

3. Roif A. Pruemmer. Proc. Fourth International Conference of the Center for High Energy Forming, Vail, Colorado, 1973.
4. H. Thomas McClelland, Henry E. Otto. Proc. Fourth International Conference of the Center for High Energy Forming, Vail, Colorado, 1973.
5. А. А. Баканова, И. П. Дудолодов, Ю. Н. Сутулов. ПМТФ, 1974, 2.
6. Э. С. Антрощенко. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976.
7. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1958, 34, 4.
8. W. Herrmann. J. Appl. Phys., 1969, 40, 6.
9. Robert J. Naumann. J. Appl. Phys., 1971, 42, 12.
10. А. А. Баканова, В. Н. Зубарев и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 3.
11. В. М. Титов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 7. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1971.
12. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
13. К. К. Крупников, М. И. Бражник, В. П. Крупникова. ЖЭТФ, 1962, 42, 3.
14. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 4.
15. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин. ЖЭТФ, 1962, 42, 1.
16. С. Б. Кормер, А. И. Фунтиков и др. ЖЭТФ, 1962, 42, 3.
17. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1970, 38, 3.
18. A. K. McManis. Bull. Americ. Phys. Soc., 1976, 21, 11.
19. А. Н. Михайлов, А. Ф. Беликова. Proc. III Symposium. Explosive Working of Metals, Mariánské, Lázně, 1976.
20. В. С. Трофимов, Г. А. Ададунов и др. ФГВ, 1968, 4, 2.
21. Е. Я. Куцовский, А. М. Ставер. ФГВ, 1975, 11, 3.
22. А. Н. Михайлов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1977, 13, 1.
23. Л. Г. Болховитинов. Докл. I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1974.
24. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя и др. Докл. АН СССР, 1977, 236, 1.
25. Г. С. Доронин, В. П. Ступников. Изв. СО АН СССР, сер. техн. н., 1970, 3, 1.
26. Ю. Л. Алексеев, В. П. Ратников, А. П. Рыбаков. ПМТФ, 1972, 1.
27. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 2.
28. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 6.
29. R. R. Voade. J. Appl. Phys., 1968, 39, 12.
30. R. R. Voade. J. Appl. Phys., 1969, 40, 9.
31. Г. А. Богачев, В. Н. Николаевский. Механика жидкости и газа, 1976, 4.
32. L. Seaman. Proc. Seventeenth Sagamore Army Materials Research Conference, Syracuse University Press, 1970.
33. В. М. Butcher, M. H. Carroll, A. C. Holt. J. Appl. Phys., 1974, 45, 9.
34. A. F. Ghoniem, M. I. Rashed, A. K. Oppenheim. Acta Astronautica, 1977, 4, 3—4.
35. P. C. Lysne. J. Appl. Phys., 1970, 41, 1.
36. В. М. Butcher. Proc. Seventeenth Sagamore Army Materials Research Conference, Syracuse University Press, 1970.
37. M. M. Carroll, A. C. Holt. J. Appl. Phys., 1972, 43, 4.
38. Г. В. Беляков, В. Н. Родионов, В. П. Самосадный. ФГВ, 1977, 13, 4.
39. Г. В. Беляков. Докл. АН СССР, 1974, 218, 5.
40. Г. В. Беляков, В. Н. Родионов. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976.

ВЗРЫВНАЯ КАМЕРА ДЛЯ РАБОТЫ СО ВЗРЫВОМАГНИТНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ И ВЗРЫВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПЛАЗМЫ

А. Е. Войтенко, А. Ф. Демчук, В. П. Исаков
(Новосибирск)

Наиболее мощным и относительно доступным первичным источником энергии в экспериментальной практике является заряд взрывчатого вещества. Использование этого источника долгое время сдерживалось отсутствием простых и надежных средств защиты от поражающих факторов взрыва: ударной волны, осколков, токсичных продуктов детонации и др. В настоящее время после создания методов расчета

и конструирования взрывных камер [1, 2] появилась возможность широкого применения этих устройств в производстве в экспериментальной физике. Сейчас в промышленности, например, эксплуатируются взрывные камеры различных типов для сварки взрывом и упрочнения, очистки литья и штамповки.

В работе [3] описана вертикальная взрывная камера для работы со взрывомагнитными генераторами (ВМГ). Днища камеры присоединены наглухо с помощью резьбовых соединений. Люк расположен в нижнем днище. Монтаж сложных экспериментальных взрывных устройств экспериментатором, находящимся внутри небольшого замкнутого объема взрывной камеры, был затруднен вследствие малого оперативного пространства, плохого освещения, излучения стенками камеры газообразных токсичных продуктов детонации и наличия пылеобразных продуктов. Попытка устранить эти недостатки путем интенсивной вентиляции внутреннего рабочего объема камеры приводила к увеличению запыленности и появлению раздражающих звуковых эффектов и сильных сквозняков. Для устранения указанных выше недостатков и дальнейшего усовершенствования целесообразно: а) применить другую схему компоновки конструктивных элементов установки; б) выделить и неподвижно зафиксировать экспериментальную крышку, которая используется для технического и экспериментального обслуживания камеры; в) камеру выполнить разъемной с тем, чтобы оперативное пространство было вне рабочего объема камеры [4]. Камера, основанная на этой схеме, приведена на рис. 1.

Основным элементом взрывной камеры является металлический цилиндр. В камере производятся осколочные эксперименты. В некоторых экспериментах общий вес осколков достигал 10 кг. Для защиты от осколков внутри камеры смонтирована дополнительная тонкостенная оболочка 6. Между основной и тонкостенной защитной оболочками уложен слой древесины 7 толщиной 15 мм, пропитанный составом, предохраняющим от возгорания. Так как направление разлета осколков несимметрично и заранее в каждом эксперименте может быть предсказан телесный угол их разлета, то в местах наибольшего действия осколков уложены дополнительные съемные стальные листы противосколочной защиты 13.

Конструктивно взрывная камера выполнена следующим образом: цилиндр 5 установлен на тележке 9, которая с помощью гидравлической передачи 10 перемещается по рельсам 11. Вблизи обоих торцов цилиндра охвачены удерживающими хомутами 8 с регулирующими по-

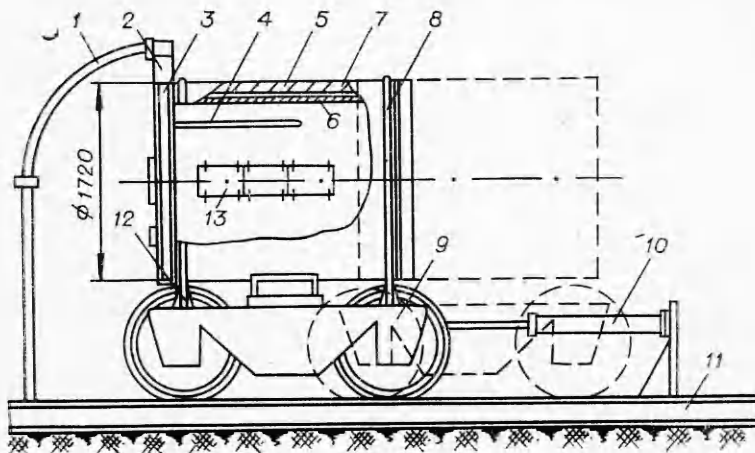


Рис. 1.

ложение цилиндра приспособлениями 12. Передняя крышка 3 подвешена в кольце 2, опирающимся на две стойки. Кольцо в верхней точке удерживается третьей стойкой 1, выполненной в виде дуги. Дуговая стойка и стойки кольца через свои опоры закреплены неподвижно на рельсах. Крышка зафиксирована в кольце в трех точках через регулирующие узлы, с помощью которых крышка закрепляется в необходимом положении. С внутренней стороны крышки имеется несколько гнезд с закрепленными в них консолями 4, на которых крепятся взрывные и экспериментальные устройства. Во время монтажа экспериментальных взрывных устройств цилиндр и тележка занимают положение, показанное на рис. 1 штриховыми линиями. Такое устройство камеры позволяет с большим удобством монтировать экспериментальные сборки и устанавливать заряд и не требует дополнительной наводки оптических регистрирующих приборов. В крышке имеется специальное отверстие, служащее для ввода измерительных кабелей и подрывной линии. Между крышкой и цилиндром в ручье проложена прокладка из резины сечением 10×10 мм. Описываемая взрывная камера располагается в обычном лабораторном помещении.

Вес ВВ испытательных подрывов равнялся 3 кг. Такой заряд имеет около 15 МДж энергии. В компоновку общей установки, в которую включена взрывная камера, входят: конденсаторные батареи, системы технического обслуживания взрывной камеры (трубопроводы, компрессор, вакуумный насос и т. д., электронная и оптическая регистрирующая аппаратура, пульты управления, системы синхронизации и т. д.).

Оснащение взрывной камеры перечисленными устройствами и аппаратурой позволяет проводить в камере различного рода экспериментальные исследования. Так, например, в камере проводились эксперименты с плоскими взрывомагнитными генераторами, вес ВВ которых равнялся 700 г [5, 6]. Генератор включался через импульсный трансформатор в цепь активной нагрузки с помощью электровзрывного размыкателя тока. Длительность импульса тока в нагрузке равнялась 1 мкс, энергия, переданная в нагрузку, составляла 10 кДж. Максимальный ток первичной цепи достигал 6 МА. Импульсный уничтожаемый трансформатор позволял уменьшить выводимый из взрывной камеры ток до 280 кА.

Проводились эксперименты со спиральными ВМГ, используемыми в качестве предварительной ступени усиления тока в плоском ВМГ. Эти генераторы имели вес ВВ до 100 г и позволяли увеличить первоначальный запас энергии в 4 раза (7). Проводились также эксперименты с плоскими ВМГ с конечной энергией в магнитном поле 1 МДж, что составляет 15% энергии взрыва при весе заряда ВВ около 1,3 кг. Максимальный ток генератора, полученный при этом, составлял 14 МА и максимальная мощность $5 \cdot 10^{10}$ Вт [8]. В настоящей взрывной камере могут быть одновременно взорваны два таких генератора.

В камере исследовалась работа взрывных и электровзрывных размыкателей тока. При весе заряда ВВ до 300 г взрывные размыкатели переключали ток в 100 кА за 2 мкс. Наиболее эффективными с точки зрения времени переключения тока ВМГ в нагрузку оказались электровзрывные размыкатели. Так, например, ток в 280 кА переключался за времена около 300 нс. Изучалось также распространение ударных волн, полученных с помощью заряда ВВ в среде с переменной плотностью и градиентом магнитного поля [9]. Зафиксирована конечная скорость ударной волны в 60 км/с при начальной 12 км/с. Аналогично исследовалось распространение ударных волн, полученных при электрическом разряде, по среде с переменной плотностью. Рассматривалось инициирование детонации по поверхности при возбуждении ее от электрического взрыва фольги [10]. С помощью методики, опи-

санной в [11, 12], синтезированы тугоплавкие карбиды Fe_3C , WC , W_2C , TiC , V_4C из исходных порошкообразных составляющих.

Для создания начального магнитного потока в экспериментах с ВМГ используется ток разряда конденсаторной батареи, который вводится в камеру через коаксиальный ввод. Кроме того, камера снабжена выводом электрического тока, который используется при работе генератора на внешнюю нагрузку. Поскольку ток ВМГ достигает десятков миллионов ампер, то создать такой вывод довольно сложно потому, что он работает в условиях значительных механических нагрузок от импульсов ударной волны и магнитного поля, должен быть герметизирован, работать при напряжениях несколько десятков киловольт и иметь как можно меньшую индуктивность. Так, например, из соображений передачи наибольшей мощности от генератора вывод должен иметь индуктивность не более 10^{-8} Г. В работе [3] описан вывод из камеры, позволяющий выводить токи до $2,5 \cdot 10^6$ А при напряжении до 5 кВ.

Для конструирования выводов необходимо определить моменты наибольших механических напряжений в конструкциях вводов и выводов электрического тока. Известно, что при разряде емкости через индуктивность и сопротивление характер тока в цепи зависит от постоянной затухания $d = R^2C/4L$, где R , C , L — сопротивление, емкость и индуктивность цепи соответственно. При $0 < d < 1$ характер разряда колебательный, а при $d > 1$ апериодический. Можно показать, что максимальный ток разряда при $d = 1$ будет в e раз меньше, чем максимальный ток разряда при $d = 0$. Этот наибольший ток и необходимо принимать в расчетах для вычисления механических напряжений в конструкциях вывода тока.

Вводимый во взрывную камеру электрический ток протекает через коаксиальный ввод только в аксиальном направлении, поэтому нужно учитывать только радиальную составляющую ponderomotorных сил F_z . Указанный ввод — один из элементов камеры. Он расположен в неподвижной крышке камеры и выполнен коаксиальным с изоляцией между электродами из стеклотекстолита, залитым эпоксидной смолой. Этим же материалом ввод изолирован и от крышки камеры. Необходимость изоляции ввода от крышки камеры диктуется тем, что камера, конденсаторная батарея и измерительные цепи связаны электрическим земляным контуром и применение крышки камеры в качестве второго земляного электрода ввода ведет к существенным погрешностям в измерительных цепях. Для предохранения от ударной волны и осколков ввод изнутри камеры закрыт дополнительно металлическим колпаком. Через ввод в камеру подается энергия (50 кДж) конденсаторной батареи, служащей для создания начального магнитного потока во взрывомагнитном генераторе. В крышке имеется прямоугольное отверстие, в котором закрепляются сменные вставки. Одна из них, например, служит для крепления окна, через которое происходит съемка с помощью скоростного фоторегистратора. Окно представляет собой либо длинную узкую щель 10×150 мм, закрытую блоком из оргстекла, либо цилиндр из оргстекла толщиной $120 \div 200$ мм. Вторая вставка служит малоиндуктивным выводом тока из камеры, полученного от ВМГ.

Рассмотрим, какие механические напряжения будут возникать во вводе и выводе при прохождении по ним электрического тока. Для коаксиального ввода магнитное поле пропорционально току $H(r) = 1/2\pi \cdot I/r$ и тогда магнитное давление выразится следующим образом:

$$p = \frac{H^2}{8\pi} = \frac{I^2}{32\pi^3 r^2} \frac{\left(\frac{U_0}{L} e^{-Ut} \frac{\sin \omega t}{\omega}\right)^2}{32\pi^3 r^2}.$$

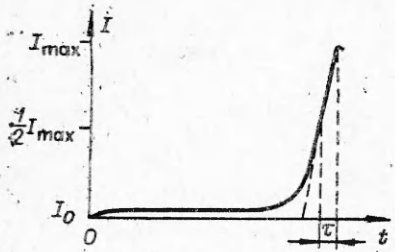


Рис. 2.

Здесь и далее H — магнитное поле; I , U — ток и напряжение в цепи ввода; P — магнитное давление; r — радиус внутренней поверхности внешнего электрода коаксиального ввода; ω — частота; t — время; P_{\max} , I_{\max} — максимальные давления и ток. Выражая магнитное давление через параметры цепи, получим максимальное давление

$$P_{\max} = \frac{U_0^2 C}{32\pi^2 L r^2}.$$

Ток во взрывомагнитном генераторе на последней стадии приблизительно можно описать функцией $I = I_0 e^{\alpha t}$, где I_0 — запиточный ток генератора, т. е. максимальный ток разряда батареи. α в каждом конкретном случае можно определить экспериментально. Поскольку максимальный ток генератора больше I_0 в 20—30 раз, и магнитное давление $p \sim I^2$, то для расчетов давлений экспоненциальную форму в зависимости тока от времени можно заменить прямой, проходящей через точку последнего удвоения тока (рис. 2).

Таким образом, время действия давления можно считать равным 2τ , где τ — время последнего удвоения тока, и записать: $I = I_{\max} \cdot t/2\tau$. В настоящих экспериментах τ изменялось от 3 до 7 мкс (на малых генераторах) и до 14 мкс — на больших. Поэтому для вывода тока, который представляет собой две параллельные пластины, магнитное поле равно $H = I/2\pi l$, где l — ширина шин, по которым течет ток. Тогда магнитное давление будет изменяться по закону:

$$P = \frac{H^2}{8\pi} = \frac{I_{\max}^2 (t/2\tau)^2}{32\pi^3 l^2}.$$

Для ввода и особенно вывода тока из камеры необходимо использовать прочный материал с низким коэффициентом удельного сопротивления. Такими материалами могут быть кадмиевая закаленная, хромистая или бериллиевая медь. У указанных материалов предел текучести в 12—20 раз больше, чем у отожженной меди [13]. Температура отжига у кадмиевой меди 150°C , а у хромистой и бериллиевой 350°C , поэтому допустимая плотность тока должна быть выбрана такой, чтобы не допустить отжига используемого материала из-за джоулева нагрева. В случае конечной проводимости σ и постоянной теплопроводности c_v изменение температуры на поверхности вывода в нашем случае можно оценить из формулы:

$$\int_0^t j^2 dt = \int_{Q_0}^Q \sigma dQ,$$

где j — плотность тока; Q — теплота. Так как $Q = c_v T$ и $\int_0^t j^2 dt = \int_{T_0}^T \sigma c_v dT$, то $\int_0^t j^2 dt = \left(\frac{I_{\max}}{2\tau}\right)^2 \frac{t^3}{3} = \int_{T_0}^T \sigma c_v dT$. На внутреннюю поверхность крышки взрывной камеры будет действовать давление ударной волны, описываемое формулой [1]:

$$p_{\max} = 8k\rho_0 Q_{\text{ВВ}} \left(\frac{r_0}{R}\right)^{\nu} \frac{3^{\nu}\gamma - 1}{(\nu + 2)^2 (\gamma^2 - 1)},$$

где γ — показатель политропы воздуха ($\gamma = 1,4$); ρ_0 — плотность ВВ в заряде; $Q_{\text{ВВ}}$ — теплотворная способность ВВ заряда; r_0 — приведен-

ный радиус заряда VB ; R — расстояние до заряда от внутренней поверхности ввода; $\nu = 2$, $k = \pi$ — случай цилиндрической симметрии заряда VB в камере (вывод на цилиндрической части камеры); $\nu = 3$, $k = 4/3 \cdot \pi$ — случай сферической симметрии. В нашем частном случае имеем сферическую симметрию, следовательно, вывод будет нагружаться как магнитным давлением $p_m \sim -\sigma_r$, так и давлением ударной волны взрыва $p_{ув} \sim -\sigma_z$ (σ_r , σ_z , σ_φ — напряжения). Поскольку размер поперечного сечения токоввода и токовывода мал по сравнению с размерами плоскости крышки камеры, то напряжения $\sigma_\varphi = 0$.

Таким образом могут быть определены напряжения в рассчитываемом элементе (вводе или выводе электрического тока) во взрывной камере.

Поступила в редакцию
22/XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Демчук. Канд. дис. Новосибирск, ИГ, 1971.
2. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1968, 5, 47.
3. А. Е. Войтенко, А. Ф. Демчук, Б. И. Куликов. ПТЭ, 1970, 1, 20.
4. В. С. Гамбаров, А. Ф. Демчук и др. Бюллетень: Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1974, 35; Авт. свид. № 444394.
5. Е. И. Азаркевич, А. Е. Войтенко и др. — В сб.: Газовые лазеры. Под ред. Р. И. Солоухина, В. П. Чеботаева. Новосибирск, «Наука», 1977.
6. Е. И. Азаркевич, А. Е. Войтенко и др. ЖТФ, 1976, 46, 9, 1957.
7. В. П. Исаков. Тез. докл. III Всесоюз. симп. по сильноточной импульсной электронике. Томск, 1978.
8. Е. И. Биченков, А. Е. Войтенко и др. Докл. АН СССР, 1968, 183, 6, 1289.
9. В. В. Закайдаков, В. П. Исаков и др. ПМТФ, 1976, 5, 46.
10. А. П. Байков, А. Е. Войтенко и др. ФГВ, 1973, 9, 2, 323.
11. А. Е. Войтенко, В. П. Исаков, Т. М. Соболенко. ТВТ, 1975, 5, 1098.
12. А. Е. Войтенко, В. П. Исаков, В. И. Кирко. — В сб.: Взрывное дело, № 78/35. М., «Недра», 1977.
13. Д. Паркинсон, Б. Манхолл. Получение сильных магнитных полей, М., Атомиздат, 1971.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВНОГО ПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА

В. И. Кирко

(Новосибирск)

Взрывные источники плазмы используются для изучения высокоскоростных газодинамических процессов, протекающих в условиях высоких температур и давлений [1, 2], и применяются для нанесения покрытий и термической обработки материалов [3—6]. В связи с этим появилась необходимость детального изучения энергетических характеристик плазмы взрывного источника, а также влияния основных параметров источника на эти характеристики.

В настоящей работе изучаются энергетические характеристики взрывного плазменного компрессора [7] в зависимости от плотности заполнения его камеры сжатия рабочим веществом и от отношения массы взрывчатого вещества к массе метаемой пластины r_m .

КПД взрывного плазменного компрессора. При работе взрывного компрессора энергия, выделяющаяся в результате взрыва химического VB , переходит в энергию метаемой пластины, а затем — в энергию плазмы. В [8] показано, что пластина приобретает максимальную скорость на расстоянии, равном $\sim 1/5$ толщины заряда VB , поэтому, когда на участке разгона пластины давление сжатого в компрессоре газа на ее ускорение сказывается слабо, значение КПД компрессора можно представить в виде произведения

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (1)$$