

## ИНДУКТИВНОСТЬ ОДНОВИТКОВОГО МК-ГЕНЕРАТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ ВИТКА

В. С. Фоменко

(Москва)

1. В настоящее время известно несколько типов взрывомагнитных генераторов (ВМГ) [1]. Из них (по известным данным экспериментов) наиболее эффективной можно считать работу коаксиальных [2], плоскопараллельных генераторов типа «шина-шина» [3, 4] и типа «мехов» [5]. Высокий коэффициент сохранения магнитного потока  $\eta \sim 80\%$  в этих генераторах достигается за счет линейного увеличения поперечного сечения токонесущих проводников (шин) в области, примыкающей к индуктивной нагрузке.

Начальная индуктивность  $L_0$  плоскопараллельных ВМГ зависит от геометрических размеров токонесущих проводников и, в частности, пропорциональна их длине. Поэтому в таких генераторах большой коэффициент усиления тока ( $k_T = (L_0/L_N)\eta$ ,  $L_N$  — индуктивность нагрузки) достигается за счет большой длины проводников, что приводит к большому времени работы генераторов  $\sim 100$  мкс.

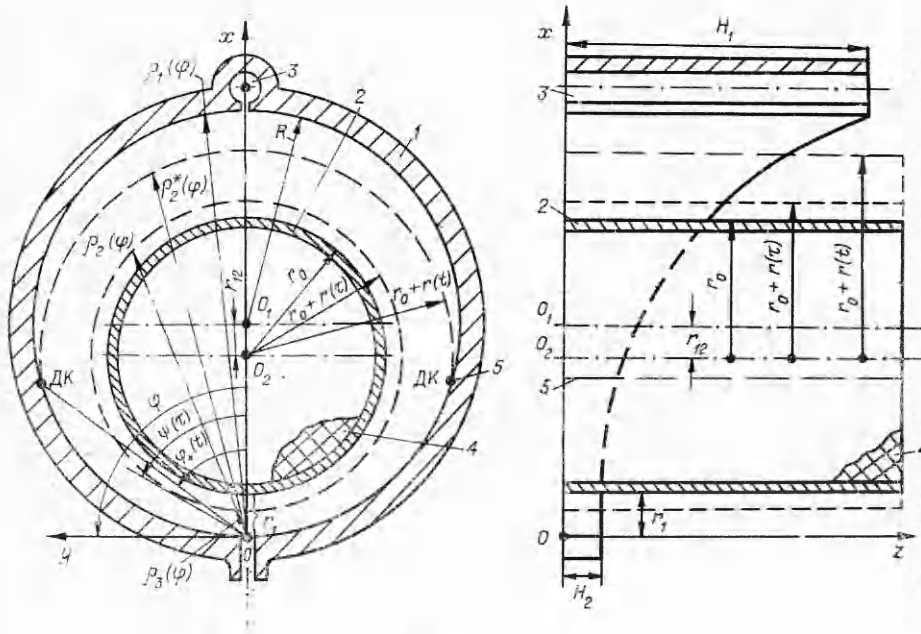
Размеры и время работы плоскопараллельных ВМГ можно уменьшить в несколько раз путем расположения шин вокруг цилиндрической проводящей трубки с зарядом взрывчатого вещества (ВВ), инициируемого по оси. В работе [6] таким образом было уменьшено время работы ВМГ до 20 мкс. Токонесущие проводники в таком генераторе (одновитковом) имели постоянное сечение, что снижало коэффициент  $\eta$  в конце работы генератора, когда напряженность магнитного поля достигала значения выше критического  $H_*$  для материала проводников (например, для проводников из меди  $H_* \sim 1$  МЭ [1]).

Эффективность одновиткового генератора можно повысить путем профилирования его токового контура за счет параболического увеличения образующей витка от токоподводящих клемм до индуктивной нагрузки [7]. Указанный характер изменения образующей витка близок к закону нарастания тока генератора и ограничивает величину нарастания линейной плотности тока  $j_+(t) = -\eta(t)\Phi_0/L(t)z_+(t)$  (напряженности магнитного поля  $H_+(t) = 0,4\pi j_+(t)$ ) по линии динамического контактирования (ДК) оболочки с витком  $z_+(t)$  в процессе работы ВМГ. Выбором геометрических размеров и величины начального магнитного потока генератора  $\Phi_0$  можно обеспечить предельно допустимый токовый режим проводников (по величине поля  $H_+(t) \approx 1$  МЭ), не переходящий в процессе работы ВМГ в стадию электрического взрыва скиповой поверхности проводников. Такой режим работы является наиболее целесообразным для создания малогабаритных ВМГ на заданные электромагнитные параметры — энергию, мощность.

Нарастание магнитного поля в генераторе (в области ДК проводников) до напряженности  $H_+(t) > H_*$  приводит к интенсивному поверхностному нагреву проводников, к взрыву их поверхностного слоя, увеличивая омические потери, а также способствуя возникновению интенсивных локальных электрических пробоев, приводящих к отсеканиям части магнитного потока в области ДК.

2. Для определения токового режима проводников профилированно-виткового МК-генератора, для выявления его преимуществ по сравнению с известными ВМГ представляет интерес найти взаимосвязь индуктивности генератора с геометрическими размерами его токового контура.

Схема ВМГ одновиткового типа с параболическим профилем витка приведена на фиг. 1 (1 — виток, 2 — оболочка, 3 — индуктивная нагрузка, 4 — заряд ВВ, 5 — линия динамического контактирования оболочки с витком  $z_+(t)$ ,  $R$  — внутренний радиус витка,  $r_0$  — наружный радиус оболочки,  $H_1, H_2$  — максимальная, минимальная полуобразующая витка соответственно,  $r_1$  — расстояние между оболочкой и минимальной образующей витка,  $r_{12}$  — эксцентриситет). Полярная система координат  $(\rho, \varphi)$



Фиг. 1

выбрана в поперечном сечении генератора с полюсом в нижней точке  $O$  окружности радиуса  $R$  и с полярной осью, совпадающей с осью  $Ox$ .

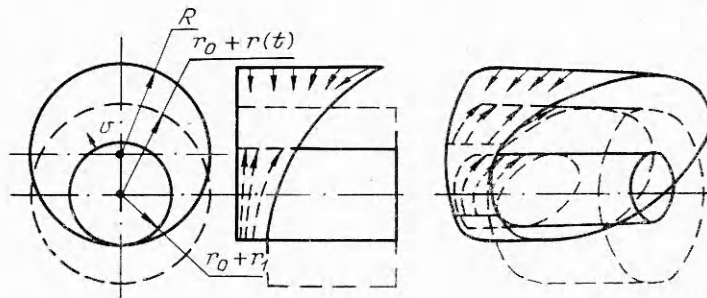
Уравнения окружности (внутренней границы витка) радиуса  $R$  с центром в точке  $O_1(x = R, y = 0)$  и наружной границы оболочки радиуса  $r_0 + r(\tau)$  с центром в точке  $O_2(x = r_0 + r_1, y = 0)$  имеют соответственно вид

$$(2.1) \quad \begin{aligned} \rho_1(\varphi) &= 2R \cos \varphi, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi/2; \\ \rho_{2, 3}(\varphi) &= (r_0 + r_1) \cos \varphi \pm \sqrt{[r_0 + r(\tau)]^2 - (r_0 + r_1)^2 \sin^2 \varphi}, \\ & \quad 0 \leq \varphi \leq \pi/2, \end{aligned}$$

где  $r(\tau) = \int_0^\tau v(\tau) d\tau, 0 \leq r(\tau) \leq r_1, v(\tau)$  — скорость расширения наружной границы оболочки под действием продуктов ВВ и противодействия магнитного поля,  $\tau$  — текущее время работы генератора при полете оболочки к минимальной образующей витка,  $0 \leq \tau \leq \tau_k, \tau_k$  — момент начала ДК оболочки с витком. Каждому моменту времени  $\tau$  соответствует отрезок величины  $\varphi$ , ограниченный значениями  $0 \leq \varphi \leq \psi(\tau)$ , где  $\psi(\tau) = \arcsin\left(\frac{r_0 + r(\tau)}{r_0 + r_1}\right)$  — угол между осью  $Ox$  и касательной, проведенной из начала координат  $O$  к окружности радиуса  $r_0 + r(\tau)$ .

При  $t > \tau_k$  ( $t$  — текущее время работы генератора,  $t - \tau_k$  — текущее время ДК оболочки с витком)

$$(2.2) \quad \begin{aligned} \rho_2^*(\varphi) &= (r_0 + r_1) \cos \varphi + \sqrt{[r_0 + r(t)]^2 - (r_0 + r_1)^2 \sin^2 \varphi}, \\ & \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$



Фиг. 2

где  $r(t) = r_1 + \int_{\tau_k}^t v(t) dt$ ,  $v(t)$  — скорость оболочки на стадии ДК с витком.

Каноническое уравнение параболического цилиндра, образующая которого перпендикулярна минимальной образующей витка и проходит через нее в точке  $(x = 0, y = 0, z = H_2)$ , имеет вид

$$(2.3) \quad 2p(z - H_2) = x^2.$$

Граница витка, усеченного параболическим цилиндром и спроектированная на плоскость  $xOz$ , описывается также уравнением вида (2.3). Коэффициент  $p$  параболы, проходящей через точку  $(x = 2R, z = H_1)$ , следует из (2.3):  $p = 2R^2/(H_1 - H_2)$ .

Тогда любое значение координаты  $z$ , изменяющейся от  $H_2$  до  $H_1$ , определяется уравнением

$$(2.4) \quad z(\rho, \varphi) = \frac{H_1 - H_2}{(2R)^2} (\rho \cos \varphi)^2 + H_2, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \rho \leq \rho_1.$$

С использованием (2.1) из (2.4) следует зависимость изменения полуобразующей витка

$$z(\rho_1, \varphi) = (H_1 - H_2) \cos^4 \varphi + H_2.$$

Предположим, что растекание электрического тока по оболочке с зарядом ВВ происходит лишь по той части ее поверхности, которая ограничена поверхностью витка (фиг. 2, область растекания тока по оболочке показана штриховыми стрелками, а по витку — сплошными).

Тогда для  $\tau_k < t \leq t_k$  ( $t_k$  — время работы генератора) с использованием (2.2) из (2.4) получим уравнение изменения полуобразующей поверхности оболочки, по которой растекается ток

$$z(\rho_2^*, \varphi) = \frac{H_1 - H_2}{(2R)^2} (\rho_2^* \cos \varphi)^2 + H_2, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}.$$

3. В приближении однородного распределения напряженности магнитного поля в рабочей полости генератора (полость между оболочкой и витком), т. е. в случае  $\left\langle H_+(t) \frac{z(\rho_1, \varphi_+)}{z(\rho, \varphi)} \right\rangle = H$ , выражение для внешней индуктивности генератора можно записать в виде

$$(3.1) \quad L = \begin{cases} L(\psi(\tau)) + L_H, & 0 \leq \tau \leq \tau_k, \\ L(\varphi_+(t)) + L_H, & \tau_k < t \leq t_k, \end{cases}$$

где

$$L(\psi(\tau)) = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{S^2(\psi(\tau))}{V(\psi(\tau))} k_1(\tau); \quad L(\varphi_+(t)) = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{S^2(\varphi_+(t))}{V(\varphi_+(t))} k_1(t),$$

$S, V$  — соответственно площадь поперечного сечения, рабочий объем между радиусом оболочки  $r_0 + r(\tau)$  (или  $r_0 + r(t)$  на стадии ДК) и радиусом витка  $R, \varphi_+$  — координата  $\varphi$  по линии ДК,  $k_1(\tau) \simeq \frac{1}{2} \left[ f \left( \frac{r_1 - r(\tau)}{2H_2} \right) + f \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{\delta - r(\tau)}{2H_1} \right) \right] \leq 1, \quad k_1(t) \simeq \frac{1}{2} \left[ 1 + f \left( \frac{\delta - r(t)}{2H_1} \right) \right] \leq 1, \quad \delta = 2R - 2r_0 - r_1 -$  максимальная база полета оболочки. Характер изменения и численные значения функции  $f$  такие же, как у функции  $f(b/h)$  ( $h$  — ширина шины,  $b$  — зазор между шинами) для токонесущей линии из параллельных плоских пластин [1].

На стадии полета оболочки к минимальной образующей витка ( $0 \leq \tau \leq \tau_k$ ) имеем

$$(3.2) \quad \begin{cases} S(\tau) = \pi [R^2 - (r_0 + r(\tau))^2], \\ V(\psi(\tau)) = 4 \left[ \int_0^{\pi/2} \int_0^{\rho_1(\varphi)} z(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi - \int_0^{\psi(\tau)} \int_{\rho_2(\varphi)}^{\rho_1(\varphi)} z(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi \right]. \end{cases}$$

На стадии ДК оболочки с витком,  $\tau_k < t \leq t_k$ ,

$$(3.3) \quad \begin{cases} S(\varphi_+(t)) = 2 \int_0^{\varphi_+(t)} \int_{\rho_2^*(\varphi)}^{\rho_1^*(\varphi)} \rho d\rho d\varphi, \\ V(\varphi_+(t)) = 4 \int_0^{\varphi_+(t)} \int_{\rho_2^*(\varphi)}^{\rho_1^*(\varphi)} z(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi. \end{cases}$$

Вычисление интегралов (3.2), (3.3) приводит к нижеследующим выражениям, которые позволяют представить индуктивность (3.1) в виде явной аналитической зависимости от геометрических размеров генератора:

$$(3.4) \quad V(\tau) = \frac{5}{8} \pi (H_1 - H_2) R^2 + 2\pi H_2 R^2 + \frac{3}{2} \pi \frac{H_1 - H_2}{R^2} (r_0 + r(\tau))^4 - \frac{\pi}{2} \frac{H_1 - H_2}{R^2} \left[ (r_0 + r_1)^2 (r_0 + r(\tau))^2 + (r_0 + r(\tau))^4 + \frac{4R^2 H_2}{H_1 - H_2} (r_0 + r(\tau))^2 \right],$$

где

$$r_0 + r(\tau) = (r_0 + r_1) \sin \psi(\tau); \quad \arcsin \left( \frac{r_0}{r_0 + r_1} \right) \leq \psi(\tau) \leq \frac{\pi}{2};$$

$$(3.5) \quad S(\varphi_+(t)) = R^2 (2\varphi_+(t) + \sin 2\varphi_+(t)) - \frac{1}{2} (r_0 + r_1)^2 \sin 2\varphi_+(t) - \\ - \varphi_+(t) K^2(\varphi_+(t)) - (r_0 + r_1)^2 \left[ \sin \varphi_+(t) \sqrt{a^2(t) - \sin^2 \varphi_+(t)} + \right. \\ \left. + a^2(t) \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_+(t)}{a(t)} \right) \right], \\ V(\varphi_+(t)) = (H_1 - H_2) \left[ \frac{2}{3} R^2 - \frac{7}{24} \frac{(r_0 + r_1)^4}{R^2} \right] \cos^5 \varphi_+(t) \sin \varphi_+(t) +$$

$$\begin{aligned}
& + (H_1 - H_2) \left[ \frac{5}{6} R^2 + \frac{1}{96} \frac{(r_0 + r_1)^4}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{(r_0 + r_1)^2 K^2(\varphi_+(t))}{R^2} \right] \times \\
& \times \left( \frac{3}{2} \varphi_+(t) + \sin 2\varphi_+(t) + \frac{1}{8} \sin 4\varphi_+(t) \right) + \left[ 4H_2 R^2 - \frac{1}{8} \frac{H_1 - H_2}{R^2} \times \right. \\
& \times K^4(\varphi_+(t)) + \frac{1}{4} \frac{H_1 - H_2}{R^2} K^2(\varphi_+(t))(r_0 + r_1)^2 \left. \right] \left( \varphi_+(t) + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_+(t) \right) - \\
& - 2H_2 \varphi_+(t) K^2(\varphi_+(t)) - H_2 (r_0 + r_1)^2 \sin 2\varphi_+(t) - \frac{1}{24} \frac{H_1 - H_2}{R^2} (r_0 + r_1)^4 \times \\
& \times \sin^5 \varphi_+(t) \cos \varphi_+(t) - \frac{1}{96} \frac{H_1 - H_2}{R^2} (r_0 + r_1)^4 \left( \frac{3}{2} \varphi_+(t) - \sin 2\varphi_+(t) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{8} \sin 4\varphi_+(t) \right) - (H_1 - H_2) \left[ \frac{1}{8} \frac{(r_0 + r_1)^2 K^2(\varphi_+(t))}{R^2} + 2 \frac{H_2}{H_1 - H_2} (r_0 + r_1)^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \frac{(r_0 + r_1)^4}{R^2} \right] \left[ \sin \varphi_+(t) \sqrt{a^2(t) - \sin^2 \varphi_+(t)} + a^2(t) \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_+(t)}{a(t)} \right) \right] + \\
& + (H_1 - H_2) \left[ \frac{1}{3} \frac{(r_0 + r_1)^4}{R^2} \sin^2 \varphi_+(t) - \frac{3}{4} \frac{(r_0 + r_1)^4}{R^2} \right] \sin \varphi_+(t) \times \\
& \times \sqrt{(a^2(t) - \sin^2 \varphi_+(t))^3},
\end{aligned}$$

где

$$a(t) = K(\varphi_+(t))/(r_0 + r_1); \quad K(\varphi_+(t)) = r_0 + r(t) = \sqrt{R^2 + (R - r_0 - r_1)^2 + \dots} \\
+ 2R(R - r_0 - r_1) \cos 2\varphi_+(t), \quad 0 \leq \varphi_+(t) \leq \pi/2.$$

В частности, для расчета начальной индуктивности генератора, положив в (3.2), (3.4)  $\tau = 0$ , будем иметь

$$\begin{aligned}
S(0) &= \pi (R^2 - r_0^2), \\
V(0) &= \frac{5}{8} \pi (H_1 - H_2) R^2 + 2\pi H_2 R^2 + \frac{3}{8} \pi \frac{H_1 - H_2}{R^2} r_0^4 - \frac{\pi}{2} \frac{H_1 - H_2}{R^2} \times \\
& \times \left[ (r_0 + r_1)^2 r_0^2 + r_0^4 + \frac{4H_2 R^2 r_0^2}{H_1 - H_2} \right], \\
k_1(0) &\simeq \frac{1}{2} \left[ f\left(\frac{r_1}{2H_2}\right) + f\left(\frac{\delta}{2H_2}\right) \right] \leq 1.
\end{aligned}$$

Изменение индуктивности одновиткового генератора с постоянной образующей витка ( $h$ ) определяется выражением

$$L = 4\pi \cdot 10^{-9} k_1 S/h + L_n,$$

причем величина  $S$  на соответствующей стадии работы генератора равна  $S(\tau)$ , согласно (3.2), либо  $S(t)$ , согласно (3.5),

$$k_1(\tau) \simeq \frac{1}{2} \left[ f\left(\frac{r_1 - r(\tau)}{h}\right) + f\left(\frac{\delta - r(\tau)}{h}\right) \right] \leq 1, \quad k_1(t) \simeq \frac{1}{2} \left[ 1 + f\left(\frac{\delta - r(t)}{h}\right) \right] \leq 1.$$

4. Начальная индуктивность профилированного виткового генератора зависит от относительного расположения оболочки и витка. Значение индуктивности (3.1) повышается при смещении оболочки от минимальной образующей витка в сторону индуктивной нагрузки (из-за уменьшения  $V(0)$ ). Время работы генератора при этом уменьшается (из-за уменьшения  $\delta$ ). Это свидетельствует о целесообразности выполнения указанного смещения как для сокращения длительности работы генератора, так и для

Таблица 1

$r_1$ , см	$k_1(0)^*$	$L_0$ , нГ	$t_k^{***}$ , мкс	$k_1(\tau_k)$	$\tau_k^{***}$ , мкс
0	0,875	209,04	24	—	—
0,5	0,738	181,2	22	0,876	2
1,0	0,7	177,44 (167)**	21	0,89	5
1,5	0,665	174	19,5	0,9	7,5
2,0	0,635	172,37	18	0,93	10
2,5	0,6	169,6	16,5	1,0	12,5

\* Значения коэффициента  $k_1$  получены с использованием данных работы [1].

\*\* Лабораторное измерение на макете генератора из проводящей фольги.

\*\*\* Моменты времени получены по значениям скорости  $v(t)=\text{const}=0,2$  см/мкс,  $v(t)=\text{const}=0,25$  см/мкс, близким к опытным.

Таблица 2

$r_1^*$ , см	$k_1(0)$	$L_0$ , нГ	$t_k$ , мкс
0	1	16,07	24
0,5	1	25,47	22
1,0	0,98	25,86	21
1,5	0,95	25,92	19,5
2,0	0,925	26,26	18
2,5	0,913	27,08	16,5

\* Увеличение величины смещения  $r_1$  от 0 до 2,5 см равносильно уменьшению эксцентриситета оболочки и витка от 3 до 0,5 см.

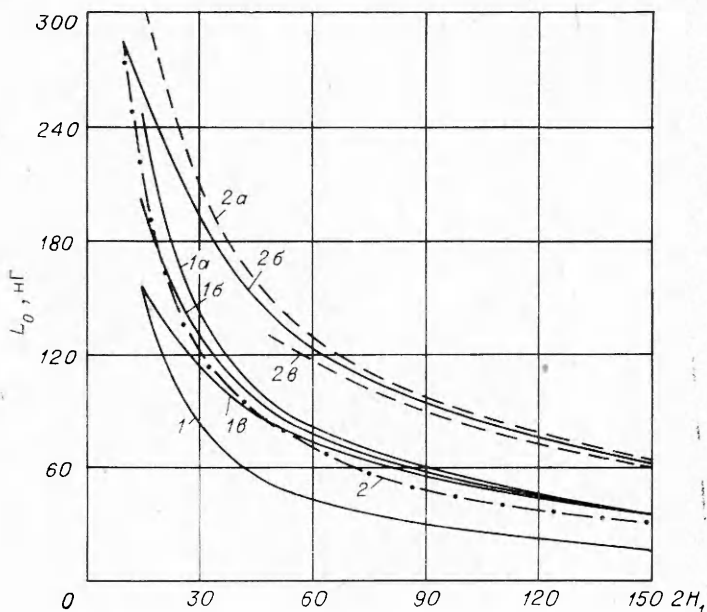
повышения скорости изменения индуктивности. Однако при таком смещении значение коэффициента  $k_1(0)$  уменьшается при малых значениях образующих витка  $2H_1$  и  $2H_2$  (как это имеет место в генераторе с размерами  $2H_1 = 15$  см,  $2H_2 = 1,5-2$  см,  $2R = 19,1$  см,  $2r_0 = 13,1$  см,  $\delta = 5$  см). Начальная индуктивность не повышается при увеличении величины смещения  $r_1$  (табл. 1).

При аналогичных величинах смещения в генераторе ( $2H_1 = 150$  см,  $2H_2 = 15$  см,  $2R = 19,1$  см,  $2r_0 = 13,1$  см,  $\delta = 5$  см) с теми же поперечными размерами витка и оболочки, но с большими значениями образующих начальная индуктивность увеличивается из-за уменьшения влияния краевого эффекта (табл. 2).

На фиг. 3 приведены результаты расчета начальной индуктивности профилированных и непрофилированных генераторов с одинаковым поперечным сечением витков и оболочек и с одинаковым их взаимным расположением. Размеры генераторов сведены в табл. 3. Кривая  $I$  — индуктивность непрофилированного генератора (с диаметром заряда ВВ 20 см) в зависимости от величины образующей витка. Кривые  $Ia - e$  — индуктивность профилированного генератора ( $2r_{ВВ} = 20$  см) в зависимости от величины максимальной образующей витка для ряда значений минимальной образующей (кривые  $Ia - e$  соответствуют значениям минималь-

Таблица 3

Номер кривых	Тип генератора	$R$ , см	$r_0$	$r_1$	$\delta$	$r_{ВВ}$	$2H$ .
$I$	Непрофилированный	13,3	10,3	1	5	10	$2H_1$
$Ia$	Профилированный	13,3	10,3	1	5	10	2
$Ib$	»	13,3	10,3	1	5	10	8
$Iв$	»	13,3	10,3	1	5	10	15
$2$	Непрофилированный	12,9	7,15	3,5	8	6,25	$2H_1$
$2a$	Профилированный	12,9	7,15	3,5	8	6,25	5
$2б$	»	12,9	7,15	3,5	8	6,25	10
$2в$	»	12,9	7,15	3,5	8	6,25	15



Фиг. 3

ной образующей 2; 8; 15 см). Аналогичные кривые 2, 2а — в приведены для генераторов с диаметром заряда ВВ 12,5 см.

Из сравнения кривых следует, что при одинаковых размерах витковых генераторов индуктивность профилированного генератора примерно в 2 раза больше по сравнению с непрофилированным. В таком же соотношении будут находиться и скорости изменения индуктивности генераторов в каждый момент времени их работы, а также конечные значения коэффициентов усиления тока ( $k_T = (L_0/L_H)\eta$ ) и энергии ( $k_E = k_T \eta$ ) в части, зависящей от  $L_0$ .

Результаты расчета индуктивности хорошо согласуются с данными эксперимента. Так, для генератора с размерами ( $2H_1 = 18$  см,  $2H_2 = 4$  см,  $2r_0 = 14$  см,  $2R = 24,3$  см,  $\delta = 6,8$  см,  $r_1 = 3,5$  см) расчетная величина начальной индуктивности составляет 215 нГ, а экспериментальное значение — 212 нГ.

Поступила 5 IX 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

2. Кюпфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
1. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. Н., Плющев Ю. И., Павловский А. И., Чернышев В. К., Феоктистова Е. А., Жаринов Е. И., Зысин А. Ю. Магнитная ку- муляция. — «Докл. АН СССР», 1965, т. 65, № 1.
3. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Демчук А. Ф., Дерибас А. А., Куликов Б. И., Нестерихин Ю. Е., Соболев О. П. Эксперименты со взрывомагнитным генератором в лабораторных условиях. — «Докл. АН СССР», 1968, т. 183, № 6.
4. Биченков Е. И. Взрывные генераторы. — «Докл. АН СССР», 1967, т. 174, № 4.
5. Knorfel H., Kroegler H., Luppi R., Van Monfoort J. E. The generation and switching of magnetic energies in the megajoule range by explosive systems. Frascati, Italy, 1968.



6. Lukasik S. J., Zepko G. W., Jameson R. L. Magnetic flux compression in an explosion geometry. Proc. conference on megagauss magnetic field generation by explosives and related experiments. Frascati, Italy, 1965. Brussels, Eur. Atom, 1966, p. 397—419.
7. Кошелев А. Я., Фоменко В. С., Чижов В. И. Взрывомагнитный генератор тока.— Бюлл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1974, № 33, с. 178.

УДК 531.44;531.57

## О ВЛИЯНИИ ТРЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ПОРШНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

В. А. Иоселевич, Н. Н. Пилюгин, С. Ю. Чернявский  
(Москва)

В последние годы в экспериментальной аэродинамике широко используются двухступенчатые легкогазовые баллистические установки с деформируемыми поршнями из пластмассы. В существующих методах расчета таких устройств либо вовсе пренебрегают трением поршня о стенки канала ствола установки [1—3], либо пользуются схематизациями трения [4—6], не имеющими достаточных обоснований. В ряде работ [7, 8] сила трения считается постоянной, причем ее величина выбирается не из физических соображений, а из условия наилучшего согласования расчетных и экспериментальных значений скорости тела или давления метаемого газа. В связи с тем, что трение является существенным фактором, вопрос о его обоснованном учете в расчетах параметров движения поршня требует специального изучения. При этом целесообразно рассмотреть работу одной только первой ступени баллистической установки, метаемой поршень навывлет.

Ниже рассматривается задача о внутренней баллистике одноступенчатой пороховой установки, в канале ствола которой с трением движется поршень из полимерного материала. Модель трения построена на основе результатов серии опытов по медленному проталкиванию сжатых в продольном направлении полимерных образцов в цилиндрическом стальном канале.

Экспериментально исследована зависимость давления пороховых газов от времени в камере постоянного объема, что позволило установить реальный закон горения пороха и выявить его отличие от геометрического [9]. Проведено сравнение расчетных и экспериментально измеренных значений максимального давления пороховых газов и дульной скорости поршня из полиэтилена.

1. В связи с тем, что сведения о характере трения твердых полимерных материалов по металлической поверхности при контактных давлениях порядка  $10^8$  Н/м<sup>2</sup> отсутствовали, была проведена серия экспериментов по проталкиванию сжатых в продольном направлении полимерных образцов в цилиндрическом стальном канале. Измерения силы трения проводились при весьма малых скоростях движения образца ( $10^{-4}$  —  $10^{-3}$  м/с). Поверхность канала была обработана до чистоты, при которой высота неровностей не превышала  $1,5 \cdot 10^{-6}$  м. Погрешности измерений силы осевого сжатия образца  $F_0$  и силы трения  $F$  не превосходили 25 и 10 Н соответственно. Образцы изготавливались из полиэтилена высокого давления и капролона. Опыты проводились с образцами различной длины  $l$  от  $0,5 \cdot 10^{-2} \pm 10^{-5}$  до  $4,0 \cdot 10^{-2} \pm 10^{-5}$  м в канале различного диаметра  $d$  от  $0,8 \cdot 10^{-2} \pm 10^{-5}$  до  $3,4 \cdot 10^{-2} \pm 10^{-5}$  м.

На фиг. 1 показаны типичные экспериментальные диаграммы  $F = F(F_0)$  при  $l/d = 1,78$  (кривая 1 — полиэтилен, 2 — капролон). На диаграммах  $F(F_0)$  можно выделить два характерных участка — на первом из них величина  $F$  растет пропорционально  $F_0$ , на втором  $F$  остается