

12

## Динамика ускорения тела в канале рельсотрона

© Ю.Г. Гендель, И.С. Глушков, Ю.А. Кареев, А.А. Николашин,  
В.П. Новиков, Ю.А. Халимуллин

ГНЦ РФ „Троицкий институт инновационных  
и термоядерных исследований“, Москва  
E-mail: kareev@triniti.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2012 г.

Представлен анализ результатов эксперимента по ускорению алюминиевого тела с массой около 3 г в рельсотроне со стальными рельсами, поставленного для исследования процессов в высокоскоростном контакте при скорости тела, близкой к переходной скорости, обусловленной эффектом скоростного скинирования тока. При отсутствии сильноточных дуг получена скорость тела 1.2 km/s, для чего осуществлялось прижатие движущегося тела к рельсам. Определена сила торможения при движении тела в канале.

Для бездугового ускорения токопроводящих тел в рельсотроне должны быть выполнены два требования:

1) обеспечен надежный электрический контакт тела с рельсами, который достигается

— для тел С-образной формы путем электродинамического прижатия хвостовиков к рельсам;

— для тел, имеющих форму параллелепипеда, путем уменьшения расстояния между контактными поверхностями рельсов в направлении движения тела.

2) Скорость  $V$  тела не превышает величину переходной (transition) скорости  $V_{tr}$ , обусловленной эффектом скоростного скинирования тока (VSE) [1], при которой начинается испарение жидкого контактного слоя алюминия в задней части тела.

Переходная скорость для конкретного сочетания используемых материалов тела и рельсов зависит [2,3] от величины геометрического параметра  $G$  рельсотрона, определяемого как

$$G = \frac{L'd^2}{M}, \quad (1)$$

где  $L'$  — градиент индуктивности рельсотрона,  $d$  — размер контактной поверхности тела в направлении магнитного поля,  $M$  — масса тела.

Анализ результатов эксперимента [2] показал, что при использовании медных рельсов с графитовым контактным слоем скорость алюминиевого тела достигла значения 4.3 km/s, превысив  $V_{tr}$  в 1.6 раза. Данный факт позволяет второе требование для рельсов с графитовым слоем рассматривать лишь как необходимое, но недостаточное условие для перехода квазиметаллического контакта в дуговой.

Проведено экспериментальное исследование ускорения током алюминиевого тела с массой около 3 g, имеющего форму параллелепипеда, в рельсотроне со стальными рельсами, токовым импульсом синусообразной формы с максимумом 252.2 kA в момент времени 341  $\mu$ s и равным 0 в моменты времени 0 и 900  $\mu$ s. Целью эксперимента являлись реализация режима ускорения с достижением  $V_{tr}$  и исследование характера контакта при  $V \leq V_{tr}$  и при  $V > V_{tr}$ .

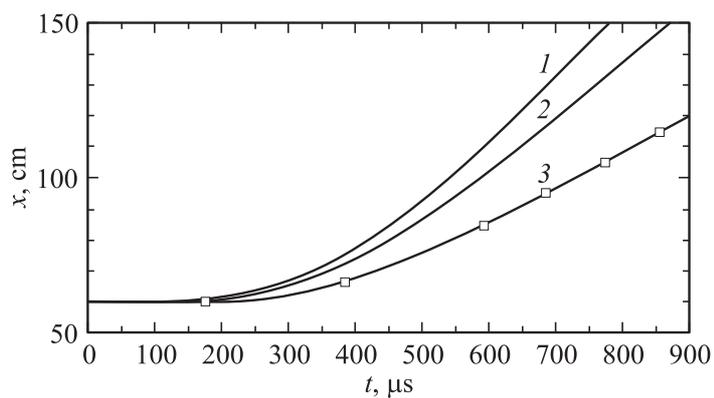
Для определения скорости  $V_{tr}$  нашего рельсотрона воспользуемся [3] формулой

$$V_{tr}(k) = V_{tr}(1)k^y, \quad (2)$$

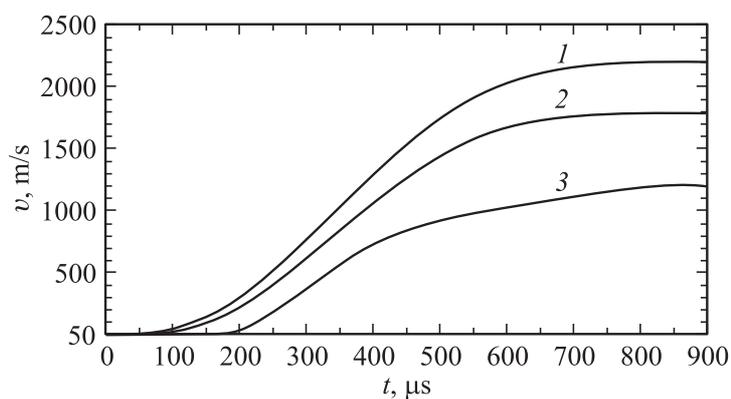
где  $k = G/G_0$ ,  $G_0 = 2.83 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{ м/кг}$ ,  $V_{tr}(1) = 1.49 \text{ км/с}$ ,  $y = 0.50$ .

При подстановке в формулу (1)  $L' = 0.52 \mu\text{Н/м}$ ,  $d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $M = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  получим  $G = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{ м/кг}$ ,  $k \approx 0.5$ ,  $V_{tr} = 1.05 \text{ км/с}$ . Полученное значение  $V_{tr}$  справедливо для случая двумерного распределения тока, когда размер  $d$  много больше других размеров тела. Для эксперимента [2] установлено, что трехмерные эффекты могут быть учтены путем замены параметра  $d$  в (1) на  $d_{ef} = dK_3$ , где коэффициент  $K_3 = 1.58$ . Для рельсотрона со стальными рельсами поправка на трехмерность даст увеличение  $G$  в  $K_3^2$  раз до значения  $3.5 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{ м/кг}$  и  $V_{tr}$  в  $K_3$  раз, до значения  $V_{tr} = 1.66 \text{ км/с}$ .

В канале рельсотрона тело, сжимаемое рельсами до предела текучести, размещалось на расстоянии 0.6 м от начала рельсов, в котором расстояние между рельсами составляло 16.22 mm. На расстоянии 1 м от начала рельсов зазор между рельсами составлял 16.10 mm. Для регистрации положения тела в канале при ускорении на расстоянии 0.665, 0.85, 0.95, 1.05 и 1.15 м от начала рельсов были размещены магнитные датчики. В эксперименте измерялись напряжения на входных и выходных концах рельсов и ток рельсотрона.



**Рис. 1.** Зависимость перемещения тела от времени: 1 — при отсутствии трения; 2 — при трении, зависящем от силы прижатия к рельсам пропорционально току с коэффициентом пропорциональности  $9.8 \text{ N/kA}$ ; 3 — согласно показаниям магнитных зондов.

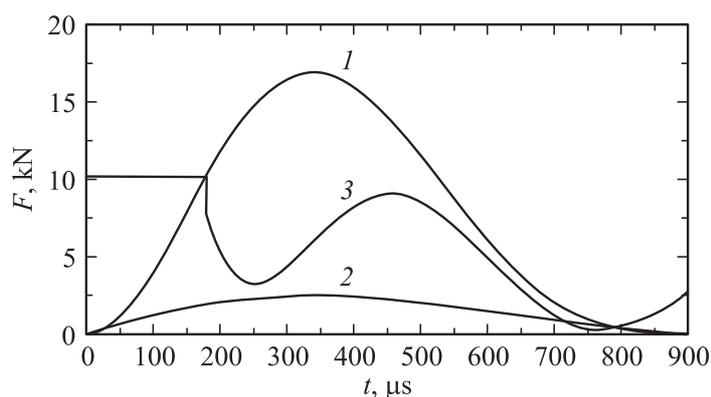


**Рис. 2.** Зависимость скорости тела от времени: 1 — при отсутствии трения; 2 — при трении, зависящем от силы прижатия к рельсам пропорционально току с коэффициентом пропорциональности  $9.8 \text{ N/kA}$ ; 3 — производная кривой 3 рис. 1.

Расчеты скорости и перемещения тела в рельсотроне в предположении отсутствия трения тела при ускорении показали, что в момент времени  $770 \mu\text{s}$ , пройдя путь  $0.9 \text{ m}$ , тело вылетит из ствола со скоростью  $2.2 \text{ km/s}$ . Положение и скорость тела в зависимости от времени показаны соответственно на рис. 1 (кривая 1) и 2 (кривая 1). На этих же рисунках кривые 2 показывают рассчитанное изменение положения и скорости тела при наличии трения о рельсы. Сила прижатия тела к рельсу, что необходимо для предотвращения дугообразования в контакте, пропорциональна величине протекающего тока с коэффициентом пропорциональности  $9.8 \text{ N/kA}$  [4]. Построенные по показаниям магнитных зондов положение тела и его скорость (производная перемещения по времени) в зависимости от времени показаны на рис. 1 (кривая 3) и на рис. 2 (кривая 3).

Видно значительное расхождение кривых, полученных в эксперименте, от соответствующих расчетных значений. Выходная скорость тела составила примерно  $1.2 \text{ km/s}$ . При осмотре поверхности рельсов обнаружены следы алюминия практически на всем пути перемещения тела, а в месте старта они оказались и за местом стояния тела, что похоже на картину, описанную в работе [5]. Масса извлеченного из ловушки тела оказалась меньше первоначальной на  $1 \text{ g}$ . В то же время вид кривых напряжения на входе и выходе рельсов, а также сигналы магнитных зондов исключают предположение о наличии сильноточных электрических пробоев в канале рельсотрона. Поэтому низкую выходную скорость тела можно объяснить потерей импульса из-за трения контактной поверхности тела о рельсы. Известное из эксперимента изменение тока, перемещения и скорости тела в предположении равномерной по длине перемещения потери массы тела позволяет рассчитать изменение силы трения в процессе движения. Результаты расчета приведены на рис. 3.

На время  $180 \mu\text{s}$  толкающая электромагнитная сила (кривая 1) достигает величины  $10.1 \text{ kN}$ , после чего начинается движение тела, зажатого между рельсами. На преодоление силы торможения затрачивается энергия  $Q_f$ , равная интегралу от произведения силы торможения и скорости тела на временном интервале от  $180$  до  $800 \mu\text{s}$ , которая равна  $2230 \text{ J}$ . При отсутствии этих потерь скорость тела могла бы быть на  $400 \text{ m/s}$  больше. Энергия  $Q_f$  расходуется на разогрев материалов рельсов и тела в зоне их контактирования при движении, что привело к потере трети массы тела.



**Рис. 3.** Зависимость толкающей силы и сил торможения от времени: 1 — сила, толкающая тело; 2 — тормозящая сила, вызванная силой прижатия тела к рельсу, зависящей от величины тока с коэффициентом пропорциональности 9.8 N/kA; 3 — тормозящая сила в эксперименте.

Правильность выводов о физике процесса ускорения тела подтверждается следующими экспериментальными результатами:

— За время стояния в течение  $180 \mu\text{s}$  джоулева диссипация в теле составляет 200 J. При этом толщина скин-слоя 2–3 мм, а его температура примерно  $300^\circ\text{C}$ . Следы алюминия, обнаруженные в месте старта тела, обусловлены наличием микродуг, обеспечивающих протекание тока в области контакта тела с рельсами.

— Суммарная мощность тепловыделения в области контактов алюминиевого тела со стальными рельсами, равная произведению силы торможения и скорости тела, достигает максимума, равного 7 MW, в момент времени  $450 \mu\text{s}$ . Потери массы тела имеют место на временном интервале от 250 до  $800 \mu\text{s}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.518.11.7012 от 12 мая 2011 г. по мероприятию 1.8 ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы“.

**Список литературы**

- [1] *Базилевский В.П., Заятдинов Р.М., Кареев Ю.А.* // Матер. 2-го Всесоюзн. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. Новосибирск, 1991. С. 285–303.
- [2] *Glushkov I.S., Kareev Yu.A., Kotova L.G., Kuharenko A.T., Halimullin Yu.A.* // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 549–553.
- [3] *Kareev Yu.A., Kuharenko A.T.* // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. N 1 (pt 1) P. 409–412.
- [4] *Marshall R.A.* // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 125–128.
- [5] *Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Куракин З.О., Розов С.И., Белобородый М.В., Латыпов В.Г.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 6. С. 89–94.