

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАЗГОН ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕЛ В РЕЛЬСОТРОНЕ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Э. М. Дробышевский, Б. Г. Жуков, Е. В. Назаров, С. И. Розов,
В. М. Соколов, Р. О. Куракин, М. А. Савельев, С. В. Юферев*

Описаны эксперименты с системой типа рельсотрон для неразрушающего МГД ускорения плазменным поршнем диэлектрических тел до скоростей, когда кинетическая энергия, приходящаяся на каждый атом, становится сравнимой или больше энергии химической связи.

В приближении постоянства тока получено простое выражение однозначно связывающее независимо от темпа разгона и конечной скорости тела длину пути ускорения с количеством электричества, пропускаемого через систему. Использование длинной L - C -линии, совмещающей достоинства емкостного и индуктивного накопителей энергии, позволило проводить разгон тела в таком режиме постоянного тока (ускорения) и достичь высокой эффективности преобразования накопленной энергии в кинетическую на сравнительно коротком пути. При энергии ~ 200 — 300 кДж, запасенной в конденсаторной батарее, тело массой 1.6 — 2 г ускоряется на длине 40 — 45 см до скорости 4 — 4.5 км/с.

Благодаря упрочнению материала тела (поликарбонат) под действием высокого давления со стороны плазменного поршня удалось реализовать почти постоянное ускорение $\sim 3 \cdot 10^6 g$ и работать при погонной плотности тока, близкой к пределу взрывного испарения электродов. Определена величина этого предела (~ 60 кА/мм).

Причиной наблюдаемого ограничения скорости в наших условиях являются не мощные пробои в задней части системы, а, скорее, распад плазменного поршня из-за жестокости к продольной стратификации

1. Современное состояние проблемы

Одной из постоянно стоящих перед технической физикой фундаментальных проблем является достижение максимально возможной концентрации энергии на единицу массы и связанная с нею проблема транспортировки максимальных потоков энергии.

В последние годы в качестве средства для решения поставленной задачи наряду с лазерным излучением и пучками частиц рассматривается возможность неразрушающего ускорения твердых тел до скоростей в десятки и даже сотни км/с. При этом потоки энергии на см^2 должны выйти на терраваттный уровень, приближаясь к потокам, реализуемым при ядерных взрывах [1]. Для ускорения до больших скоростей твердых тел разной массы (от долей грамма до килограммов) рассматриваются два пути: легкогазовые системы, в том числе с электроподогревом, и электромагнитные ускорители.

Легкогазовые системы имеют два существенных ограничения: во-первых, ускорение тела трудно регулируется по длине канала, оно велико вначале и довольно быстро падает по мере продвижения тела из-за адиабатического охлаждения толкающего газа, во-вторых, имеются принципиальные трудности, обусловленные конечностью скорости звука и истечения газа. Реально такие системы на скорости 5 — 8 км/с (последняя цифра близка к достигнутому максимуму [2, 3]) имеют длину во много метров, сложны и дороги в обслуживании.

Более перспективным представляется пока электродинамическое ускорение [4]. Наиболее разработана и испытана на сегодня концепция рельсо-

тронного ускорителя, основанная на использовании пондеромоторных сил, действующих на проводник, по которому течет ток — контур с током всегда стремится расширяться.

Реально ускоритель представляет собой две направляющие, замкнутые токопроводящей перемычкой (рис. 1). При подведении тока к концам электродов-рельсов возникает сила, действующая на перемычку и ускоряющая ее. Перемычка может быть металлической или диэлектрической. В первом случае возникает проблема надежности и перегрева скользящих контактов. Во втором случае диэлектрик ускоряется давлением плазмы, которая генерируется на его тыльной стороне током газового разряда. В этом случае говорят об ускорении плазменным поршнем. Последний вариант представляется наиболее перспективным для получения максимальных скоростей.

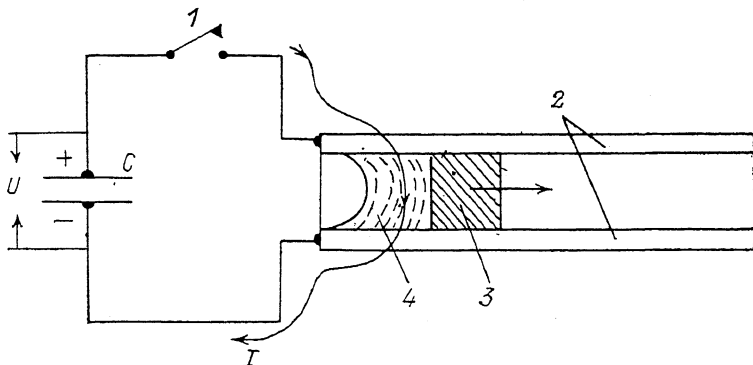


Рис. 1. Схема рельсотронного ускорителя твердых тел с помощью плазменного поршня.
1 — коммутатор; 2 — «рельсы», 3 — ускоряемое тело, 4 — плазменный поршень.

Толчком к интенсивному развитию исследований по ускорителям рельсотронного типа послужила работа Рашлейха и Маршалла в Австралийском университете, которые в 1977 г. достигли исключительно высокого по тому времени

Таблица 1

Максимальные результаты экспериментов по неразрушающему МГД ускорению твердых тел плазменным поршнем в рельсотроне

Работы	Масса тела, г	Скорость, км/с	Длина ускорителя, м	Энергия в накопителе, кДж	КПД системы тело, накопитель, %
[5]	3	5.9	5	540000	0.01
[13]	1.3	4.5—5	0.9	255+ВВ	5.1—6.4
[14]	0.75	0.87	1	31	0.92
[15]	0.3	3.3	0.8	150	1.1
[16]	275	1.5	4	7600	4
[17] {	5	3.2	4	100	25
	10	2.6	4	147	22.1
[10]	2.5	8.5	3.65	460	19.7
[18]	7.2	1.8		300	3.9
[19] {	1	6.6	5.2	625	3.5
	4	3	1.65	230	7.8
{11, 12} {	2	8	3.7	660	9.7
	4	6	3.7	660	10.9
			(5 ступеней)		
[20]	106	3.1		3800	13.3
[21] {	4.44	2.01	2.4	128	7
	20	1.5	3	200	11.3
[22]	0.9	6	0.5	787	2
Данная {	2	3.9	0.45	200	7.4
работа {	1.6	4.5	0.45	250	6.4

результата: на системе с плазменным поршнем с длиной рельсов 4 м тело массой 3 г было ускорено до 5.9 км/с [5]. С этого времени ряд крупнейших научных центров в мире начал разрабатывать собственные системы ЭМУ, проводя исследования широким фронтом в научном и техническом планах.

Состояние проблемы на конец 1981 г. подробно освещено в обзоре Хоука и др. [6], где дана также простая теория процесса ускорения. В то время максимально достигнутая в результате применения изоэренной техники скорость составляла около 10 км/с [7]. Здесь танталовый диск в поликарбонатной обойме, которая целиком разрушилась в эксперименте (общая масса 2.8 г), ускорялся в рельсотроне длиной 4.9 м со взрывомагнитным генератором. Основной же диапазон достигнутых скоростей — 4—6 км/с.

Состояние на конец 1983 г. отражено в трудах двух конференций [8, 9]. Полученные скорости лежат в пределах 2.5—4.5 км/с (табл. 1). Выделяется результат Тауэра и Хейта [10] — скорость 8.5 км/с при массе ускоряемого тела 2.5 г.

Пожалуй, основное достижение, представленное на проходившем в апреле 1986 г. в Остине (Техас) III Симпозиуме по технике электромагнитного ускорения — это запуск Хэйтом и Тауэром [11] пятиступенчатого рельсового ускорителя, что позволило сильно поднять полный КПД при той же длине и энергии (табл. 1) [12]. Кроме того, в лаборатории Техасского университета в Остине на коаксиальном рельсотроне плазменный сгусток массой около 0.08 г был ускорен до скорости ~40 км/с [23].

До недавнего времени вопрос об эффективности преобразования электрической энергии в кинетическую энергию тела не считался актуальным. Исследователи направляли свои усилия на достижение максимально возможных скоростей. Полный КПД системы Рашлейха и Маршалла (в предположении, что была использована вся энергия генератора) составлял ~0.01 % [5]. Согласно теоретическим оценкам обзора [6], для системы накопитель—тело удовлетворительным представляется КПД ~10 % для одноступенчатого ускорителя и ~20 % — для десятиступенчатого.

Обычно используются емкостные накопители с полной энергией порядка 1 МДж. Тогда для стандартно используемых тел с массой 1—2 г при скорости ~6 км/с полный КПД системы накопитель—тело составляет ~2—3 %. Эта цифра является превалирующей в реально осуществленных ранее экспериментах (табл. 1). В последние годы за рубежом КПД поднят в 2—3 раза (до 7—10 %). Любопытно, что в [17] использовалась сравнительно низковольтная (всего 800 В) батарея электролитических конденсаторов. В работе [10] достигнута самая высокая скорость без разрушения твердого тела — 8.5 км/с при высоком КПД. Правда, последние результаты находятся в некотором противоречии с более поздними результатами этих же авторов [11], когда они сравнивают КПД одно- и пятиступенчатых систем (табл. 1).

Так как много энергии теряется в токоподводящих цепях и коммутирующих устройствах, то иногда КПД вычисляют не по отношению к полной энергии, запасенной в накопителе, а по отношению к энергии, подведенной непосредственно к электродам ускорителя. Здесь числа более солидные — 10—25 % [22].

Наша задача заключалась в создании удобного для использования в лабораторных условиях ускорителя для исследований экстремальных теплофизических свойств вещества и обтекания тел газом, когда начинают играть роль диссипация и ионизация, т. е. когда числа Маха (отношение скорости тела к скорости звука в среде) составляют $M=10-15$. Для воздуха это соответствует скоростям в 3.5—5 км/с. Поэтому требования удобства в эксплуатации и компактности, а значит, и повышения полного КПД системы играли существенную роль. В связи с этим было важно также выяснить, при каких предельно реализуемых параметрах может осуществляться само ускорение.

В статье отражено состояние работ и результаты, достигнутые нами к концу 1988 г. [24].

В январе 1989 г. опубликованы материалы IV Симпозиума по технике электромагнитного ускорения [25]. Они не демонстрируют существенных сдвигов в этой области.

2. Электромагнитный ускоритель в режиме постоянного тока. Общая идеология

Если пренебречь трением и другими потерями, то тело постоянной массы m в рельсотронном ускорителе с погонной индуктивностью электродов L' за время t приобретает скорость

$$V = \frac{L'}{2m} \int_0^t I^2 dt = \frac{L'}{2m} \int_0^t \left(\frac{dQ}{dt} \right)^2 dt, \quad (1)$$

где Q — количество электричества, перенесенное ускоряющим током.
В простейшем случае $I = \text{const}$

$$V = \frac{L'}{2m} I^2 \Delta t = \frac{L' Q^2}{2m \Delta t}, \quad (2)$$

где Δt — время протекания постоянного тока.

Эта скорость набирается на длине

$$S = V \Delta t / 2 = L' Q^2 / 4m, \quad (3)$$

которая, на первый взгляд, парадоксальным образом не зависит от времени разряда (и самой конечной скорости).

Однозначная связь длины канала при его фиксированной геометрии (L') только от количества электричества и массы тела говорит о том, что конечная скорость тела зависит только от темпа, времени разряда источника энергии, содержащего данный заряд Q . И если, скажем, при разряде некоего источника за 1 с будет получена скорость всего 1 м/с, то при разряде того же источника через ту же систему за 100 мкс в идеале должна получиться скорость тела 10 км/с.

Формула (3) согласует параметры канала с параметрами источника энергии.

Если накопителем энергии является конденсаторная батарея, то $Q_0 = C U_0$, где C — емкость батареи, U_0 — начальное напряжение на ней. Тогда КПД преобразования электрической энергии в кинетическую энергию тела $mV^2/2$ в режиме постоянного тока будет

$$\eta = \frac{L'^2 C \kappa^4 Q_0^2}{4m \Delta t^2} = \frac{L' C \kappa^2}{2 \Delta t} V = \frac{L'^2 C \kappa^2}{4m} I^2, \quad (4)$$

где $\kappa = Q/Q_0 < 2$ — отношение полного количества электричества Q , протекшего через систему в режиме постоянного тока, к запасенному Q_0 .

Из выражения (4) следует, что η растет с уменьшением массы тела и времени ускорения, т. е. с возрастанием скорости тела, пока не включаются достаточно мощные диссипативные процессы (частично они учтены уже в κ).

Каковы же пределы ускорения тела и повышения КПД процесса в реально мыслимых лабораторных условиях? Обычно считается, что величина ускорения ограничена как минимум двумя факторами: прочностью тела и величиной допустимого тока. Расплавление меди электродов, согласно [6], происходит при погонной плотности тока $i_c \approx 43$ кА/мм. Тело разрушается при ускорении, определяемом как

$$a_{\max} = \sigma / \rho h. \quad (5)$$

Например, для поликарбоната (лексан и т. п.) предел прочности $\sigma = 7 - 9$ кГ/мм² [26, 27]. Тогда при $\rho = 1.2$ г/см³ и длине тела $h = 1.2$ см $a_{\max} = 6 \cdot 10^5$ г.

Рассмотрим для иллюстрации конкретный пример. Пусть ускоряется тело кубической формы с ребром $h = 1.2$ см, $m = 2$ г на длине $S = 0.5$ м. Стандартно $L' = 0.25 - 0.35$ мкГ/м, примем $L' = 0.3$ мкГ/м. Тогда из (3) следует, что потребное $Q = (4mS/L')^{1/2} = 115$ Кл, т. е. при $\kappa \approx 1$ необходима батарея с $C = 23$ мФ, заряженная до $U_0 = 5$ кВ. Запасенная в ней энергия составит $W = 290$ кДж.

При $a_{\text{max}}=6 \cdot 10^5 \text{ g}$ на длине $S=0.5 \text{ м}$ достигается скорость $V=2.43 \text{ км/с}$ за время $\Delta t=410 \text{ мкс}$. При этом $\eta=2 \%$ всего, а $I=280 \text{ кА}$, т. е. $i=23 \text{ кА/мм}$. Мы видим, что в данном примере ограничение на скорость налагается прочностью ускоряемого тела, тогда как ток мог бы быть увеличен еще вдвое. Для увеличения скорости до $\sim 4.8 \text{ км/с}$ следовало бы увеличить длину электродов до $S=2 \text{ м}$ и соответственно вдвое емкость батареи. При этом полный КПД системы должен возрасти в идеале до 4% .

Следует отметить, что указанные выше ограничения ускорения, обусловленные прочностью тела и нагревом электродов, едва ли могут считаться однозначно проверенными экспериментально. Поэтому одной из целей нашей работы было достижение (и фиксация) предельных параметров ускорения.

3. Электрическая цепь и конструкция ускорителя

Простое подключение емкостной батареи к ускорителю, когда ток нарастает до максимума, а потом начинает спадать, не позволяет реализовать максимальный режим в продолжении всего процесса ускорения. Чтобы обеспечить постоянство тока разряда, обычно используют индуктивные накопители, как это сделано в пионерской работе [5]. При этом приходится вводить дополнительные коммутации, что усложняет систему и ее эксплуатацию, понижает результирующий полный КПД.

В последние годы для создания импульсов тока заданного профиля большое внимание обращено на разработку так называемых «компульсаторов» — электрических машин типа униполярных генераторов с дополнительными обмотками, компенсирующими изменение магнитного потока в них со временем [28]. Однако время вывода энергии из них довольно велико (в лучших известных конструкциях $\sim 1 \text{ мс}$), а максимальное значение выдаваемой за отдельный импульс энергии исчисляется пока первыми сотнями кДж.

Для обеспечения профиля тока, близкого к постоянному, мы воспользовались хорошо известной в технике схемой так называемой длинной L — C —линии. Как ни удивительно, мы не нашли в доступной литературе до конца 1988 г. примера ее использования при электромагнитном ускорении твердых тел, хотя подчас рассматриваются и экспериментально исследуются гораздо более изощренные L — C —схемы, например типа «бегущей волны» [11, 29]. Пример использования длинной L — C —линии в ускорительной системе опубликован лишь в [30].

Достоинством длинной линии является возможность получения очень больших величин силы тока (до мегаамперных значений), в пределе ток ограничивается только величиной собственной индуктивности используемых конденсаторов.

Большое преимущество заключается также в возможности ограничиться в схеме лишь одним коммутатором — замыкателем. В нашем случае включение тока инициировалось вспомогательным искровым разрядом, поджигавшимся за ускаряемым телом после зарядки батареи, непосредственно подсоединенной к электродам ускорителя, до желаемого напряжения. Тем самым была исключена обычно применяемая [5, 22] перемычка из фольги или проволоочки, вещество которой при взрыве исходно формирует за телом плазменный поршень. На взрыв такой перемычки тратится до $\sim 10 \text{ кДж}$ энергии.

Характерная осциллограмма рабочего тока приведена на рис. 2. Время нарастания тока составляет $\sim 30 \text{ мкс}$, потом в течение 150 — 185 мкс (в зависимости от числа конденсаторных банок и подключенных индуктивностей) ток практически постоянен, после чего за $\sim 50 \text{ мкс}$ спадает. При этом батарея перезаряжается до напряжения, достигающего 20 — 25% от исходного. Если учесть, что величина Q в выражениях (2)—(4) соответствует только заряду, переносимому во время протекания постоянного тока, то при оценках с точностью до 10% допустимо принять, что $Q \approx Q_0$ и $\kappa \approx 1$.

Поскольку электроды и диэлектрические стенки ускоряющей системы при исследованных нами режимах, близких к предельным, неизбежно необратимо деформируются и разрушаются, то была использована самая простая.

в изготовлении и легко разбирающаяся конструкция типа описанной в работах [31,32].

Поперечное сечение электродов-рельсов имело Т-образную форму. Зазор между электродами фиксировался с точностью ~ 0.02 мм прозрачными диэлектрическими стенками канала. Вся сборка заключалась между стальными плитами, которые скреплялись болтами. Между плитами и тыльными сторонами электродов помещались диэлектрические прокладки, создававшие зазор, необходимый для замыкания магнитного потока. Боковые диэлектрические стенки при сборке также поджимались к электродам отдельными достаточно массивными стальными пластинами, ушпирившимися в стягивающие болты. Никакой дополнительной обработки канала после сборки не проводилось.

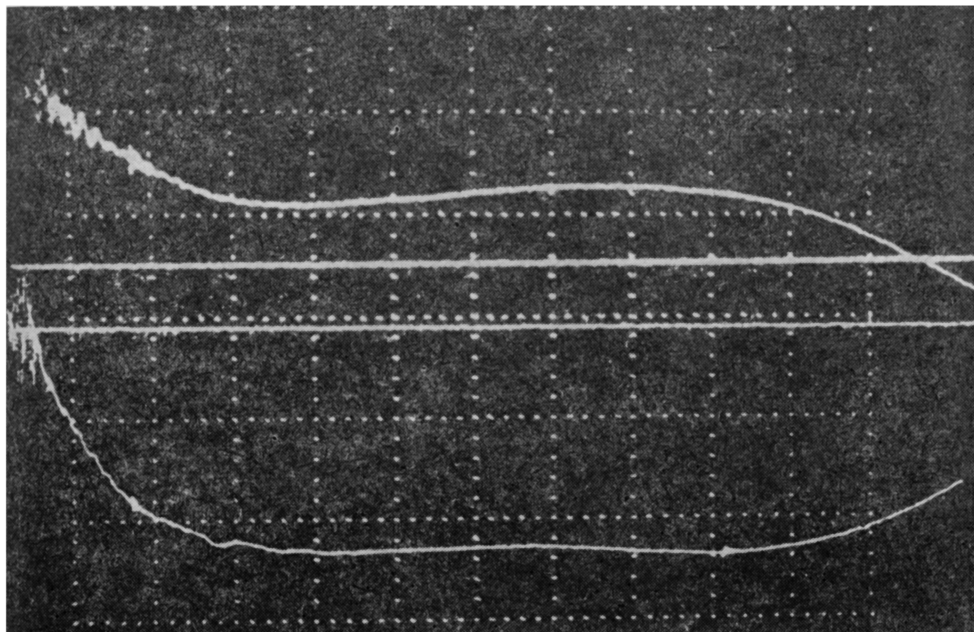


Рис. 2. Оциллограммы тока (нижняя) и напряжения (верхняя) в эксперименте от 25.06.88. Временная шкала: одно большое деление 20 мкс.

Отметим, что практически в каждом эксперименте изменялись не только электрические параметры, но проводились также конструктивные изменения и усовершенствования различных элементов системы.

4. Результаты экспериментов

Ускорялся поликарбонатный кубик с ребром ~ 12 или ~ 11 мм, который вставлялся в канал на глубину ~ 10 см, чтобы исключить влияние неоднородности магнитного поля. Рабочая длина электродов составляла около 50 см.

Помимо осциллографирования силы тока и напряжения на казенной части камеры проводилась сверхскоростная фоторегистрация тела в свободном полете на фоне масштабной сетки, а также плазмы, движущейся в канале. После свободного полета ускоренное тело ударялось о торец длинного дюралюминиевого (марка Д-16) цилиндра $\varnothing 130$ мм, так что по размерам и форме кратера также можно было судить о целостности и скорости тела. Результаты типичных экспериментов сведены в табл. 2.

Первые пять экспериментов отражают зависимость скорости тела массой ~ 2 г от начального напряжения U_0 на батарее емкостью $C = 19.2$ мФ при длительности полочки постоянного тока ~ 150 мкс. Скорость V растет от 2.4 до 4.2 км/с с ростом напряжения от 3.75 до 5.2 кВ. Полный КПД достигает максимума $\eta = 7.4$ % при $U_0 = 4.6$ кВ (эксперимент от 09.01.88).

Результаты экспериментов по ускорению тел (кубиков) из поликарбоната

Дата экспери- мента	Начальное на- пряжение U_0 , кВ	Масса тела, г	Сила тока на «полочке», кА	Скорость тела на выходе, км/с	Энергия в нако- питель, кДж	КПД системы тело/накопитель, %	$T_{\Sigma}, 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}$	Длительность «полочки» тока мкс
17.11.87	3.75	2	405	2.42	135	4.4	24.6	150
21.11.87	4.46	2	490	3.0	191	4.7	36.0	150
25.12.87	4.6	2	520	2.0	203	2.0	40.6	150
09.01.88	4.6	2	500	3.9	203	7.4	37.5	150
17.01.88	5.2	2	600	4.17	260	6.9	54.0	150
02.02.88	5.1	1.57	610	4.5	250	6.4	55.8	150
28.02.88	5.4	1.57	730	тело распалось				150
01.06.88	5.18	1.53	720	3.0	310	2.2	88.1	170
12.06.88	5.11	1.55	690	3.1	300	2.5	80.9	170
25.06.88	4.96	1.49	630	4.5	285	5.3	67.5	170
06.10.88	5.05	1.57	560	4.5	295	5.4	58.0	185

Примечание. В экспериментах по 02.02.88 погонная индуктивность электродов была $L' = 0.28 \text{ мкГн/м}$, начиная с 28.02.88 $L' = 0.22 \text{ мкГн/м}$. Вначале $C = 19.2 \text{ мФ}$, с 01.06.88 $C = 23.2 \text{ мФ}$. В эксперименте 25.12.87 имел место развитый лидер, в экспериментах 01.06.88 и 12.06.88 — выброс меди.

Существенным моментом являются сильные вариации скорости тела и полного КПД в зависимости от точности изготовления деталей и качества их сборки при постоянном значении U_0 (сравните эксперименты от 25.12.87 и 09.01.88). Причиной является разная степень развития лидерного пробоя перед телом, что выражается в первую очередь в существенно разной скорости его движения (от ~ 2.5 до ~ 6 км/с): очевидно, что чем больше скорость лидера, тем больше протекающий через него ток. Факт сильных вариаций параметров лидера при прочих равных условиях говорит о том, что лидер формируется не вследствие пробоя, обусловленного возникающей перед телом сильной ударной волной, а, скорее, вследствие прорыва плазмы из толкающего тело плазменного поршня, чем плохо контролируемые зазоры между телом и стенками канала, как это отмечалось в [22]. При хорошей обтюрации скорость лидера составляет всего 2.5 км/с и он быстро исчезает.

При понижении массы до 1.57 г скорость тела возрастает до 4.5 км/с (эксперимент от 02.02.88), но эффективность ускорения не увеличивается.

Повышение напряжения с $U_0 = 5.1$ до 5.4 кВ (т. е. на $\sim 6\%$) привело к распаду тела на три сильно неравных осколка, о чем можно было судить по изображениям на СФР-грамме и по кратерам на мишени. Скорость наибольшего осколка составляла ~ 3 км/с. При больших U_0 тело распалось на еще большее число осколков.

Это весьма важный результат, поскольку позволяет судить о максимально допустимом значении ускорения, при котором тело еще не разрушается. Если за время $\Delta t = 150$ мкс тело достигает скорости 4.5 км/с, то среднее ускорение будет $a = 3 \cdot 10^6 \text{ г}$. При длине тела $h = 1.1$ см и его плотности $\rho = 1.2 \text{ г/см}^3$ это соответствует давлению на дно тела (и его предельной прочности $p = \sigma = \rho ah = 40 \text{ кГ/мм}^2$).

Таким образом, предельно достижимое без разрушения тела ускорение оказывается более чем вчетверо большим, чем можно было ожидать, исходя из расчетов по статической прочности материала. Такое благоприятное расхождение обусловлено, по всей вероятности, известным эффектом повышения прочности материалов при килобарных давлениях вследствие залечивания микродефектов и тому подобных явлений (см., например, [33]). Прочность некоторых материалов может возрасти на порядок и выходит на насыщение при $p \approx 5 \cdot 10^4 \text{ атм}$ [34]. Механизм описываемого упрочнения отличается от динамического упрочнения, проявляющегося при очень быстром нагревании материала, когда микротрещины просто не успевают развиваться.

Более чем четырехкратное увеличение прочности поликарбоната, обусловленное действием высокого (до ~ 4 кбар) давления, делает возможной работу в режимах, предельных также по тепловыделению в электродах.

В этом смысле показательные эксперименты от 01.06.88 и 12.06.88 (табл. 2). Здесь емкость батареи была увеличена с 19.2 до 23.2 мФ (т. е. на $\sim 20\%$), а длительность полочки разрядного тока с ~ 150 до ~ 170 мкс (т. е. только на $\sim 13\%$). В результате сила тока при том же U_0 возросла на $\sim 7\%$. Такое изменение параметра $I^2\Delta t$ оказалось критическим. Скорость тела при $U_0 = 5.11 - 5.18$ кВ упала до ~ 3 км/с, из канала происходил выброс большого количества паров и капелек меди. При снижении напряжения до $U_0 = 4.96$ кВ скорость тела возросла до 4.5 км/с, выброс меди стал незаметным (эксперимент от 25.06.88).

С увеличением продолжительности полочки тока до ~ 185 мкс при $C = 23.2$ мФ и $U_0 = 5.05$ кВ скорость тела осталась неизменной (4.5 км/с), выброса меди не наблюдалось (эксперимент от 06.10.88).

Таким образом, критическая погонная плотность тока, при которой происходит взрывное испарение электродов, достигает в наших условиях $i_c \approx 60$ кА/мм, что на $\sim 40\%$ превышает приводимое в [6] значение $i_c \approx 43$ кА/мм.

Следует заметить, что при интерпретации и сравнении экспериментов, включающих в себя энерговыведение в электродах, следует соблюдать известную осторожность из-за неоднородного распределения тока и энерговыведения вследствие сильных скин-эффектов [35]. Поэтому величина комплекса $I^2\Delta t$ лишь весьма условно характеризует локальное энерговыведение в приповерхностном слое электродов.

5. О возможных причинах ограничения скорости тела

Из выражения (4) следует, что КПД преобразования запасенной в накопителе энергии в кинетическую энергию тела должен вначале линейно расти с повышением скорости тела. Это в общем и имеет место в экспериментах от 17.11.87, 21.11.87 и 09.01.88. Но уже в эксперименте от 17.01.88 КПД падает, и далее, несмотря на увеличение энерговклада, $I^2\Delta t$, уменьшение массы тела и т. п., скорость растет довольно медленно — до 4.5 км/с. Такое насыщение скорости на разном уровне (от ~ 3.5 до ~ 6 км/с) на разных установках, условно называемое «шестикилометровым рубежом», отмечено в работах [19, 22, 28] и ряде других. Причины его до сих пор остаются не до конца ясными. По-видимому, более или менее одновременно и довольно резко включается в действие сразу несколько конкурирующих диссипативных факторов. Одним из вероятных являются вторичные пробои в задней части системы [19].

Действительно, по мере роста скорости тела разность потенциалов ΔU_L , необходимая для поддержания постоянного тока через плазменный поршень и обусловленная включением все новых порций индуктивности, растет пропорционально скорости V

$$\Delta U_L = L' \cdot I \cdot V. \quad (6)$$

При $L' = 0.28$ мкГн/м, $I = 600$ кА и $V = 5$ км/с она составляет $\Delta U_L = 840$ В. К этому добавляется еще ΔU_r — возрастание омического падения потенциала на рельсах, растущее по мере продвижения по ним тела от исходного положения. Из-за скин-эффекта ΔU_r может достигать сотен вольт.

Ясно, что при разности потенциалов $\sim 10^3$ В вероятность нового пробоя между рельсами в районе токоподводов резко возрастает, особенно если учесть, что здесь в сторону, противоположную ускорению тела, течет поток плазмы, покидающей плазменный поршень из-за всевозможных (например, релей-тэйлоровских) неустойчивостей.

Расщепление зоны свечения и его перескоки от области плазменного поршня, примыкающей к телу, назад наблюдались на поздних этапах ускорения и в некоторых наших экспериментах, но доля тока, протекающего через новые каналы, не измерялась.

Для проверки предположения о вторичных пробоях как причине ограничения скорости были проделаны эксперименты с пониженным значением погон-

ной индуктивности ($L' = 0.22$ мкГн/м) — эксперименты от 28.02.88 и более поздние (как отмечено в разделе 4, часть этих экспериментов позволила установить предельно допустимые значения прочности материала тела и погонной плотности тока в электродах).

Сопоставление результатов экспериментов от 02.02.88 (где еще было $L' = 0.28$ мкГн/м), 25.06.88 и 06.10.88 показывает, что, несмотря на сильные различия в параметрах электрической цепи и самих разрядов, когда разность потенциалов на входе в систему была значительно понижена, конечная скорость тела осталась прежней, а КПД его ускорения даже упал.

Отсюда следует, что мощные вторичные пробои за плазменным поршнем не являются причиной ограничения скорости тела в наших условиях. Скорее, события развиваются более мягко. Как следует из экспериментов от 02.02.88 и 06.10.88, где $I^2 \Delta t$ почти одинаковы, при меньшем L' , по-видимому, все же возрастает эффективность работы самого поршня, поскольку скорость тела остается прежней. Возможно, из-за понижения ΔU_L затягивается процесс расщепления поршня, но это предположение требует дальнейшего изучения.

Заключение

Основным достоинством созданной нами системы по магнитоплазменному ускорению макротел с помощью плазменного поршня являются ее компактность и конструктивная простота.

Использование схемы длинной $L-C$ -линии позволило вести разгон тела в режиме постоянного ускорения и совместить достоинства емкостного и индуктивного накопителей с применением только одной коммутации, конструктивно оформленной в виде вспомогательного иницирующего разряда за исходно покоящимся телом. Несмотря на отсутствие предускорения, тело массой 1.5—2 г получает скорость 4—4.5 км/с при энергии, запасенной в конденсаторной батарее, 200—250 кДж. Полный КПД системы накопитель—ускоряемое тело достигает 7 %. Разгон тела ведется на базе всего 40—45 см.

Путем варьирования электрических параметров системы показано, что возможные мощные пробои в задней части системы не могут быть в нашем случае причиной ограничения скорости тела на достигнутом уровне. Дело, вероятно, заключается в неустойчивости плазменного поршня по отношению к продольной стратификации.

Величина постоянного ускорения тела (кубика) доходит до $\sim 3 \cdot 10^6$ г, так что нагрузка на его основание (~ 4000 кГ/см²) в 4—5 раз превосходит предел статической прочности материала — поликарбоната ($\sigma_{\max} = 700—900$ кГ/см²). Здесь, по-видимому, проявляется упрочнение материала под действием килобарных давлений. Использование этого явления явилось основным фактором, позволившем резко сократить длину ускоряющих электродов и довести погонную плотность электрического тока до значения, при котором электроды начинают взрываться (значение $i_c \approx 60$ кА/мм определено нами экспериментально, оно на 40 % превышает приводимую в литературе теоретическую величину 43 кА/мм).

Таким образом, процесс ускорения удалось оптимизировать сразу по двум параметрам и вести его на режимах, когда нагрузки на материал и погонная плотность тока близки к своим предельным значениям.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику В. М. Тучкевичу за организацию и поддержку этих исследований.

Список литературы

- [1] Манзон Б. М. // УФН. 1981. Т. 134. С. 611—639.
- [2] Charters A. C. // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 181—203.
- [3] Stip A. J. // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 613—621.
- [4] Weldon W. F. // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 671—679.
- [5] Rashleigh S. C., Marshall R. A. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N 4. P. 2540—2542.
- [6] Hawke R. S., Brooks A. L., Fowler C. M. et al. // AIAA J. 1982. Vol. 20. P. 978—985.
- [7] Fowler C. M., Zimmermann E. L., Cummings C. E. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1475—1480.

- [8] Труды III Междунар. конф. по генерации мегатауссных магнитных полей и родствен-
ным экспериментам. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение.
М.: Наука, 1984.
- [9] II Symp. on Electromagnetic Launch Technology. IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20.
N 2.
- [10] Tower M. M., Haight C. H. // IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20. N 2. P. 298—301.
- [11] Haight C. H., Tower M. M. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1499—1502.
- [12] Tower M. M., Jackson G. L., Farris L. K. et al. // Int. J. Impact Enging. 1987. Vol. 5.
P. 635—644.
- [13] Шецов Г. А., Тумов В. М., Башкатов Ю. Л. и др. // Труды III междунар. конф. по ге-
нерации мегатауссных магнитных полей и родственным экспериментам. М.: Наука,
1984. С. 177—182.
- [14] Usuba S., Kondo K., Sawaoka A. // IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20. N 2. P. 260—
263.
- [15] Clark G. A., Bedford A. J. // IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20. N 2. P. 276—279.
- [16] Deis D. W., Scherbath D. W. // IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20. N 2. P. 245—248.
- [17] D'Aoust J., Cobb K., Creedon R. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1984. Vol. 20. N 2.
P. 294—297.
- [18] Hawke R. S., Brooks A. L., Fowler C. M. et al. // Proc. of the III Conf. on Megagauss
Magnetic Field Generation and Related Topics. Ultrahigh Magnetic Fields. Physics.
Techniques. Applications. М.: Nauka, 1984. P. 171—176.
- [19] Hawke R. S., Nellis W. J., Newman G. H. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22.
N 6. P. 1510—1515.
- [20] Holland M. M., Wilkinson G. M., Krickhuhn A. P. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986.
Vol. 22. N 6. P. 1521—1526.
- [21] Usuba S., Kakudate Y., Aoki K. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6.
P. 1785—1779.
- [22] Кондратенко М. М., Лебедев Е. Ф., Остаев В. Е. и др. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 1.
С. 159—164.
- [23] Upshaw J. L. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1779—1784.
- [24] Дробышевский Э. М., Жуков Б. Г., Назаров Е. В. и др. Препринт. ФТИ. № 1315, Л.,
1989. 23 с.
- [25] IV Symp. on Electromagnetic Launch Technology. IEEE Trans. on Magn. 1989. Vol. 25.
N 1.
- [26] Rosenwasser S. N., Stevenson R. D. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1722—
1729.
- [27] Поликарбонаты. Каталог / Под ред. Э. Л. Калининцева. Черкассы, 1986.
- [28] Pratar S. B., Driga M. D., Weldon W. F. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22.
N 6. P. 1681—1683.
- [29] Parker J. V. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 10. P. 6710—6723.
- [30] Sato K., Yanagisawa M., Kawashima N. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1989. Vol. 25.
N 1. P. 500—503.
- [31] Shrader J. E., Bohn A. J., Thomson J. G. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vo . 22. N 6.
P. 1739—1741.
- [32] Burton R. L., Goldstein S. A., Tidman D. A. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22.
N 6. P. 1410—1415.
- [33] Береснев Б. И., Трушин Е. В. Процесс гидроэкструзии. М.: Наука, 1976.
- [34] Kinsland G. L., Bassett W. A. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 3. P. 978—985.
- [35] Дробышевский Э. М., Юферев В. С., Юферев С. В. Препринт ФТИ. № 1305. Л., 1988,
21 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
13 марта 1990 г.