

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ

В.В. ЕГОРОВ

*Балтийский государственный технический университет
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1,
т. (812) 495-77-48, факс (812) 575-06-11, E-mail knight-vladimir@ya.ru*

Ствол и прежде всего, ствольная труба как командная деталь арт-установки, во многом определяют её эксплуатационные характеристики.

При проектировании ствола перед конструктором встаёт широкий круг сложных задач, которые ему необходимо решить при ограниченном времени и большой ответственности, так как ошибка при проектировании и экспертизе ствола артиллерийского орудия (АО) может привести к значительным финансовым и временным потерям. Минимизировать вероятность нерациональных, ошибочных конструкторских решений можно при наличии так называемой проектно-экспертной системы (ПЭС) [1], т. е. системы, аккумулирующей в формальном виде знания специалистов в области проектирования и экспертизы стволов АО.

Создание такой ПЭС — т. е. эффективного программного продукта предназначенного для генерации проектных решений одновременно с их экспертизой на осуществимость и надёжность функционирования — сложная задача, шагом к решению которой является автоматизация проектной экспертизы ствола АО на ранних стадиях проектирования. Такая автоматизация может быть достигнута за счёт соответствующего программного обеспечения — рабочего аналога проектно-экспертной системы ствола. Однако при создании подобного продукта необходимо соблюсти баланс между функциональностью и затратами на разработку и поддержку, поэтому было бы избыточно разрабатывать ПЭС способную решать весь спектр задач, стоящих перед конструктором — целесообразно остановиться только на типовых задачах проектирования и экспертизы ствола (рис. 1). Перечень задач, которые можно считать типовыми, может изменяться от проекта к проекту и отражает особенность принципиальной схемы орудия.

Классификационным признаком для выбранного деления типовых задач является вариативность параметров формальной информационной модели ствола.

Под *формальной информационной моделью* будем понимать модель объекта, представленную в виде информации на формальном (профессиональном) языке, описывающую существенные для данного рассмотрения параметры объекта.

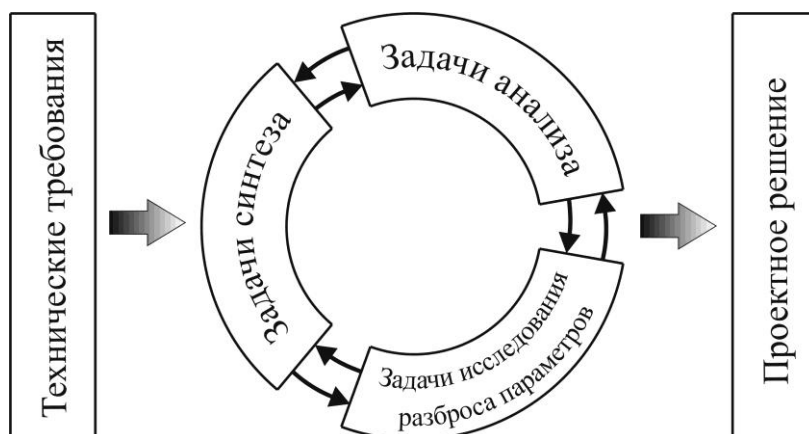


Рис. 1. Типовые задачи проектирования и экспертизы

В *задачах синтеза* существуют условия, которым должны удовлетворять характеристики «неизвестной модели», и требуется построить модель этого объекта. Решение задачи синтеза представляет собой итерационный процесс из следующих шагов:

1. создание «исследовательской модели»;
2. анализ модели (решение задачи анализа);
3. сравнение результатов анализа с условиями задачи.

Типовые задачи синтеза ствола АО получим, накладывая ограничения на параметры ствола. Так возможно наложение ограничений по материалу, массе, наружным размерам и т. д. Комбинация таких ограничений и даёт в итоге конкретную проектную задачу, которая может характеризоваться либо неполнотой входной информации (много удовлетворительных вариантов решения), либо избыточностью входной информации (нет удовлетворительных вариантов решения).

Обе ситуации типичны для проектирования артстволов, и, как правило, проявляются и разрешаются по-разному. В первой ситуации привлекаются дополнительные соображения, отсутствующие как требования технического задания (ТЗ). В процессе проектирования данные соображения вытекают обычно из опыта, знаний, иногда интуиции пользователя, но могут исходить и из промежуточных результатов автоматизированного проектирования или из сведений, входящих в информационно-справочную систему. Вторая ситуация разрешается после доказательства несовместимости поставленных в ТЗ требований путем отступления от каких-либо из них частично или целиком. Выбор пути отступления, расширения или снятия ограничений ТЗ трудно формализуем, к тому же выходит за область компетентности ПЭС, поэтому при автоматизации проектной задачи по стволу необходимо поставить в ее центр специалиста-проектировщика, активно взаимодействующего с ПЭС.

Однако ПЭС может предлагать специалисту-проектировщику типовые варианты проектных решений (так называемые «исследовательские модели») на основе имеющихся эмпирических методов и статистических данных, которые могут быть им приняты, отвергнуты, или скорректированы, т. е. процесс проектирования должен проходить в диалоговом режиме, который кроме того должен обеспечивать:

- введение разнообразной входной информации, необходимой для выполнения как всей проектной процедуры, так и отдельных проектных операций;
- получение вводной инструкции и инструкций в ходе работы системы;
- возможность в нужный ему момент прервать процесс проектирования для выполнения вспомогательных действий (например, запросить и получить справку из информационно-справочной системы);
- возможность перейти по своему усмотрению от одной проектной операции к другой, если это не нарушает логику проектирования;
- возможность в ходе работы пользоваться диагностическими сообщениями системы по существу решаемой задачи и «подсказками» по правилам работы с системой (последнее часто называют сервисным обеспечением);
- возможность завершить диалог, удовлетворившись его результатами.

Традиционная классификация проектных задач стола АО для проектных организаций включает четыре операции:

1. проектирование ведущей части канала ствола;
2. проектирование каморы;
3. определение наружных размеров ствола и выбор марки материала,
4. (если необходимо) выбор способа упрочнения (автоскрепление или скрепление) и определение его параметров.

Решение задачи проектирования в виде простой итерационной процедуры «синтез модели – анализ модели» представляется нерациональным, так как не позволяет убрать из рассмотрения неработоспособные конструкции до полного определения параметров модели. Поэтому разумно так управлять процессом проектирования, чтобы отработка конструкции ствола на работоспособность (решение задач анализа) проводилась одновременно с его проектированием.

В задачах анализа существует модель объекта и требуется в результате работы с этой моделью определить её неизвестные характеристики. При решении задач анализа проверяют условия работоспособности [2], т. е. требования, которым должна удовлетворять конструкция ствола, полученные при рассмотрении ствола как элемента различного рода систем и подсистем ствольного комплекса.

Ствол как элемент внутрибаллистической системы «ствол-заряд-снаряд» обеспечивающей разгон снаряда заданных калибра и массы до требуемой начальной скорости за счёт давления пороховых газов канале ствола.

Внутрибаллистический процесс, протекающий с исключительно высокими силовыми (давление пороховых газов составляет несколько сотен мегапаскалей) и тепловыми нагрузками (температура доходит до 3000 °С), а также характеризующийся динамичностью их приложения (темп стрельбы может достигать несколько тысяч выстрелов в минуту), выводит на первый план задачу обеспечения гарантированной прочности ствола АО.

При решении данной задачи будем считать, что баллистическое проектирование орудия завершено, т. е. известны некоторые конструктивные данные канала ствола, условия заряжания и баллистические характеристики выстрела. Следовательно, ствол как элемент внутрибаллистической системы должен соответствовать начальным условиям внутрибаллистического процесса (условиям заряжания), а конструкция его канала должна обеспечивать расчётные характеристики внутрибаллистического процесса (давление газов, путь, скорость и время движения снаряда и т. д.), а его прочность должна быть достаточной, чтобы обеспечить эти внутрибаллистические характеристики.

Гарантией прочности ствола и его частей является отсутствие прогрессирующих остаточных деформаций в конструкции ствола при всевозможных условиях огневой эксплуатации АО.

Опыт проектирования показывает, что обеспечить гарантированную прочность можно только использованием специальных орудийных сталей, выбором рациональных конструкции ствола и способов его упрочнения.

Химический состав и соответствующая термическая обработка обеспечивают орудийным сталям широкий диапазон прочностных свойств. Однако на данный момент для изготовления стволов доступны стали с категорией прочности от О–55 до О–125 включительно.

Однако возможность получить ту или иную категорию прочности определяется не только химическим составом стали, но и прокаливаемостью заготовки ствола – с увеличением толщины стенки заготовки максимально достижимая категория прочности уменьшается, поэтому, несмотря на то, что в настоящее время из-за возможности использовать оружейные стали с высокой категорией прочности наиболее часто применяются стволы-моноблоки, находят широкое применение такие конструктивно-технологические приёмы повышения прочности как скрепление и автоскрепление.

Также отмеченные выше ограничения на толщину заготовок стволов делают невозможным применение сталей с высокой категорией прочности для толстостенных стволов-моноблоков орудий средних и особенно крупных калибров.

Ствол с казенником, затвором и механизмами запираания составляют характерную часть артиллерийского орудия – узел запираания. Поскольку казенная часть ствола является *элементом узла запираания канала*, то к ней могут быть предъявлены требования, вытекающие из рассмотрения надежности узла запираания. Так, ствол должен обладать в казенной части повышенной жесткостью, особенно в месте соединения с казенником, площадь сечения дна каморы должна давать приемлемое усилие на затвор с точки зрения надежности запираания и обтюрации пороховых газов. Иногда ставится условие быстротворности ствола, что диктует определенное конструктивное исполнение ствола в месте его соединения с казенником, коробом или ствольной обоймой.

Ствол как *составной элемент откатных частей орудия* должен иметь такую массу, которая обеспечивала бы приемлемые динамические характеристики орудия. На ранних стадиях проектирования это может быть определено с помощью массы откатных частей, составляющей до 50 % массы орудия, и скорости их свободного отката с учётом этих величин для существующих качественных в динамическом отношении орудий-прототипов и тенденций их изменения. Кроме того, ствол как элемент откатных частей должен иметь конструктивную базу для направления при откате при предварительно принятой рациональной длине отката с учётом типа люльки и его расширения при стрельбе от давления газов и нагрева.

Как *элемент качающейся и вращающейся частей* (КЧ и ВЧ) орудия ствол должен не только обладать приемлемой массой, но и рациональным расположением центра масс относительно осей наведения. Это обеспечит приемлемые инерционные характеристики КЧ и ВЧ орудия, а, следовательно, рациональную компоновку и характеристики приводов наведения, механизма стабилизации, уравновешивания КЧ.

Часть требований к конструкции ствола вытекает из рассмотрения ствола как основного функционального элемента орудия, а орудия – как *элемента ствольного комплекса*, включающего в себя кроме орудия боеприпас, носитель, приборы управления огнем. На ствол в составе арторудия возлагается значительная часть задачи по обеспечению точности стрельбы ствольного комплекса. Так, ведением снаряда по каналу нарезного ствола обеспечивается стабилизация снаряда на траектории; поперечная жесткость ствола значительно влияет на ошибку технического рассеивания снарядов; сохранение точности стрельбы при заданном в ТЗ настреле тоже во многом зависит от конструкции ствола, его износостойкости и живучести. Учитывая эти соображения, конструкция ведущей части канала ствола

должна отвечать требованиям надежной стабилизации снаряда и износостойкости, а ствол в целом – быть достаточно жестким. В нем должны быть использованы соответствующие типу и назначению орудия способы повышения живучести, например, лейнирование, быстроменность, искусственное охлаждение, защитное покрытие канала и т. п.

Артиллерийский ствол является сложным в технологическом отношении объектом – большая относительная длина, наличие высокоточного глубокого отверстия сложной формы, высокие требования по чистоте обработки рабочих поверхностей, соосности поверхностей, непрямолинейности канала, другим погрешностям формы и т. п., Не будем забывать и о высоких механических характеристиках орудийных сталей, что усложняет их обработку. Всё перечисленное вынуждает использовать специализированное дорогостоящее оборудование и, безусловно, сказывается на стоимости изготовления ствола. Следовательно, уже на ранних стадиях проектирования необходимо учитывать возможность производства, т. е. принадлежность ствола к некоторой технологической системе. Такая система должна быть ориентирована на определенный тип производства и включать в себя наиболее экономичные технологические приемы изготовления стволов с учетом существующего оборудования, технологий и перспектив развития производства. В итоге, вопрос сводится к технологичности конструкции, т. е. к возможности ее изготовления при оправданных затратах [3].

Работоспособность ствольных комплексов определяются при рассмотрении внешних моделей функционирования [4], т. е. моделей решения боевых задач. Работа же ствола описывается, как правило, внутренними моделями напряженно-деформированного состояния, нагрева, износа и т. д. Связи между внешними и внутренними моделями функционирования сложны и носят опытно-эмпирический характер. Поэтому целесообразно изучать вопрос о работоспособности стволов, оставаясь в рамках внутренних моделей, определяя отказ ствола через параметры, непосредственно относящиеся к нему.

Таким образом, рассмотрение ствола как элемента различного рода систем и подсистем ствольного комплекса позволяет выявить условия работоспособности, которым должна удовлетворять конструкция ствола. Анализ же сложившихся физических представлений о процессах, протекающих в артиллерийском стволе, позволяет выделить по внутренним задачам функционирования несколько групп параметров по условиям работоспособности. Это, помимо геометрических параметров канала ствола, которые должны соответствовать геометрическим параметрам, полученным в результате внутрибаллистического решения:

- а) параметры, характеризующие прочность ствола и его частей;
- б) параметры, характеризующие изменение поверхности канала ствола;
- в) параметры ствола как механической колебательной системы;
- г) параметры, характеризующие ствол как составную часть орудия;
- д) параметры, характеризующие тепловой аспект;
- е) параметры, характеризующие технологический аспект.

Для каждой из таких групп систему условий работоспособности можно записать неравенствами вида

$$A \geq [A], A \leq [A] \quad (1)$$

где A – матрица-строка (вектор) параметров ствола, $[A]$ – вектор допустимых значений этих параметров.

Такая форма записи условий работоспособности позволяет дать экспертную оценку каждого проектного решения в формализованном виде, но требует установления допустимых значений параметров, которые должны быть получены из анализа как внутренних, так и внешних моделей функционирования.

Матрицу-строку каждой группы следует понимать как открытую – развитие представлений о работоспособности ствола расширяет и видоизменяет ее. Сведённые воедино, неравенства всех групп составляют систему условий работоспособности артиллерийского ствола.

Неравенства вида (1) формализуемы для использования в ПЭС, однако трудность заключается в подборе соответствующих моделей функционирования, которые как не могут быть слишком сложны, так и должны иметь достаточную точность решения.

Включение в состав ПЭС экспертных модулей анализирующих достаточное количество параметров по условиям работоспособности позволяет создать работоспособную и рациональную конструкцию ствола.

Задачи исследования разброса параметров предполагают, что часть параметров модели известна, а другая изменяется в некотором (обычно небольшом) интервале, и необходимо определить влияние этих изменений. Задачи подобного рода могут возникать при назначении допусков на элементы ствола, а также в случаи оценки надёжности ствола артиллерийской установки. Трудность в решении задач исследования разброса параметров заключается в правильном учёте их взаимного влияния. Как правило, в задачах исследования разброса параметров изменение характеристик определяется посредством многократного решения задач анализа, что подчёркивает важность выбора правильных моделей функционирования ствола.

Работа в диалоговом режиме полезна не только при решении проектных задач (задач синтеза), но и для решения задач анализа и разброса параметров. Такой подход позволяет пользователю системы по результатам решения задачи анализа получить справку и рекомендации по дальнейшему улучшению конструкции ствола АО, что может являться предварительным этапом при переходе к задачам синтеза.

Активное использование диалогового режима при решении типовых задач позволяет говорить о информационно-справочной системе ПЭС как об отдельном информационном модуле. На ИСС возлагаются задачи:

- предоставление справочной информации;
- объяснение результатов;
- обучение работе с системой;
- предоставление рекомендации;
- информирование об ошибках, допущенных при вводе.

Рассмотрение типовых задач проектной экспертизы позволило составить перечень необходимых модулей, большая часть которых вошла в первую версию ПЭС TUBE2010, а также сформулировать требования предъявляемые к ним. Классификация типовых задач выявила четыре типа необходимых модулей: 1) проектные, решающие задачи синтеза; 2) экспертные, решающие задачи анализа; 3) модули, исследующие разброс параметров 4) и информационно-справочная система.

Реализация интерфейса первой версии ПЭС представлена на рис.2.

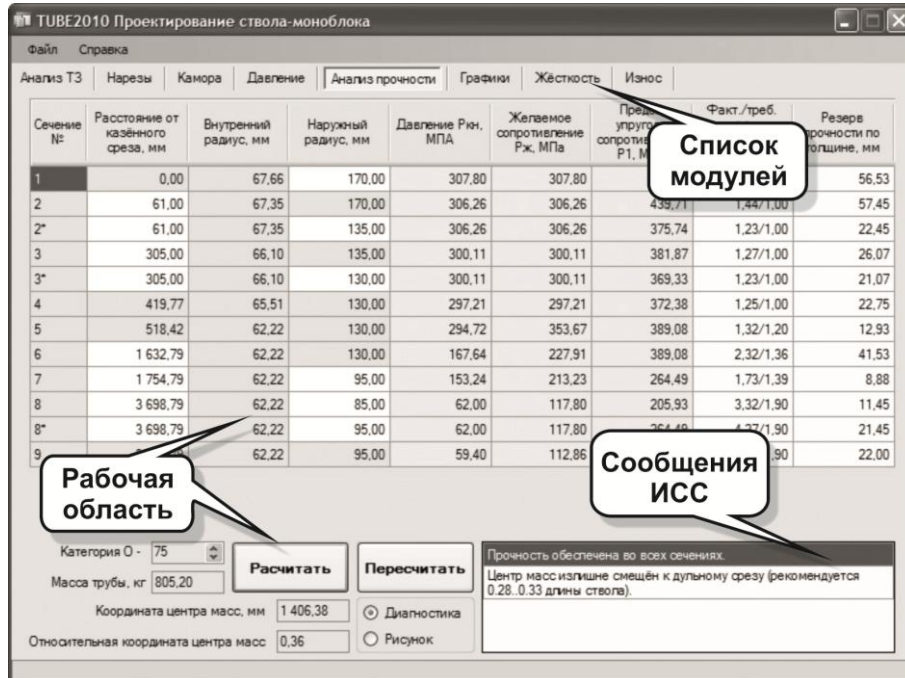


Рис. 2. Интерфейс первой версии ПЭС

Проектно-экспертная система TUBE2010 позволяет в диалоговом режиме выполнить проекты стволов моноблоков, отвечающих баллистическим решениям и требованиям по типу, форме, размерам, массово-центровочным, жесткостным и другим характеристикам ствола. Кроме того, в подсистеме могут решаться частные (ограниченные) задачи:

- проектирование ведущей части канала;
- проектирование камерной части канала;
- подбор материала ствола, выбор толщин стенки ствола;
- расчет прочности ствола-моноблока;
- расчет массы и положения центра масс ствола;
- расчет прогибов и углов поворота дульного среза ствола от собственного веса с учетом сочленения его с люлькой;
- оценка показателей износа и другие.

Библиографический список

1. Гуцин А.Н., Радченко И.А. Экспертные системы: учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. 2007. 92 с.
2. Зайцев А.С. Проектирование артиллерийских стволов. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. 2007. 164 с.
3. Туктанов А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2007. – 375 с.: ил.
4. Чуев Ю.В. Проектирование ствольных комплексов. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.