

шие плоского упругого предвестника при различных начальных амплитудах ($M_0 = 0,1$ (1), 0,005 (2) и 0,002 (3)). Все постоянные взяты из работы [12] для облегчения сравнения результатов. Видно, что со временем относительное различие соседних кривых сильно уменьшается и они почти сливаются. Это случается тем раньше, чем больше исходная амплитуда предвестника. Качественные результаты близки к данным [4], где для $u_0 \sim 1$ км/с упругие предвестники сливаются на расстоянии 7—8 мм от точки удара. Экспериментальные точки на рис. 2, взятые из работы [12], получены для $u_0 \sim 0,1$ км/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Нигматулин, Н. И. Холин. Изв. АН СССР. МТТ, 1974, 4, 131.
2. J. W. Taylor. J. Appl. Phys., 1965, 36, 10, 3146.
3. J. J. Gilman. Appl. Mech. Rev., 1968, 21, 8, 767.
4. С. А. Христианович. ПММ, 1956, 20, 5, 599.
5. А. А. Гриб, О. С. Рыжов, С. А. Христианович. ПМТФ, 1960, 1, 63.
6. Е. И. Шемякин. ПМТФ, 1963, 5, 83.
7. В. А. Бабаков. ФТПРПИ, 1969, 4, 37.
8. J. N. Johnson, W. Band. J. Appl. Phys., 1967, 38, 4, 1578.
9. R. S. Lee, N. P. Suh. J. Mech. Phys. Solids, 1972, 20, 4, 251.
10. В. М. Фомин, Э. М. Хакимов. ПМТФ, 1979, 5, 114.
11. L. Malvern. Quart. Appl. Math., 1951, 8, 4, 405.
12. J. W. Taylor, M. H. Rice. J. Appl. Phys., 1963, 34, 2, 364.

Поступила в редакцию 21/VI 1982,
после доработки — 5/XI 1984

ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ РЕЛЬСОТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. Г. Анисимов, Ю. Л. Башкатов, Г. А. Швецов

(Новосибирск)

В последние годы начиная с работы [1] возрос интерес исследователей к электродинамическому методу ускорения твердых тел до высоких скоростей. Ожидается, что использование электромагнитных сил позволит получить скорости частиц, значительно превышающие достигнутые в настоящее время. Обсуждению возможностей данного метода и анализу физических процессов, происходящих в ускорителях, были посвящены две международные конференции [2, 3].

В качестве источников энергии при электродинамическом методе ускорения используются конденсаторные батареи, индуктивные накопители, взрывомагнитные генераторы (ВМГ) и другие импульсные источники энергии. ВМГ имеют ряд преимуществ перед другими источниками: высокие удельные энергетические характеристики ($\sim 10^2$ Дж/см³, $\sim 10^7$ Вт/см³, ~ 50 Дж/г [4]), что значительно превышает аналогичные параметры других импульсных источников электромагнитной энергии; позволяют получать в нагрузке электрический импульс требуемой формы и продолжительности (в данном случае обеспечивающий наиболее эффективный режим ускорения тела в рельсотроне); могут быть полностью автономны от внешних источников начальной электромагнитной энергии.

Вопросы электродинамического ускорения твердых тел в рельсотронных ускорителях с питанием от взрывных МК-генераторов рассмотрены в работах [5—10]. Результаты экспериментов [7—10] приведены в таблице. В качестве источника энергии использовались плоские непрофилированные ВМГ. Отметим, что достигнутые электродинамическим методом скорости твердых тел являются рекордными в настоящее время, хотя

Параметр	Единица измерения	Номер эксперимента							
		1А	1С	2А	2В	2С	2D	2Е	50-1
Длина ускорителя	м	0,9	0,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	0,27
Калибр ускорителя	мм	12,5	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	50
Масса частицы	г	2,9	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	165
Емкость конденсаторной батареи	мФ	1,5	1,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Напряжение	кВ	9,5	16,2	11,5	16,1	16,2	16,1	16,1	16,0
Энергия в батарее	кДж	68	197	198	389	394	389	389	384
Начальный ток	кА	285	450	440	640	640	625	625	630
Максимальный ток	кА	575	800	800	970	965	1200	1250	1950
Максимальное ускорение	10 ⁶ g	1,7	3,4	3,4	5,0	5,0	7,7	8,4	0,2
Максимальное давление									
предел пластичности		4,8	9,3	9,3	14	14	21	23	2,1
Достигнутая скорость	км/с	2,8	5,6	5,4	9,9	9,9	10,1	10,1	0,3
Кинетическая энергия	кДж	11,4	48,6	45,2	153	152	158	158	10,1
Сохранность тела	—	Да	Частично	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да

вопросы, связанные с обеспечением сохранности тела (см. таблицу), еще не решены. Авторы [7] считают, что применение ВМГ позволит получить скорости 5—25 км/с при диаметре частиц 8—30 мм.

ВМГ для питания рельсотронных ускорителей твердых тел

Отметим основные физические процессы, определяющие ускорение тела в канале рельсотронного ускорителя.

Если пренебречь силами трения и противодействия, то на тело действует сила $F = m \frac{dv}{dt} = \frac{\lambda_p I^2}{2}$. Откуда

$$v = \int_0^t \frac{\lambda_p I^2}{2m} dt. \quad (1)$$

Здесь v — скорость тела; m — масса ускоряемого тела; $\lambda_p = dL_p/dx$ — погонная индуктивность рельсотрона (в дальнейшем будем считать $\lambda_p = \text{const}$); I — протекающий в цепи ток.

Из выражения (1) следует, что для достижения высокой скорости тела необходимо увеличивать ток в цепи и время ускорения. Однако существуют физические ограничения на плотность электрического тока, и, при заданных размерах электродов, на полный ток. Можно выделить три основных фактора, ограничивающих для любой электродинамической системы величину плотности протекающего тока [11]: 1) максимальное магнитное давление не должно превышать прочности ускоряемого тела; 2) максимальное магнитное давление не должно превышать прочности ствола ускорителя; 3) протекающий ток не должен приводить к плавлению электродов.

Для иллюстрации предельных величин оценим критическую плотность тока на единицу ширины канала. Чтобы проводник за время протекания тока оставался в твердом состоянии, должно выполняться условие (см. [12])

$$g = \int_0^t j^2 dt \approx \frac{I^2}{b^2 \delta^2} t \leq g_{кр},$$

где $g_{кр}$ — значение интеграла тока, при котором проводник остается в твердом состоянии, для меди $g_{кр} = 0,89 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$; j — плотность тока; b — ширина электродов; δ — глубина скин-слоя; t — время электрического импульса. Так как $\delta = \sqrt{t/\mu_0 \sigma_0}$ (μ_0 — магнитная проницаемость

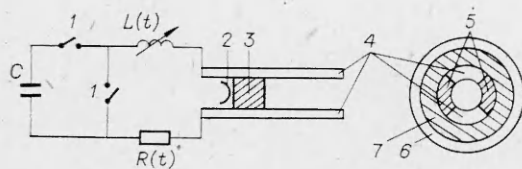


Рис. 1. Схема рельсотронного ускорителя твердых тел с питанием от ВМГ.

1 — коммутационные ключи; 2 — фольга; 3 — ускоряемое тело; 4 — электроды; 5, 7 — изоляторы; 6 — стальной бандаж; $R(t)$, $L(t)$ — сопротивление и индуктивность цепи; C — конденсаторная батарея.

вакуума, σ_0 — электропроводность проводника), окончательно имеем

$$I_{кр}/b \leq \sqrt{g_{кр}/\mu_0\sigma_0} = 3,3 \cdot 10^7 \text{ А/м.} \quad (2)$$

Более точные, чем (2), оценки $I_{кр}/b$ могут быть сделаны на основе экспериментов.

С учетом отмеченных физических факторов, ограничивающих ток в рельсотронном ускорителе, представляется, что для наиболее эффективного ускорения тела необходимо обеспечить ток $I = I_{кр}$ при разряде конденсаторной батареи или от вспомогательного взрывомагнитного генератора — предусилителя энергии, а основное ускорение тела осуществлять при $I = I_{кр}$.

Для такого режима можно сформулировать следующие требования к ВМГ как источнику энергии для рельсотронного ускорителя твердых тел: генератор должен обеспечить величину тока, близкую к $I_{кр}$ в течение всего времени работы, а также необходимую длительность электрического импульса. Так как время работы генератора $T_0 = z_0/D$ (z_0 — длина заряда ВВ, D — скорость детонации), то обеспечение необходимой длительности электрического импульса достигается изменением z_0 и D .

Рассмотрим более детально возможность удовлетворения первого требования.

Схема рельсотронного ускорителя твердых тел приведена на рис. 1. При замыкании ключа 1 в цепи начинает течь ток, металлическая фольга взрывается, образуется плазма, которая под действием протекающего в цепи тока ускоряет тело. В момент достижения током значения $I(t_1) = I_{кр}$ срабатывает коммутатор 8 и начинает работать взрывомагнитный генератор. Процесс электродинамического ускорения в рассматриваемой схеме можно разбить на два этапа: при разряде источника начальной энергии и при работе взрывомагнитного генератора.

Изменение тока в цепи на втором этапе описывается системой уравнений

$$\frac{d(LI)}{dt} + IR = 0, \quad (3)$$

$$L(t) = L_0 - \int_{t_1}^t (\lambda_r D - \lambda_p v) dt, \quad t_1 \leq t \leq T_0,$$

где $\lambda_r = dL_r/dz$ — погонная индуктивность генератора; L_0 , $L(t)$, $R(t)$ — начальная и текущая индуктивность цепи и ее сопротивление. Из уравнения (3) следует, что ток в генераторе остается постоянным, если обобщенное магнитное число Рейнольдса $Re_{m_0} = \dot{L}(t)/R(t) = 1$. Если $Re_{m_0} > 1$, ток в цепи возрастает, если $Re_{m_0} < 1$ — убывает. Рассмотрим возможность построения генератора с $Re_{m_0} = 1$. В рассматриваемом случае

$$\begin{aligned} dL/dt &= dL_r/dz \cdot D - \lambda_p v, \\ R(t) &= R_r(t) + R_p(t) + R_{пл}(t). \end{aligned}$$

Здесь $R_r(t)$, $R_p(t)$, $R_{пл}(t)$ — сопротивление генератора, рельсотрона и плазменной перемычки соответственно.

Подставляя значение dL/dt и $R(t)$ в выражение для Re_{m_0} , получим

$$dL_r/dz = \lambda_p v/D + R(t)/D.$$

Если необходимо достичь скорость метаемого тела 5 км/с, то при $D = 7,6$ км/с, $\lambda_p = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $R(t) = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом погонная индуктив-

ность генератора должна быть

$$dL_r/dz \geq 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \quad dL_r/dt \geq 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (4)$$

Для получения скорости $v = 10$ км/с при тех же значениях D , λ_p и $R(t) = 3 \cdot 10^{-3}$ Ом

$$dL_r/dz \geq 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \quad dL_r/dt \geq 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (5)$$

Найденные значения dL_r/dz и dL_r/dt следует считать все же оценками снизу, так как не учитывается омическое сопротивление в точках контакта и реально существующее во всех системах увеличение индуктивности генератора и рельсотрона под действием магнитного давления. Так

как $v = \frac{\lambda_p I_{KD}^2}{2m} \cdot t + v_0$ (v_0 — скорость, приобретенная телом на первом этапе ускорения), то

$$\frac{dL_r}{dz} = \frac{\lambda_p^2 I^2}{2mD^2} z + \frac{R(t) + \lambda_p v_0}{D} = Az + \frac{R(t)}{D} + \frac{\lambda_p v_0}{D}, \quad (6)$$

$$L_r(z) = L_{r0} - \frac{\lambda_p^2 I^2}{2} \int_0^z \frac{R}{D} dz - \lambda_p v_0 z. \quad (7)$$

Составляющие сопротивления цепи $R_r(t)$ и $R_p(t)$ можно оценить через глубину скин-слоя:

$$R_r(z) = \frac{2}{d} (z_0 - z) \sqrt{\frac{\mu_0 D}{\sigma_r (z + t_1 D)}},$$

$$R_p(z) = \frac{4}{3b} \sqrt{\frac{\mu_0 \lambda_p I^2 z^{3/2}}{\sigma_p m D^{3/2}}}.$$

Сопротивление плазмы $R_{пл}$ измерено экспериментально. Плазма создавалась при взрыве медной фольги толщиной 30 мкм. При токе разряда 300—500 кА $R_{пл} = 5 \cdot 10^4 \div 10^{-3}$ Ом. Таким образом, сопротивление цепи можно представить следующим образом:

$$R(z) = \frac{2}{d} (z_0 - z) \sqrt{\frac{\mu_0 D}{\sigma_r (z + t_1 D)}} + \frac{4}{3b} \sqrt{\frac{\mu_0 \lambda_p I^2 z^{3/2}}{\sigma_p m D^{3/2}}} + R_{пл}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), (7), можно получить аналитические зависимости dL_r/dz и $L_r(z)$.

Рассмотрим возможность построения ВМГ с полученными зависимостями $L_r(z)$ и оценками dL_r/dz применительно к трем наиболее распространенным геометриям взрывных генераторов.

Цилиндрический генератор. При отношении радиусов наружного и внутреннего электродов, равном 2, и $D = 7,6$ км/с генератор имеет погонную индуктивность $dL_r/dz = 1,4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $dL_r/dt = 10^{-3}$ Гн/с, что явно недостаточно для получения $v = 5$ км/с.

Спиральный генератор. При отношении диаметров спирали и внутреннего электрода, равном 2, $D = 7,6$ км/с и ширине шины спирали, равной диаметру внутреннего электрода, $dL_r/dz = 12 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $dL_r/dt = 9 \cdot 10^{-2}$ Гн/с, что значительно превышает приведенные выше оценки (5) для достижения скорости 10 км/с. Для построения генератора с индуктивностью $L_r(z)$ в соответствии с зависимостью (7) необходимо уменьшить (уменьшать) ширину витка генератора, что усложняет технологию его изготовления.

Плоский генератор. При ширине электродов, равной расстоянию между ними, и $D = 7,6$ км/с $dL_r/dz = 6 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $dL_r/dt = 4,5 \cdot 10^{-3}$ Гн/с.

Сравнение полученных значений с оценками (4), (5) показывает, что dL_r/dz и dL_r/dt у плоского генератора достаточны для достижения $v = 5$ км/с и меньше необходимых значений для получения $v = 10$ км/с.

Увеличить скорость изменения индуктивности можно при параллельной работе нескольких генераторов, соединенных последовательно. Вопросы построения многоэлементных генераторов рассмотрены в [13]. Каждый генератор иницируется в определенный момент времени, что позволяет обеспечить выполнение зависимости (7) для $L_r(z)$, повысить dL_r/dz и увеличить время работы (максимальное время работы, когда все генераторы работают последовательно).

Следует отметить важное преимущество плоских и коаксиальных генераторов — простоту изготовления.

Экспериментальные исследования работы МК-генератора на рельсотронный ускоритель

Рельсотронный ускоритель (см. рис. 1) состоял из двух медных или латунных электродов сечением 20×6 мм, разделенных изолятором из текстолита толщиной 8 мм. Для создания необходимой прочности ускоритель помещался в стальную трубу и заливался снаружи эпоксидным компаундом с наполнителем. Диаметр канала 11,7 мм, длина 900 мм. Погонная индуктивность рельсотрона $\lambda_p = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Ускоряемое тело длиной 9—10 мм и массой 1,2—1,3 г готовилось из капролона. Участок ускорения тела составлял 800 мм. Для создания плазмы использовались медные или алюминиевые фольги толщиной 30 мкм. Источник начальной энергии — конденсаторная батарея ($C = 20,4 \cdot 10^{-3}$ Ф, $\varphi_0 = 5$ кВ). Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении. Скорость тела в канале определялась индуктивными датчиками, которые располагались в изоляторе и измеряли изменение компоненты магнитной индукции, направленной вдоль канала. Вне канала использовалась покадровая оптическая регистрация полета тела и контактные датчики. Падение напряжения на плазменной перемычке измерялось двумя идентичными делителями напряжения, которые подключались к электродам рельсотрона на выходе из канала. В момент выхода тела из канала регистрируется бросок напряжения на омических делителях. Сохранность тела контролировалась оптической покадровой регистрацией тела в полете и по форме кратера. Ток в системе измерялся индуктивными датчиками.

По результатам анализа задачи, выполненного выше для указанных размеров рельсотрона и тела массой 1,2 г, изготовлен плоский ВМГ с переменной погонной индуктивностью. Ширина шин генератора 50 мм, длина 1,4 м, расстояние между шинами изменялось от 30 мм на начальном участке до 40 мм на конечном. Начальная индуктивность генератора $0,54 \cdot 10^{-6}$ Гн.

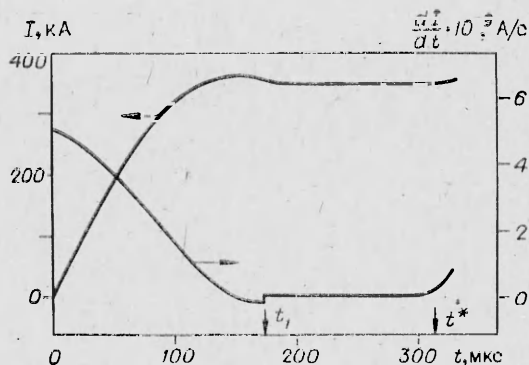
Зарегистрированные зависимости $I(t)$ и dI/dt изображены на рис. 2. Генератор начал работать при $t = 170$ мкс. На участке $t = 170 \div 310$ мкс ток практически не изменялся, движение тела равноускоренное. Оценка скорости тела по формуле (1) для экспериментально полученных значений $I(t)$ при $\lambda_p = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м дает хорошее согласие для пройденного телом расстояния $x(t)$ с показаниями индуктивных датчиков, которыми регистрировалось движение тела в канале ствола. В этом эксперименте при $m = 1,2$ г получена скорость $v = 4,5$ км/с.

Для уменьшения габаритов ВМГ при неизменном времени работы генератора проведены эксперименты с использованием ВВ с малой скоростью детонации ($D = 3,7$ км/с).

Чтобы проверить возможность такого применения ВВ в ВМГ сравнили работу двух генераторов с одинаковыми значениями T_0 , L_{r0} , но разными D . Основные характеристики генераторов приведены ниже:

	$D=7,6$ км/с	$D=3,7$ км/с
T_0 , мкс	136	141
L_{r0} , нГн	300	300
I_0 , кА	203	147
$I(T_0)$, кА	1144	903
$I(T_0)/I_0$	5,6	6,1

Рис. 2. Зависимости $I(t)$ и dI/dt (t_1 , t_2 — моменты начала работы ВМГ и разрушения датчика).



Эксперименты показали, что ВВ с малой скоростью детонации можно эффективно использовать в ВМГ, предназначенных для питания рельсотронных ускорителей твердых тел. В экспериментах при $D = 3,7$ км/с зафиксирована сварка верхней и нижней пластин.

Для проверки возможности управления формой токового импульса в многоэлементном шинном генераторе проведены эксперименты с трехэлементным ВМГ. Генераторы включались последовательно-параллельно. Разводка детонации осуществлялась детонирующим шнуром. Эксперименты показали, что в этом случае можно обеспечить необходимую форму и продолжительность электрического импульса. При длине рельсотрона 0,8 м стабильно регистрировались скорости 4,5—5 км/с при массе тела 1,2—1,3 г. Во всех экспериментах наблюдалась значительная эрозия электродов ускорителя. Характерная фотография каверны приведена на рис. 3.

Заключение

В результате проведенных исследований в рамках электротехнической модели сформулированы требования к взрывомагнитным генераторам как источнику энергии для рельсотронных ускорителей твердых тел. Определена зависимость индуктивности генератора от координаты для получения равноускоренного движения. Отработаны конструкции одночного и трехэлементного плоского МК-генератора, позволяющие обеспечить этот режим ускорения. Показана перспективность использования многоэлементных шинных и коаксиальных ВМГ для питания рельсотронного ускорителя.

Продемонстрирована возможность использования в ВМГ взрывчатых веществ с малой скоростью детонации.

В экспериментах по ускорению твердых тел в рельсотронном ускорителе длиной 0,8 м достигнуты скорости частиц 5 км/с при массе тела 1,2—1,3 г. Ускорение частиц до более высоких скоростей связано прежде всего с увеличением масштаба эксперимента (длины рельсотрона, плотности тока и длительности электрического импульса), а также с подбором материала электродов ускоряемого тела и вакуумированием канала.

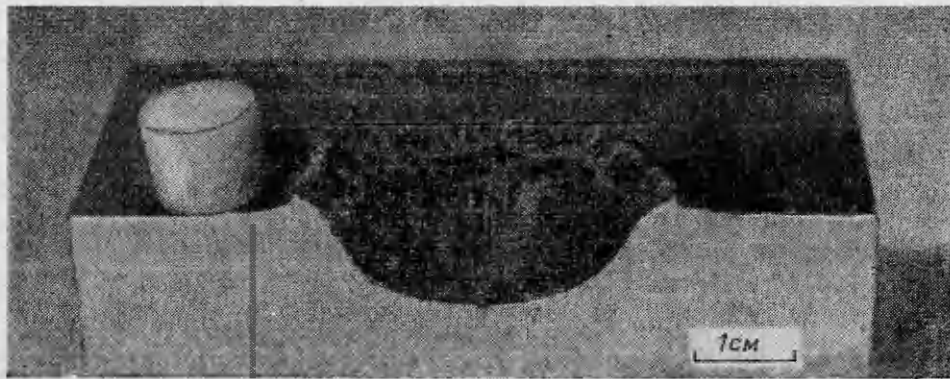


Рис. 3. Фотография каверны.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. C. Rashleigh, R. A. Marshall. J. Appl. Phys., 1978, 49, 4.
2. Proc. Conf. on Electromagnetic Guns and Launchers. IEEE Trans. on Magnetics, v. MAG-18, 1982, 1.
3. Proc. 2-nd Symp. on Electromagnetic Launch Technology. IEEE Trans. on Magnetics, MAG-20, 1984, 2.
4. Сверхсильные магнитные поля/Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984.
5. А. Д. Сахаров и др. Докл. АН СССР, 1965, 165, 1.
6. R. L. Chapman, D. E. Harms, J. P. Sorenson. The magneto hydro dynamic hypervelocity gun. Proceedings of the Sixth Hypervelocity Impact Symposium. Vol. 1, 1963.
7. R. S. Hawke, C. M. Fowler e. a.— In: Shock Waves in Condensed. Matter. AJP Conf. Proc., 1981.
8. D. R. Peterson, C. M. Fowler. Tech. Rep. LA-UR-79-2220, 1979.
9. R. S. Hawke, A. L. Brooks. Tech. Rep. UCRL-84575, 1981.
10. C. M. Fowler, D. R. Peterson. Tech. Rep. LA-UR-71-1883, 1981.
11. R. S. Hawke, J. K. Scudder.— In: Megagauss Physics and Technology/Ed. by P. J. Turchi. N.— Y. and London: Plenum Press, 1980.
12. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
13. А. И. Pavlovskii e. a.— In: Megagauss Physics and Technology/Ed. by P. J. Turchi. N.— Y. and London: Plenum Press, 1980.

Поступила в редакцию 12/VI 1985,
после доработки — 16/X 1985

ДЕТОНАЦИЯ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

А. А. Васильев, Д. В. Зак

(Новосибирск)

Проблема взрывобезопасности при работе с большими количествами горючего газа поставила на повестку дня задачу определения критического диаметра детонации взрывчатых газовых смесей.

Создание свободного заряда газообразного ВВ связано со значительными трудностями, возникающими в связи с размытием свободной границы заряда и перемешиванием взрывчатой смеси с окружающим зарядом газом. Изменение состава смеси в зоне смешения серьезно затрудняет трактовку полученных результатов.

В [1] предпринята попытка создания свободного заряда, представляющего собой осесимметричную струю взрывчатой смеси $4\text{H}_2 + \text{O}_2$ диаметром 7,62 мм. Получить детонацию в струе не удалось. Поэтому вместо струи в [1] использован прямоугольный слой смеси $9,5 \times 12,7$ мм, имеющий три жесткие и одну свободную границу. Смесь со стороны свободной поверхности ограничивалась спутным потоком воздуха (скорость воздуха и смеси ~ 10 м/с). Исследования [1] как для струй, так и для слоя были неудачны, ибо ни в одном опыте не зафиксирован детонационный процесс.

Большинство дальнейших исследований осуществлялось в каналах со «слабыми» стенками: пленки нитроцеллюлозы [1—5], полиэтиленовые [2] и т. д. Предполагалось, что тонкие пленки не влияют на распространение детонации, поэтому газовый заряд со стороны такой пленки считался свободным.

Детонационный режим распространения в действительно свободном газовом заряде получен в [7, 8]. Первоначально цилиндрический газовый заряд помещали в тонкостенную резиновую трубку, растянутую вдоль оси. Заряд оказывался свободным при сдвигании резиновой оболочки за счет сил упругости. При скорости сдвигания ~ 70 м/с свободная граница заряда оказывалась сильнотурбулизованной. В оптимальном режиме размытие ее достигало ~ 2 мм при радиусе газового заряда 10 мм.

Данная работа продолжает исследования проблемы критического диаметра многофронтной газовой детонации.