

03;12

Синхронный разгон двух тел мм-размера до гиперзвуковых скоростей в многоканальном рельсовом ускорителе

© Б.Г. Жуков, Р.О. Куракин, В.А. Сахаров, С.В. Бобашев,
С.А. Поняев, Б.И. Резников, С.И. Розов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bgzhukov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2013 г.

Дано описание двухканального электромагнитного рельсового ускорителя макротел оригинальной конструкции. С его помощью реализован синхронный групповой полет в атмосфере со скоростью свыше 4 km/s двух пластиковых кубиков со стороной 2 mm, массой ≈ 0.01 g каждый. Полет тел и картина течения регистрировались методами скоростной фотографии с использованием двухкадровой теневой системы.

Задача разгона и высокоскоростного (более 1 km/s) полета группы тел по близким траекториям актуальна для многих современных направлений науки и техники. К ним относятся, например, ввод топлива в зону термоядерной реакции [1,2], задачи гиперзвуковой внешней баллистики и исследования специфических особенностей кратерообразования и разрушения мишеней при групповом высокоскоростном соударении. Специальный интерес представляет случай последовательного попадания тел в одно и то же место мишени [3]. Организация разгона нескольких тел до примерно одинаковых скоростей ($V > 1$ km/s) и их полета в среде по близким траекториям, а также синхронизация моментов вылета тел из каналов ускорителей являются достаточно сложными задачами, решение которых с использованием газодинамических метателей, например легкогазовых пушек, практически невыполнимо.

Задача синхронного высокоскоростного разгона двух тел сравнительно просто решается, если в качестве прототипа ускорителя использовать разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе компактные рельсотроны, способные разгонять до скоростей свыше 5 km/s пластиковые кубики мм-размера. Отличительной особенностью этих ускорителей,

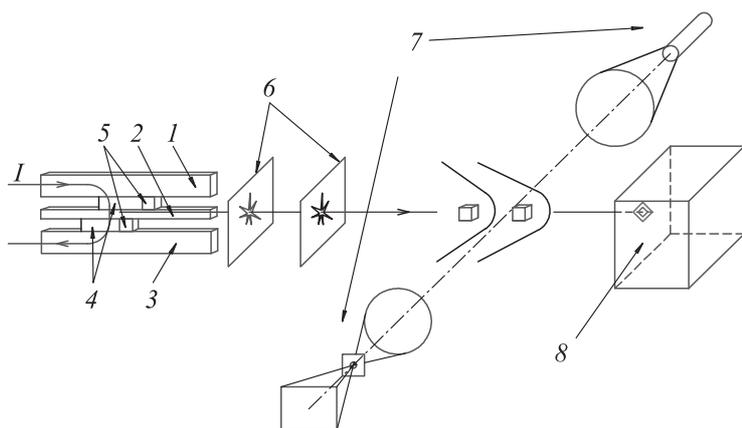


Рис. 1. Схема эксперимента с двухканальным рельсовым ускорителем: 1–3 — электроды рельсотрона (медь), 4 — плазменные поршни, 5 — разгоняемые тела (кубики из поликарбоната), 6 — тонкопленочные датчики, 7 — система двухкадровой лазерной теневой съемки, 8 — мишень, I — разрядный ток через плазменные поршни.

позволяющей преодолевать „катастрофическую“ эрозию электродов на начальных участках разгона, является наложение на канал внешнего импульсного магнитного поля, создаваемого отдельным источником питания [4].

Схема двухканального рельсового ускорителя и измерительная система показаны на рис. 1. Ускоритель имеет три электрода 1, 2 и 3, один из которых 2 является общим для верхнего и нижнего каналов. Оба канала с поперечным сечением 2×2 мм каждый и длиной 200 мм расположены параллельно друг другу со сдвигом осей 5 мм. Внешнее магнитное поле создается двумя витками, расположенными симметрично по бокам сборки (на рисунке не показаны). Ускорители подключены последовательно к одному источнику энергии, что обеспечивает равенство токов в плазменных поршнях 4 и в силу этого равенство амперовых сил, действующих на тела 5 в каждом канале. Во время работы электрод 2 находится под плавающим потенциалом. Разгоняемые тела 5 изготовлены из поликарбоната и выполнены в форме кубиков со стороной 2 мм и массой примерно 0.01 г. Для

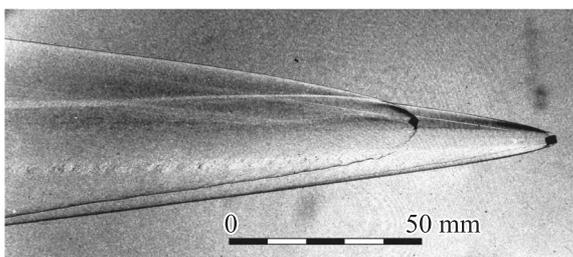


Рис. 2. Теневые фотографии группового полета двух 2-мм кубиков в воздухе. Скорость лидирующего кубика 4.2 км/с. Время экспозиции кадра 20 нс.

питания каналов ускорителя и витков, создающих внешнее магнитное поле, используются накопители энергии в виде LC -линий, аналогичные описанным в работе [4]. Осциллограммы токов и индукции магнитного поля приведены там же (см. рис. 2 работы [4]). Для инициации разряда на боковые стенки из оргстекла у задних торцов кубиков наносятся тонкие полоски из графита. Амплитуда разрядного тока через каналы достигает ≈ 80 – 90 кА. Длина разгона, как и в [4], составляет 160 мм.

Для определения скорости лидирующего тела применяется система 6 из двух тонкопленочных датчиков [5], отстоящих друг от друга на расстоянии 70 мм. Первый датчик располагается в 170 мм от выхода из каналов. Далее на расстоянии 500 мм от выходных сечений располагается двухкадровая оптическая теневая система 7 с полем зрения 200 мм. Источниками света системы служат два импульсных рубиновых лазера с длительностями вспышек ≈ 20 нс. Варьированием моментов светового импульса каждого лазера удается получить в одном эксперименте два теневых изображения летящих тел и определить скорость движения каждого из них. На расстоянии 900 мм от выходных сечений каналов располагается массивная мишень 8 из алюминия. По размерам и форме кратеров на мишени можно оценивать скорости тел и их взаимное расположение в момент столкновения с мишенью.

На рис. 2 представлена теневая фотография синхронного группового полета в атмосферном воздухе двух тел с гиперзвуковой скоростью. Скорость первого (лидирующего) тела, полученная по показаниям пленочных датчиков, составляет 4.2 км/с ($M \approx 13$). В момент съемки второе тело отстает от лидера на расстояние $\Delta X_1 \approx 36$ мм. На

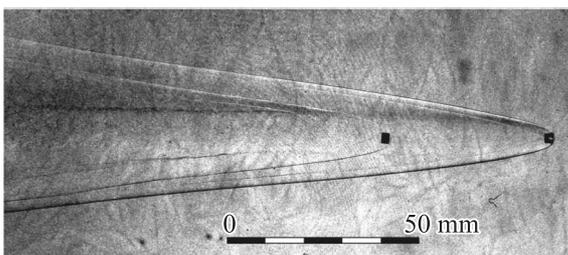


Рис. 3. Теневые фотографии группового полета двух кубиков по одной траектории „след в след“. Скорость лидирующего кубика 4.3 км/с. Время экспозиции кадра 20 нс.

втором кадре, снятом теневой системой через $\Delta t = 9.5 \mu\text{s}$, картина полета сохранилась, при этом расстояние по траектории между лидером и вторым телом увеличилось примерно на 10% и составило $\Delta X_2 \approx 39\text{--}40 \text{ mm}$. Газодинамические возмущения от лидера в зоне движения второго тела уже достаточно малы, и их учет не способен объяснить наблюдаемое увеличение дистанции между телами. Скорее всего, второе тело покидает свой канал со скоростью несколько меньшей, чем скорость первого тела. По приведенным выше данным можно оценить разницу в скоростях, которая составляет $\Delta V_{1,2} \approx 0.3\text{--}0.4 \text{ km/s}$. За время свободного полета тел до поля зрения теневой системы ($\sim 10^{-4} \text{ s}$) расстояние между телами становится $\approx 30\text{--}40 \text{ mm}$ (рис. 2). Вследствие равенства амперовых сил, действующих на плазменные поршни в обоих каналах, различие в ускорениях разгоняемых кубиков можно связать с некоторой (неконтролируемой) разницей в их массах ($\sim 10\%$).

Необычная картина наблюдается в одном из экспериментов (рис. 3), где траектории свободного полета обоих тел практически совпадают — второе тело движется за лидирующим практически „след в след“. На втором теневом снимке через $\Delta t = 8.5 \mu\text{s}$ расстояние между телами по траектории не изменяется, в отличие от случая, рассмотренного ранее (рис. 2). Полет „след в след“ происходит и в дальнейшем, и оба тела ударяют в одно и то же место мишени, расположенной в конце трассы на расстоянии 0.6 м от поля наблюдения. Время между соударениями кубиков с мишенью составляет $\approx 10 \mu\text{s}$. Весьма существенно, что размер и форма кратеров при последовательном ударе двух тел в одно

и то же место заметно отличаются от кратеров, создаваемых летящими с той же скоростью одиночными телами с массой, примерно равной удвоенной массе кубика. Это объясняется тем, что гидродинамические и термодинамические параметры вещества, разлетающегося после удара первого тела, не успевают релаксировать за время $\sim 10 \mu\text{s}$. В результате разлет вещества и распространение ударных волн в мишени и ударнике при первичном и повторном ударе происходят в различных условиях.

Заметим, что идея последовательного включения ускорителей в общую цепь питания впервые была использована в экспериментах по встречному соударению двух тел размером 2 mm [6]. В этом случае дульные срезы двух идентичных ускорителей располагались навстречу друг другу на расстоянии 120 mm. Достигнутый уровень синхронизации позволил зафиксировать процесс столкновения двух тел с относительной скоростью 10 km/s в поле наблюдения всего 100 mm [6].

В заключение отметим, что двухканальный ускоритель, разработанный на базе одноканального малогабаритного рельсотрона [4] в сочетании с системой измерения скорости движения тел [5] и фотографирования объектов в полете, является компактным лабораторным устройством, пригодным для исследования многих задач технической физики.

Работа поддержана Программами президиума РАН П-02 и П-25 и грантом РФФИ № 12-08-01050.

Список литературы

- [1] Combs S.K. et al. // Fusion Engineering and Design. 2012. V. 87. P. 634–640.
- [2] Кутеев Б.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 63–67.
- [3] Williams A.E., Persechino M.A. // Intl. J. Impact Engng. 1987. V. 5. P. 709–728.
- [4] Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Сахаров В.А., Бобашев С.В., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 12. С. 63–70.
- [5] Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Сахаров В.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 45–48.
- [6] Drobyshevski E.M., Zhukov B.G., Sakharov V.A. et al. // Intl. J. Impact Engng. 1995. V. 17. P. 285–290.