

тов // Вестник Донского гос. тех. ун-та. – 2014. – Т. 14, № 2(77). – С. 110–120.

3. Нейдорф Р. А., Обухова Е. Н. Алгоритм расчета и оценки результатов факторно-тестовой оценки // Научное обозрение. – 2015. – № 2. – С. 41–56.

4. Нейдорф Р. А., Обухова Е. Н. Технология формирования тестов текущего контроля знаний на основе парадигмы факторного тестирования // Известия Санкт-Петербургского гос. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2016. – № 34(60). – С. 108–114.

Получено 22.09.2016

5. Нейдорф Р. А., Обухова Е. Н. Методология организации тестирования на основе алгоритмов планирования и обработки двухуровневых многофакторных экспериментов.

6. Св. Роспатента об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2014610878. Программное средство конструирования тестов с использованием технологии планирования факторных экспериментов / Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова, Н. М. Федоров. – 2014.

УДК 004.942; 623.5

В. Г. Суфиянов, кандидат физико-математических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ СНАРЯДА НА БРОНЕПРОБИТИЕ ОДНОРОДНОЙ СТАЛЬНОЙ ПРЕГРАДЫ

Процесс артиллерийского выстрела, как указывают авторы [1], необходимо рассматривать в виде системы взаимосвязанных объектов. В данной работе представлены результаты исследования процесса бронепробития на основе математического моделирования взаимодействующих элементов системы «орудие – заряд – снаряд – мишень». В этой связи для определения эффективности действия снаряда на мишень последовательно проводилось моделирование внутренней, внешней и конечной баллистики.

Рассмотрим задачу моделирования выстрела из 125-мм гладкоствольного орудия со стандартным зарядом и бронебойно-подкалиберным снарядом.

Результаты моделирования внутренней баллистики для штатного заряда типа трубки-зерна и исследуемого снаряда представлены в работе [2].

Геометрическая модель снаряда с ведущим пояском представлена на рис. 1.

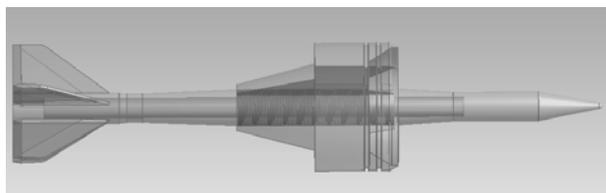


Рис. 1. Геометрическая модель снаряда

В состав снаряда входит сердечник, бронебойный демпфер и бронебойный наконечник из вольфрамового сплава, стальной корпус, оперение и ведущий поясок из алюминиевого сплава.

Ведущий поясок массой 2,2 кг учитывается в общей массе снаряда только во внутрибаллистическом процессе. На внешней траектории ведущий поясок отделяется от активной части снаряда и в дальнейших расчетах не участвует.

Оперение оказывает стабилизирующее влияние на внешнебаллистическую траекторию движения снаряда. Внешняя геометрия активной части снаряда в работе считается неизменной. Расчет внешней траектории снаряда проводился на основе методики, описанной в работе [3].

Для описания физических параметров материалов снаряда были использованы данные ANSYS Autodyn [4], которые использовались в работе [5] при расчетах задач конечной баллистики. В работе предполагается, что бронебойные элементы состоят из вольфрамового сплава (TUNGALLOY), а корпус изготовлен из стали S-7 (STEEL S-7).

В данной работе исследуется влияние диаметра сердечника бронебойно-подкалиберного снаряда на глубину пробития стальной однородной пластины. Бронебойный сердечник представляет собой цилиндр, стандартная длина которого составляет 420 мм, а диаметр – 18 мм. Диаметр сердечника варьируется в пределах 0...28 мм. Соответственно, меняется внутренняя геометрия стального корпуса снаряда, в котором находится сердечник. Средний диаметр корпуса снаряда составляет 30 мм.

Масса снаряда меняется в зависимости от диаметра сердечника из-за разницы плотностей вольфрамового сплава TUNGALLOY, которая составляет 17 000 кг/м<sup>3</sup>, и стали STEEL S-7 – 7 750 кг/м<sup>3</sup>. Соответственно, с увеличением диаметра сердечника увеличивается масса снаряда.

Преграда представляет собой прямой круговой цилиндр, в качестве материала которого рассматривалась сталь S-7. По нормали к одной из торцевых сторон цилиндра подлетает снаряд. Размеры преграды были выбраны исходя из данных пробития снарядом гомогенной брони по нормали на расстоянии 2000 м. Для исследуемого снаряда средняя глубина пробития стальных преград на данном расстоянии составляла 440 мм. Диаметр цилиндра составлял

800 мм (26,7 средних диаметров снаряда) и выбирался из предположения отсутствия влияния краевых условий на решение задачи. В качестве краевых условий для преграды принимались условия закрепления цилиндрической поверхности.

### Математическая модель задачи бронепробития

Процесс соударения снаряда с преградой описывается моделью сжимаемого упругопластического тела. Основные соотношения модели базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [6]:

$$\frac{d\dot{u}_\alpha}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} = 0,$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial \dot{u}_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0,$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta},$$

где  $\frac{d}{dt}$  – субстанциональная производная по времени;  $\dot{u}_\alpha$  – компоненты скорости деформации;  $\rho$  – плотность;  $\sigma_{\alpha\beta}$  – компоненты тензора напряжений;  $x_\alpha$  и  $x_\beta$  – составляющие вектора координат;  $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $E$  – внутренняя энергия;  $\alpha, \beta, \gamma$  – индексы координатного вектора, указание индексов  $\alpha, \beta, \gamma$  означает, что берется его соответствующая координата,  $\alpha, \beta, \gamma \in \{x, y, z\}$ . Здесь используется форма с немymi индексами, которая означает, что если в уравнении встречаются величины с одинаковыми индексами, то по ним ведется суммирование.

В качестве уравнения состояния моделируемой среды использовано уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена EOS Shock Linear [7]

$$p = p_n + \Gamma \rho (E - E_n),$$

где  $p$  – полное давление системы;  $p_n$  – давление в начальном состоянии;  $\Gamma$  – коэффициент Грюнайзена в текущий момент времени;  $E_n$  – внутренняя энергия в начальном состоянии.

В теории упругости напряжения и деформации связаны линейным соотношением, справедливым до значения предела упругости. При увеличении деформации зависимость становится нелинейной. В работе использовалась модель пластичности Джонсона – Кука, которая зависит от эквивалентной деформации, скорости деформации и температуры [8]:

$$\sigma_n = \left( A + B \epsilon_p^n \right) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right],$$

где  $\sigma_n$  – предел текучести;  $A, B, C$  – параметры материала ( $A$  – начальный предел текучести,  $B$  – константа твердости,  $C$  – константа скорости деформации);

$\epsilon_p$  – эквивалентная пластическая деформация Мизеса;  $\dot{\epsilon}_p$  – скорость эквивалентной пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_0$  – относительная скорость деформации;  $T$  – текущая температура;  $T_m$  – температура плавления;  $T_r$  – нормальная температура;  $n, m$  – показатели твердости ( $n$  – коэффициент твердости,  $m$  – показатель теплового размягчения).

### Результаты комплексного моделирования артиллерийского выстрела

Моделирование внутренней и внешней баллистики осуществлялось в расчетных блоках разработанного авторами [9] программно-вычислительного комплекса. Моделирование конечной баллистики производилось в ANSYS Autodyn.

Расчет внутренней баллистики позволил определить максимальное давление внутри ствола, на дно канала ствола и дно снаряда. Результаты моделирования показали, что максимальные давления не превышают критических значений для всех вариантов расчета. Также была получена зависимость дульной скорости от массы снаряда с учетом ведущего пояса.

Внешнебаллистические процессы были рассчитаны с учетом того, что внешняя геометрия снаряда постоянна, соответственно, аэродинамическое сопротивление не зависит от внутренней конструкции снаряда. Центр тяжести снаряда с увеличением диаметра сердечника из вольфрамового сплава смещается к хвостовому оперению, но за счет оперения располагается не далее центра давления.

В расчетном блоке внешней баллистики [10] для исследуемого снаряда были определены углы наведения артиллерийского орудия для стрельбы на полигоне на расстояние 2000 м.

Результаты моделирования всех этапов артиллерийского выстрела сведены в таблице. Вариант 7 является наиболее близким к штатному снаряду.

Как видно из таблицы, масса снаряда с увеличением диаметра сердечника увеличивается. Два крайних случая соответствуют однородным снарядам, состоящим полностью из стали S-7 и вольфрамового сплава.

Зависимости дульной и конечной скоростей снаряда от его активной массы представлены на рис. 2, а. Зависимость глубины пробития от активной массы снаряда представлена на рис. 2, б.

Как следует из расчетов, несмотря на уменьшение дульной скорости снаряда, конечная скорость на расстоянии 2000 м немонотонно зависит от активной массы снаряда и достигает максимума 1516 м/с для 5-го варианта расчета. Это связано с сочетанием массовых и начальных скоростных характеристик снаряда.

Как следует из таблицы, величина падения скорости уменьшается с увеличением активной массы снарядов: для самого легкого снаряда падение скорости подлета по отношению к дульной скорости составило 15,6 %, а для тяжелого в два раза ниже – 7,8 %.

Результаты расчета внешней баллистики использовались при проведении расчета толщины броне-

пробития. Задача решалась в программе ANSYS Autodyn в осесимметричной постановке методом сглаженных частиц SPH. На рис. 3 представлены результаты действия снаряда по бронеплите толщиной 440 мм для 4-го и 7-го вариантов расчета.

Как видно из рис. 3, а, при 4-м варианте происходит застревание снаряда в преграде глубиной 440 мм;

при 7-м варианте (рис. 3, б) также происходит застревание снаряда, но на задней стенке видно начало образования откола, что предшествует явлению пробития преграды. На рис. 4 представлены результаты расчета 11-го варианта для однородного снаряда из вольфрамового сплава, при котором происходит полное пробитие преграды.

#### Результаты расчета внутренней баллистики для различных масс снаряда

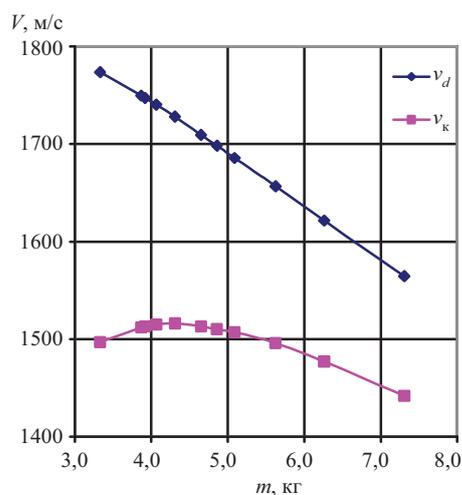
Номер варианта расчета	Диаметр сердечника, мм	Масса снаряда*, кг	Масса активной части, кг	Дульная скорость, м/с	Конечная скорость, м/с	Падение скорости, м/с	Глубина пробития, мм
1	—**	5,531	3,331	1773	1497	276	189
2	0	6,067	3,867	1749	1512	237	243
3	4	6,116	3,916	1747	1513	234	252
4	8	6,263	4,063	1740	1515	225	266
5	2	6,507	4,307	1728	1516	212	310
6	16	6,848	4,648	1709	1513	196	354
7	18	7,056	4,856	1698	1510	188	391
8	20	7,288	5,088	1686	1507	179	442
9	24	7,825	5,625	1657	1496	161	489
10	28	8,460	6,260	1621	1477	144	563
11	—***	9,506	7,306	1564	1442	122	552

#### Примечания:

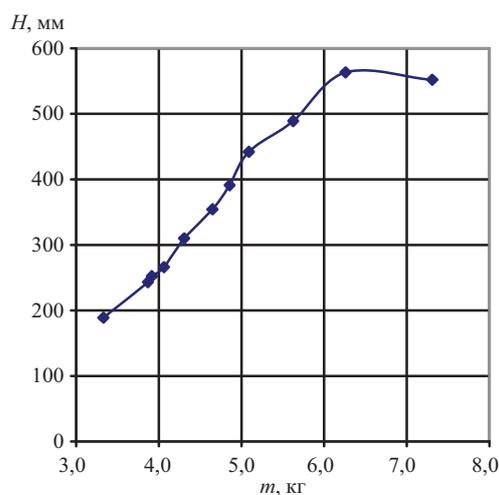
\* – масса снаряда с учетом ведущего устройства;

\*\* – снаряд (за исключением ведущего устройства) считается однородным – полностью состоящим из стали S-7;

\*\*\* – снаряд (за исключением ведущего устройства) считается однородным – полностью состоящим из вольфрамового сплава.

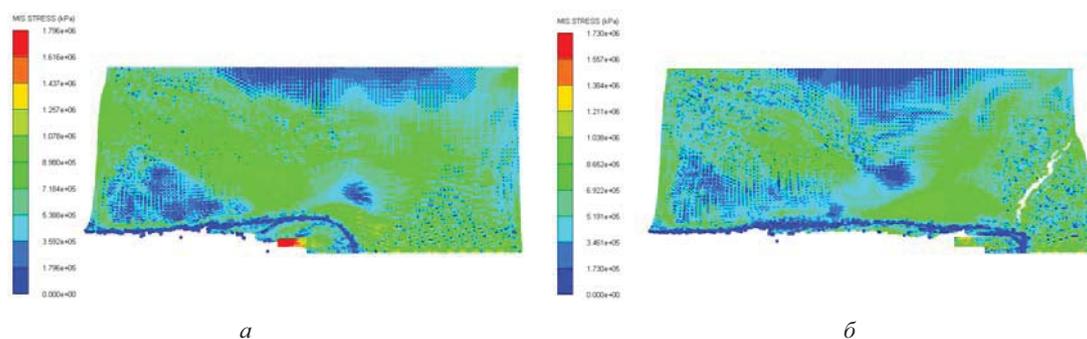


а



б

Рис. 2. Зависимость дульной  $v_d$  и конечной  $v_k$  скорости снаряда (а) и глубины пробития (б) от массы активной части снаряда



а

б

Рис. 3. Распределение напряжений внутри преграды для двух вариантов расчета при полной остановке снаряда: а – 4-й вариант расчета; б – 7-й вариант расчета

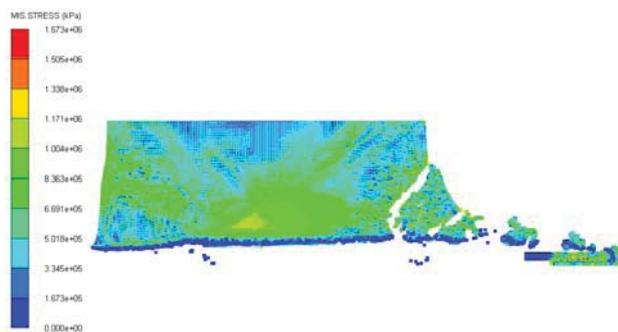


Рис. 4. Распределение напряжений внутри преграды для 11-го варианта расчета

Как показали численные исследования (см. табл.), для рассматриваемой геометрии и конструкции снаряда существует предельная глубина пробития преграды, которая в данной серии расчетов оказалась равной 563 мм.

#### Выводы

Исследовано влияние внутренней структуры бронебойно-подкалиберного снаряда на величину пробития преграды на основе комплексного моделирования процесса выстрела. Показано, что при одинаковом заряде дульная скорость снаряда уменьшается с увеличением его массы. При этом скорость подлета к цели имеет немонотонный характер в зависимости от активной массы бронебойно-подкалиберного снаряда. Анализ бронепробития показал, что с увеличением диаметра сердечника глубина пробития также носит немонотонный характер, а максимальное пробитие достигается для снаряда, масса активной части которой на 32 % больше штатной.

Получено 26.10.2016

УДК 658.5.012.7

А. В. Сократов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АУДИТ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СТРУКТУР-СТРАТЕГИЙ ИХ РАЗВИТИЯ. ОБЗОР. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**З**адача разработки эффективной программы технического развития производственной системы (ПС) для конкретных условий предприятия является комплексной, охватывающей как технические, так и экономические аспекты. Одним из таких аспектов является аудит производства на основе результатов которого делаются выводы о технико-экономическом состоянии производства предприятия и перспективных направлениях его развития.

#### Библиографические ссылки

1. Маликов Н. Ш., Слуцкий В. Е. Пространственная модель исследования динамики взаимодействия в системе «орудие – ствол – выстрел» для решения задач точности стрельбы // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева. – № 5(107). – С. 184–190.
2. Русяк И. Г., Ермолаев М. А. Математическое моделирование артиллерийского выстрела для комбинированных зарядов // Вопросы оборонной техники. – Серия 14, Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 141–149.
3. Расчет траектории движения снаряда в атмосфере с учетом гидродинамики его обтекания / И. Г. Русяк, А. И. Карпов, С. А. Королев, С. А. Карсканов // Вопросы оборонной техники. – Серия 14, Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 130–141.
4. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013. – URL: <http://148.204.81.206/ANSYS/150/> (дата обращения: 16.05.2016).
5. Batra R. C., Stevens J. B. Adiabatic Shear Bands in Axisymmetric Impact and Penetration Problems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 151, 1998. P. 325–342.
6. Липанов А. М., Вахрушев А. В., Федотов А. Ю. Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Математическое моделирование и программирование. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 53–65.
7. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013.
8. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541–547.
9. Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M. Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot // 5th International Conference on Military Technologies, ICMT 2015. V. Krivanek (eds). 19–21 May 2015. Brno. Czech Republic. University of Defense. P. 9–17.
10. Там же.