

Л. В. ДУБОВОЙ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН

К ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХБЫСТРЫХ СГУСТКОВ ПЛАЗМЫ В УСКОРИТЕЛЯХ РЕЛЬСОТРОННОГО ТИПА

(Представлено академиком С. А. Христиановичем 31 X 1963)

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области электродинамического ускорения плазменных сгустков, большинство описанных к настоящему времени конструкций ⁽¹⁻³⁾ позволяет сообщать плазме скорости, не превышающие $0,1-1,0 \cdot 10^6$ м/сек, однако для опытов с инъекцией плазмы в магнитные ловушки, например, желательны скорости порядка 10^6-10^7 м/сек.

В соответствии с теорией ⁽⁴⁾ для заданных размеров конденсаторной батареи питания ускорителя и его оптимальной конструкции увеличение скорости плазменных сгустков может быть достигнуто за счет уменьшения массы ускоряемого вещества. Однако, как показывает опыт, при этом возникает ряд специфических трудностей технического характера, связанных с процессом создания плазменного сгустка, предназначенного для дальнейшего ускорения, который должен обладать резко очерченными границами и достаточно высокой проводимостью при сравнительно низкой концентрации исходных нейтральных частиц.

В связи с предварительными исследованиями ионизации газов при пониженных давлениях в процессе конструирования системы было признано целесообразным отказаться от общепринятой схемы инъекции ускоряемого вещества в виде нейтралов, когда функции ионизации и ускорения возлагаются на один и тот же ток. В описываемых опытах в ускоритель впрыскивалась высокоионизованная плазма, создававшаяся вне пространства ускорения.

На рис. 1 приведено схематическое изображение установки с разрядниками и батареей конденсаторов. Длина l коаксиальных электродов равна 0,9 м, их диаметры 0,06 и 0,1 м соответственно. Собственная индуктивность L_0 батареи с разрядником при емкости $C = 48 \mu\text{ф}$ не превышала $35 \cdot 10^{-9}$ гн. Вакуумный разрядник позволял производить коммутацию батареи в диапазоне напряжений 1—50 кВ за времена, меньше 50 нсек. Имевшийся в установке разрядник для закорачивания батареи в описываемых опытах не применялся.

Конструкция плазменного источника аналогична ⁽⁵⁾. Нормальная работа источника обеспечивалась разрядом малоиндуктивного конденсатора емкостью 17 $\mu\text{ф}$. Разрядный ток через источник имел форму апериодического импульса длительностью 2,5 $\mu\text{сек}$. Изменение тока разряда от 25 до 200 ка позволяло менять количество инжектируемых в ускоритель частиц примерно от 1 до 60 $\mu\text{г}$. Состав плазмы — высокоионизованные продукты испарения поверхности изоляционного вкладыша источника, изготовленного из оргстекла. Измеренный методом задерживающего потенциала ⁽⁶⁾ спектр частиц в инжектируемой плазме соответствует средней энергии электронов и ионов 10—15 эВ. Расчетное значение кулоновской проводимости плазмы обеспечивает незначительную диффузию ускоряющего токового слоя в сгустке в течение всего времени его движения вдоль коаксиала.

Инъекция плазмы осуществлялась в 30 см от разделительного изоляционного коаксиала. Измеренная скорость распространения фронта инжектируемой плазмы от места впуска равнялась $5 \cdot 10^3$ м/сек и слабо зависела от режима

источника. Момент включения основного разрядника после срабатывания системы напуска плазмы определялся экспериментально по максимуму скорости сгустка на выходе из ускорителя. Найденное в опытах оптимальное время задержки совпадает с временем, необходимым для распространения фронта инжектируемой плазмы от места впуска до точки, удаленной от него на 25 см. Скорость движения сгустков в ускорителе и пространствен-

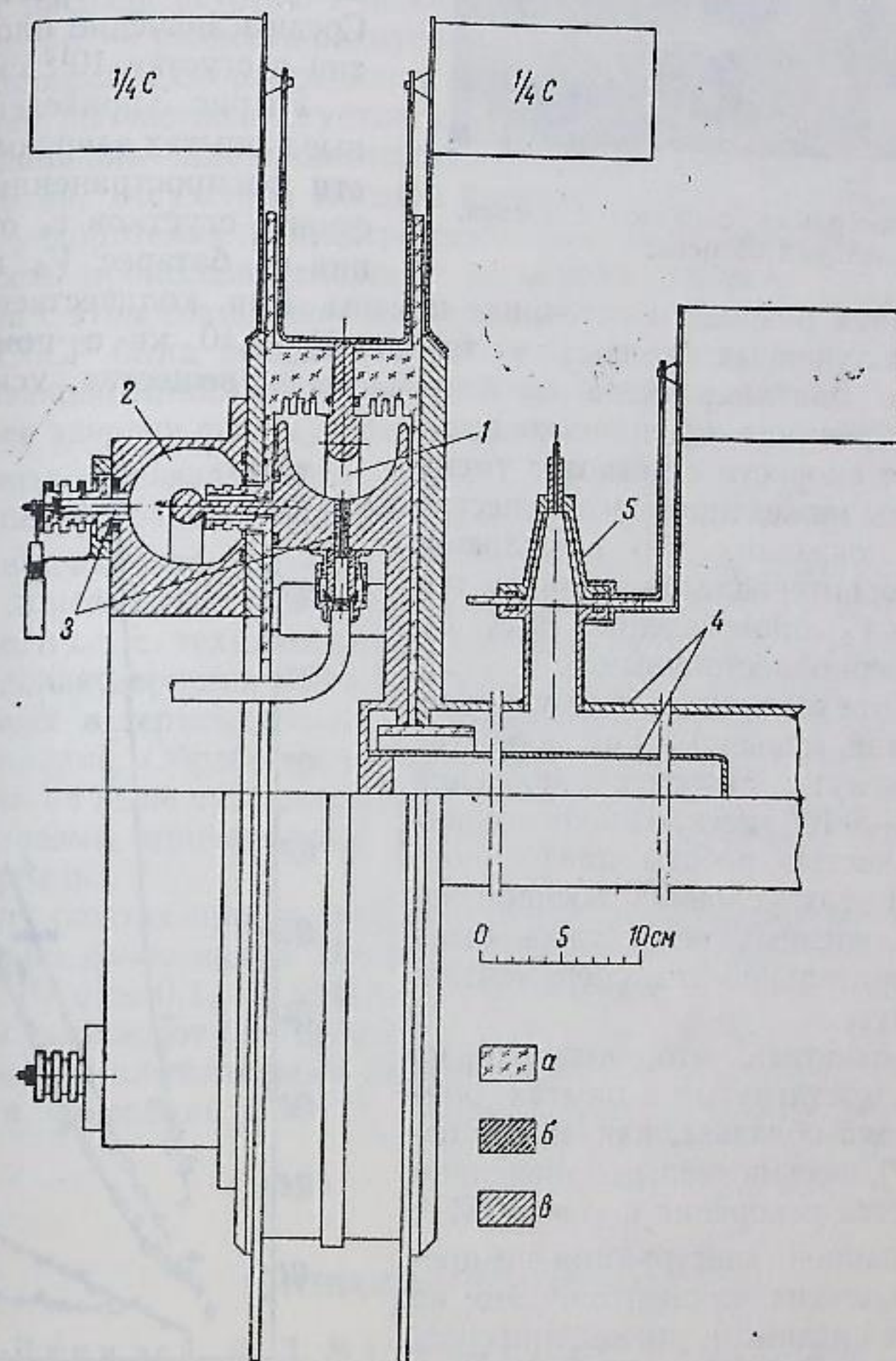


Рис. 1. Схема установки. 1 — основной разрядник, 2 — разрядник закорачивания тока батареи, 3 — поджигающие электроды, 4 — электроды пушки, 5 — плазменный источник. а — оргстекло, б — резина, в — металл

ное распределение в них плотности определялось с помощью зондов направленного потока частиц ⁽⁷⁾, зондов Лэнгмюра и магнитных зондов.

Как выяснилось в процессе наладки ускорителя, оптимальные условия работ конструкции весьма критичны к пространственному распределению инжектируемой в ускоритель плазмы в момент времени, непосредственно предшествующий включению основной батареи. Стабильная работа ускорителя обеспечивалась лишь для случая резко очерченного токнесущего торца сгустка. Измеренная в опытах толщина диффузионного слоя торца, определяемая как расстояние, на котором происходит 10-кратный спад плотности заряженных частиц в инжектируемом сгустке от максимального значения, для случая хорошо отлаженной системы не превышала 3—5 см при средней длине однородной части 30 см.

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с пары электрических зондов, расположенных за выходом ускорителя на расстоянии 68 см друг от друга. Амплитуда сигнала пропорциональна концентрации частиц в сгустке, характерно слабое расплывание продольных размеров плазменного образования, свидетельствующее о малом разбросе продольной компоненты скоростей частиц. Среднее значение плотности частиц в сгустке 10^{14} см $^{-3}$.



Рис. 2. Осциллограмма сигналов с зондов. 1 дел. = 1,65 мсек.

значениях тока разряда в источнике плазмы. Для количественной характеристики полученных кривых в точках $V_6 = 10$ кв с помощью баллистического маятника была оценена масса m_0 вещества, ускоренного в сгустке. Из рисунка виден четко выраженный рост скорости сгустков с уменьшением массы инжектируемого вещества. Измерения показали, что в условиях опыта во всем интервале изменений m_0 при неизменном V_6 произведение $m_0 v_0$ остается примерно постоянным.

При работе с количествами ускоряемого вещества, меньшими 1 мкг, в опытах были достигнуты скорости движения сгустков $3-5 \cdot 10^6$ м/сек, однако в связи с нестабильностью работы плазменного источника в этих условиях воспроизводимость полученных результатов была неудовлетворительной от эксперимента к эксперименту.

Следует отметить, что, несмотря на большие v_0 , достигнутые в опытах, описанная система обладает, как и все остальные (1-4), весьма малым значением к.п.д. процесса ускорения $\eta = m_0 v_0^2 / CV_6^2$, который в данной конструкции не превышает нескольких процентов. Это не является неожиданным, так как при среднем времени ускорения $t \sim l/v_0 \approx 10^{-6}$ сек. время полной разрядки батареи θ , выполненной из стандартных промышленных конденсаторов с большим значением собственной индуктивности, порядка десятков микросекунд, и, естественно, эффективность использования тока при этом весьма мала.

Предпринятая нами попытка увеличить время взаимодействия сгустка с ускоряющим его током за счет наращивания длины ускорителя не привела к положительным результатам. Как показали измерения на 3-метровой модели ускорителя, скорость сгустка растет лишь в начале, на расстоянии 0,6-1,0 м, а затем, после насыщения, начинает медленно спадать. Проведенные нами калориметрические и зондовые измерения скорости энергетических потерь и диффузии в свободно движущемся сгустке показали, что причиной этого несколько неожиданного эффекта является радиальный распад сгустка, при котором частицы плазмы, сталкиваясь с электродами ус-

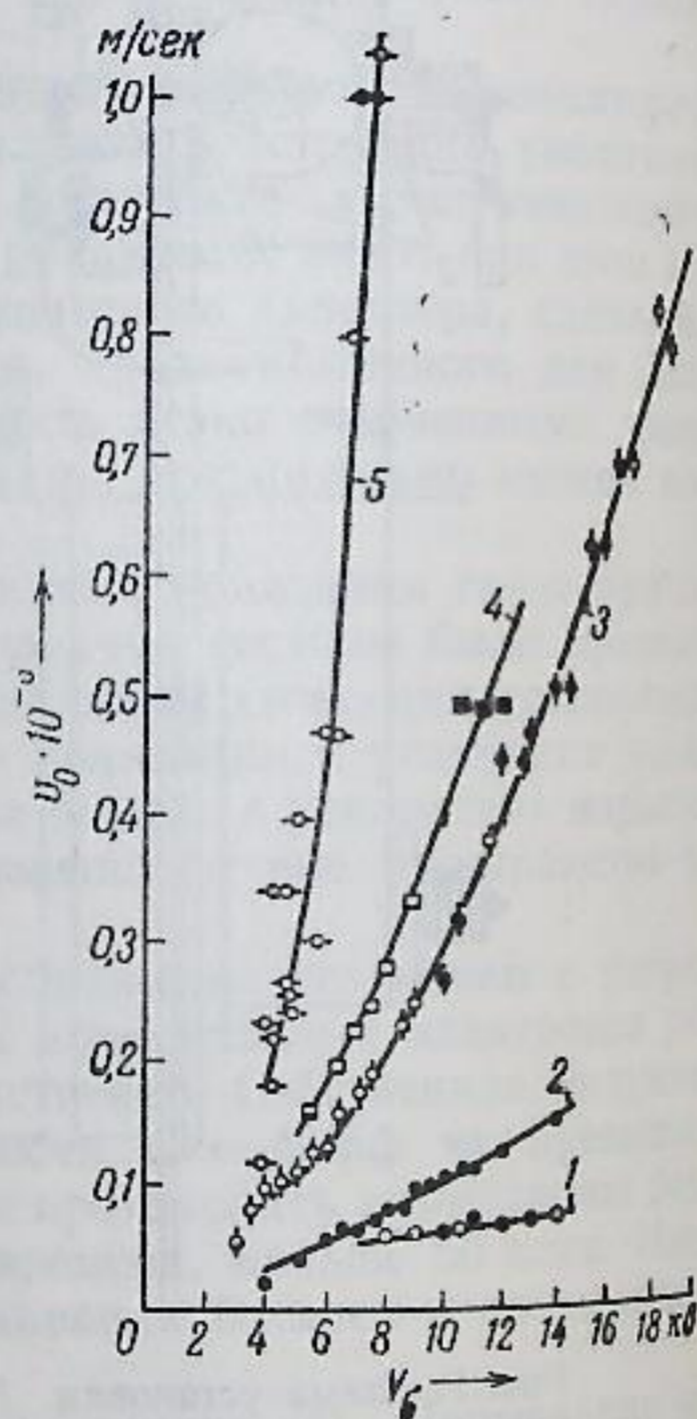


Рис. 3. Зависимость скорости сгустков плазмы от напряжения на батарее. В точке $V_6 = 10$ кв масса сгустка на кривой: 1 — 20 мкг, 2 — 18 мкг, 3 — 5 мкг, 4 — 3 мкг, 5 — меньше 1 мкг.

корителя, быстро теряют свою энергию. Эффект эквивалентен резкому увеличению диссипативных потерь в сгустке, компенсирующих, в конечном счете, работу, совершаемую током. Одновременно с этим происходит интенсивный процесс охлаждения сгустка и ухудшения его проводимости, приводящий к аномально быстрому диффузионному расплыванию токового слоя, обнаруженному ранее в (3).

Время распада сгустка τ может быть оценено как величина порядка $\delta R/v_1$, где δR — разность радиусов коаксиала, $v_1 \approx 10^4$ м/сек — поперечная составляющая скорости ионов в сгустке. Так как радиальная компонента температуры частиц в сгустке, обеспечивающая необходимое из условий скинирования значение проводимости плазмы, не может быть сделана меньше 10-20 эв, отсутствие методов предотвращения радиальной диффузии частиц в ускорителях рельсотронного типа принципиально ограничивает длительность процессов ускорения временами порядка 10^{-6} сек.

В связи с этим совместно с Вычислительным центром Сибирского отделения АН СССР была решена задача оптимизации параметров ускорителя, обеспечивающая минимальное время t_0 передачи запасенной в конденсаторной батарее энергии сгустку. Выполненные на основании теории (4) численные расчеты показали, что при $q = C^2 V_6^2 L_1^2 / 2 m_0 L_0 \approx 12-20$ величина имеет минимум, равный примерно $3/\omega_0$, где L_1 — погонная индуктивность электродов коаксиала, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0 C}$. Принимая время жизни сгустка равным 10^{-6} сек., для собственного периода батареи питания ускорителя получаем весьма жесткое с технической точки зрения условие $\omega_0 \leq 3 \cdot 10^6$ сек $^{-1}$, которое удовлетворяется лишь в лучших образцах конденсаторных батарей, применяемых в термоядерных исследованиях при изучении быстрых процессов в плазме. Обработка имеющихся в литературе данных показывает, что ни одна из ныне существующих установок по электродинамическому ускорению плазмы приведенным условиям не удовлетворяет ни одновременно, ни порознь.

В наших опытах при $m_0 \approx 5$ мкг q оптимально, однако ω_0 в 4 раза меньше предельно допустимого. В одной из наиболее совершенных современных установок (2) $q \approx 0,1$, ω_0 меньше оптимального значения в 3 раза.

Авторы выражают благодарность Г. И. Будкеру за постоянный интерес к работе и ряд плодотворных дискуссий, В. Н. Лукьянову за помощь при проведении измерений и Ю. А. Березину за выполнение расчетов.

Поступило
17 IX 1963

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 В. Ф. Демичев, В. Д. Матюхин, ДАН, 150, 279 (1963). 2 D. M. Wetstone, Phys. Fluids, 5, 981 (1962). 3 L. C. Burkhardt, R. H. Lovberg, Phys. Fluids, 5, 341 (1961). 4 Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов и др., ЖЭТФ, 33, 3 (1957). 5 Ю. С. Азовский, И. Г. Гужовский, Б. Г. Сафонов, В. А. Чураев, ЖТФ, 32, 1050 (1962). 6 Д. Г. Булыгинский, Б. В. Галактионов и др., ЖТФ, 33, 183 (1963). 7 Plasma Eater Measurer Flow, Nukloniks, 20, 58 (1962).