

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «СТРЕЛКОВОЕ ОРУЖИЕ – СТВОЛ – ПУЛЯ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. А. Громов¹, Ю. В. Чебурков², А. И. Годунов³, Н. К. Юрков⁴

^{1,2} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

^{3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ darkzgrom@gmail.com, ² yuceburkov@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Стрелковое оружие является неотъемлемой частью современного боя. В связи с развитием средств бронезащиты требуется повышать эффективность индивидуального стрелкового оружия. *Материалы и методы.* Одним из средств достижения цели по повышению эффективности образца является 3d моделирование. При использовании новых технических решений необходимо проведение оптимизации направленных на выбор наилучших конструктивных характеристик. В статье рассмотрен порядок проведения моделирования с целью оптимизации и выбора оптимальных технических характеристик с помощью программных комплексов системы автоматизированного проектирования элементов системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов. *Результаты и выводы.* Смоделированная система позволяет на этапе проектирования спрогнозировать технические характеристики стрелкового оружия с целью повышения эффективности его действия.

Ключевые слова: модель, стрелковое оружие, пуля, патрон, система

Для цитирования: Громов А. А., Чебурков Ю. В., Годунов А. И., Юрков Н. К. Моделирование элементов системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 12–21. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-2

MODELING OF ELEMENTS OF THE "SMALL ARMS – BARREL – BULLET" SYSTEM USING THE FINITE ELEMENT METHOD

A.A. Gromov¹, Yu.V. Cheburkov², A.I. Godunov³, N.K. Yurkov⁴

^{1,2} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

^{3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ darkzgrom@gmail.com, ² yuceburkov@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Small arms are an integral part of modern combat. In connection with the development of armor protection means, it is required to increase the effectiveness of individual small arms. *Materials and methods.* One of the means to achieve the goal of improving the efficiency of the sample is 3d modeling. When using new technical solutions, it is necessary to carry out optimization aimed at choosing the best design characteristics. The article considers the procedure for conducting modeling in order to optimize and select the optimal technical characteristics using computer-aided design software systems for the elements of the "small arms – barrel – bullet" system using the finite element method. *Results and conclusions.* The simulated system allows at the design stage to predict the technical characteristics of small arms in order to increase the effectiveness of its action.

Keywords: model, small arms, bullet, cartridge, system

For citation: Gromov A.A., Cheburkov Yu.V., Godunov A.I., Yurkov N.K. Modeling of elements of the "small arms – barrel – bullet" system using the finite element method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):12–21. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-2

Введение

Главные политические установки военной доктрины Российской Федерации ориентированы на устранение войны из жизни человечества, упрочение международной стабильности и безопасности. Оборонительный характер военной доктрины не снижает, а наоборот, предъявляет более высокие требования к эффективности ракетно-артиллерийского вооружения и, в частности, индивидуального стрелкового оружия военнослужащего. Повышение эффективности ракетно-артиллерийского вооружения – главное требование при проектировании новых и модернизации существующих систем. Чем выше эффективность индивидуального стрелкового оружия, тем выше эффективность военнослужащего. Одним из способов повышения эффективности является моделирование систем вооружения с целью выбора оптимальных технических характеристик, позволяющих повысить эффективность действия стрелкового оружия. Рассмотрим способ моделирования системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов.

Моделирование системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием методов конечных элементов

Для моделирования движения пули по каналу ствола используем ряд программных комплексов, а именно: для создания моделей патрона и ствола в декартовой системе координат применен *SolidWorks*, а для непосредственного моделирования перемещения поражающего элемента внутри ствола образца стрелкового оружия (СО) выбран комплекс *ANSYS*, точнее – его приложения *AYTODYN* и *Explicit Dynamics – Mechanical*. Он позволил произвести расчеты давления пороховых газов с изменением массы пороховой навески.

Рассмотрим подробнее построение объемных моделей с использованием комплекса САПР *SolidWorks*. Построение модели патрона представим на примере 7,62 мм патрона образца 1943 г. с пулей со стальным сердечником [1]. Рассмотрение начнем с построения пули с оболочкой. Для начала была выбрана плоскость, в которой построен эскиз с применением набора инструментов, представленных на рабочей панели (рис. 1,а).

Используя инструмент «Повернутая бобышка», развернем эскиз вокруг созданной оси на 360° (рис. 1,б). Из представленного списка выберем материал с необходимыми характеристиками для придания физико-химических свойств элементу патрона. Законченная трехмерная модель пули с геометрическими размерами представлена на рис. 1,в.

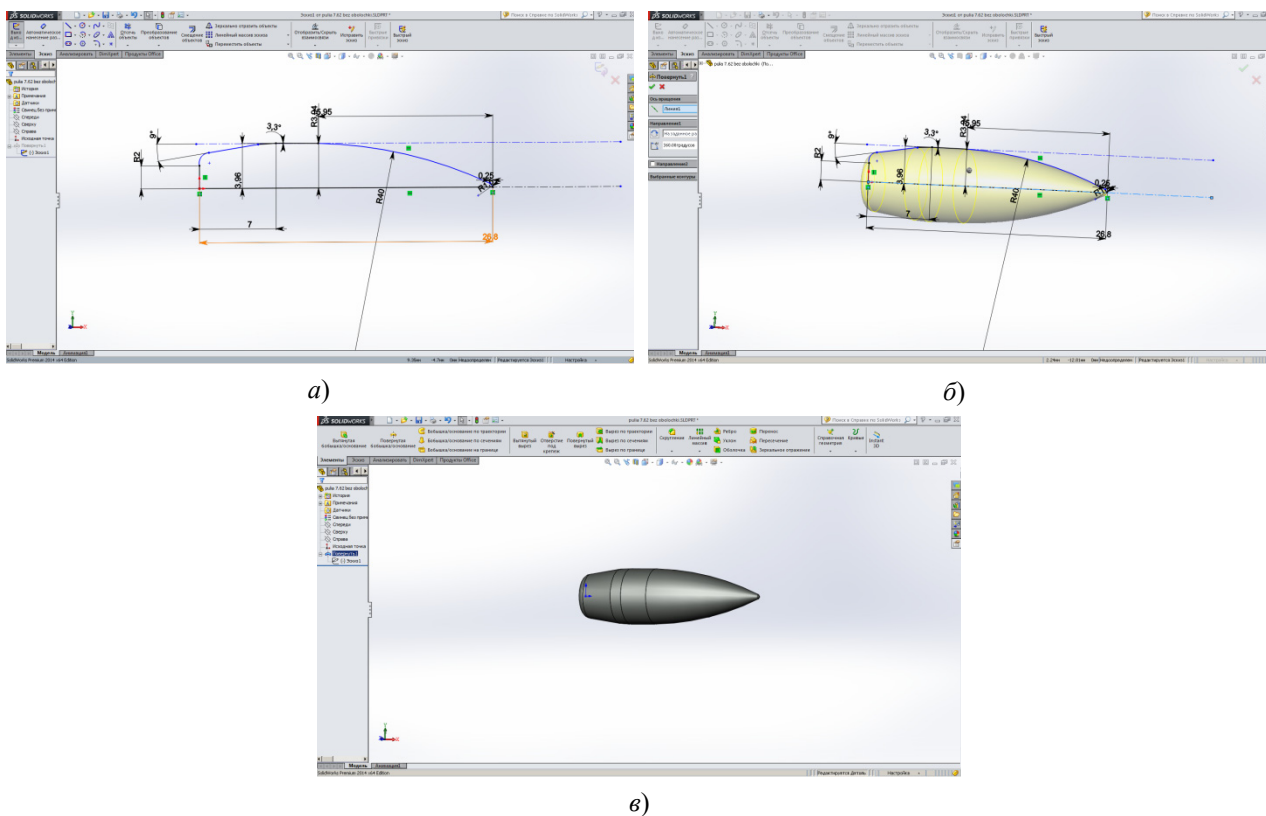
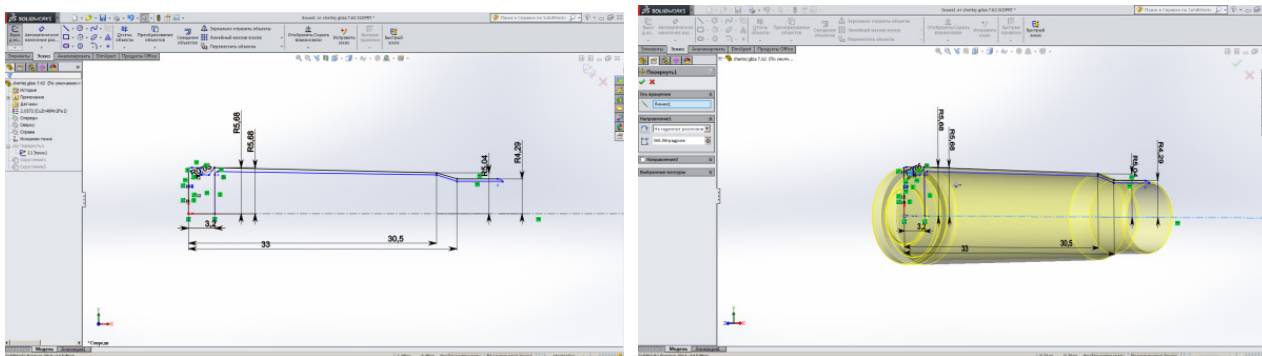


Рис. 1. Построение трехмерной модели пули:
а – построение эскиза пули; б – разворот эскиза пули вокруг оси X ; в – трехмерная модель 7,62 мм пули

Построение трехмерной модели гильзы производим по аналогичному алгоритму (рис. 2).

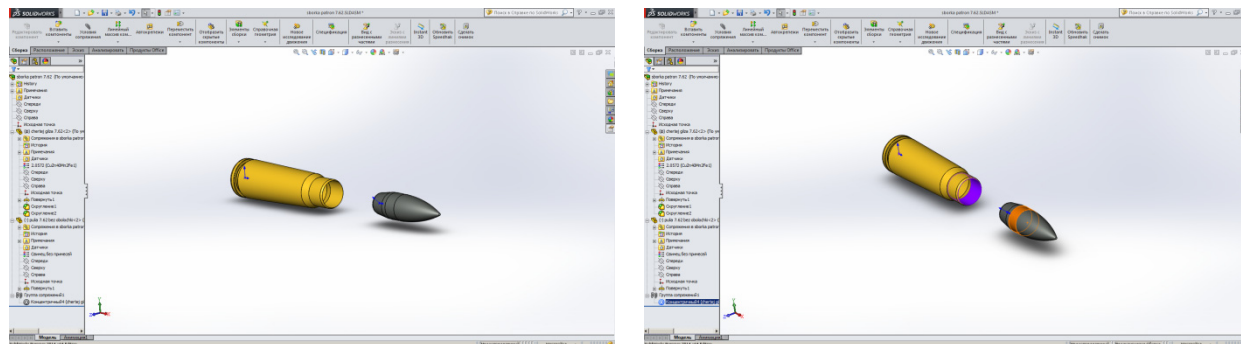


а)

б)

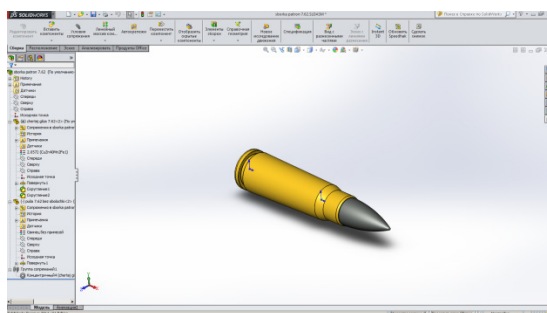
Рис. 2. Построение трехмерной модели гильзы:
а – построение эскиза гильзы; б – разворот эскиза гильзы вокруг оси X

Далее для последующих расчетов необходимо создать патрон в сборе. С целью выполнения подготовительных мероприятий была создана сборка, в которую добавлены спроектированные трехмерные модели пули и гильзы (рис. 3,а).



а)

б)



в)

Рис. 3. Моделирование сборки патрона:
а – добавление в сборку элементов; б – выбор поверхностей для контактного сопряжения; в – вид сборки после сопряжения

Соединение элементов сборки подразумевает выбор мест сопряжения всех его элементов, т.е. были произведены следующие действия: выбраны контактирующие поверхности, произведено выравнивание элементов относительно осей координат и заданы конкретные размеры смещения одной модели относительно другой (рис. 3,б). Выбираем «Концентричное сопряжение», задаем условия соосности двух деталей. В результате получили трехмерную сборку – модель 7,62 мм патрона образца 1943 г. (рис. 3,в).

Для расчета системы построим ствол. Принцип его построения коренным образом отличается от приведенного выше алгоритма. Все моделирование производилось строго по чертежам, которые представлены в альбомах на данный образец стрелкового оружия.

Моделирование ствола производим с использованием инструмента «Вытянутая бобышка». Построение начинаем с казенной части ствола. На выбранной плоскости в точке начала координат (для удобства дальнейшей работы с моделью) отображаем эскиз – окружность с радиусом, равным наружному размеру сечения казенной части ствола, указанного на чертеже (рис. 4,а). Окружность вытягиваем вдоль оси Z на расстояние до уменьшения диаметра ствола, указанного на чертеже (рис. 4,б).

Следом в торцевой части построенного цилиндра подобным образом создается еще один цилиндрический элемент, но с размерами, соответствующими данному участку на чертеже (рис. 4,в) и так далее, до выполнения размера длины ствола, установленного чертежом (рис. 4,г). По окончании построения цилиндрических частей началась обработка фасок, кромок и скруглений по требованиям чертежа (рис. 4,д). Построение канала ствола начнем с концентричного цилиндрического выреза в смоделированной детали (рис. 4,е,ж). Аналогичным способом построены все конические сужения и расширения в стволе (рис. 4,и).

Для создания нарезов в канале ствола был использован инструмент «Спираль». Для правильного создания им нарезов необходимых геометрических размеров был выбран диаметр окружности спирали и ее шаг (рис. 4,к). Для наиболее точных расчетов при моделировании формы нарезов должны соответствовать представленным на чертеже. Соблюдая эти условия, по размерам реальных нарезов на дополнительной справочной плоскости был построен режущий элемент. Он, в свою очередь, фиксировался на вершине спирали. При прохождении эскиза по данной кривой элементы ствола, находящиеся на его пути, исключались из модели. Для этого используем команду «Вырез по направлению» (рис. 4,л).

Так как по окончании этой операции не было изготовлено требуемое количество нарезов, то, чтобы сократить время на моделирование их режущих инструментов, был применен инструмент «круговой массив» (рис. 4,м). Он позволил на справочной окружности через определенное количество градусов повторить проектируемый элемент ствола необходимое количество раз.

Конечный этап моделирования ствола включает выбор сплава и придание ему требуемых физико-химических свойств и характеристик, чтобы их применить в дальнейших расчетах. Общий вид ствола представлен на рис. 4,н.

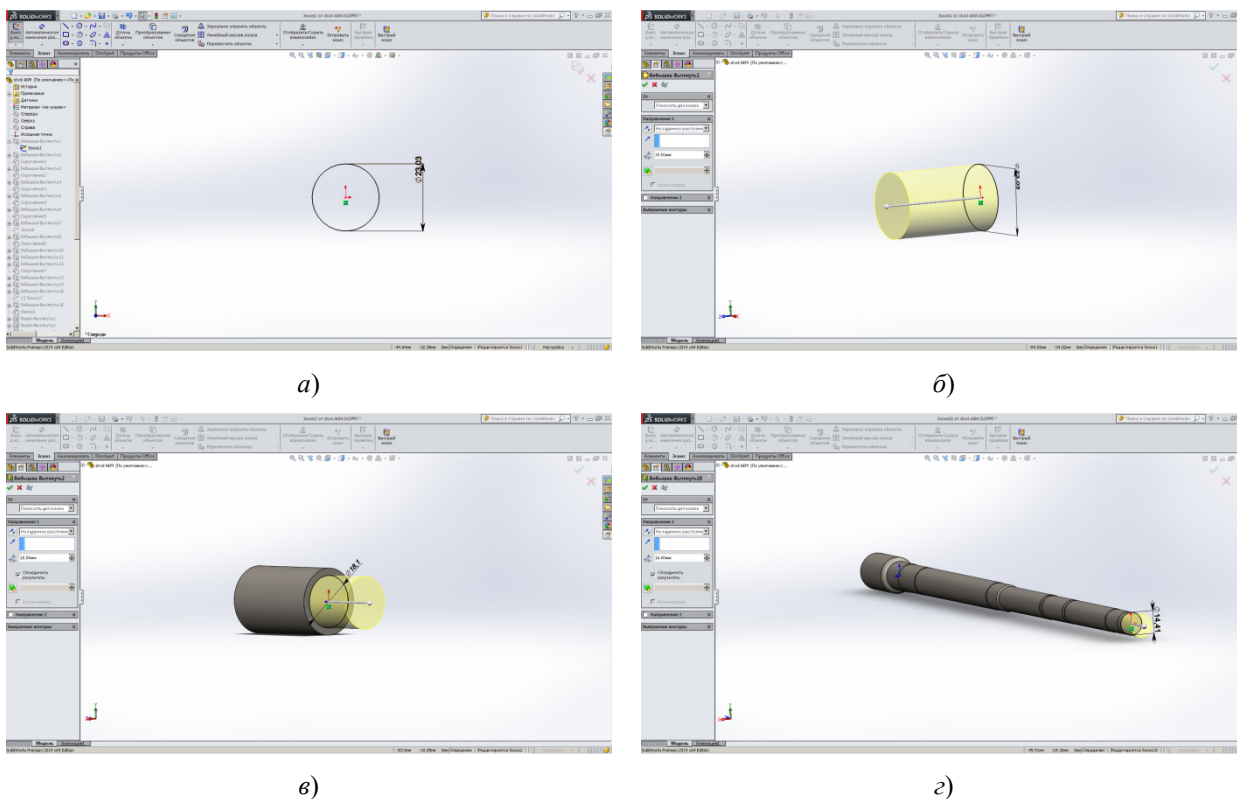
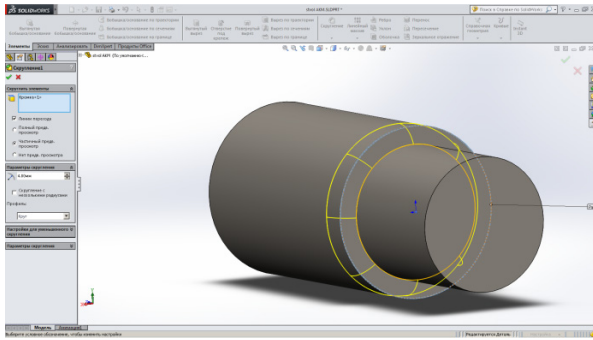
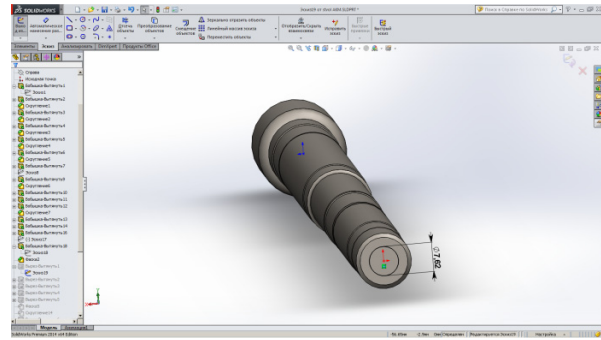


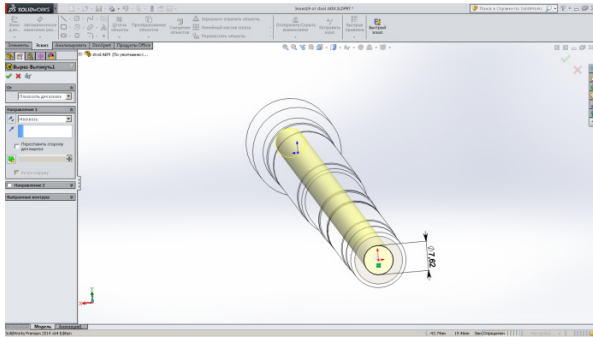
Рис. 4. Построение ствола: а – построение окружности с диаметром, равным размерам наружного сечения казенной части; б – вытягивание окружности вдоль оси. Построение цилиндрической заготовки казенной части ствола; в – построение последующих цилиндров; г – общий вид заготовки трехмерной модели ствола (начало)



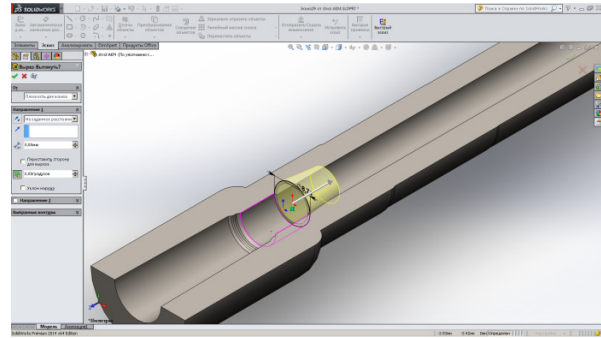
д)



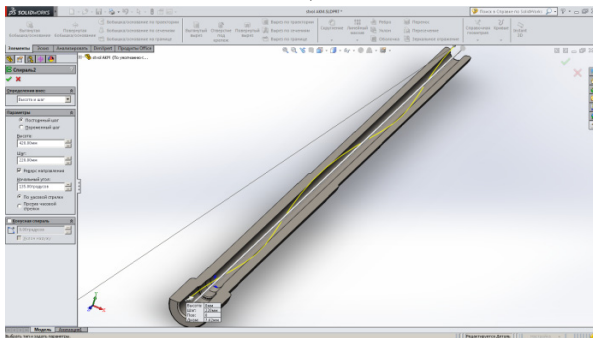
е)



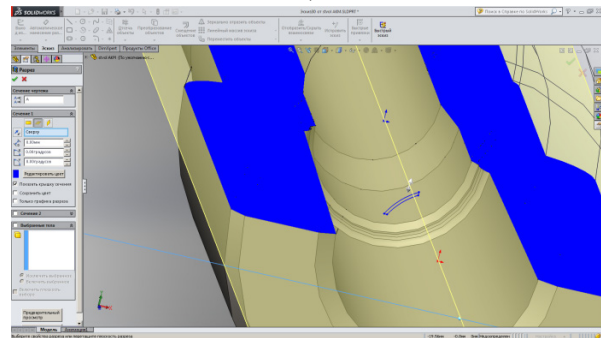
ж)



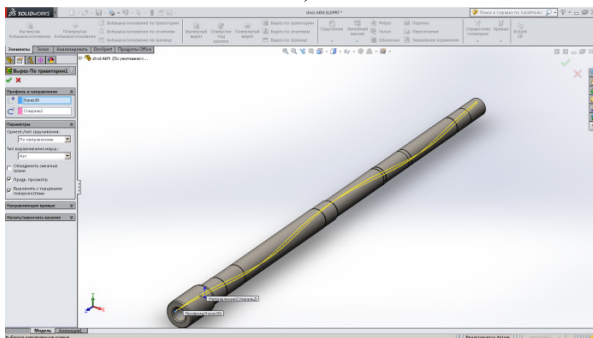
и)



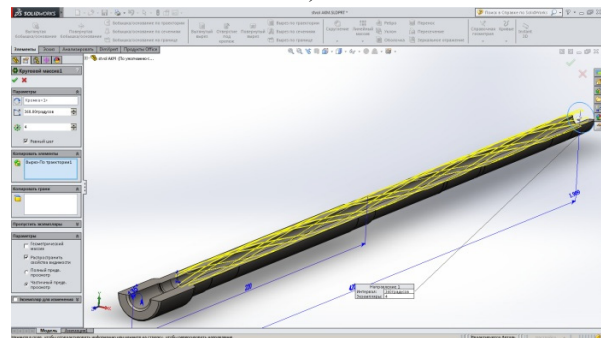
к)



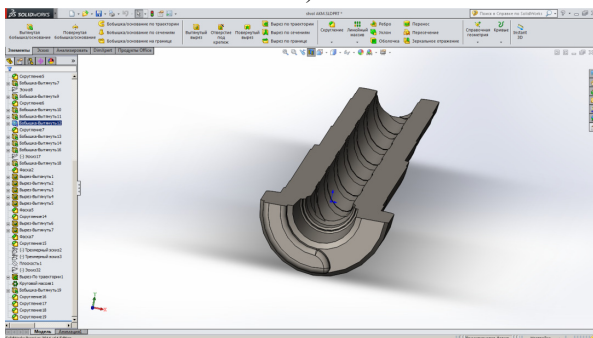
л)



м)



н)



п)

Рис. 4. Построение ствола: д – построение технологических скруглений; е – подготовка к моделированию сквозного отверстия; ж – отверстие в стволе, заготовка под канал ствола; и – изготовление конических сужений в казенной части; к – подготовка к моделированию нарезов в стволе; л – моделирование формы режущей поверхности; м – определение шага и длины нарезов; н – моделирование количества нарезов; п – общий вид смоделированного ствола с сечением в плоскости осей X, Z (окончание)

Следующим этапом при моделировании стало сопряжение спроектированных моделей патрона и ствола в декартовой системе координат. По аналогии со сборкой патрона выбираем поверхности для концентричного сопряжения. Здесь ими явились цилиндрические поверхности пули и патронника канала ствола.

Условием для сопряжения является заход гильзы до касания стенок патронника, а пули – до касания нарезов в стволе (рис. 5).

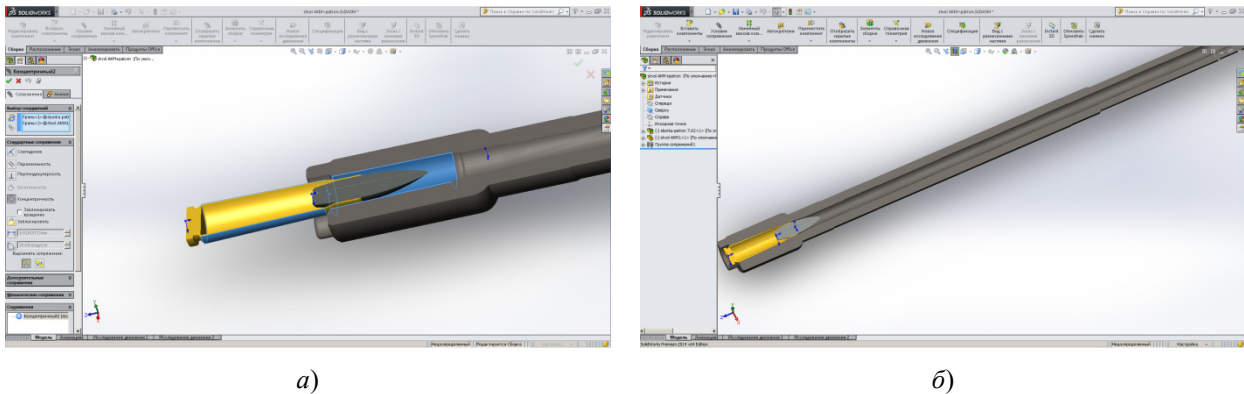


Рис. 5. Сборка патрона со стволом:
а – выбор поверхностей сопряжения; б – конечный вид сборки ствол–патрон

Модель «патрон – ствол» готова для использования в дальнейших расчетах в программном комплексе *ANSYS*. Программный комплекс *ANSYS* использовали для расчетов, связанных с механикой и газодинамикой. Рассмотрим подробнее процесс ввода начальных условий и их дальнейшего решения [2].

Первым делом поставили задачу, выбрали данные, требуемые для дальнейших расчетов, а это: приложение в комплексе, которое необходимо для решения расчетов (выбрали *Explicit Dynamics – Mechanical*); материал для каждого элемента трехмерной модели (при расчетах используются физико-химические характеристики заданного материала). Для дальнейших расчетов запускаем выбранное выше приложение. Задача ставилась на виртуальной рабочей поверхности. Общий вид представлен на рис. 6.

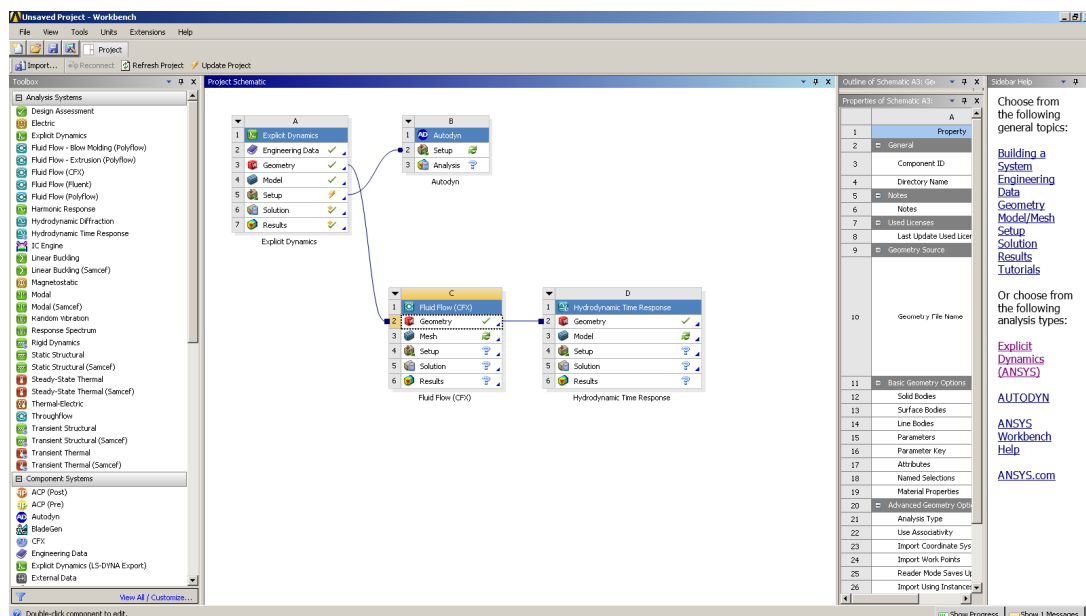


Рис. 6. Общий вид *Workbench*

Дальнейшая работа проводилась в приложении *Explicit Dynamics – Mechanical*, куда была загружена спроектированная модель (рис. 7,а). Здесь у каждого элемента было проверено соответствие физико-химических свойств. Выбраны требуемые поверхности взаимодействия (рис. 7,б).

Зафиксированы элементы, которые при детонации способны перемещаться, но по условиям должны быть неподвижны (гильза, ствол). Задаем место и время детонации заряда (рис. 7,б). Выставляем время процесса (т.е. установили конкретное время окончания процесса, как правило, это не более одной секунды). Выбираем количество циклов повторения расчетов (заданное время процесса делится на равные интервалы, через которые будет производиться полный алгоритм расчетов). Создаем структурную сетку каждого элемента (рис. 7,з).

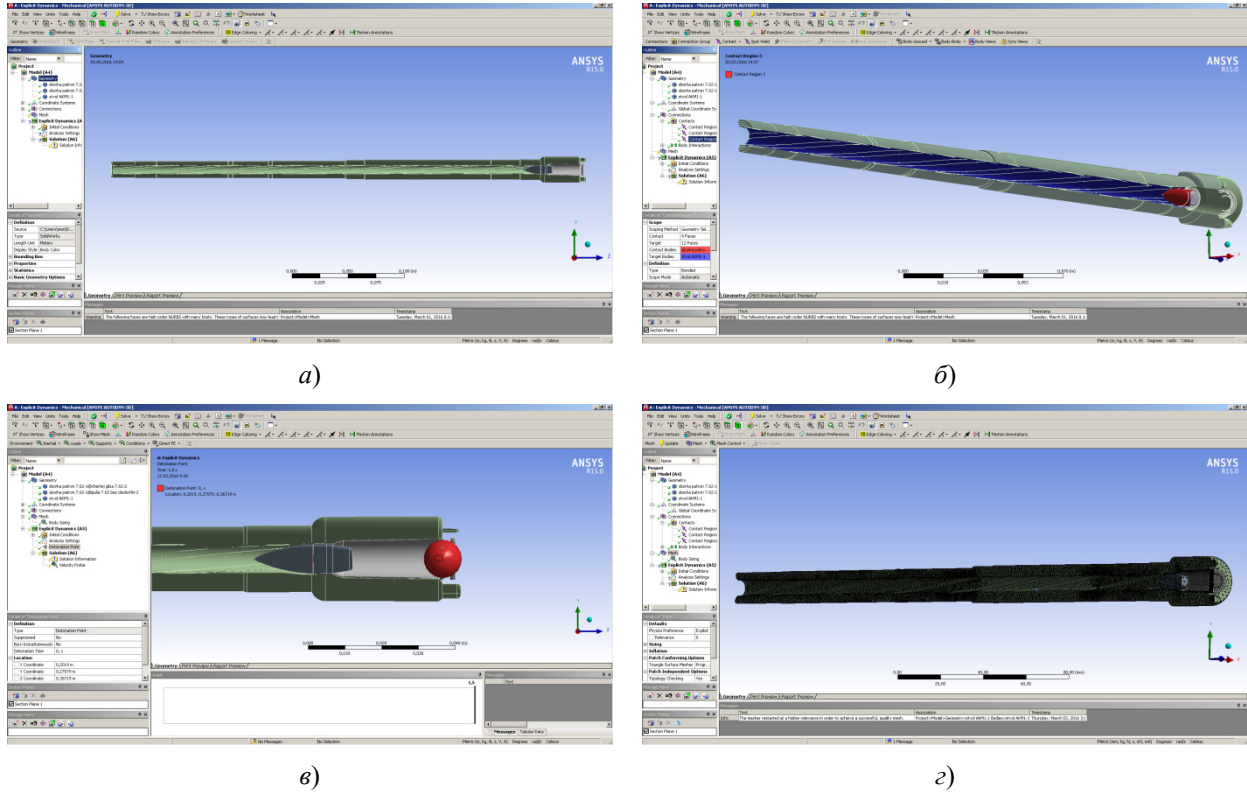


Рис. 7. *Explicit Dynamics – Mechanical*. Постановка задачи, подготовительные мероприятия: а – рабочее окно приложения *Explicit Dynamics – Mechanical* с экспортированной трехмерной моделью; б – выбор поверхностей взаимодействия; в – определение места и времени детонации; г – построение сетки каждого элемента модели

Каждый отдельный элемент в сетке представляет собой фигуру с восемью вершинами. Вычисления пластических деформаций приведены ниже. Плоскости, которые составляют равные углы с каждым из главных направлений расчетов, называем октаэдрическими плоскостями [3]. Касательное напряжение на этой плоскости определяется по формуле [4]

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2J_2}{3}}, \quad (1)$$

где второй инвариант напряжений девиаторов определяется по формуле

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2], \quad (2)$$

где σ_{ij} – общие тензоры напряжений в ij направлениях.

Направления 11, 22 и 33 являются основными напряжениями по направлениям. По вон Мизесу [4] критическое значение критерия текучести области при чистом сдвиге октаэдрической плоскости определяем

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} k, \quad (3)$$

где k – предел текучести в чистом сдвиге.

Соответственно, критерий текучести выражаем как

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0. \quad (4)$$

При выполнении этого условия будут происходить условия одноосного растяжения тела, когда

$$\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0. \quad (5)$$

Подставим эти значения в приведенные выше уравнения и получим одноосное напряжение текучести:

$$\sigma_y = \sqrt{3}k = \sqrt{3J_2}. \quad (6)$$

Напряженное состояние проверяется критерием текучести. Если критерий текучести превышен, то приращение эффективной пластической деформации вычисляется следующим образом:

$$\Delta \epsilon_{eff}^p = \frac{\sqrt{3J_2} - \sigma_y}{3G}. \quad (7)$$

Эффективная пластическая деформация является комплексным значением этих приращений и рассчитывается

$$\epsilon_{eff}^p = \int \Delta \epsilon_{eff}^p dt. \quad (8)$$

Эффективная интенсивная пластическая деформация определяется по формуле

$$\epsilon_{eff}^p = \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\Delta t}, \quad (9)$$

где Δt – текущее время.

Эффективная деформация определяется по формуле

$$\Delta \epsilon_{eff} = \int \Delta \epsilon_{eff} dt, \quad (10)$$

где

$$\Delta \epsilon_{eff} = \Delta t \left[\frac{2}{3} (\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 + \epsilon_{zz}^2 + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}},$$

здесь ϵ_{ij} – общий тензор деформации в направлении ij , которое включает в себя упругую и пластическую составляющие.

Основное уравнение движения решается с помощью неявного переходного динамического анализа:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t), \quad (11)$$

где m – масса матрицы; c – матрица демпфирования; k – матрица жесткости; $F(t)$ – вектор нагрузки [5].

В любой момент времени t эти уравнения можно рассматривать как совокупность «статических» уравнений равновесия, которые также учитывают силы инерции и силы демпфирования. Используем метод интеграции, чтобы решить эти уравнения в дискретные моменты времени. Отрезок времени между последовательными точками называется временным шагом интегрирования. При решении дифференциальных уравнений должен быть произведен анализ динамики с определением массы, импульса и энергии в Лагранжевых координатах [6]. Это совместно с материалом модели и набор начальных и граничных условий определяет комплексное решение.

Для лагранжевой формулировки данной задачи в настоящее время используются уравнения динамики, в которых сетка перемещается и деформируется с материалом модели, сохраняя массу. Плотность в любой момент времени можно определить с помощью текущего объема зоны и ее начальной массы:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}. \quad (12)$$

Дифференциальные уравнения в частных производных выражаем через импульс сохранения энергии относительно ускорений для тензора напряжений σ_{ij} :

$$\rho \dot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$\rho \dot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$\rho \dot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}.$$

Импульс сохранения энергии выражаем через

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx}). \quad (13)$$

Эти уравнения решаются отдельно для каждого элемента в модели на основе входных значений на конец предыдущего временного шага. Малые интервалы времени используются для обеспечения устойчивости и точности решения. Берутся результаты из предыдущего момента времени для того, чтобы предсказать результаты в следующий момент времени. Требования для итерации не предъявляем [7].

При постановке задач и использовании уравнений динамики постоянными оставляем массу, количество движения и величину энергии. Только масса и импульс сохранения энергии остаются неизменными. Энергия накапливается с течением времени в узловых точках. Ее сохранение контролируется в процессе решения.

Заключение

Таким образом, при проведении моделирования с использованием программных комплексов системы автоматизированного проектирования на этапе проектирования рассчитываются оптимальные технические характеристики стрелкового оружия с целью повышения эффективности его действия.

Список литературы

1. Горов Э. А. Основания проектирования автоматического оружия: дополнительные главы к основному курсу. М. : Изд-во Артиллерийской инженерной академии, 1955. 195 с.
2. Басов К. А. ANSYS справочник пользователя. М. : Изд-во ДМК-Пресс, 2005. 640 с.
3. Захарынкoв В. Ф. [и др.]. Биомеханика системы «стрелок – оружие» и эффективность стрельбы. СПб : Балтийский государственный технический университет ; М. : Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2013. 159 с.
4. Партон В. З. Механика разрушения. Теория и практика. М. : УРСС, 2007. 240 с.
5. Литвинов А. Н., Юрков Н. К. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 16–22.
6. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М. : УРСС, 2008. 256 с.
7. Хади О. Ш., Литвинов А. Н. Моделирование состояния гетерогенных структур для повышения безопасности сложных технических систем в процессе их жизненного цикла // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 3. С. 8–15.

References

1. Gorov E.A. *Osnovaniya proektirovaniya avtomaticheskogo oruzhiya: dopolnitel'nye glavy k osnovnomu kursu = Fundamentals of designing automatic weapons: additional chapters to the basic course*. Moscow: Izd-vo Artilleriyskoy inzhenernoy akademii, 1955:195. (In Russ.)
2. Basov K.A. *ANSYS spravochnik pol'zovatelya = ANSYS user's guide*. Moscow: Izd-vo DMK-Press, 2005:640. (In Russ.)

3. Zakharynkov V.F. et al. *Biomekhanika sistemy «strelok – oruzhie» i effektivnost' strel'by = Biomechanics of the "shooter – weapon" system and firing efficiency*. Saint Petersburg: Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet; Moscow: Moskovskiy gos. tekhn. un-t im. N.E. Bauman, 2013:159. (In Russ.)
4. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya. Teoriya i praktika = Mechanics of destruction. Theory and practice*. Moscow: URSS, 2007:240. (In Russ.)
5. Litvinov A.N., Yurkov N.K. Modeling of the stress-strain state in layered structures of RES under technological and operational impacts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):16–22. (In Russ.)
6. Morozov E.M., Nikishkov G.P. *Metod konechnykh elementov v mekhanike razrusheniya = Finite element method in fracture mechanics*. Moscow: URSS, 2008:256. (In Russ.)
7. Khadi O.Sh., Litvinov A.N. Modeling of the state of heterogeneous structures to improve the safety of complex technical systems during their life cycle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(3):8–15. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Александрович Громов

соискатель ученой степени кандидата технических наук,
курсовой офицер – преподаватель
факультета ракетно-артиллерийского вооружения,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: darkzgrom@gmail.com

Aleksey A. Gromov

Candidate of the academic degree
of candidate of technical sciences,
course officer – teacher of the faculty
of rocket and artillery armament,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Voenny gorodok, Penza, Russia)

Юрий Викторович Чебурков

кандидат технических наук, старший преподаватель
кафедры средств ближнего боя,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: yuseburkov@mail.ru

Yuriy V. Cheburkov

Candidate of technical sciences, senior lecturer
of the sub-department of melee weapons,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Voenny gorodok, Penza, Russia)

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of automatics and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 27.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 30.03.2023

Принята к публикации / Accepted 04.05.2023