

УДК 623.535

Н.Ш. Маликов¹, В.Е. Слущкий²**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ОРУДИЕ - СТВОЛ - ВЫСТРЕЛ»
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТОЧНОСТИ СТРЕЛЬБЫ**ОАО «ЦНИИ «Буревестник»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Излагается методика задачи формирования угла вылета снаряда в пространственной постановке для гладких, нарезных стволов орудий, в широком диапазоне начальных скоростей снаряда, реализованная с помощью программного комплекса LS DYNA. Приводятся результаты практических расчетов и подтверждение результатов экспериментальными данными.

Ключевые слова: динамика, программный комплекс LS DYNA, конечные элементы, ствол, оси, непрямолинейность, нарезы.

Обеспечение высокой точности стрельбы всегда являлось главной задачей проектирования и эксплуатации артиллерийских комплексов. В 70–80-е годы XX века усилиями предприятий МинОборонПром и, в значительной степени, ЦНИИ «Буревестник» были достигнуты значительные результаты в области количественного анализа процессов формирования параметров точности стрельбы прямой наводкой из гладкоствольных орудий и использования их в танковой и противотанковой артиллерии.

В настоящее время, в связи с мощным развитием вычислительной техники и программных средств многостороннего назначения, появилась реальная возможность существенно расширить круг тонких динамических исследований процесса выстрела для целей обеспечения точности стрельбы на область стрельбы из нарезных стволов прямой наводкой и по навесной траектории, стрельбы из автоматических орудий с высокой скорострельностью в широком диапазоне начальных скоростей снарядов.

В статье изложена методика построения задачи формирования угла вылета снаряда в пространственной постановке для гладких, нарезных стволов орудий, в широком диапазоне начальных скоростей снаряда, реализованная с помощью программного комплекса LS DYNA. Приводятся результаты практических расчетов и подтверждение результатов экспериментальными данными.

Разработанная модель рассматривает пространственную задачу динамики поведения составных частей орудия (ствола, люльки, башни, шасси) и снаряда при выстреле в процессе прохождения снаряда по стволу и вылете из ствола. Элементы конструкции представлены соответствующим набором конечных элементов, который позволяет решить задачу с минимальными затратами времени. В расчете проводится учет упруго-пластических характеристик материала, зазоров и рассеивания энергии при движении, деформации и колебательных процессах.

В качестве реализованного примера на рис. 1 приведена расчетная модель для 152 - мм нарезной пушки типа 2А65 при стрельбе осколочно-фугасным снарядом.

Особенности построения модели:

- пушка нарезная калибра 152 мм;
- пушка динамически неуравновешенная (присутствует плечо динамической пары);

- присутствует сопротивление откату в процессе выстрела (во время движения снаряда по каналу ствола).

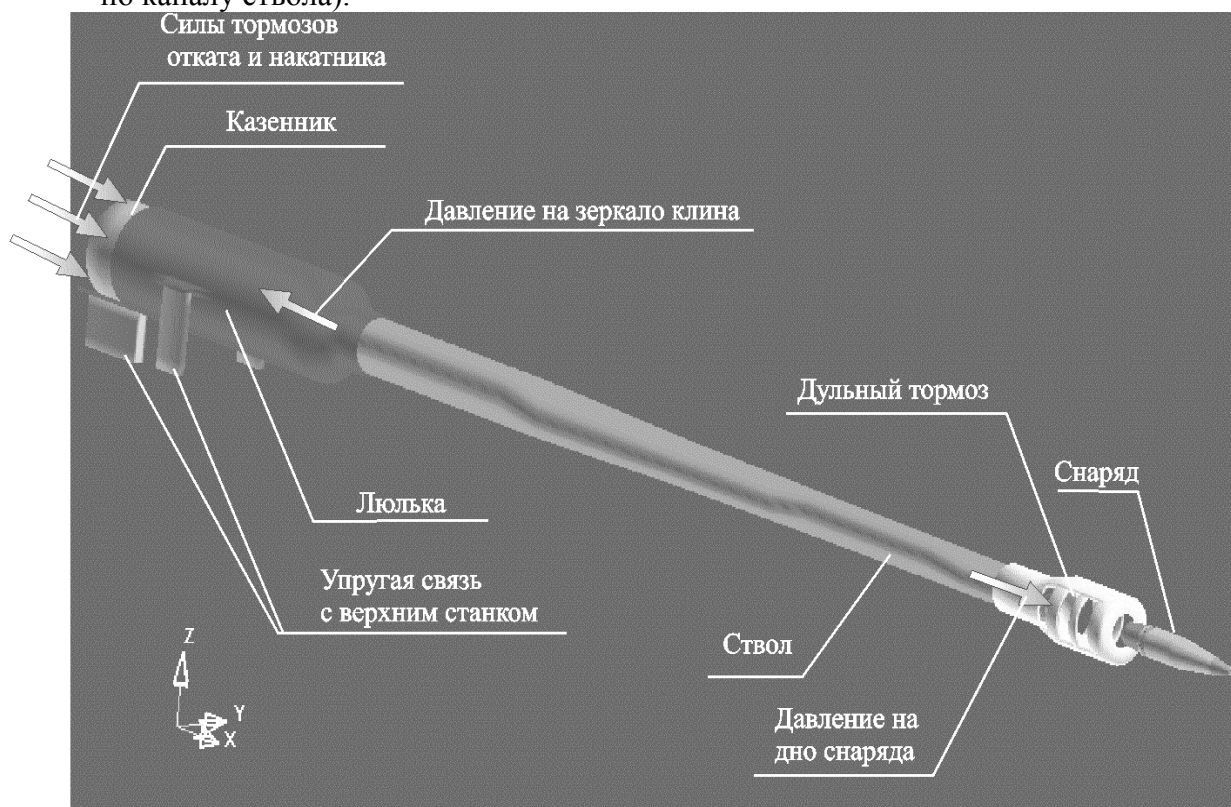


Рис. 1. Расчетная схема

В расчетной схеме учтены действующие в системе нагрузки (рис. 1).

1. Давление на дно снаряда.
2. Давление на дно камеры (зеркало клина).
3. Силы, действующие со стороны накатника и тормозов отката в местах их приложения;
4. Распределенное давление вдоль канала ствола, возникающее за снарядом при его движении по каналу ствола.
5. Нагрузки, возникающие при движении снаряда по непрямолинейному стволу.
6. Нагрузки на нарезках в канале ствола и на ведущем пояске снаряда, придающие вращение снаряду.

На рис. 2 представлены схемы разбиения элементов конструкции на конечные элементы и график отклонения от прямолинейности оси канала ствола по его длине.

Нарезы представлялись поворотом конечных элементов трубы относительно продольной оси предыдущих элементов на угол, соответствующий крутизне нарезки. Нарезы ведущего пояска для лучшей устойчивости представлялись в виде шестиугольных (гексаэдров) элементов.

Индивидуальный угол вылета снаряда вычислялся с учетом угла наклона базовой оси канала ствола перед выстрелом:

$$\gamma_{\text{инд}} = \gamma_{\text{дин}} + \gamma_{\text{попр}} - \theta_{\text{баз}};$$

$\gamma_{\text{дин}}$ – динамический угол вылета;

$$\gamma_{\text{дин}} = V_{\text{поп}} / V_0,$$

где $V_{\text{поп}}$ – поперечная относительная скорость центра масс снаряда после вылета из канала ствола;

V_0 – продольная (начальная) скорость снаряда;

$\gamma_{\text{попр}}$ – поправка к углу вылета снаряда, получаемая на начальном участке траектории;

$\theta_{\text{баз}}$ – угол наклона базовой оси ствола перед выстрелом.

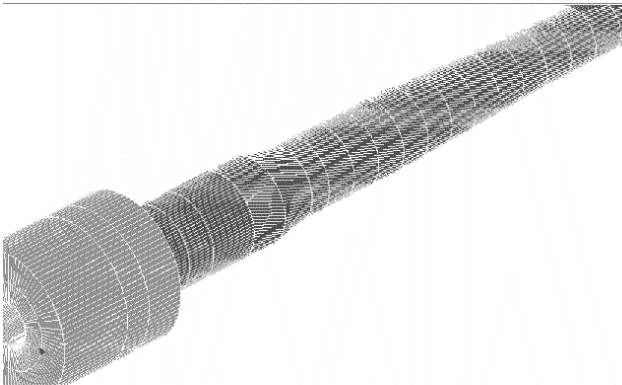
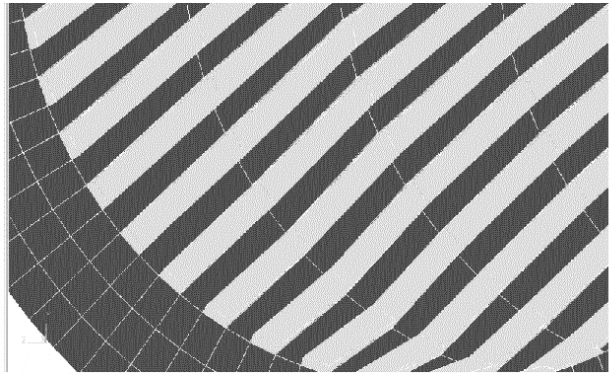


Схема разбиения на конечные элементы трубы с казенником



Представление поля нарезов ствола конечными элементами

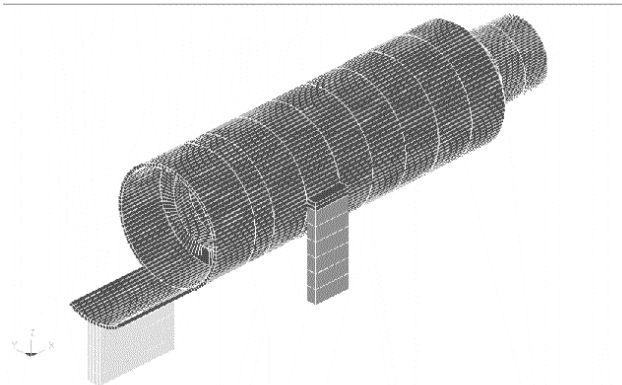


Схема разбиения на конечные элементы люльки с опорами

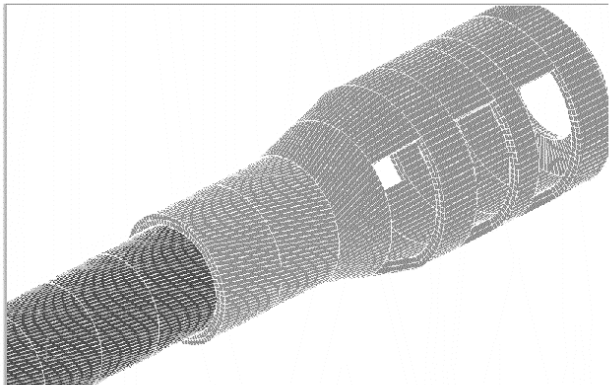


Схема разбиения на конечные элементы дульного тормоза

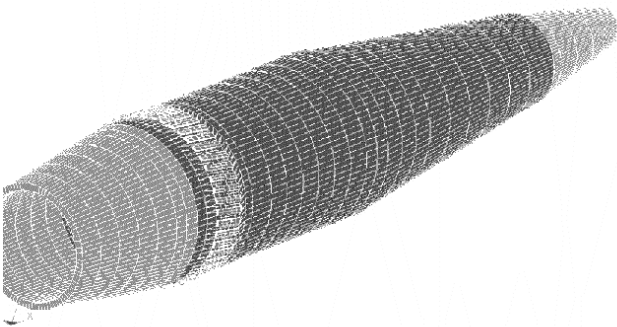
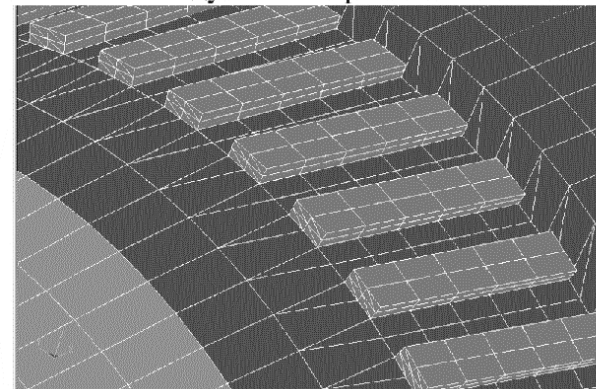
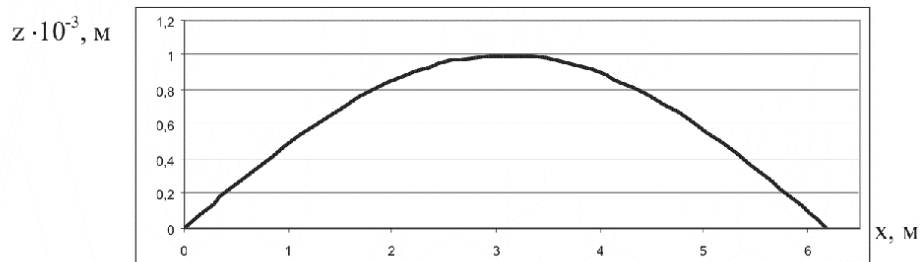


Схема разбиения на конечные элементы снаряда



Представление нарезов снаряда конечными элементами



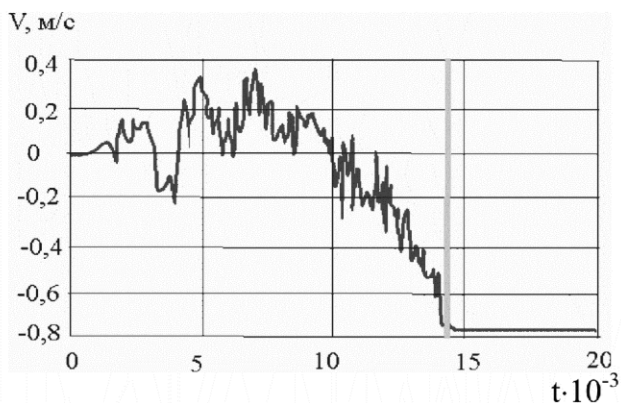
Задаваемое смещение узлов, моделирующее непрямолинейность оси канала ствола
 z - отклонение от прямолинейности; x – расстояние от дульного среза

Рис. 2. Схема представления конструкции конечными элементами

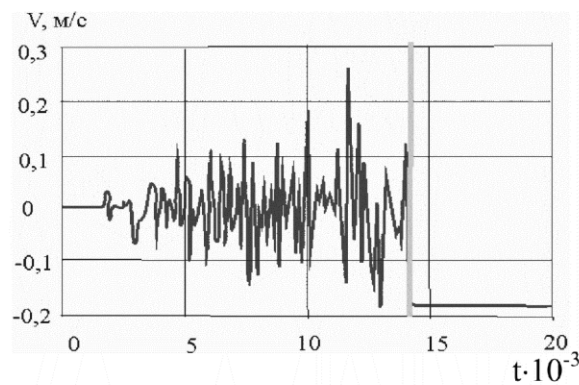
В процессе построения модели было достигнуто наибольшее соответствие геометрических размеров элементов модели (снаряда, ствола, люльки) и массовых и жесткостных характеристик с реальными.

Модель включает около 30 тысяч конечных элементов, время расчета на вычислительной машине Pentium 3 ГГц составляет около 8 часов. Такое представление модели обеспечивает устойчивость решения задачи при заданных начальных условиях.

На рис. 3 и в табл. 1 показаны отдельные результаты решения задачи для 152 - мм нарезной пушки типа 2А65 при стрельбе осколочно-фугасным снарядом 3ОФ45.



Поперечная скорость по оси z центра масс снаряда типа 3ОФ45



Поперечная скорость по оси y центра масс снаряда типа 3ОФ45

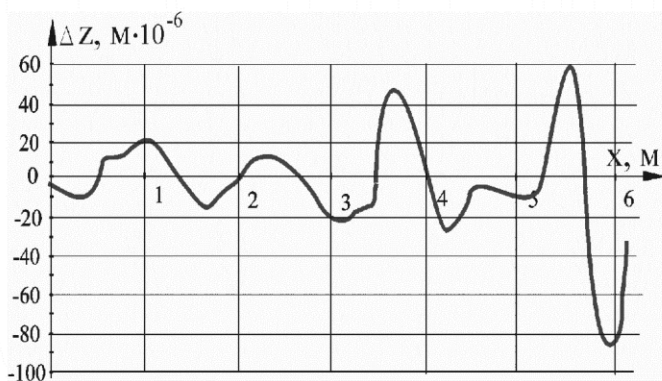
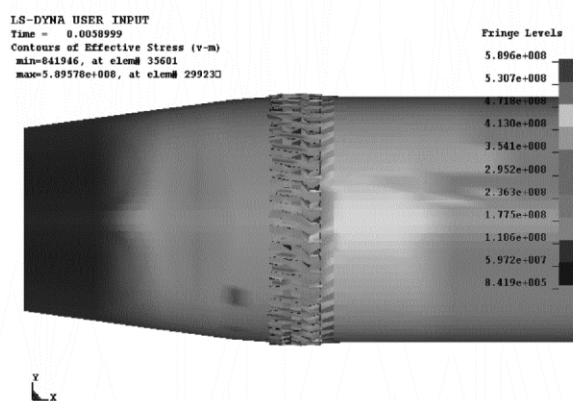


График деформируемой оси канала ствола в момент вылета снаряда из канала ствола



Напряжения, возникающие на ведущем пояске снаряда в момент времени, соответствующий действию максимального давления

Рис. 3. Результаты решения

Таблица 1

Результаты определения угла вылета снаряда 3ОФ45 из ствола

Ось	Поперечная скорость центра масс снаряда, м/с	Динамический угол вылета, мрад	Индивидуальный угол вылета, мрад
Z	-0,761	-0,939	-0,432
Y	-0,187	-0,231	-0,231

Приведенные результаты расчетов подтверждают возможность решения широкого класса задач динамики выстрела и формирования точностных характеристик орудия с использованием разработанной методики на базе программного комплекса LS DYNA.

Следует отметить, что вследствие прецессии снаряда при движении в нарезном стволе наблюдается взаимодействие колебаний, возникающих из-за наличия непрямолинейности оси канала ствола по горизонтальной и вертикальной осям. Кроме того, наблюдается суще-

ственно большая чувствительность по сравнению со стрельбой из гладкого ствола к наличию эксцентриситета масс снаряда, к точности описания процесса колебаний ствола и снаряда.

Для проверки точности новой методики был проведен комплекс расчетов для группы из 17 пушек 2А46М, отстрелянных в конце 80-х годов на Донгузском полигоне, для которых имеются подробные экспериментальные результаты и результаты расчетов по существующим методикам.

Особенности построения модели пушки 2А46М:

- пушка гладкоствольная калибра 125 мм;
- пушка динамически уравновешенная (плечо динамической пары отсутствует);
- сопротивление откату незначительно в процессе выстрела (во время движения снаряда по каналу ствола).

Ствол был представлен в виде тела с распределенными параметрами, состоящим из тысячи конечных элементов. Люлька, казенник интерпретировались в виде упругих тел с эквивалентной массой и моментом инерции. Люлька соединяется с неподвижным верхним станком опорами с упругими элементами эквивалентной жесткости. Различные виды снарядов, входящих в боекомплект пушки, были разделены на одну – две тысячи конечных элементов.

Результаты расчета и их сравнение со стрельбовыми результатами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета и их сравнение со стрельбовыми результатами

Номер трубы		Стрельбовый угол вылета	Расчетный угол вылета	Разница стрельбового и расчетного	Номер трубы		Стрельбовый угол вылета	Расчетный угол вылета	Разница стрельбового и расчетного
1	y	0,28	0,472	-0,192	10	y	0,32	0,541	-0,221
623	z	-0,13	-0,036	-0,094	X2B8403	z	0,12	0,006	0,114
2	y	0,30	0,292	0,008	11	y	0,48	0,419	0,061
520	z	-0,17	-0,108	-0,062	X2B741806	z	0,10	-0,101	0,201
3	y	0,25	0,317	-0,067	12	y	0,28	0,322	-0,042
523	z	0,00	-0,117	0,117	494	z	-0,30	-0,152	-0,148
4	y	1,14	0,820	0,34	13	y	0,08	0,006	0,074
880722	z	0,20	0,055	0,145	881110	z	-0,31	-0,179	-0,131
5	y	0,64	0,823	-0,183	14	y	0,94	0,637	0,303
880615	z	-0,49	-0,189	-0,301	440880	z	-0,26	0,027	-0,287
6	y	0,94	0,654	0,286	15	y	0,19	0,180	0,010
ЛВ742586	z	0,12	-0,183	0,303	1144	z	-0,26	-0,091	-0,169
7	y	0,66	0,501	0,159	16	y	0,10	0,201	-0,101
X2B8869	z	-0,30	-0,207	-0,093	1010	z	-0,43	-0,091	-0,339
8	y	0,60	0,471	0,129	17	y	0,12	0,155	-0,035
1039	z	0,05	-0,151	0,201	880 927	z	-0,20	-0,090	-0,110
9	y	0,52	0,302	0,218	Средние	y	0,461	0,419	Среднее 0,001
687	z	-0,04	-0,008	-0,032		z	-0,135	-0,095	$S_{\Delta} = 0,184$

Выполненный расчет хорошо согласуется со стрельбовыми результатами, а также с используемой методикой приведения пушек к нормальному бою по бесстрельбовым зависимостям, опирающимися на разложение формы кривой отклонения от прямолинейности оси канала ствола по формам колебаний. Это строго подтверждает статистический анализ, приведенный далее.

Проверка соответствия выборочных средних критериям закона Стьюдента (табл. 3).

Если $t = \left| \gamma_p - \gamma_{np} \right| \cdot \sqrt{\frac{m}{S_p^2 + S_{np}^2}} \leq t_{m-1, \alpha/2}$, то результаты статически неразделимы.

где γ_p, γ_c – значения углов вылета снаряда для i – трубы, полученные расчетным, стрельбовым методами; m – количество труб в выборке; t – статистика закона Стьюдента; $t_{m-1, \alpha/2}$ – квантиль закона Стьюдента с уровнем значимости α (двухсторонний интервал).

Таблица 3

Сравнение результатов со стрельбовым экспериментом по критерию распределения Стьюдента

Тип снаряда	t при расчетах по LS-DYNA	Квантиль распределения Стьюдента $t_{m-1, \alpha/2}$	Вывод
ЗБМ 26	0,011	$t_{33,05} = 1,69241$	Не различимы
ЗБМ 42	0,168	$t_{33,05} = 1,69241$	Не различимы
ЗБК 18	1,673	$t_{33,05} = 1,69241$	Не различимы
ЗОФ26	0,890	$t_{32,05} = 1,69389$	Не различимы

Проверка соответствия выборочных дисперсий критерию Фишера (табл. 4).

Если $F = \max\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{np}}, \frac{\sigma_{np}}{\sigma_p}\right) \leq F_{m-1, m-1, \alpha}$, то результаты статически неразличимы,

где F – статистика закона Фишера;

$F_{m-1, m-1, \alpha}$ – квантиль закона Фишера с уровнем значимости α .

Таблица 4

Сравнение результатов со стрельбовым экспериментом по критерию распределения Фишера

Тип снаряда	F при расчетах по LS-DYNA	Квантиль распределения Фишера $F_{m-1, m-1, \alpha}$	Вывод
ЗБМ 26	$F = \max(0.774; 1.292)$ $F =$	$F_{33, 33, 0.1} = 1,57669$	Не различимы
ЗБМ 42	$F = \max(0.806; 1.241)$ $F = 1.241$	$F_{33, 33, 0.1} = 1,57669$	Не различимы
ЗБК 18	$F = \max(0.796; 1.256)$ $F = 1.256$	$F_{33, 33, 0.1} = 1,57669$	Не различимы
ЗОФ26	$F = \max(1.014; 0.986)$ $F =$	$F_{32, 32, 0.1} = 1,58666$	Не различимы

Методическая ошибка расчета индивидуальных углов вылета снарядов с использованием программного комплекса LS-DYNA оценивается величиной $\Delta\theta_m = 0,08...0,11$ мрад (срединное отклонение) для разных типов снарядов.

Разработанная методика обеспечивает широкие возможности расчетного анализа при проектировании новых изделий артиллерийского комплекса, использующих новые конструктивные решения. В ней реализованы возможности пространственного представления конструктивной схемы, обеспечивающие одновременный учет всех видов колебаний, а также учет упругих и демпфирующих свойств конструкции. Методика позволяет расширять состав учитываемых факторов по результатам эксперимента без коренной переделки модели за счет привлечения дополнительного объема исходной информации.

Разработанная методика позволяет выполнять весь класс расчетов, связанных с определением динамики поведения ствола и снаряда в процессе выстрела, нагрузок, параметров меткости и кучности стрельбы для динамически уравновешенных, динамически не уравновешенных и нарезных пушек, снарядов с высокой и невысокой начальной скоростью, типовых артиллерийских орудий и высокоскорострельных автоматических пушек.

Дата поступления
в редакцию 11.12.2014

N. Sh. Malikov¹, V. Ef. Slutsky²

**3D MODEL FOR RESEARCH ON INTERACTION DYNAMICS WITHING
“GUN-TUBE-SHOT” SYSTEM FOR THE SHOOTING ACCURACY TASKS SOLUTION**

Joint Stock Company “Central Research Institute “Burevestnik”¹,
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alexeev²

This article describes the methods for the task of 3D setting up of a shell jump angle applicable to smoothbore and rifled tubes in a wide range of initial shell speeds, fulfilled by means of LS DYNA software package. Actual calculation results are given and confirmed by experimental data.

Key words: dynamics, LS DYNA software package, finite elements, tube, axes, nonlinearity, rifling grooves.