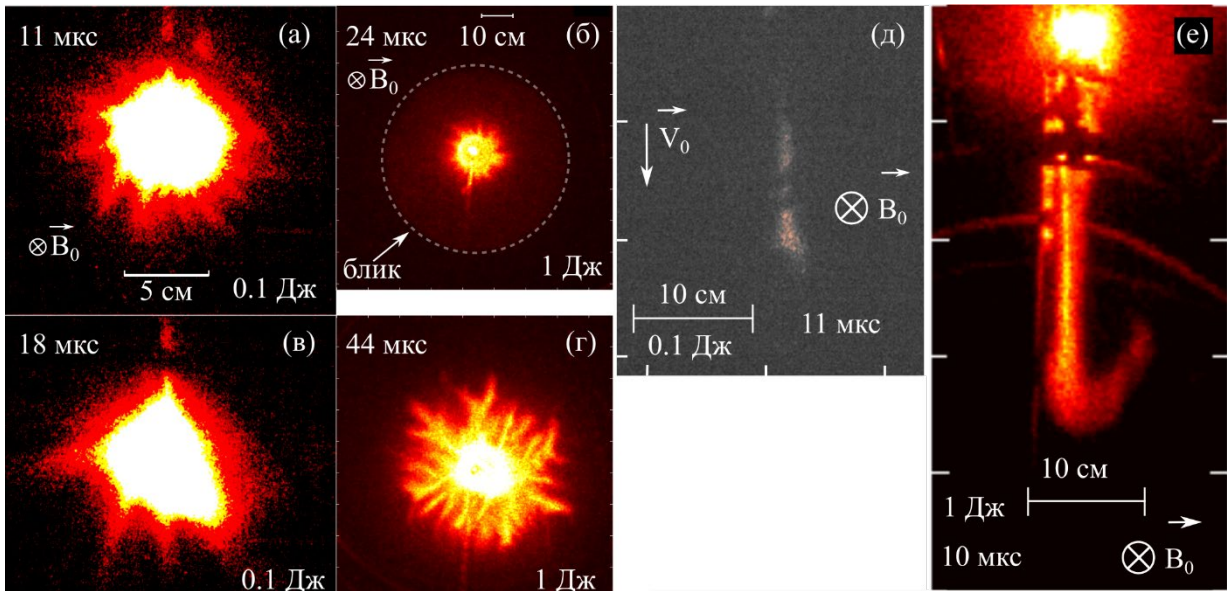


Рис. 2. Сравнение некоторых особенностей динамики плазменных струй, различающихся начальной энергией на 1 порядок при инъекции поперек и вдоль  $B_0$  в вакууме, полученные быстрой фотосъемкой: (а)–(г) — инъекция плазменной струи вдоль магнитного поля, вид на наблюдателя; (а), (б) — струя с начальной энергией 0.1 Дж в поле 225 Гс спустя 11 и 18 мкс после начала инъекции; (в), (г) — струя с начальной энергией 1 Дж в поле 225 Гс спустя 24 и 44 мкс после начала инъекции; (д)–(е) — струя плазмы, расширяющаяся поперек внешнего поля 450 Гс, демонстрируется плазменный «лист»; (д) — струя с начальной энергией 0.1 Дж; (е) — 1 Дж

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы магнитные возмущения при инъекции плазменных струй вдоль и поперек внешнего магнитного поля в вакууме. Источник простой конструкции с относительно низкой (уровня 0,1 и 1 Дж) энергией облака позволяет детально исследовать физические эффекты, присущие активным космическим экспериментам и астрофизическим явлениям с облаками плотной плазмы, включая образование глубоких диамагнитных каверн, возбуждение электромагнитной неустойчивости, развитие желобковой неустойчивости, а также установление коллимированных струйных течений.

Работа выполнена при поддержке 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» и при частичной поддержке Российского научного фонда, проект # 24-12-00459.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коробков С.В., Гуцин М.Е., Гундорин В.И. и др. Простейшая эрозионная плазменная пушка из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией // Письма в Журнал технической и физики. 2019. Т. 45, № 5. С. 45–48.

Коробков С.В., Николенко А.С., Гуцин М.Е. и др. Особенности динамики и неустойчивости плазменных струй, расширяющихся во внешнее магнитное поле, в лабораторных экспериментах с компактными коаксиальными генераторами плазмы на крупномасштабном стенде «Крот» // *Астрономический журнал*. 2023. Т. 100, № 1. С. 107–118.

Николенко А.С., Гуцин М.Е., Коробков С.В. и др. Динамика плазменного облака, формируемого компактной коаксиальной пушкой, при разлете в вакуум и фоновую плазму большого объема во внешнем магнитном поле // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49, № 11. С. 1101–1117.

Giannini T., Antonucci S., Lorenzetti D. et al. The 2015–2016 Outburst of the Classical EXor V1118 Ori // *Astrophys. J.* 2017. V. 839. P.112.

Haerendel G. Experiments with plasmas artificially injected into near-Earth space. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V.6. A. 29.

McKee C.P., Hollenbach D. Interstellar shock waves // *J. Annual Rev. Astronomy and Astrophys.* 1980. V. 18. P. 219.

Spruit H.C., Foglizzo T., Stehle R. Collimation of magnetically driven jets from accretion discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1997. V. 288. P. 333.

Winske D., Huba J. D., Niemann C. et al. Recalling and updating research on diamagnetic cavities: Experiments, theory, simulations // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V. 5. A. 51.