

## СХЛОПЫВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С. Г. Алиханов, Г. И. Будкер, Г. Н. Кичигин, А. В. Кошкин

(Новосибирск)

В работе представлены результаты экспериментов по схлопыванию металлических оболочек (лайнеров) под действием магнитного поля одновиткового соленоида. Получены энергии схлопывающихся оболочек около 400 кдж, что составляет  $\approx 25\%$  начальной энергии конденсаторной батареи. Приводится теоретический расчет движения лайнера при некоторых упрощениях. Данные экспериментов сравниваются с расчетными.

Одним из способов концентрации большой энергии в малом объеме является использование для этой цели кинетической энергии схлопывающейся оболочки. В качестве оболочки целесообразно применить тонкостенный металлический цилиндр (лайнер). Для ускорения лайнера обычно применяются взрывчатые вещества [1,2]. Однако в лабораторных экспериментах несомненно удобнее использование магнитного давления [3]. В этом случае передача энергии происходит по схеме: энергия конденсаторной батареи — магнитное поле соленоида — кинетическая энергия лайнера. Для проведения такого эксперимента необходимо выполнение двух условий: время сжатия  $t_*$  меньше времени проникновения поля внутрь оболочки, т. е.  $t_* < bd/D$  ( $b$  — толщина оболочки,  $d$  — диаметр лайнера,  $D$  — коэффициент диффузии магнитного поля); давление магнитного поля должно существенно превышать предел прочности материала оболочки. Если второе требование удовлетворяется, то лайнер можно считать жидким, и его движение под действием магнитного давления будет описываться в рамках магнитной гидродинамики, причем из теоретического анализа такого движения (в продольном магнитном поле) следует, что оно устойчиво [4]. В данной работе приведены результаты экспериментов по схлопыванию металлических оболочек в магнитном поле (металлический  $\theta$ -пинч), которые сравниваются с данными теоретического расчета движения лайнера. Магнитное поле создается одновитковым соленоидом, внутри которого помещен лайнер. Соленоид вместе с малоиндуктивными подводами и источником энергии — батареей конденсаторов — образует  $RLC$ -контур. Общая емкость конденсаторов  $C_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  Ф, начальное напряжение  $U_0 = 4$  кв. Типичные параметры алюминиевых (марка АД-1М) лайнеров: внешний диаметр  $d = 80$  мм, толщина стенки  $b = 2,5$  мм, длина  $l = 150$  мм, масса  $M = 250$  г; параметры медных (медь М1) лайнеров соответственно:  $d = 80$  мм,  $b = 1$  мм,  $l = 150$  мм,  $M = 350$  г. При проведении экспериментов измерялись ток в контуре и напряжение на батарее конденсаторов. Положение лайнера фиксировалось с торца в проходящем свете импульсной лампы (ИФК-200) СФР-ом, работающим в режиме непрерывного фоторегистрирования и режиме лупы времени.

1. Рассмотрим схлопывание проводящего металлического лайнера в продольном магнитном поле. Задача сводится к совместному решению уравнений движения лайнера под действием магнитного давления и уравнений, описывающих электрические процессы в контуре. При решении не учитываются следующие факторы: конечность толщины лайнера, потери энергии на деформацию, проникновение поля внутрь лайнера и изменение активного сопротивления контура со временем. При этих упрощениях система уравнений запишется следующим образом (в гауссовской системе единиц):

$$\begin{aligned} M \frac{d^2\delta}{dt^2} &= - \frac{I^2}{2c^2} \frac{\partial L}{\partial \delta}, & \delta(t) &= r_0 - r(t), \\ I &= - C_0 \frac{dU}{dt}, & U &= \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} (LI) + RI \end{aligned} \quad (1.4)$$

Здесь  $M$  — масса лайнера,  $r_0$  — радиус соленоида,  $r$  — радиус цилиндрической оболочки;  $I(t)$ ,  $U(t)$  — ток и напряжение на конденсаторе;  $R$ ,  $C_0$ ,  $L(t)$  — соответственно сопротивление, емкость и индуктивность контура,  $c$  — скорость света. Эта система уравнений решалась при начальных условиях

$$I(0) = \delta(0) = \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad U(0) = U_0 \quad (1.2)$$

Индуктивность контура (без учета торцов соленоида) легко выражается через  $\delta(t)$ :

$$L(t) = L_0 + L_1(t) = L_0 + \frac{4\pi^2 N^2 \delta(t) [2r_0 - \delta(t)]}{l} \quad (1.3)$$

Здесь  $L_1$  — индуктивность соленоида с лайнером;  $L_0$  — индуктивность контура в начальный момент времени;  $N$ ,  $l$  — число витков и длина соленоида соответственно.

Систему (1.1) удобно привести к системе уравнений для безразмерных величин

$$y = \frac{\delta}{r_0}, \quad z = \frac{U}{U_0}, \quad \tau = \frac{ct}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

Эта система после подстановки второго уравнения из (1.1) в третье и с учетом (1.3) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{d\tau^2} &= \beta(1-y) \left( \frac{dz}{d\tau} \right)^2 \\ [1 + \alpha y(2-y)] \frac{d^2 z}{d\tau^2} + [2\alpha(1-y) \frac{dy}{d\tau} + \gamma] \frac{dz}{d\tau} + z &= 0 \quad (1.4) \\ \alpha = \frac{4\pi^2 N^2 r_0^2}{L_0 l}, \quad \beta = \frac{4\pi^2 N^2 C_0^2 U_0^2}{Mc^2 l}, \quad \gamma = \frac{cR}{\sqrt{L_0/C_0}} \end{aligned}$$

Соответственно изменятся начальные условия (1.2).

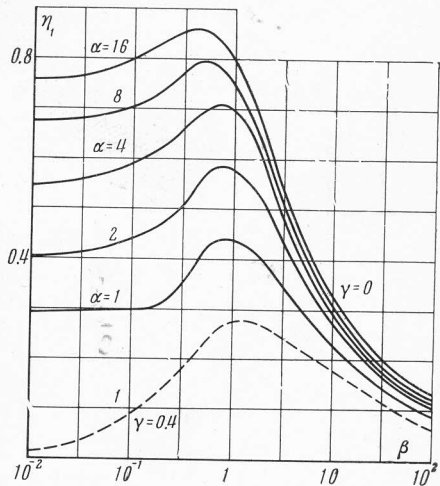
Система нелинейных уравнений (1.4) при различных параметрах  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  решалась на электронной вычислительной машине М-20.

На фиг. 1 графически представлены зависимости к.п.д. установки  $\eta$  от  $\alpha$  и  $\beta$  ( $\gamma = 0$ ). Левые части кривых соответствуют медленному сжатию, когда время сжатия существенно больше периода колебаний контура. В этом случае справедливо адиабатическое соотношение

$$W/f = \text{const} \quad (1.5)$$

Здесь  $W$ ,  $f$  — энергия и частота контура. Из соотношения (1.5) для к.п.д. получим

$$\eta = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}} \quad (\beta \ll 1)$$



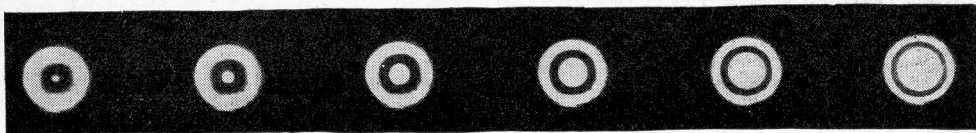
Фиг. 1

Этому закону приближенно следует зависимость  $\eta$  от  $\alpha$  (при малых фиксированных  $\beta$ ), полученная из расчета. Правые части кривых соответствуют случаю быстрого сжатия, когда оболочка схлопывается за время,

существенно меньшее времени разряда батареи. В этом случае к.п.д. мал

$$\eta \approx \alpha / \sqrt{\beta} \ll 1 \quad (\alpha \ll \beta)$$

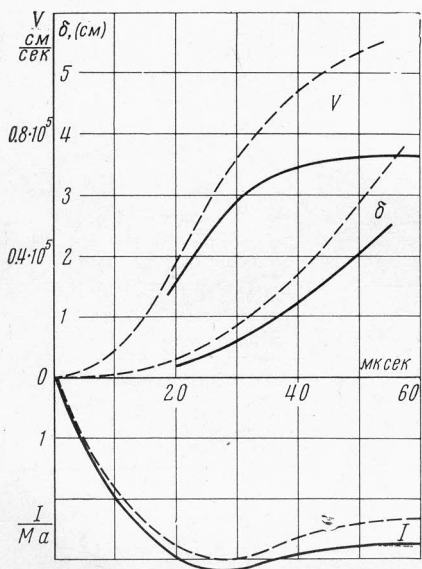
Оптимальное значение параметра  $\beta \approx 1$ , как и следует ожидать, приближенно соответствует равенству времени схлопывания полупериоду



Фиг. 2

колебаний контура. На том же графике одна из кривых (пунктир) приводится для случая  $\gamma \neq 0$ . Как видно из этого графика, учет  $\gamma$  значительно уменьшает к.п.д.

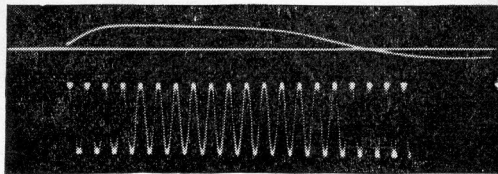
2. На фиг. 2 показаны фазы схлопывания оболочки из алюминия, снятые СФР-ом в режиме лупы времени. Интервал между кадрами 8 мксек. В соответствии с теорией [4], внешнее продольное магнитное поле не вызывает магнитогидродинамических неустойчивостей. Видимая на СФР-граммах площадь сечения кольца, в пределах ошибок измерения, остается постоянной в ходе сжатия оболочки. Это свидетельствует о том, что лайнер до самого момента схлопывания сохраняет первоначальную цилиндрическую форму. На фиг. 3 приведена экспериментальная (сплошная кривая) и теоретическая (пунктир) зависимости положения лайнера  $\delta$ , его скорости  $V$  и тока в контуре  $I$  от времени; из этой фигуры видно, что основное ускорение лайнера происходит на первой половине пути. На последнем этапе схлопывания начинают сказываться силы торможения вследствие вязкости материала и сопротивления сжатого воздуха. Запасенная лайнером кинетическая энергия переходит в энергию взрыва, которым завершается процесс схлопывания. При расширении проводящего облака, образовавшегося при взрыве, индуктивность контура уменьшается. Этим объясняется продолжение плато на осциллограмме тока в контуре после момента схлопывания оболочки, представленной на фиг. 4, где максимальное значение тока  $2.8 \cdot 10^6$



Фиг. 3

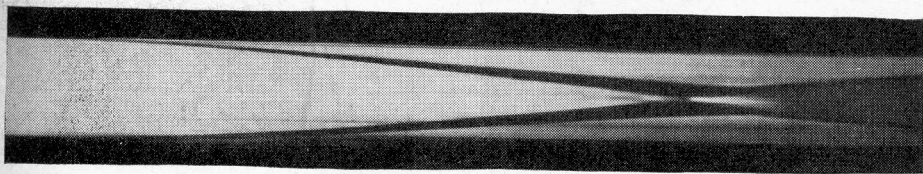
Ма (частота калибровочного сигнала 125 кгц). Медный лайнер сжимается подобно алюминиевому.

Кадровые съемки дают возможность проследить общую картину движения и устойчивости лайнера. Для определения положения и скорости оболочки в любой момент времени были проведены съемки в режиме непрерывного фоторегистрирования. Ширина щели фоторегистратора выбиралась таким образом, чтобы часть лайнера, вырезаемую ею, практически можно было считать плоской во все моменты схлопывания. На фиг. 5 показана одна из фотографий, полученная в этом режиме для алюминиевого лайнера, а на фиг. 3 приведены кривые для  $\delta(t)$  и  $V(t) = d\delta/dt$  (сплошные линии), полученные после обработки подобной фотографии. Там же приведена экспериментальная кривая для тока. Эти кривые сравниваются с расчетными (пунктир)



Фиг. 4

при соответствующих величинах параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , которые определялись условиями эксперимента. Некоторое отклонение от теории можно объяснить неточностью в определении параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , неучетом твердости (в начальный период движения) и вязкости (в конечном этапе схлопывания) металла.



Фиг. 5

Кинетическая энергия лайнера, приобретенная им за время ускорения,  $E_* = \frac{1}{2} MV_*^2$  ( $M$ —масса,  $V_*$  — максимальная скорость оболочки в конечной стадии сжатия) в проведенных экспериментах достигает 100 кдж (к. п. д.  $\approx 25\%$ ). Это превосходит ранее полученные результаты работы [5]. Схлопывающаяся металлическая оболочка с энергией 100 и более килоджоулей несомненно имеет практический интерес и может быть использована для нагрева плазмы, получения сильного магнитного поля и т. п.

В заключение авторы благодарят В. А. Полякова и В. Г. Белана за содействие при проведении эксперимента.

Поступила 15 II 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров А. Д. и др. Магнитная кумуляция. Докл. АН СССР, 1965, т. 165, № 1.
2. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of Very High Magnetic Fields by Implosion. J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, No. 3.
3. Linhart J. G., Knoepfel H., Gouylan C. Amplification of Magnetic Fields and Heating of Plasma by a Collapsing Metallic Shell. Nucl. Fusion, 1962, Suppl., pt. 2, p. 753.
4. Linhart J. G. Dynamic Stability of a Conducting, Cylindrical Shell in a Magnetic Field. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 3.
5. Snare E. C. Cylindrical Metallic Foils Collapsed in a «Theta» Pinch. Proc. Conf. on Megagauss Magn. Field by Explosives and Related Experiments. Frascati, Sept. 21—23, 1965.