


## ОБЗОРЫ

УДК 536.12

В. А. БАЛАКИН


 22. IX. 2021

 ТРЕНИЕ И ИЗНОС В КАНАЛЕ НАРЕЗНОГО СТВОЛА  
 АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ОРУДИЯ  
 (ПО МАТЕРИАЛАМ ЗАРУБЕЖНОЙ ПЕЧАТИ)

В процессе выстрела из артиллерийского орудия с нарезным стволом снаряд приобретает заданные линейную и угловую скорости, что обеспечивает ему необходимую дальность и устойчивость полета на траектории. В задней части снаряда имеется один или два ведущих пояска (в виде колец, закрепленных на корпусе) из относительно мягких материалов. При врезании ведущего пояска в нарезы ствола происходит закручивание снаряда вокруг своей оси, в то же время зона скользящего контакта (ведущий поясок—нарезы) должна предотвращать утечку пороховых газов в направлении движения снаряда.

Процесс фрикционного взаимодействия ведущего пояска с нарезами канала ствола сопровождается износом обоих элементов рассматриваемой пары трения. Срок службы («живучесть») канала ствола определяется допускаемой величиной потери начальной скорости снаряда при вылете из орудия, либо потерей устойчивости его в полете. Обычно он определяется несколькими тысячами выстрелов, что соответствует времени эксплуатации ствола до 10 с [1]. Чрезмерный износ ведущего пояска может привести к появлению зазора между пояском и стволом, прорыву пороховых газов в этот зазор, возникновению одностороннего контакта корпуса снаряда с каналом ствола и, как следствие, к повышенному износу ствола. На корпусе такого снаряда после выстрела видны следы нарезов ствола [2].

Изучению механизма трения и износа в канале ствола орудия посвящен ряд работ [2—12]. Рассматривая движение снаряда по каналу ствола целесообразно выделить три участка: начальный (участок врезания ведущего пояска в нарезы), средний и дульный. Эти участки отличаются друг от друга контактными давлениями и скоростями скольжения. В работе [4] описана методика экспериментального определения сил трения в процессе выстрела из 155-миллиметровой гаубицы модели М185, основанная на использовании уравнения движения снаряда по каналу ствола в виде

$$m \frac{dv}{dt} = F - T. \quad (1)$$

В уравнении (1) отсутствует сила аэродинамического сопротивления воздуха, следовательно, им можно пользоваться лишь на начальном участке движения, когда скорость снаряда еще мала.

При выстреле производят измерения: давления пороховых газов, ускорения снаряда, деформаций на наружной поверхности ствола и де-



формаций на корпусе снаряда под ведущим пояском. Передача информации от движущегося снаряда осуществляется посредством проводной связи. Вход в канал ствола имеет коническую форму, что облегчает процесс деформирования материала ведущего пояска при врезании его в нарезы. В начальные моменты врезания коэффициент трения определяется из формулы  $T = N(\sin \alpha + f \cos \alpha)$ . У ствола марки М185 величина  $\alpha = 5^\circ 48'$  ( $\sin \alpha = 0,1011$ ;  $\cos \alpha = 0,9949$ ). После полного врезания  $T = fN$ .

Исследования процесса врезания ведущего пояска в нарезы про-

Таблица 1. Данные о врезании ведущего пояска снаряда М107 в нарезы стволов [4]

$l$ , мм	$v$ , м/с	$T$ , кН	$p$ , МПа	$pv$ , МВт/м <sup>2</sup>	$f$	$q$ , МВт/м <sup>2</sup>
<i>Ствол «новый»</i>						
3,6	2,4	361	202	485	0,600	291
5,1	3,8	387	218	827	0,500	413
6,6	4,5	383	240	1115	0,290	326
8,1	5,7	387	270	1540	0,230	354
25,4	13,0	311	340	4420	0,073	323
127,0	57,9	156	345	20000	0,036	720
254,0	85,9	116	345	29700	0,026	772
508,0	117,0	89	345	40400	0,021	848
<i>Ствол «частично изношенный»</i>						
25,4	7,6	423	329	2500	0,099	418
127,0	48,2	111	344	16600	0,026	432
254,0	73,7	89	345	25500	0,021	536
508,0	104,0	71	345	36000	0,017	612

дились стрельбой из «нового» (до испытаний из него было сделано лишь около 150 выстрелов) и «частично изношенного» (после 600—800 выстрелов) стволов. Обработка экспериментальных данных по одному из выстрелов в каждом стволе представлена в табл. 1. Интенсивность тепловыделения на контакте определяется по формуле  $q = f p v$ . Ведущий поясок шириной 25,4 мм был изготовлен из медного сплава обычно применяющегося в таких случаях—90% Cu + 10% Zn.

Анализ данных показывает, что при врезании ведущего пояска в нарезы ствола контактные давления достигают 345 МПа, интенсивность тепловыделения возрастает до 612—848 МВт/м<sup>2</sup>, коэффициент трения уменьшается до значений 0,017—0,021. Процесс врезания ведущего пояска в нарезы ствола существенно влияет на внутреннюю баллистику снаряда. Изменение величины усилий врезания оказывает влияние на давление и температуру пороховых газов.

Теоретическому анализу взаимодействия снаряда с нарезным стволом орудия посвящена работа [11]. В ней рассмотрены вопросы контактной геометрии, а также радиальных перемещений ведущего пояска, корпуса снаряда и ствола под действием давления пороховых газов.

В начальные моменты врезания, когда скорость скольжения еще мала, происходит интенсивное пластическое деформирование поверхностных слоев ведущего пояска более жесткими выступами нарезки ствола. Характер фрикционного взаимодействия двух тел в зоне скользящего контакта при этом можно классифицировать как трение без смазки. С увеличением скорости возрастает интенсивность тепловыделения. Приблизительно через 130 мм пути происходит полное врезание ведущего пояска в нарезы ствола, коэффициент трения уменьшается до значений,



Таблица 2. Фрикционные свойства образцов из меди [14]

$v$ , м/с	$t$ , мс	$p$ , МПа	$\frac{pv}{\text{МВт/м}^2}$	$f$	$q$ , МВт/м <sup>2</sup>	$l$ , м	$\Delta m$ , мг	$I_h$ , $10^{-5}$
46	40,4	41,3	1900	0,77	1460	1,86	2,4	0,46
46	19,8	90,3	4150	0,60	2490	0,91	6,4	2,51
183	12,3	45,5	8320	0,27	2250	2,25	0,3	0,48
183	10,6	76,5	14000	0,27	3780	1,95	0,6	1,10
183	7,2	159,0	29100	0,17	4940	1,31	0,9	2,46
275	19,0	90,3	24500	0,24	5880	5,22	5,9	4,03
275	19,5	118,0	32500	0,18	5850	5,36	4,8	3,20
366	4,3	31,7	11600	0,30	3480	1,59	0,4	0,90
366	4,3	78,0	28500	0,19	5410	1,59	1,1	2,47
366	3,6	160,0	58500	0,13	7600	1,31	1,6	4,36
458	23,3	38,6	17700	0,26	4600	10,70	6,6	2,20
458	21,8	81,3	37200	0,19	7070	10,00	21,4	7,63
458	9,5	129,0	59100	0,15	8860	4,33	10,8	8,90
550	14,2	41,3	22700	0,26	5910	7,80	7,6	3,48
550	12,8	82,7	45500	0,18	8190	7,02	16,4	8,35
550	8,1	127,0	69800	0,15	10470	4,45	15,0	12,05

характерных для гидродинамических режимов трения. На основании этого в работах [2—9] делается вывод о плавлении поверхности трения ведущего пояска и дальнейшего движения снаряда со «смазкой».

На среднем и дульном участках ствола контактные давления зависят от перекосов снаряда по отношению к оси ствола, а также от центробежных сил, связанных с несовпадением центра масс снаряда с его осью вращения. Центробежные силы возрастают к дульной части ствола.

Исследования показали, что износ по длине ствола неравномерен [9]. Повышенный износ ствола наблюдается на участке врезания. Чем выше твердость материала ведущего пояска, тем интенсивнее износ ствола. Использование полимерных и пластмассовых поясков увеличивает срок службы ствола [11]. Применение поясков из отожженного железа ведет к несколько большему (по сравнению с медью и медным сплавом) износу нарезок ствола [9]. Тем не менее такие пояски используются на снарядах калибром 105 и 152 мм [8]. В ряде случаев «живучесть» стволов лимитирована износом дульной части ствола, где центробежные силы достигают максимальных значений. Осмотр стволов орудий и найденных после выстрела снарядов с привлечением физических методов исследований поверхностей трения (металлографии и электронной микроскопии) дает информацию о процессах изнашивания стволов и ведущих поясков. В работе [8] приводятся результаты исследований структуры поверхностных слоев ведущих поясков из меди и отожженного железа на снарядах калибром 105, 155 и 203 мм, а также структуры поверхностных слоев корпуса снаряда (из магниевового сплава с добавками 6,01% Al и 1,20% Zn) к 150-миллиметровой танковой пушке и корпуса 230-миллиметрового снаряда в местах контакта их со стволами (в дульной части) орудий. Эти исследования подтверждают факт оплавления ведущих поясков и корпусов снарядов в зоне фрикционного контакта при высоких скоростях. Потери на трение в орудиях среднего калибра составляют около двух процентов от энергии, выделяющейся при сгорании пороха [11, 12]. Помимо трения на износ ствола орудия оказывает влияние термическое, химическое и механическое воздействие пороховых газов, вызывающих эрозию канала ствола [7]. Ряд компонентов пороховых газов вступает в химическую реакцию с нагретой поверхностью ствола, изменяя ее физико-химические свойства и, в частности, уменьшая температуру плавления. С целью снижения эрозии стального ствола



Таблица 3. Фрикционные свойства образцов из снарядной стали [14]

$v$ , м/с	$t$ , мс	$p$ , МПа	$pv$ , МВт/м <sup>2</sup>	$f$	$q$ , МВт/м <sup>2</sup>	$l$ , м	$\Delta m$ , мг	$I_h$ , 10 <sup>-5</sup>
3	8,3	87,5	262	0,49	128	0,025	0,1	16,1
6	11,1	86,2	516	0,35	181	0,067	0,3	18,0
18	10,8	75,2	1350	0,54	729	0,195	7,6	15,7
46	38,0	78,0	3580	0,26	932	1,750	15,0	34,4
92	96,1	26,9	2480	0,50	1240	8,840	3,1	1,4
137	21,8	117,0	16000	0,32	5110	2,990	10,0	13,5
183	21,9	89,0	16300	0,28	4570	4,000	6,1	6,1
272	24,5	79,3	21600	0,24	5180	6,680	6,3	3,8
366	3,8	72,4	26500	0,30	7950	1,400	3,1	8,9
366	8,8	125,5	45900	0,24	11000	3,230	14,5	18,1
366	21,3	129,0	47200	0,23	10900	7,810	36,6	18,8
366	21,1	162,0	59300	0,22	13100	7,740	99,6	51,9
457	21,5	30,4	13900	0,39	5420	9,820	12,3	5,0
457	17,5	120,5	55000	0,20	11000	7,960	41,5	21,0
550	23,8	27,6	15200	0,30	4560	13,100	10,6	3,3
550	22,1	33,1	18200	0,29	5270	12,200	19,4	6,5
550	10,4	121,0	66500	0,19	12600	5,700	31,1	22,0

применяются покрытия из других металлов, например, хромирование. Нанесение покрытий из тугоплавких металлов — молибдена, вольфрама и тантала находится в стадии исследований [7]. Эффективным средством снижения эрозии является использование специальных веществ в виде вкладышей, устанавливаемых в гильзе. К этим веществам относятся полиуретан, смесь из 45%  $TiO_2$  и 55% парафина. Использование смеси из  $TiO_2$  и парафина увеличило срок службы танковых орудий до 10 000 выстрелов [7].

В лабораторных условиях моделирование процессов фрикционного взаимодействия снаряда с каналом ствола орудия проводилось на специальной дисковой установке при скоростях до 600 м/с [13, 14]. Установка состоит из диска диаметром 610 мм, который через коробку скоростей приводится во вращение посредством электродвигателя. Диск изготовлен из материала ствола орудия. К плоским (торцевым) поверхностям диска вблизи его периферии прижимаются (торцом) цилиндрические образцы диаметром 2 мм. Усилие прижима создается пневматически. Образцы имеют возможность двигаться по радиусу к центру диска, в результате чего осуществляется трение по новому («свежему») следу. Радиальное движение образцов осуществляется от автономного электропривода. Установка смонтирована внутри полости бетонного пола, что обеспечивает безопасность испытаний. Под установкой имеется смотровая яма размером 1 830×914×914 мм. Для уменьшения аэродинамических эффектов диск с образцами располагают в вакуумной камере. В процессе испытаний с помощью тензометрии измеряются силы трения и нормального давления. Одновременно регистрируются угловая скорость диска, а после испытаний линейный износ образцов.

В табл. 2—4 приведены некоторые результаты лабораторных испытаний фрикционных свойств образцов из меди, снарядной стали, медного сплава, отожженного железа, константана, цинка, никеля, алюминия, нейлона при высоких скоростях скольжения. Диаметр образцов у последних пяти материалов равен 3,7 мм. Характерными особенностями этих испытаний явились кратковременность процесса трения (от 3,6 до 96,1 мс), большие контактные нагрузки (до 162 МПа), высокие значения интенсивностей тепловыделения (от 128 до 12 600 МВт/м<sup>2</sup>) и изнашивания (от  $0,46 \cdot 10^{-5}$  до  $51,9 \cdot 10^{-5}$ ). С увеличением тепловыделения и времени контакта коэффициент трения уменьшался.



Выражая  $\frac{dp}{dx}$  из уравнения (6) и подставляя его в (8), а также учитывая (7) и (9), имеем

$$\omega r = \frac{12\mu}{h^3} \left( \frac{vh}{2} - Q - x\omega \right)^2 + \frac{\mu v^2}{h}. \quad (10)$$

В сечении  $h = h_0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ , следовательно,

$$\omega r = \mu v^2 / h_0. \quad (11)$$

С учетом (11), уравнение (10) принимает вид

$$\frac{\mu v^2}{h_0} = \frac{12\mu}{h^3} \left( \frac{vh}{2} - Q_1 - x\omega \right)^2 + \frac{\mu v^2}{h}. \quad (12)$$

В работе [16] выражения (6) — (12) приводятся в безразмерном виде, что упрощает анализ процесса плавления ползуна.

Использование уравнений гидродинамической теории смазки в рассматриваемом случае стало возможным в результате допущения, что зазор между ползуном и контртелом, заполненный расплавом, имеет профиль, аналогичный профилю зазора в радиальных подшипниках скольжения (т. е. сначала суживающийся, а затем расширяющийся). В условиях скользящего контакта ведущего пояска по нарезам канала ствола реальность такой модели вызывает сомнение. Почему у передней и задней грани ведущего пояска зазор больше, чем в промежутке между ними? Почему не учтено наличие шероховатости контртела? Требуют обоснования также вопросы тепловыделения и теплопереноса в зоне трения.

В работах [11, 17] задача об оплавлении ползуна при высоких скоростях скольжения рассмотрена в предположении, что поверхность плавления ползуна и поверхность контртела параллельны, а толщина пленки вдоль контакта постоянна. Принимается, что скорость плавления ползуна  $\dot{m} = \text{const}$ , давление в пленке не зависит от координаты  $z$ . Напряжение вязкого сдвига равно

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial z} = \mu \frac{v}{h}.$$

Эпюры скоростей в смазочном слое определяются известными зависимостями

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (z^2 - zh) + \frac{vz}{h};$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (z^2 - zh).$$

Условие неразрывности (уравнение Рейнольдса) для сдавливаемой пленки имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6v \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + 12\rho \frac{\partial h}{\partial t}$$

или

$$\nabla^2 p = 12\mu \dot{m} / \rho h^3. \quad (13)$$



Решение уравнения (13) представлено в виде

$$p - p_0 = \frac{48\dot{m}B^2\mu}{\rho h^3\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (-1)^{\frac{n-1}{2}} n^{-3} \left[ \frac{\operatorname{ch}\left(n\pi \frac{y}{L}\right)}{\operatorname{ch}\left(n\pi \frac{B}{2L}\right)} - 1 \right] \times \\ \times \cos\left(n\pi \frac{x}{L}\right). \quad (14)$$

Интегрирование (14) по площади для случая скольжения ведущего пояска в канале ствола дает  $p_{\text{ср}} = \mu mL^2/\rho h^3$ .

Здесь также не учитывается шероховатость контртела (нарезов канала ствола). Модель взаимодействия ползуна с контртелом при условии параллельности движущейся плавящейся поверхности и поверхности неподвижной чрезвычайно упрощена, особенно для таких нестационарных процессов, как движение снаряда по каналу ствола. Вопросы механики контакта, теплофизики трения и теории смазки при наличии фрикционного переноса в зоне скользящего контакта ведущий поясок — нарезы ствола являются сложными и неизученными. Тем не менее рассмотренные выше модели дают представление о состоянии вопроса по теории трения и износа в каналах нарезных стволов артиллерийских орудий и стрелкового оружия.

### Обозначения

$m$  — масса снаряда;  $v$  — скорость;  $t$  — время;  $F$  — сила давления пороховых газов;  $T$  — сила трения;  $\alpha$  — угол между образующей конуса и осью ствола;  $f$  — коэффициент трения;  $N$  — нормальная нагрузка;  $l$  — путь трения (снаряда);  $p$  — контактное давление;  $p_0$  — максимальное давление в пленке;  $q$  — интенсивность тепловыделения;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $b$  — длина контакта;  $\theta$  — температура;  $\theta_{\text{max}}$  — максимальная температура на скользящем контакте;  $C$  — константа;  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления (разложения) материала пояска;  $\theta_0$  — начальная температура;  $s=l/b$  — безразмерный путь скольжения;  $x, y, z$  — координаты;  $x_1$  и  $x_2$  — координаты передней и задней грани ползуна;  $h$  — толщина пленки расплава;  $h_1$  и  $h_2$  — толщина пленки у передней и задней грани ползуна;  $h_0$  — минимальная толщина пленки;  $\mu$  — вязкость пленки;  $\omega$  — скорость плавления;  $Q$  — объемный расход на единице ширины (в направлении  $y$ );  $Q_1$  — расход у переднего края ползуна на единице ширины;  $r$  — удельная теплота плавления на единице объема;  $E$  — скорость диссипации энергии на единице площади пленки;  $\dot{m}$  — массовая скорость плавления;  $u$  — скорость в направлении  $y$ ;  $L$  — длина ползуна;  $B$  — ширина ползуна;  $p_{\text{ср}}$  — среднее контактное давление;  $I_h$  — интенсивность изнашивания.

### Nomenclature

$m$  — projectile mass;  $v$  — velocity;  $t$  — time;  $F$  — force of pressure of gunpowder gases;  $T$  — friction force;  $\alpha$  — angle between the cone generatrix and barrel axis;  $f$  — coefficient of friction;  $N$  — normal load;  $l$  — friction length (of a projectile);  $p$  — contact pressure;  $p_0$  — maximum pressure in a film;  $q$  — intensity of heat release;  $\lambda$  — thermal conductivity;  $c$  — specific heat;  $\rho$  — density;  $b$  — contact length;  $\theta$  — temperature;  $\theta_{\text{max}}$  — maximum temperature on a sliding contact;  $C$  — constant;  $T_{\text{пл}}$  — temperature of band material melting (decomposition);  $\theta_0$  — initial temperature;  $s=l/b$  — dimensional length of sliding;  $x, y, z$  — coordinates;  $x_1$  and  $x_2$  — coordinates of the front and rare edges of a slider;  $h$  — melt film thickness;  $h_1$  and  $h_2$  — film thickness at the front and rare edges of a slider;  $h_0$  — minimum film thickness;  $\mu$  — film viscosity;  $\omega$  — melting rate;  $Q$  — volume flow rate on a unit of width (in  $y$  direction);  $Q_1$  — flow rate at the slider front edge on a unit of width;  $r$  — specific heat of melting on unit volume;  $E$  — rate of energy dissipation on a unit of film area;  $\dot{m}$  — mass velocity of melting;  $u$  — velocity in  $y$  direction;  $L$  — slider length;  $B$  — slider width;  $p_{\text{ср}}$  — mean contact pressure;  $I_h$  — wear rate.