

УДК 623.52

В.Е. Слуцкий¹, А.А. Зайцев²

УЧЕТ В БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО КОМПЛЕКСА ДЕФОРМАЦИЙ ВЕДУЩЕГО ПОЯСКА СНАРЯДА ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Открытое акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт
«Буревестник»²

При решении задач внутренней баллистики неизбежно приходится осуществлять согласование решения с экспериментальными данными с помощью согласующих коэффициентов. Явления контакта ведущего пояска снаряда с каналом ствола зачастую при написании моделей не учитывается. В связи с этим требуется согласование для каждого состояния ствола в зависимости от его износа или нагрева, что не позволяет использовать модель в качестве бесстрельбовой методики баллистической подготовки орудий.

Предлагаемая методика позволяет осуществить согласование с экспериментом только один раз, подбирая параметры под поставленную партию зарядов и используя их при стрельбе этой партии из орудий, имеющих различный износ и нагрев ствола в процессе стрельбы.

Ключевые слова: Баллистическая подготовка, внутренняя баллистика, ведущий поясок снаряда.

В составе ошибок стрельбы, определяющих эффективность поражения целей артиллерийскими комплексами, ошибка баллистической подготовки является одной из важнейших. Одной из задач баллистической подготовки является определение поправок на отклонение начальной скорости снаряда из-за износа канала ствола и свойств партии для отдельного орудия. В настоящее время этот класс задач решается методами внутренней баллистики с использованием допущений, принятых ОСТ ВЗ-3296-85 "Метод внутрибаллистического расчета". В статье предлагается усовершенствование метода путем использования при решении задачи внутренней баллистики:

- анализа внедрения ведущего пояска снаряда в канал ствола при досылке снаряда в ствол;
- определения величины давления, обеспечивающего обмятие ведущего пояска (давления форсирования) и длины участка, на котором осуществляется обмятие пояска, и, соответственно, сопротивления движению снаряда на этом участке;
- определения величины раскручивающего снаряд момента и возникающей силы сопротивления движению снаряда (силы трения).

Глубина внедрения снаряда при досылке и соответствующее изменение объема камеры осуществляются решением задачи определения точки контакта ведущего пояска снаряда с поверхностью изношенного ствола и деформации ведущего пояска при внедрении его в ствол. При решении задачи определения точки контакта используется представление измеренной площади канала ствола аппроксимирующим кусочно-кубическим сплайном, а задачи внедрения решением задачи Ляме при воздействии на кольцо внутреннего давления $p_{вн}$ (от корпуса снаряда) и внешнего давления $p_{нар}$ (от поверхности канала ствола).

Глубина внедрения определяется зависимостью

$$x_{дос}^{nl} = \sqrt{\frac{U_{дос}}{\pi \cdot R_{нар} \cdot (f_{врез} + \gamma) \cdot p_k^m}};$$

На поверхности контакта при досылке действует давление

$$p_k = p_k^m + p_k^{nl} = p_k^m + \frac{2 \cdot k^2 \cdot \gamma}{(1 - k^2) \cdot (1 - \nu^2) \cdot R_{вн}} \cdot E_t \cdot x_{дос}^{nl};$$

$$p_k^m = \frac{\sigma_m \cdot k^2 \cdot (1 - k^2)}{[1 + 3k^2 - \nu \cdot (1 - k^2)]};$$

$$\gamma = -0,5 \cdot \frac{dD}{dx} = -\frac{dS/dx}{2\sqrt{\pi} \cdot S(x^*)};$$

где $U_{дос}$ - энергия, получаемая снарядом при досылке; $S(x)$ - профиль площадей поперечных сечений канала по длине трубы по результатам измерений диаметров канала ствола по полям и нарезам.

Характеристики ведущего пояска:

$R_{нар} = D_{вп}^{max}/2$ - максимальный наружный радиус;

$R_{вн} = D_{оп}/2$ - внутренний радиус опорной поверхности;

σ_T - предел текучести материала;

E_y - модуль упругости материала;

E_t - модуль упрочнения на участке пластичности;

ν - коэффициент Пуассона;

$f_{врез}$ - коэффициент трения при контакте ведущего пояска с каналом ствола;

γ - угол конусности на поверхности контакта.

При решении задачи контакта и деформирования ведущего пояска снаряда используется схема взаимодействия ведущего пояска и канала ствола, представленная на рис. 1.

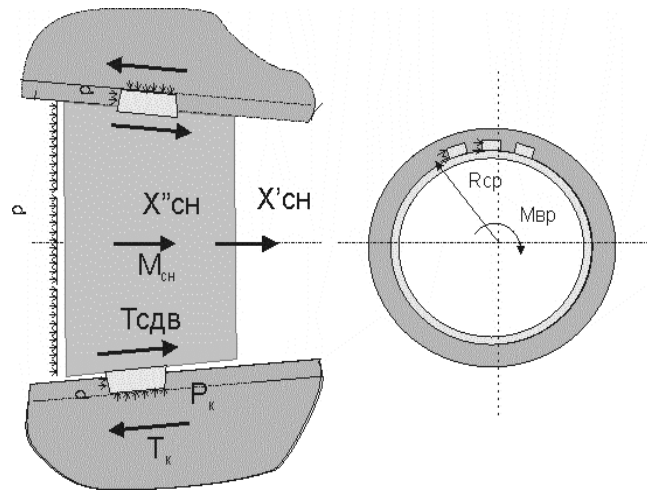


Рис. 1. Схема взаимодействия ведущего пояска и канала ствола

Снаряд движется под действием баллистического давления p с ускорением $\ddot{X}_{сн}$ и под действием спирали нарезки вращается с ускорением $\ddot{\alpha}$.

На ведущий поясок действуют:

- сдвигающая сила со стороны корпуса снаряда $T_{сдв} = p \cdot S_{корп} - m_{сн} \cdot \ddot{X}_{сн}$;

- вращающий момент $M_{вр} = J_{сн} \cdot \ddot{\alpha} = J_{сн} (\ddot{X}_{сн} \cdot \frac{d\alpha}{dx} + \dot{X}_{сн}^2 \cdot \frac{d^2\alpha}{dx^2})$;

- контактное давление p_k между поверхностью канала ствола и ведущим пояском, определяемое по величине деформации пояска, стенок ствола и снаряда;

- контактное давление на гранях нарезов $p_{нар} = \frac{M_{вр}}{R_{ср} \cdot n \cdot b_{вн} \cdot h_{вн}}$;

- сила трения на контактных поверхностях $T_k = (f_{ep} + \gamma) \cdot \int_{S_k} p_k \cdot ds + ((f_{ep} + R_{cp}) \cdot \frac{d\alpha}{dx}) \cdot \frac{M_{ep}}{R_{cp}}$;
- баллистическое давление p на заднюю поверхность пояска;
- массовая сила $\rho_{en} \cdot \ddot{X}_{en}$, равномерно распределенная по объему пояска.

С целью упрощения решения примем, что взаимодействие баллистического давления и массовых сил эквивалентно обжатия в осевом направлении давлением

$$p_z = \frac{p \cdot S - m_{en} \cdot \ddot{X}_{en}}{S}.$$

При движении снаряда по стволу возникает контакт между его корпусом и поверхностью канала ствола. Контакт осуществляется по ведущему пояску снаряда, осуществляющему уплотнение пороховых газов в заснарядной полости, и дополнительной опорной поверхности. Для калиберных снарядов в качестве дополнительной опорной поверхности обычно выступает опорный поясок, располагающийся впереди ведущего пояска на расстоянии 1..1,5 калибра. Для бронебойных подкалиберных снарядов опорная поверхность обычно располагается сзади от ведущего пояска, но имеются конструкции, в которых дополнительных опорных поверхностей две, и они располагаются спереди и сзади от ведущего пояска.

Сопротивление движению снаряду происходит за счет пластической деформации ведущего пояска при формировании поверхности уплотнения и трения, возникающего при контакте ведущего пояска и дополнительной опорной поверхности с поверхностью канала ствола. Для новых стволов при первых выстрелах процесс формирования ведущего пояска осуществляется на начальном участке движения снаряда (участке входа в калиберную часть ствола). Для стволов, имеющих износ и разогретых предшествующими выстрелами, канал ствола приобретает коническую форму, и формирование ведущего пояска происходит на значительном участке движения снаряда, нередко по всей длине ствола.

Для целей решения задач внутренней баллистики ограничимся рассмотрением контакта ведущего пояска снаряда с поверхностью канала ствола, трение на котором составляет основную часть сопротивления движению.

Как показали детальные расчеты, нагруженный контакт ведущего пояска снаряда с поверхностью канала ствола происходит на всем протяжении ствола, даже после завершения формирования ведущего пояска, вследствие упругого расправления стенок канала ствола и корпуса снаряда. Это упругое поджатие вполне компенсирует износ поверхности контакта ведущего пояска.

Для нарезных стволов в процессе формирования поверхности уплотнения, формируются нарезы, осуществляющие закрутку снаряда при ведении по стволу. Сравнивая формирование ведущего пояска снаряда в нарезных и гладких стволах, для целей оценки сопротивления движению снаряда можно принять, что деформирование пояска в нарезных и гладких стволах происходит эквивалентно. Это обусловлено тем, что формирование пояска происходит в условиях глубокой пластики, а объем металла заполняющего нарез не превышает 20% суммарного объема пояска, поэтому формирование профиля нареза не выделяется в отдельную задачу.

Анализ напряженно-деформированного состояния пояска производится при следующих допущениях:

- поля напряжений и деформаций ведущего пояска принимаются осесимметричными;

- диаметр контактной поверхности принимается равным: $D_k = \frac{2 \cdot \sqrt{S_k}}{\sqrt{\pi}}$;

- в процессе перемещения снаряда по стволу под действием контактного давления происходит упругая деформация стенок ствола и корпуса снаряда, оцениваемая по формулам Ляме плоских сечений толстостенных цилиндров;

- в процессе перемещения снаряда по стволу происходит износ ведущего пояска снаряда, отражающий вынос металла и увеличение диаметра контактирующей поверхности канала под действием баллистического давления за снарядом.

Определение давления контакта на участке формирования ведущего пояска осуществляется на основании решения уравнения $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, согласования эквивалентных напряжений в теле пояска с эквивалентными деформациями, в соответствии с истинной диаграммой деформирования материала пояска.

Схемы действия напряжений и деформаций в теле ведущего пояска представлены на рис. 2.

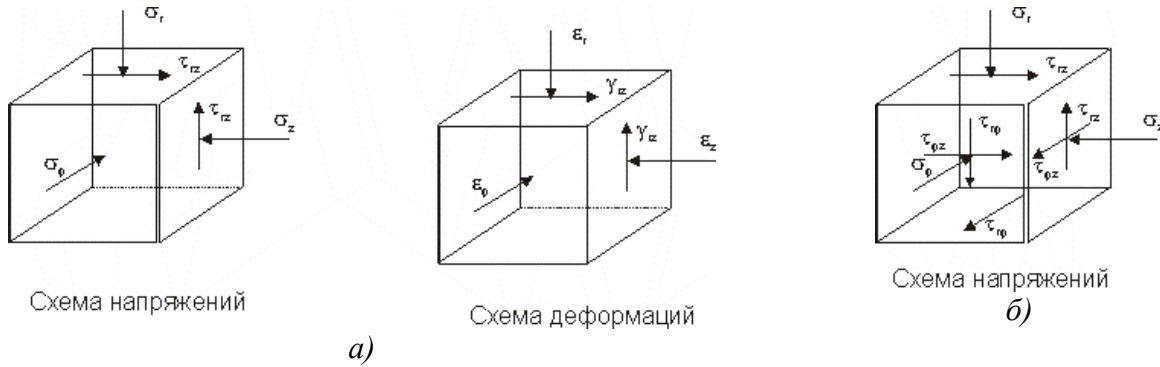


Рис. 2. Схемы действия напряжений и деформаций в теле ведущего пояска:
 а – на верхней поверхности контакта; б – у основания нареза

Для вычисления эквивалентных напряжений и деформаций используются следующий алгоритм.

Перемещения деформируемого объема вычисляются:

$$\text{вдоль радиуса } u = \frac{(D_{en} - D_k)}{(D_{en} - D_{on})} \cdot (r - \frac{D_{on}}{2}) - (\eta_{cmv} + \eta_{chn}) \cdot p_k - \Delta u \frac{D_k}{2};$$

вдоль образующей $v=0$;

вдоль направляющей w определяется перемещением выдавливаемого объема металла

$$[(S_{en} + S_{on} - S_k) - \pi \cdot D_k \cdot (\eta_{cmv} + \eta_{chn}) \cdot p_k - \pi \cdot D_k \cdot \Delta u] \cdot d\xi = S_{en} \cdot dw + w \cdot dS_{en};$$

Величина деформаций в зоне контакта на верхней поверхности пояска:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \varepsilon_\phi = \frac{2 \cdot u_k}{D_k}; \varepsilon_z = \frac{dw}{d\xi}; \gamma_{rz} = (\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial w}{\partial r});$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\phi)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_\phi - \varepsilon_z)^2 + 3 \cdot \gamma_{rz}^2};$$

Напряжения, действующие в зоне контакта на верхней площадке пояска

$$\sigma_r = -p_k;$$

$$\sigma_z = -\frac{p \cdot S_k - m_{chn} \cdot \ddot{X}_{chn}}{S_k} = -p_z;$$

$$\sigma_\phi = -v \cdot (p_k + p_z);$$

$$\tau_{rz} = (\gamma + f_{ep}) \cdot p_k;$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + 6 \cdot \tau_{rz}^2};$$

После завершения формирования ведущего пояска устанавливается упругое равновесие между сжатым корпусом снаряда и распертыми стенками ствола, аналогичное прессовой

посадке. Соответствие между размерами внедряющихся тел и контактным давлением записывается следующим образом: $(D_{\text{вн}}^{\text{сфор}} - D_k - D_k \cdot \bar{\Delta}_u^i) = 2 \cdot (\eta_{\text{ств}}^i + \eta_{\text{сн}}) \cdot p_k$; $\eta_{\text{ств}} \cdot \eta_{\text{сн}}$ - податливость ствольной трубы и корпуса снаряда при действии контактного давления; Δ_u - радиальный износ ведущего пояска в процессе движения по стволу; $D_{\text{вн}}^{\text{сфор}}$ - диаметр сформированного пояска.

Параметры сопротивления движению снаряда по стволу определяются по зависимостям

$$p_0 = \begin{cases} p & \text{при } X_{\text{сн}} = X_{\text{сн}}^0 \text{ и } p < p_{\text{фн}} \\ p_{\text{фн}} & \text{при } X_{\text{сн}} \leq L_{\text{ств}} \\ 0 & \text{при } X_{\text{сн}} > L_{\text{ств}} \end{cases} - \text{давление форсирования и сопротивления движению по стволу};$$

жению по стволу;

$$p_{\text{фн}} = T_k / S = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot (f_{\text{сп}} + \gamma)}{\sqrt{S}} \cdot \int_{\xi_1}^{\xi_2} p_k \cdot d\xi + (f_{\text{сп}} + R_{\text{сп}} \cdot \frac{d\alpha}{dx}) \cdot \frac{M_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}} \cdot S}; - \text{давление внутри канала}$$

ла ствола, преодолевающее силу сопротивления движению снаряда по стволу.

$$P_{\text{фн}} = p_0 \cdot S_{\text{кан}} - \text{усилие сопротивления движению снаряда.}$$

В соответствии с предлагаемым алгоритмом были проведены контрольные расчеты для гладких и нарезных стволов танковой и полевой пушки.

Для неизношенного ствола была получена хорошая сходимость результатов по форме кривой давления, величине начальной скорости и максимальному давлению при близких коэффициентах согласования.

На рис. 3 приведена кривая контактного давления ведущего пояска на поверхность канала ствола при различном износе ствола.

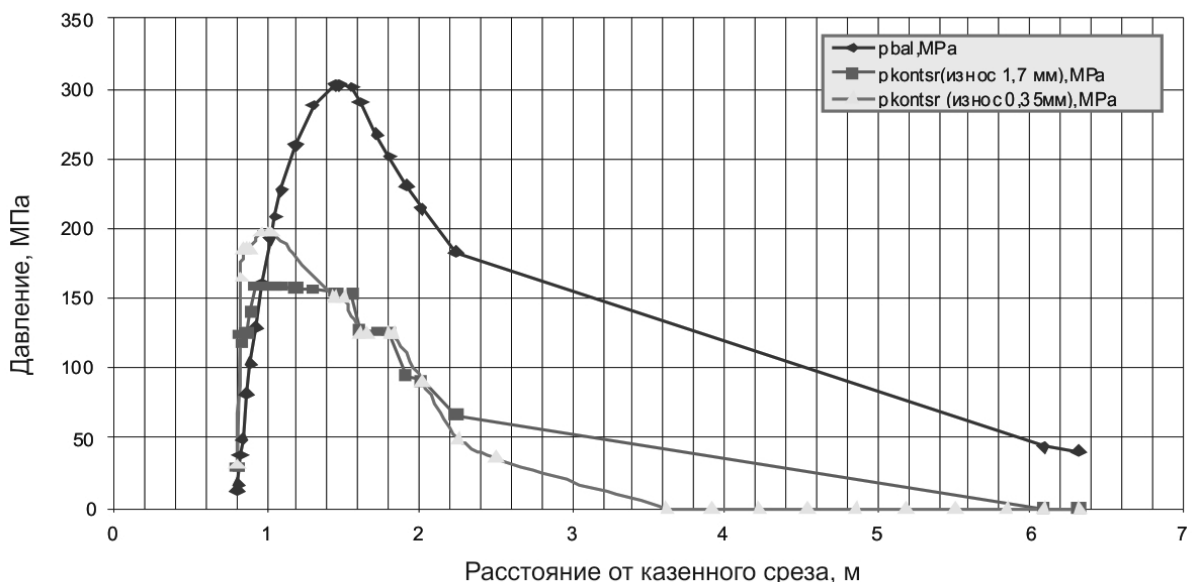


Рис. 3. Изменение контактного давления ведущего пояска в зависимости от износа трубы (изделие 2А46М, осколочно-фугасный снаряд)

Проведенные расчеты показали, что определяющим фактором потери начальной скорости в изношенном стволе является существенное удлинение участка формирования нарезов. В сильно изношенных стволах из-за конуса, вызванного износом, они переформируются практически на всем пути движения снаряда. Увеличение объема зарядной камеры, используемое в типовой методике расчета, дает только 20..30% от полной потери V_0 при износе ствольной трубы.

В табл. 1, в качестве примера представлены данные расчетов изменения начальной скорости снаряда ЗБМ42 по представленной и типовой методикам, в сравнении с табличными данными.

Таблица 1

Данные сравнения проведенных по методике расчетов изменения начальной скорости снаряда ЗБМ42 в зависимости от износа ствола с расчетами по типовой методике для изделия 2А46М

Износ ствола, мм	0	0,4	1,0	1,67	2,8
Потеря $\Delta V_0, \%$ (расчет по предложенной методике)	0	0,1	0,8	1,73	3,19
Потеря $\Delta V_0, \%$ (расчет по типовой методике)	0	0,06	0,20	0,42	1,16
Потеря $\Delta V_0, \%$ табличная	0	0,4	0,8	1,34	2,74

Выводы

1. В изношенном стволе формирование ведущего пояска и, соответственно, повышенное сопротивление движению снаряда происходит на значительном участке движения снаряда по стволу, а для сильно изношенного ствола практически до дульного среза. Это сопротивление, в основном, и определяет потерю начальной скорости снарядом.

2. Предлагаемое усовершенствование методики внутриваллистического расчета позволяет выполнить учет в баллистической подготовке артиллерийского комплекса деформаций ведущего пояска снаряда при выстреле и обеспечить преэминентность данных по параметрам выстрела для всех труб с различным износом.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

V.E. Slutsky¹, A.A. Zaycev²

ACCOUNTING FOR DEFORMATIONS OF THE ROTATING BAND DURING FIRING IN THE BALLISTIC PREPARATION OF ARTILLERY SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Joint Stock Company "Central Research Institute "Burevestnik"²

Solving the internal ballistics problems it is necessarily to perform a correlation of the computation result with experimental data by applying correlation coefficients. When the model is being written, the effects of driving band contact with the barrel bore are often neglected. Therefore the correlation is necessary for every barrel state depending on its ware rate and heat. That means the model cannot be used as a non-firing method of gun ballistic preparation.

The proposed procedure enables to perform the correlation with the experiment only once, matching the parameters to the delivered lot of charges and using them when firing this lot from the guns with different ware rate and heat value.

Key words: Ballistic preparation, internal ballistic, driving band.