

УДК 623.52

В.Е. Слущкий¹, А.А. Зайцев²**О МЕТОДИКЕ ПРОВЕДЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
АРТИЛЛЕРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ОБОРУДОВАНИЯ КОНТРОЛЬНО-ПРОВЕРОЧНОЙ МАШИНЫ**

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

В настоящее время для выполнения баллистической подготовки артиллерийских комплексов требуется проведение большого количества стрельб. Это влечет за собой значительные материальные и временные затраты. В статье предложена методика проведения баллистической подготовки артиллерийских комплексов с использованием оборудования контрольно-проверочной машины, которая позволяет свести к минимуму количество стрельб. Контрольные расчеты по предлагаемой методике подтвердили хорошую сходимость результатов расчета начальной скорости снаряда при различном износе ствола с табличными значениями, полученными экспериментально.

Ключевые слова: Баллистическая подготовка, артиллерийский комплекс, контрольно-проверочная машина.

Появление в войсках контрольно-проверочных машин (КПМ), предназначенных для технического обслуживания, текущего ремонта, диагностики и настройки АК и оснащенных современными измерительными приборами и мощными вычислительными средствами, открывает еще один эффективный путь комплексного решения задачи баллистической подготовки для артиллерийских подразделений. В составе приборного комплекса КПМ имеются высокоточные электронно-оптические приборы, позволяющие измерять с погрешностью не более 0,01 мм диаметр канала ствола по его длине (приборы ПИНТ, ПИОС), начальную скорость снаряда с погрешностью не более 0,1% (ФЭБ, АБС), а также ЭВМ, которая с помощью специального программного обеспечения может решать широкий круг задач обеспечения боевой подготовки АК.

В методике предлагается решение следующих задач баллистической подготовки:

- 1) 1 определение поправок на отклонение начальной скорости снарядов из-за свойств и особенностей партии зарядов стрельбовым методом;
- 2) 2 определение поправок на отклонение начальной скорости снарядов из-за износа канала ствола и свойств партии для отдельного орудия стрельбовым методом;
- 3) 3 определение поправок на отклонение начальной скорости снаряда из-за износа канала ствола и свойств партии для отдельного орудия бесстрельбовым методом;
- 4) 4 определение поправок на отклонение начальной скорости снарядов из-за несоответствия температуры заряда табличной;
- 5) 5 определение поправок на отклонение начальной скорости снарядов из-за разогрева ствола орудия;
- 6) 6 определение поправки на суммарное отклонение начальной скорости снарядов для отдельного орудия;
- 7) 7 определение разнобоя основных орудий батарей относительно контрольного орудия дивизиона и орудий батареи относительно основного;
- 8) 8 разработка рекомендаций по комплектованию огневых подразделений с учетом износа стволов орудий;
- 9) 9 разработка рекомендаций по комплектованию огневых подразделений и орудий

боеприпасами в соответствии с поступающими партиями боеприпасов.

Первые две задачи решаются на основе точных измерений начальной скорости снаряда приборами КПП, третья, четвертая и пятая – решением задачи внутренней баллистики и нагрева (охлаждения) ствола при стрельбе, все остальные задачи решаются методами сортировки информации, находящейся в базе данных бортовой информационно-измерительной управляющей системы (БИУС) КПП, обслуживающей подразделение.

Подробнее рассмотрим особенности алгоритма и его реализации для класса расчетных задач 3, 4, 5.

Этот класс задач решается методами внутренней баллистики и нагрева (охлаждения ствола) с использованием допущений, принятых ОСТ ВЗ-3296-85 "Метод внутрибаллистического расчета" и ОСТ ВЗ-6016-85 "Метод расчета нагрева и охлаждения ствола". Методика усовершенствована за счет 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);
- использования при расчете результатов измерений с высокой точностью диаметра калиберной части ствола и участка камеры, примыкающего к калиберной части (~ 200 мм), в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- совместного решения в составе задачи внутренней баллистики задачи нагрева и охлаждения ствола орудия в ряде контрольных сечений;
- учета изменения температуры на поверхности канала и диаметра канала ствола вследствие разогрева его стенок.

Система дифференциальных уравнений, описывающих задачу:

$$[K_{\varphi} \cdot (q + J_{\text{сн}} \cdot (\frac{d\alpha}{dx})^2) + \frac{\omega_3 - g}{3}] \cdot \ddot{X}_{\text{сн}} - p \cdot S^*(x) = -p_0 \cdot S^*(x);$$

$$W \cdot \dot{p} - R_{\text{пр}} \cdot \omega_2 \cdot \dot{T} + p \cdot \dot{W} - R_{\text{пр}} \cdot T \cdot \dot{\omega}_2 = 0;$$

$$(R_{\text{пр}} / \theta_{\text{пр}}) \cdot \omega_2 \cdot \dot{T} + p \cdot \dot{W} + (R_{\text{пр}} / \theta_{\text{пр}}) \cdot T \cdot \dot{\omega}_2 + \dot{Q}_{\text{ТП}} - \sum_{i=1}^{n_k} (f_i / \theta_i) \cdot \omega_i \cdot \dot{\psi}_i = - \sum_{i=1}^{n_{\Gamma}} G_{\text{ТК}};$$

$$\dot{\omega}_r - \sum_{i=1}^{n_k} \omega_i \cdot \dot{\psi}_i + \dot{g} = 0;$$

$$\dot{g} = \sum_{i=1}^{n_2} G_K;$$

$$\dot{Q}_{\text{ТП}} = \int_0^{X^*} 2 \cdot \alpha_{\text{МТ}}(x) (T(x) - T_{\text{см}}(x)) \cdot \sqrt{\pi S} \cdot dx;$$

$$\dot{W} - S^*(x) \cdot \dot{X}_{\text{сн}} + \sum_{i=1}^{n_k} (\alpha_i - 1 / \rho_i) \cdot \omega_i \cdot \dot{\psi}_i - \alpha_{\text{пр}} \dot{g} = 0;$$

$$\dot{\psi}_i - a_{zi} \dot{z}_i = 0; \dots i = 1 \dots n_k;$$

$$\dot{z}_i - p \cdot \Gamma_i / K_i = 0; \dots i = 1 \dots n_k;$$

$$\dot{T}_{\text{ст}}^j + \frac{1}{c \cdot \rho \cdot r_0} (\alpha_{\text{МТ}} - \frac{\lambda}{\delta}) \cdot T_{\text{ст}}^j = \begin{cases} 0 & \text{при } X_{\text{сн}} < X_j; j = 1 \dots n_l; \\ \frac{1}{c \cdot \rho \cdot r_0} (\alpha_{\text{МТ}} \cdot T_{\Gamma} - \frac{\lambda}{\delta} \cdot T_{\text{ст}0}^j) & \text{при } X_{\text{сн}} \geq X_j; \end{cases}$$

$$S^* = \begin{cases} S(x) & \text{при } X_{\text{сн}} \leq L_{\text{ств}}; \\ S(L_{\text{ств}}) & \text{при } X_{\text{сн}} > L_{\text{ств}}; \end{cases} \quad X^* = \begin{cases} X_{\text{сн}} & \text{при } X_{\text{сн}} \leq L_{\text{ств}}; \\ L_{\text{ств}} & \text{при } X_{\text{сн}} > L_{\text{ств}}; \end{cases}$$

Начальные условия:

$$t = 0; X_{\text{сн}} = X_{\text{сн}}^0; \dot{X}_{\text{сн}} = 0; p = p_0; W = W_0; T = T_0; \omega_2 = \psi_0 \cdot \omega_0; Q_{\text{ТП}} = 0; g = 0;$$

$$\psi_1 = \psi_0; z_1 = z_0; \psi_i = 0; z_i = 0; (i = 2 \dots n_k); T_{\text{ст}}^j = T_{\text{ст}0}^j (j = 1 \dots n_l);$$

где K_{φ} – коэффициент второстепенных работ;

q – масса снаряда;

$J_{\text{сн}}$ – момент инерции снаряда при вращении вокруг продольной оси;

α – угол поворота снаряда в нарезках;

$\omega_3 = \sum_{i=1}^{n_k} \omega_i$ – масса заряда; g – масса истекшего газа;

$X_{\text{сн}}, \dot{X}_{\text{сн}}, \ddot{X}_{\text{сн}}$ – перемещение, скорость и ускорение снаряда;

p – среднебаллистическое давление пороховых газов в канале ствола;

S_i^* – площадь поперечного сечения канала ствола;

r_0 – давление форсирования и сопротивления движению по стволу;

W – свободный объем полости в заснарядном пространстве;

$R_{\text{пр}}$ – приведенное значение универсальной газовой постоянной для пороховых газов;

ω_{Γ} – масса газа в заснарядной полости;

T – среднебаллистическая температура пороховых газов в канале ствола;

$\theta_{\text{пр}}$ – приведенное значение показателя адиабаты для пороховых газов;

$Q_{\text{ТП}}$ – количество тепла, передаваемое стенке ствола по всей его длине;

n_k – число компонент заряда (1 компонента – воспламенитель);

f_i – сила пороха для i - компоненты;

θ_i – показатель адиабаты для i - компоненты, $\theta_i = (k-1)$;

$\omega_z = \sum_{i=1}^{n_k} \omega_i$ - масса заряда;

ω_i – масса i – компоненты;

ψ_i - текущее значение относительной сгоревшей части пороха i - компоненты;

T_{cm}^j - температура стенки ствола в j -ом сечении в процессе выстрела;

α_i – коволюм для i - компоненты;

ρ_i – плотность пороха для i - компоненты;

a_{zi} - поверхность горения пороха;

Γ_i – физический закон горения для i – компоненты;

z_i - относительная толщина сгоревшего слоя пороха i - компоненты.

Ki - коэффициент импульса пороховых газов;

$\lambda = \lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности ствольной стали;

c – удельная теплоемкость ствольной стали;

ρ - плотность стального лейнера ствола;

δ - толщина прогреваемого слоя.

С учетом расширения ствола в результате нагрева при стрельбах площадь сечений вычисляется по формуле

$$S_i^* = s_i + \Delta S_i^{нагр};$$

где $\Delta S_i^{нагр}$ - изменение площади поперечного сечения канала в результате нагрева ствола по результатам решения тепловой задачи.

Объем камеры, соответствующий начальному периоду воспламенения, определяется по

формуле $W_0 = W_0^{doc} - \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\omega_i}{\rho_i} - (\alpha_B - 1 / \rho_1) \cdot \psi_e \cdot \omega_B$.

Объем камеры после досыла снаряда $W_0^{doc} = W_{кам} - W_{доп} - W_{зп} + W_{дос}$,

где $W_{кам} = \frac{\pi}{4} \cdot \int_{l_{ка}} D_{iB} \cdot D_{iC} \cdot dx$; - объем камеры по результатам обмеров;

$W_{зп} = \int_{l_{зп}} S^{зп} dx$; - объем запоясковой части снаряда;

$W_{доп}$ - объем несгорающих элементов узла запираения и выстрела внутри камеры (без запоясковой части снаряда);

$W_{дос}$ - дополнительный объем камеры, формирующийся в результате досылки снаряда (соответствует положению снаряда $X_{сн}^0$ и вычисляется при подготовке начальных условий);

$S^{зп}(x)$ – площадь сечения запоясковой части снаряда (принимается с чертежа);

$l_{зп}$ - длина запоясковой части снаряда.

Площадь сечений канала ствола по результатам обмеров

$$S_i = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \cdot D_{iB} \cdot D_{iГ} \text{ (гладкий);} \\ \frac{\pi}{4} \cdot [D_{iB}^n \cdot D_{iГ}^n + \frac{n_n \cdot b_n}{\pi \cdot D_{ср}} \cdot (D_{iB}^n \cdot D_{iГ}^n - D_{iB}^n \cdot D_{iГ}^n)] \text{ (нарезной);} \end{cases}$$

где D_{iB} , $D_{iГ}$ – измеренный диаметр канала ствола в i -том сечении в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

D_{iB}^n , $D_{iГ}^n$, D_{iB}^H , $D_{iГ}^H$ – измеренный диаметр канала ствола в i -том сечении в вертикальной и горизонтальной плоскостях по полям и нарезам;

$D_{cp} = (D_{ив}^n + D_{иг}^n) / 2$ - средний диаметр канала по полям;

n_n – число нарезов;

b_n – ширина нарезки;

Характеристики порохового газа в процессе горения, характеристики процессов истечения газа через зазоры и при выходе снаряда из канала ствола, изменение характеристик пороха в зависимости от исходной температуры заряда определяются в соответствии с зависимостями ОСТ ВЗ-3296-85. Параметры порохового газа и заряда на участке воспламенения, входящие в начальные условия, определяются из решения системы уравнений состояния смеси газов и 1 закона термодинамики.

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

Учитывая, что при решении задач внутренней баллистики неизбежно приходится осуществлять согласование решения с экспериментальными данными с помощью согласующих коэффициентов K_f и K_i , обычно явления контакта при написании моделей не учитываются. Но при такой постановке согласование надо проводить по существу для каждого состояния ствола в зависимости от его износа или нагрева, что резко снижает качество расчетной модели и не позволяет ее использовать в качестве бесстрельбовой методики баллистической подготовки орудий.

Предлагаемая методика позволяет осуществить согласование с экспериментом только один раз, подбирая параметры под поставленную партию зарядов. В дальнейшем подобранные коэффициенты K_f и K_i используются при стрельбе с использованием этой партии из разных орудий, имеющих различный (измеренный приборами КПМ) износ, при различном нагреве ствола в процессе стрельбы.

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

В табл. 1 приведены данные сравнения проведенных по методике расчетов изменения начальной скорости снаряда в зависимости от износа ствола, с табличными данными для изделия 2А46М.

Таблица 1

Данные сравнения проведенных по методике расчетов изменения начальной скорости снаряда в зависимости от износа ствола, с табличными данными для изделия 2А46М

Тип снаряда	Износ ствола, мм	Начальная скорость V_0 , м/с	Потеря ΔV_0 , м/с	Потеря ΔV_0 , % (расчет по предложенной методике)	Потеря ΔV_0 , % табличная	Примечание
ЗБМ42	0	1699,9	0	0	0	согласов.
	0,4	1698,6	-1,3	0,1	0,4	
	1,0	1686,7	-13,2	0,8	0,8	
	1,67	1670,5	-29,4	1,73	1,34	
	2,8	1645,6	-54,3	3,19	2,74	
ЗБМ15	0	1785,5	0	0	0	согласов.

Тип снаряда	Износ ствола, мм	Начальная скорость V_0 , м/с	Потеря ΔV_0 , м/с	Потеря ΔV_0 ,% (расчет по предложенной методике)	Потеря ΔV_0 ,% табличная	Примечание
	0,4	1783	-2,5	0,14	0,4	
	1,0	1772,8	-12,7	0,71	0,8	
	1,67	1760,8	-24,7	1,38	1,34	
	2,8	1736,2	-49,3	2,76	2,26	
ЗБК18	0	905,02	0	0	0	согласов.
	0,4	905,33	+0,31	0	0,08	
	1,0	903,2	-1,82	0,2	0,2	
	1,67	900,5	-4,52	0,5	0,57	
	2,8	894,5	-10,51	1,16	1,58	
ЗОФ26	0	849,9	0	0	0	согласов.
	0,4	852,06	+2,15	0	0,08	
	1,0	847,1	-2,9	0,34	0,2	
	1,67	845,22	-4,7	0,55	0,57	
	2,8	839,44	-10,46	1,23	1,58	

Выводы

1. Приборный комплекс КПМ позволяет эффективно решать весь круг задач баллистической подготовки в артиллерийском дивизионе.
2. Предлагаемое усовершенствование методики внутрибаллистического расчета позволяет обеспечить использование определенных стрельбой баллистических параметров партии выстрелов для всех орудий дивизиона, независимо от износа ствола орудия.
3. Контрольные расчеты по предлагаемой методике подтвердили хорошую сходимость результатов расчета начальной скорости снаряда при различном износе ствола с табличными значениями, полученными экспериментально.

Дата поступления
в редакцию 11.12.2014

V.E. Slutsky¹, A.A. Zaycev²

ON PROCEDURES OF HANDLING THE BALLISTIC PREPARATION OF ARTILLERY SYSTEMS BY APPLYING THE EQUIPMENT OF THE CHECK & TEST VEHICLE

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

A large number of shots is currently required to provide the ballistic preparation of the artillery systems. That results in huge material costs and time consumption. This paper contains the ballistic preparation procedures of the artillery systems by applying the equipment of the check & test vehicle, which allows to minimize the number of shots. Check calculations of the proposed procedures confirmed a good convergence of the muzzle velocity calculation results under a different barrel wear with the experimentally obtained tabulated values.

Key words: Ballistic preparation, artillery system, check & test vehicle.