

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Кафедра стартовых и технических комплексов ракет
и космических аппаратов

*С.С. ЖАРОВА, Р.В. КРАСИЛЬНИКОВ,
В.Л. МАРТЫНОВ*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ПУСКА
ПОДВОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2020

УДК 623.827.01:519.87(075.8)

Ж 35

Ж 35

Жарова, С.С.

Математическое моделирование процессов пуска подводных изделий: учебное пособие / С.С. Жарова, Р.В. Красильников, В.Л. Мартынов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 45 с.

ISBN 978-5-907324-00-8

Рассмотрены особенности физических процессов, протекающих при старте подводных изделий из пусковых установок (ПУ) разных типов, применяемые схемы ПУ, их конструктивные и принципиальные различия, математическая модель функционирования ПУ с пороховым аккумулятором давления.

Для студентов и аспирантов технических вузов, обучающихся по специальностям, связанным с вооружением и военной техникой, а также курсантов военных университетов и академий.

УДК 623.827.01:519.87(075.8)

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. БГТУ «Военмех»
О.А. Толпегин; канд. техн. наук, проф. СПб ГМТУ *О.И. Ефимов*

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

ISBN 978-5-907324-00-8

© БГТУ, 2020
© Авторы, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов пуска подводных изделий является актуальным вопросом и предполагает представление исследуемых объектов в виде математических моделей.

В ходе изучения или научного исследования возникает множество практических задач, решение которых сводится к решению алгебраических, дифференциальных уравнений и их систем. Однако аналитическое решение подобных задач возможно только в простейших случаях, большинство же уравнений решить аналитически невозможно. В этом случае применяются численные методы решения.

На данный момент разработано большое количество специализированных программ для решения алгебраических или дифференциальных уравнений и их систем в поставленных исследователем задачах. Одной из наиболее удобных для пользователя является Matlab.

Настоящее пособие рассматривает применение адаптированного для студентов пакета «Matlab Simulink» для расчета параметров процессов пуска.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПУСКОВЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

1.1. Типы подводных изделий

В соответствии с ГОСТ 2.101-2016 *изделием* называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации. Изделиями могут быть устройства, средства, машины, агрегаты, аппараты, приспособления, оборудование, установки, инструменты, механизмы, системы и др.

Под *подводным изделием* в данном пособии понимается техническое средство для проведения или обеспечения различных работ, решения разных задач или осуществления исследований под водой или частично над водой. К задачам можно отнести поиск, обнаружение, классификацию, обследование или уничтожение подводных и частично надводных объектов, подводно-технические работы, океанологические исследования и ряд других назначений.

При этом, ввиду ограниченной энергетической автономности подводных изделий, крайне актуальной задачей является их размещение на более крупногабаритных носителях, способных обеспечить доставку в нужный район действий и развертывание (отделение от носителя). Основные типы изделий, размещааемых на подводных носителях, показаны на рис. 1, характеристики отдельных образцов приведены в таблице.



Рис. 1. Типы подводных изделий

Характеристики подводных изделий

Изделие	Калибр, м / длина, м / масса, кг	Назначение
SUBSCUT	0,075 / 0,99 / 4,5	Средство ГПД
ADC MK2	0,076 / 0,95 / 4,5	
SCAD 101	0,100 / 1,00 / 5,5	
LESCUT	0,124 / 0,92 – 1,23 / 4,5 – 24,8	
CRAW	0,152 / 2,16 / 99,8	Противолодочная торпеда
ADC MK3 / MK4	0,159 / 2,69 / 45,0	Средство ГПД
Seaspider	0,210 / 1,94 / 107,0	Антиторпеда
SeaFox	0,240 / 1,31 / 43,0	Противоминный подводный аппарат
MARK 44 Mod. 1	0,324 / 2,84 / 196,5	Противолодочная торпеда
MARK 46 Mod. 6	0,324 / 2,59 / 234,5	
MARK 50 «Barracuda»	0,324 / 2,84 / 340,0	
MARK 54 «Mako»	0,324 / 2,69 / 275,8	
Torpedo 43 (Tr 43)	0,400 / 2,64 / 310,0	Универсальная торпеда

Изделие	Калибр, м / длина, м / масса, кг	Назначение
MARK 37 Mod. 3	0,483 / 3,51 / 648,7	Противолодочная торпеда
BGM-109 «Tomahawk»	0,531 / 6,25 / 1200,0	Крылатая ракета большой дальности
Exocet SM39	0,533 (0,348) / 5,38 (4,69) / 1350,0 (666,0)	Противокорабельная крылатая ракета
МК 60 CAPTOR	0,533 / 3,35 / 935,0	Противолодочный минный комплекс
MARK 48 Mod. 1	0,533 / 5,79 / 1558,0	Универсальная торпеда
MARK 48 Mod. 5 ADCAP	0,533 / 5,79 / 1676,0	
65-76 «Кит»	0,650 / 11,3 / 4450,0	Противокорабельная торпеда

Приведем краткие определения упомянутых типов подводных изделий.

Крылатая ракета – беспилотный управляемый летательный аппарат, который поддерживается на задаваемой высоте большую часть своей воздушной траектории за счет аэродинамической подъемной силы. В зависимости от скорости полета делятся на дозвуковые ($M < 1$), сверхзвуковые ($M < 5$) и гиперзвуковые ($M > 5$).

Торпеда – самодвижущийся подводный снаряд, содержащий взрывчатое вещество и предназначенный для уничтожения надводных кораблей, подводных лодок и других подводных объектов противника (например, атакующей торпеды). Соответственно могут быть противокорабельными, противолодочными и универсальными (предназначенными для поражения любых типов целей).

Морская мина – скрытно устанавливаемый в водной среде боеприпас, предназначенный для поражения подводных лодок, кораблей и судов противника, а также для затруднения их плавания. По типу установки делятся на якорные (закрепленные с помощью якоря в толще воды на определенной глубине), донные (лежащие на дне) и дрейфующие (свободно перемещающиеся в толще воды).

Средства ГПД – самодвижущиеся или дрейфующие подводные снаряды, предназначенные для подавления или снижения эффективности гидроакустического наблюдения и функционирования гидроакустических систем самонаведения подводного оружия противника. Включают в себя приборы создания гидроакустических помех, ложные гидроакустические цели и средства искажения спектрально-временных характеристик гидроакустических полей.

Необитаемый подводный аппарат (НПА) – устройство для проведения или обеспечения различных работ и исследований под водой. Могут быть дистанционно управляемыми по кабель-тросу оператором, находящимся на носителе или на берегу (телеуправляемые НПА), работающими самостоятельно по программе (автономные НПА) или связанными с судном-носителем кабель-тросом и буксируемыми судном по его траектории с возможностью осуществлять маневрирование в вертикальной и/или горизонтальной плоскостях (буксируемые НПА).

1.2. Пусковые установки и методы пуска оружия

Пусковые установки (ПУ) предназначены прежде всего для безопасного отделения оружия от носителя, понимая под безопасностью:

- для оружия после его выхода за обводы носителя и из-за вызванного его движением скаса набегающего потока воды – успешное самостоятельное выполнение начального пространственного маневрирования с решением в дальнейшем траекторных задач атаки цели;
- для подводного носителя – исключение несанкционированных соударений с оружием после потери им контакта с направляющими ПУ.

Не менее важными проблемами отделения оружия для разработчиков ПУ являются: скрытность одиночного и залпового использования оружия, экономия энергоресурсов подводной лодки и оружия, длительное хранение оружия в режиме боевой готовности, быстрое приготовление и залповое применение с заданным темпом стрельбы, в тактически обоснованное время совместная работа узлов ПУ с погрузочными приспособлениями и устройствами быстрого заряжания, а также многое другое.

Как отмечалось выше, номенклатура используемого оружия весьма широка:

- 1) различного типа оружие (прежде всего, торпеды), имеющее свою двигательную-двигательную установку, которую в общем случае можно включить еще в пусковой трубе;
- 2) оружие, включение двигательных-двигательных комплексов которого в пусковой трубе нежелательно (пример – подводная ракета с твердотопливным двигателем);

3) оружие, не имеющее средств для создания тягового усилия, влияющего на его движение вблизи корпуса носителя (типичный пример – мины).

В качестве источника энергии, необходимого для создания выталкивающей силы при создании устройств отделения подводных изделий от носителей, могут использоваться разные типы энергии (рис. 2).

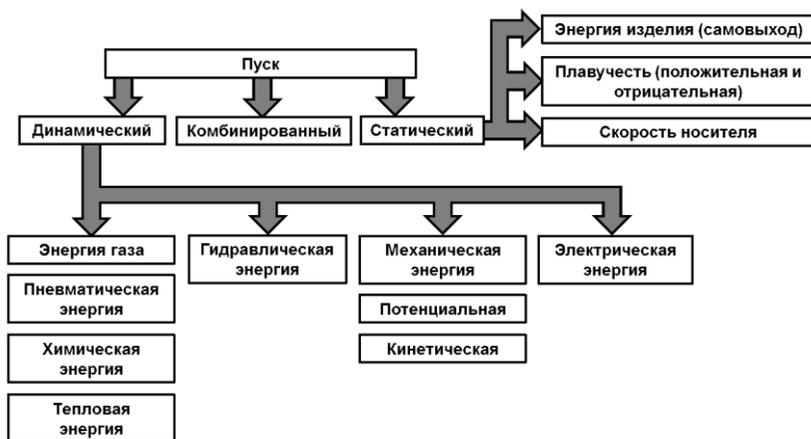


Рис. 2. Типы пуска и используемая энергия

Рассмотрим указанные типы пуска.

Статический пуск. Основная его особенность – отсутствие динамического воздействия на запускаемое оружие со стороны силовой установки пускового устройства. К статическому пуску относятся следующие его виды.

Сброс (метание) оружия. Расположение сбрасывающих установок и положение оружия относительно потока выбираются таким образом, чтобы исключался «присос» оружия к носителю, т.е. в зоне положительного избыточного давления на его корпус. Одновременно или несколько ранее с раскрытием захватов, удерживающих оружие, откидывается его курок, т.е. запускается двигатель-двигательный комплекс торпеды. Для мин достаточно снятия последних предохранительных «запретов». Примером реализации такого пуска могут служить торпедные аппараты С. К. Джевецкого, которые применялись на первых российских подводных лодках (ПЛ). При

большой отрицательной плавучести возможен самостоятельный выход вниз оружия из труб, располагаемых вертикально (или под небольшим углом к вертикали). Известны варианты схемно-технических решений с использованием специально закрепленной на оружии положительной плавучести, обеспечивающей его всплытие и отбрасываемой после отхода изделия на безопасное от носителя расстояние.

Самовыход торпед. Под самовыходом торпеды понимается ее выход из пусковой трубы (пусковой решетки) под действием упора, развиваемого собственным двигателем (примеры – торпедные аппараты (ТА) немецких ПЛ S-206, типа 209, шведских ПЛ класса A-19 Gotland). Такой метод пуска оружия влечет за собой значительное снижение массогабаритных характеристик пусковых установок, открывая возможность увеличить их количество на носителе и решить вопросы залпа. При самовыходе создаются условия более простого решения проблем, связанных с выносом пусковых труб в межбортное пространство ПЛ. Существенно изменяются и характеристики шумоизлучения при выходе торпеды под действием упора гребного винта. Пусковые установки, реализующие самовыход торпед, оказывают наименьшее влияние на корабль и являются самыми дешевыми из всех возможных типов пусковых устройств. Кроме того, им не требуется такая сложная система трубопроводов, как для ПУ других типов.

На рис. 3 приведено одно из технических решений, основанных на реализации самовыхода торпеды из пусковой решетки.

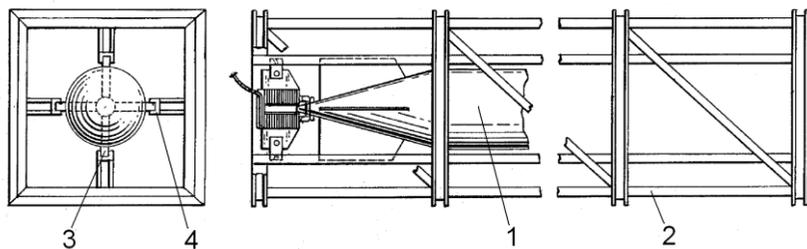


Рис. 3. Пусковая решетка для реализации самовыхода изделия по патенту США № 3,158,124: 1 – подводное изделие; 2 – направляющая решетка; 3 – направляющие элементы изделия (башмаки); 4 – направляющие дорожки пусковой решетки

Имеются и негативные последствия реализации самовыхода торпед:

1) существенное увеличение внутреннего диаметра врезаемых в прочный корпус пусковых труб, что создает дополнительные трудности с их компоновкой на ограниченной площади переборки ПЛ. Увеличение диаметра связано с необходимостью обеспечивать подток воды в полость за изделием, образующуюся по мере его выхода из пусковой трубы;

2) необходимость обеспечения малой скорости носителя в процессе пуска и невозможность маневрирования в течение длительного времени при залповом пуске самовыходящих изделий. Нарушение указанных требований может привести к заклиниванию изделия в пусковой трубе;

3) невозможность использовать «инертные», не имеющие собственного движительного комплекса типы оружия.

Использование скорости носителя можно реализовать в нескольких направлениях. Один из вариантов – использование инерционности самого оружия. Пример – крепление торпед на отдельных типах торпедных катеров. В момент выхода на атакуемую цель катер набирает максимальную скорость, в определенный момент снимается стопор торпеды, катер резко снижает обороты двигателей и торпеда по инерции уходит с направляющих дорожек в сторону цели.

Существуют варианты схемно-технических решений, когда на изделии крепится вытяжной парашютик определённой площади, раскрываемый в момент начала отделения, а создаваемый носителем набегающий поток вытягивает изделие из пусковой трубы.

Простота применяемых решений также имеет свою обратную сторону, связанную с необходимостью повышенной скорости носителя для создания соответствующих сил.

Динамический пуск изделий подразумевает, что начальная скорость и направление (кинематические характеристики) движения оружия обеспечиваются работой энергетических устройств (силовых установок) пусковой системы. В этом случае говорят о катапультировании оружия. Реализация динамического пуска предполагает создание необходимого импульса силы, действующей на оружие, т.е. соответствующих энергетических систем, чтобы обеспечить требуемые параметры его отделения от носителя: регламентируемый минимум выходной скорости, выполнение требований по ограничениям на величины перегрузки и возможного избыточного давления на оболочку изделия.

Различают пуск оружия с приложением к нему сосредоточенной силы (механические пусковые устройства) или распределенной нагрузки (пневматические, гидравлические, электрические пусковые устройства).

Комбинированный пуск предусматривает согласованную реализацию статической и динамической составляющих. Направленное целевое комплексное проектирование системы «оружие–ПУ–носитель» с реализацией комбинированного пуска может привести к созданию технических решений, объединяющих положительные стороны статического и динамического типов пуска.

В настоящее время наиболее распространен динамический пуск оружия, реализуемый с помощью энергетических устройств, с приложением к нему распределенной нагрузки (пневматические, гидравлические и электрические ПУ), однако в некоторых странах используются и механические пусковые устройства.

Рассмотрим примеры пусковых систем, использующих разные типы энергии.

Энергия газа. Простейший случай воздушных пусковых устройств – широко распространенные пневматические (воздушные) ТА, представляющие собой одноконтурную расширительную машину, где торпеда – поршень, применяются на ПЛ уже более 100 лет. Основные достоинства таких устройств:

- наличие системы воздуха высокого давления (ВВД) на борту ПЛ и возможность восстановления запасов энергетики;
- экологическая и физиологическая безвредность, что имеет исключительное значение для замкнутых объемов ПЛ;
- сравнительная простота технической реализации пусковых устройств, а также высокая надежность и простота обслуживания;
- хорошо изученные свойства и доступные методики расчетов, как следствие – хорошая управляемость энергопотребления и предсказуемость результатов проектирования;
- компактность, отсутствие высоких температур, взрывопожаробезопасность;
- способность длительно находиться в режиме ожидания без потери рабочих свойств;
- возможность реализации приводов с регулируемой по времени большой импульсной мощностью;
- постоянная готовность к использованию.

Отрицательными особенностями ВВД являются рациональность применения только в ограниченном диапазоне глубин, сложность технической реализации управляющих устройств и высокие требования к точности их изготовления, необходимость разработки специализированных конструкций, обеспечивающих длительный (до 3...4 мес.) режим поддержания требуемого давления в его источниках, а также воздействие на личный состав воздуха, выпускаемого в отсек при утилизации остаточной энергии (работа системы беспузырной торпедной стрельбы).

Первый трубный аппарат для подводного пуска торпед сконструировал Уайтхед в 1868 г. Он был установлен на канонерской лодке, представленной австрийским флотом для испытаний его торпед. Несмотря на примитивность устройства, этот аппарат уже тогда имел почти все основные элементы, присущие последующим ТА: переднюю и заднюю крышки, приводы для их открытия и закрытия, курковый зацеп. Пуск производился сжатым воздухом, поступавшим в казенную часть аппарата по специальной трубе из баллона высокого давления.

В 1879 г. американский инженер Мортенсен представил проект сигарообразной двухвинтовой субмарины с пневматическим двигателем на сжатом воздухе. Конструкция самой лодки никакого интереса не вызвала. Однако впервые в мире проект предусматривал установку в корпусе лодки трубы для выбрасывания торпеды с помощью сжатого воздуха.

Боевые действия подводных лодок в начале XX в. показали насущную необходимость обеспечения беспузырности выстреливания торпед из ТА (недопущения выхода вместе с изделием отработанного воздуха). В немецком подводном флоте беспузырность обеспечивали поршневые воздушные ТА, которые предполагали размещение между оружием и задней крышкой аппарата специального поршня, который в процессе выстрела останавливался перед передней крышкой и таким образом герметизировал внутреннюю полость аппарата. У поршневых ТА были два существенных недостатка, которые привели к отказу от их использования: после выстрела из такого ТА лодка приобретала большой положительный дифференциал на нос, а наличие поршня снижало скорость перезарядки аппарата из-за необходимости извлекать его перед загрузкой новой торпеды.

В нашей стране проблема беспузырности была решена за счет создания оригинальной конструкции системы беспузырной торпедной

стрельбы (БТС). В определенный момент выстрела открывается специальный клапан и воздух забирается из полости ТА в отдельную емкость. Вместе с воздухом в эту емкость поступает также вода, компенсирующая вес отделившейся от подводной лодки торпеды.

Первым, кто предложил в 1936 г. выпускать в прочный объем ПЛ отработавший в ТА воздух, был Г.И. Бычков. Следующий шаг сделал Ф.И. Наумов, предложивший выпускать из ТА воздух и воду по резиновому шлангу в трюм, т.е. непосредственно в отсек. Открывание выпускного клапана Ф.И. Наумов связал с автоматом, действующим в зависимости от падения давления в боевом баллоне, а выдержку времени открытого положения выпускного клапана – с часовым механизмом.

Впервые система БТС была установлена на одной из ПЛ Черноморского флота в Севастополе. Монтаж первых систем БТС был начат в конце 1940 г. на ПЛ типов «Щ» и «М», а их испытания проведены перед самой войной.

Начиная с момента установки ТА на подводную лодку вплоть до конца Второй мировой войны, стрельба торпедами велась с перископной глубины. Это объяснялось тем, что средства обнаружения лодок в подводном состоянии только начали серьезно развиваться, а также тем, что основными целями торпедных атак являлись надводные корабли.

Активные боевые действия ПЛ дали толчок развитию средствам и тактике противолодочной борьбы, что потребовало увеличить как глубину погружения лодок, так и глубину стрельбы из торпедных аппаратов. В конце 1940-х годов для ПЛ проектов 611 и 613 была разработана система «глубоководной стрельбы», получившая наименование ГС-30. Соответственно предельная глубина стрельбы из ТА увеличилась до 30 м. В последующие годы были созданы системы ГС-45, ГС-70, ГС-100, ГС-200 и ГС-250, т.е. был освоен весь реально достижимый для воздушных ТА диапазон глубин стрельбы, вплоть до 250 м. Необходимо отметить, что воздушные торпедные аппараты, позволяющие производить стрельбу на глубинах до 250 м, до настоящего времени применяются только на отечественных ПЛ. Общая схема воздушного ТА приведена на рис. 4.

В прочном корпусе 1 подводной лодки размещается комплект труб торпедных аппаратов 2. Казенные части труб размещены в отсеке ПЛ. Казенная часть каждого ТА сообщается патрубком с

клапаном подачи воздуха 3. Последний в свою очередь сообщен патрубком с боевым баллоном 4. На казенной части каждого ТА размещены клапан сброса воздуха 5 и невозвратный клапан. Каждый клапан сброса воздуха сообщается патрубком с цистерной сброса воздуха 6.

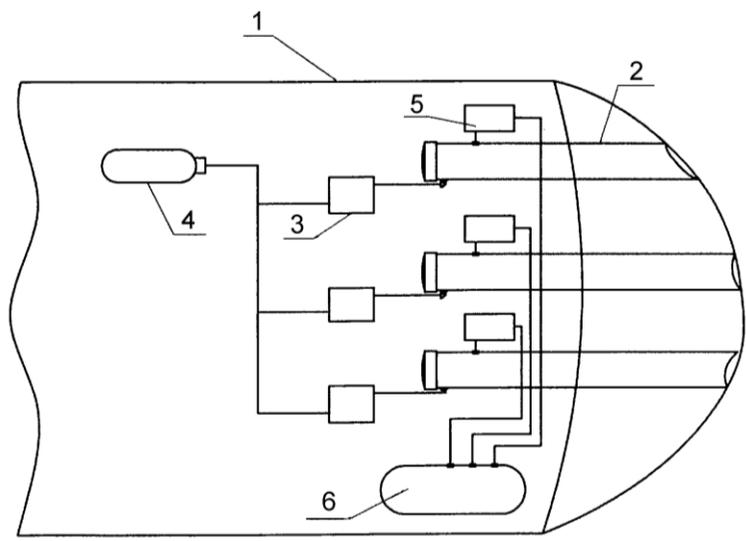


Рис. 4. Схема воздушного торпедного аппарата по патенту РФ № 2 219 096: 1 – прочный корпус ПУ; 2 – труба торпедного аппарата; 3 – клапан ВВД (боевой клапан); 4 – баллон с запасом воздуха высокого давления (ВВД); 5 – выпускной клапан системы беспузырной торпедной стрельбы (БТС); 6 – цистерна БТС

Еще одним типом применяемых в подводных пусковых системах источников энергии, выталкивающих изделие за счет энергии газов, являются *химические источники*, прежде всего, представленные пороховыми аккумуляторами давления (ПАД).

Впервые применять для пуска торпед пороховые заряды предложил в 1881 г. Джон Эриксон. Эта идея позволяла значительно упростить конструкцию аппарата, так как исчезала необходимость в баллонах сжатого воздуха, подводящих трубах, манометрах и других вспомогательных устройствах. На первых порах такое решение не получило распространения из-за технологической невозможности обеспечить стабильные характеристики производимых зарядов,

однако впоследствии ПАД стали широко применяться в комплексах подводного базирования.

Пиротехническая энергия обладает почти всеми положительными качествами ВВД: предсказуемость результатов проектирования, способность длительно находиться в режиме ожидания без потери рабочих свойств, возможность реализации приводов с регулируемой по времени большой импульсной мощностью, постоянная готовность к использованию. При этом для нее характерны более компактные размеры (из-за большей удельной энергии пороховых зарядов по сравнению с воздухом) и повышенная надежность.

Минусами пиротехнических средств создания выталкивающей силы являются их более узкий по сравнению с ВВД диапазон глубин применения и существенная зависимость от температуры окружающей среды.

Таким образом, анализ положительных и отрицательных сторон разных источников энергии позволяет рассматривать ПАД как один из перспективных для пусковых систем, в особенности для малогабаритных изделий.

Традиционно для рассматриваемых выталкивающих систем, работающих в воздушной среде или на небольших глубинах, применяются критические и сверхкритические ПАД, в которых скорость истечения газов из сопла равна или превышает местную скорость звука, а скорость горения не зависит от противодействия, создаваемого внешней водной средой.

Однако с увеличением глубины количество энергии, необходимое для выталкивания изделия, качественно возрастает (пропорционально глубине погружения), и, если принять время разделения объектов примерно постоянным во всем необходимом диапазоне глубин, возникает задача регулирования количества сжигаемого топлива по глубине.

Возможные пути решения этой задачи:

1) выталкивание изделия за счет сгорания заряда определенной массы (может реализовываться как для заряда, формируемого из отдельных зерен, так и при создании зарядов специальной геометрии);

2) использование нескольких критических ПАД, включающихся последовательно в процессе пуска изделия. При этом часто сопряжение расходных характеристик последовательно работающих ПАД достигается с помощью сигнализаторов давления, настроенных на давление в камере ранее запускаемого ПАД;

3) создание докритических ПАД, скорость горения которых зависит от внешнего противодавления;

4) создание гибридных групп ПАД, включающих в свой состав как критические, так и докритические аккумуляторы давления.

Проблемой регулирования в случае с применением одного критического ПАД является малый диапазон глубин, в котором может быть осуществлен пуск. Это обстоятельство приводит к поиску технических решений по использованию групп ПАД, применяемых на разных глубинах. Вариант такого решения описан в патенте США № 6,701,819 (рис. 5).

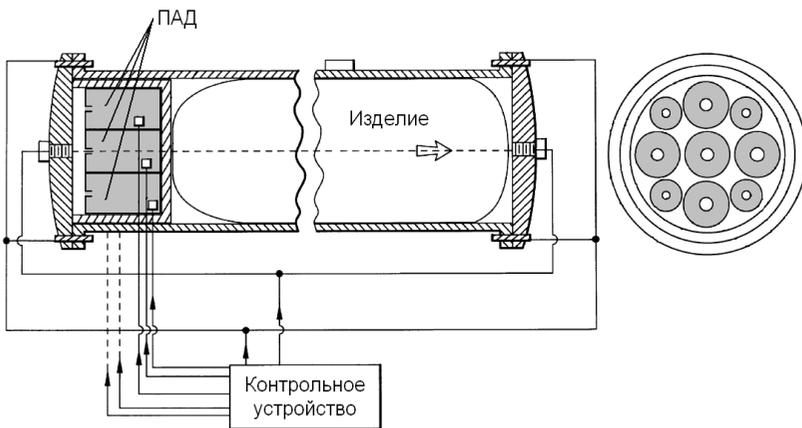


Рис. 5. Пример реализации группы ПАД по патенту США № 6,701,819

Как следует из приведенной схемы, изделие располагается в пусковой трубе, внутри которой свободно перемещается толкающий поршень. Группа ПАД расположена в отдельной расширительной полости. Прежде всего это связано с ограничением теплообмена горячих газов с водной средой и с необходимостью обеспечить запираение отработанных газов в полости пусковой трубы после выстрела.

В зависимости от глубины стрельбы производится контролируемое воспламенение зарядов ПАД таким образом, чтобы выходная скорость изделия была примерно постоянной во всем диапазоне глубин. Соответственно на самой малой глубине происходит вос-

пламенение и горение одного ПАД из группы, а на предельной глубине стрельбы – горение всех аккумуляторов давления.

Недостатком описанного метода является его техническая сложность, необходимость масштабной отработки на специализированных стендах, имитирующих внешнее противодействие. Кроме того, процесс горения критических ПАД существенно зависит от начальной температуры заряда, что может быть негативным фактором в отдельных ситуациях при эксплуатации носителя.

Третий метод регулирования заключается в применении для пуска докритических ПАД, скорость горения зарядов которых зависит от внешнего противодействия. Данный тип регулирования широко распространен, в частности, в забортных ПУ системы CSA Mk 2 для средств ГПД, применяемой ВМС США.

Гидравлическая энергия. Выше уже говорилось о том, что пусковые системы, использующие энергию газов, имеют ограниченную глубину применения. В то же время все более актуальным становится создание более глубоководных пусковых систем с целью устранить недостатки воздушных. Можно отметить два важных направления, в пределах которых возможны те или иные решения задачи обеспечения пуска оружия с больших глубин:

- 1) замена сжатого воздуха более эффективным источником энергии, позволяющим создавать большую выталкивающую силу;
- 2) устранение (уменьшение) влияния забортного давления на работу пускового устройства и, соответственно, снижение величины выталкивающей силы.

В 60-70-е гг. XX в. на вооружение разных стран стали поступать гидравлические торпедные аппараты, в которых рабочим телом, выталкивающим оружие, является забортная вода. Такое решение позволяет существенно снизить влияние забортного давления на работу пусковой системы и увеличить максимальную глубину стрельбы. Наиболее распространенные схемы гидравлических ТА – пневмогидравлического и аппарата с турбонасосной силовой установкой (ТНСУ) – приведены на рис. 6 и 7.

При подаче ВВД из баллона 1 в пневмоцилиндр 2 (см. рис. 6) одновременно с его поршнем перемещается и установленный на одном штоке поршень гидроцилиндра 3. При движении последнего вода из импульсной цистерны 4 под давлением через открытый кингстон (клапан-заслонку) 5 поступает в кормовую часть трубы аппарата 6, заставляя оружие двигаться в трубе и набирать необходимую для безаварийного выхода скорость.

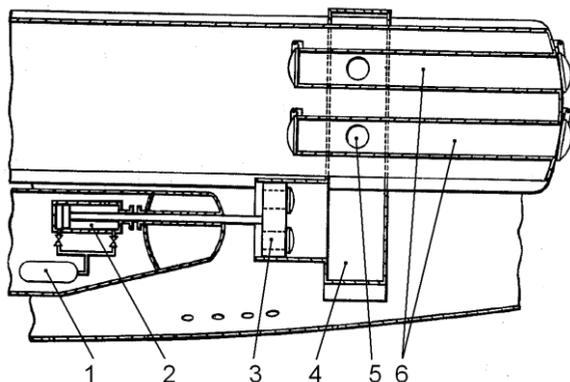


Рис. 6. Схема гидравлических торпедных аппаратов по патенту США № 2,848,970: 1 – баллон ВВД; 2 – пневматический цилиндр; 3 – гидравлический поршень; 4 – импульсная цистерна; 5 – кингстон; 6 – трубы торпедных аппаратов

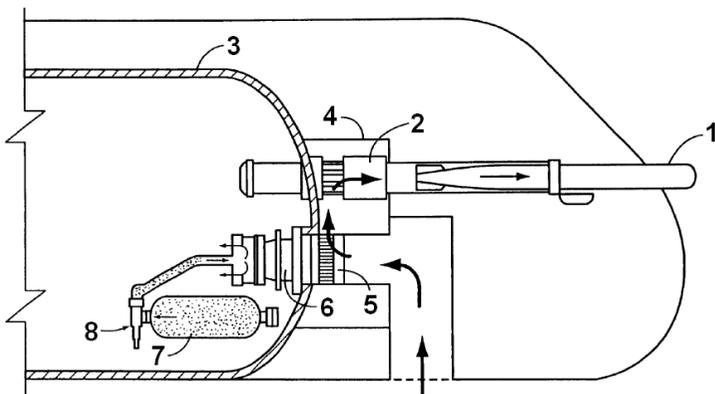


Рис. 7. Схема гидравлических торпедных аппаратов по патенту США № 6,220,196: 1 – изделие; 2 – кингстон; 3 – прочный корпус ПЛ; 4 – импульсная цистерна; 5 – рабочее колесо турбины; 6 – турбина; 7 – баллон ВВД; 8 – боевой клапан

Гидравлический ТА с ТНСУ (см. рис. 7) работает следующим образом. ВВД из баллона 7 подается через регулирующий клапан 8 в турбину 6 и раскручивает ее лопатки до определенной скорости. На

вращающемся штоке турбины установлено рабочее колесо 5, которое обеспечивает за счет вращения подачу забортной воды в импульсную цистерну 4. Из импульсной цистерны вода под давлением через открытый кингстон 2 поступает в трубу аппарата, выталкивая оружие 1.

Механическая энергия. Использующие ее пусковые системы отличаются следующие положительные качества:

- относительная простота конструкций;
- очень слабая зависимость от глубины использования, т.е. стабильность работы установки вне зависимости от внешних условий;
- постоянная готовность к срабатыванию;
- возможность создания автоматических систем с учетом минимального воздействия на носитель при отделении.

Особенность применения механической энергии заключается в том, что выталкивающее усилие не распределяется по поверхности изделия (как в случаях с энергией газа, гидравлической или электрической энергией), а локально прикладывается к определенному силовому элементу на корпусе изделия (силовой наделке). Соответственно такой тип энергии требует усиления корпусно-механической части изделия.

В качестве примера можно привести схему пневмомеханической установки, показанную на рис. 8. Изделие 3 размещается в трубе ТА 2, а в его задний срез упирается телескопический толкатель 6 меньшего по сравнению с трубой диаметра, другой стороной упирающийся в заднюю крышку 4. После открытия передней крышки 5 и завершения подготовки к выстрелу ВВД из баллона 1 подается в полость за изделием, вызывая раздвижение толкателя 6, который непосредственно выталкивает изделие из трубы ТА. Плюсом описанной схемы является то, что ее работа меньше зависит от глубины стрельбы из-за малого диаметра поршня толкателя.

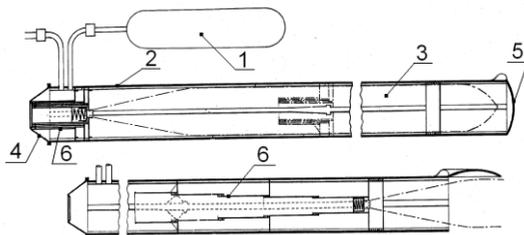


Рис. 8. Схема механического торпедного аппарата по патенту США № 1,985,184:

1 – баллон ВВД; 2 – труба аппарата; 3 – изделие; 4 – задняя крышка аппарата;

5 – передняя крышка аппарата; 6 – воздушный толкатель

Электрическая энергия. Менее распространенным, но одним из наиболее перспективных типов энергии является электрическая. Чаще всего встречаются предложения по реализации для пуска подводных изделий принципа линейного электродвигателя, где якорем служит само изделие, разгоняемое с помощью управляемого электромагнитного поля. Управление бегущим полем позволяет реализовать практически любой закон перемещения изделия, задать его скорость и ускорение на каждом конкретном этапе пуска. Схема электромагнитной пусковой системы приведена на рис. 9.

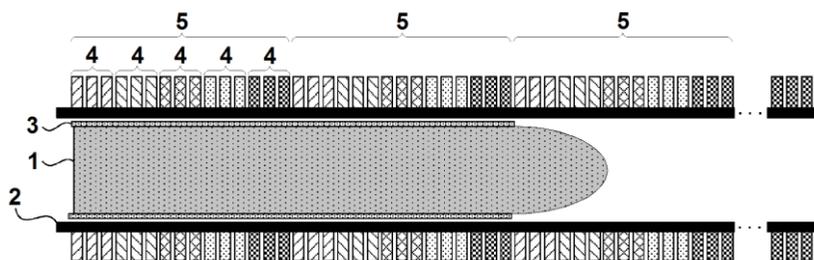


Рис. 9. Схема электромагнитной пусковой системы по патенту США № 9,341,435:
 1 – изделие; 2 – пусковая труба; 3 – магнитопроводящий разгонный контейнер;
 4 – блоки синхронизируемых обмоток; 5 – цикличные блоки обмоток (соленоиды)

Пусковая установка для разгона изделия 1 состоит из диэлектрической пусковой трубы 2, вокруг которой выполнены блоки синхронизируемых обмоток 4, циклично расположенные вдоль пусковой трубы, образуя соленоиды. Изделие 1 располагается внутри разгонного контейнера 3, выполненного из ферромагнетика. Также данный контейнер служит экраном для изделия. Чтобы создать выталкивающий изделие импульс, на блоки обмоток 4 регулируемо подается электрический ток, создающий магнитное поле, благодаря которому происходит разгон контейнера 3.

Преимущества электромагнитной пусковой системы – возможность точно варьировать начальную скорость и энергию выстреливаемого оружия, а также бесшумность выстрела. Недостаток такого типа пусковых систем – низкий КПД (не более 25 %), что приводит к необходимости применять для их реализации очень мощные источ-

ники электроэнергии, что существенно ограничено энергетическими возможностями носителя.

В качестве еще одного варианта пусковых систем, являющегося гибридом электромагнитной и гидравлической, можно привести показанный на рис. 10. В данном случае вода подается в полость пусковой трубы за счет ее перемещения магнетогидродинамическим насосом, в основе принципа работы которого лежит сила Лоренца, приводящая в движение морскую воду. С учетом перемещаемого количества воды и требуемого расхода данное решение на современном этапе развития техники выглядит футуристично.

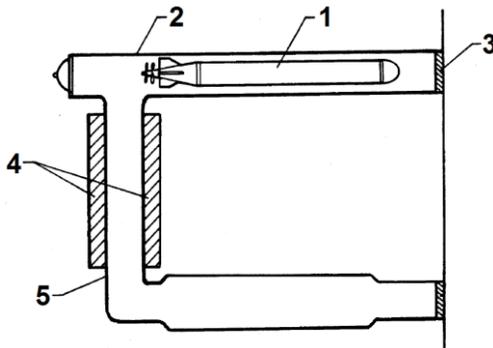


Рис. 10. Схема электрогидравлического ТА по патенту США № 5,284,106:
1 – изделие; 2 – пусковая труба; 3 – передняя крышка;
4 – магнетогидродинамический насос; 5 – подводной трубопровод

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Общие понятия математического моделирования

Сущность методологии математического моделирования состоит в замене исходного объекта его образом – математической моделью и дальнейшем ее изучении, например, с помощью реализуемых на компьютерах вычислительных алгоритмов.

Если с точки зрения целей исследования между двумя объектами есть сходство, то вместо одного можно исследовать другой. Первый называется оригиналом, второй – моделью. Модель – это заместитель оригинала, позволяющий изучить некоторые его свойства. Сходство может быть не по всем характеристикам (форме, размерам, цвету,

структуре и т.п.), а лишь в тех свойствах, которые являются объектом конкретного исследования. Так, например, для изучения распространения волн возмущения от сверхзвукового самолета можно воспользоваться сходством этого явления с распространением волн при движении лодки по поверхности пруда.

Моделирование – это процесс выбора или построения модели для исследования конкретных свойств оригинала в определенных условиях.

2.2. Этапы моделирования

Математическое моделирование любого объекта можно условно разбить на три этапа: разработка модели, выбор алгоритма, создание программы (рис. 11).

На *первом этапе* выбирается (или строится) эквивалент объекта, отражающий в математической форме его свойства: законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д. Математическая модель (или ее фрагменты) исследуется теоретическими методами, что позволяет получить важные предварительные знания об объекте.

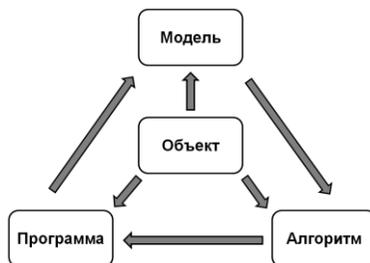


Рис. 11. Этапы моделирования

Второй этап – выбор (или разработка) алгоритма для реализации модели на компьютере. Модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательность вычислительных и логических операций, которые нужно произвести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью. Вычислительные алгоритмы не должны искажать основные свойства модели и, следовательно, исходного объекта, быть экономичными и адаптирующимися к особенностям решаемых задач и используемых компьютеров.

На *третьем этапе* создаются программы, «переводящие» модель и алгоритм на доступный компьютеру язык. К ним также предъявляются требования экономичности и адаптивности.

Проверка адекватности модели – это проверка соответствия результатов, получаемых с помощью модели, реальному поведению исследуемого объекта. На этой стадии проводится исследование и

уточнение самой модели в соответствии с поставленной задачей, а также может корректироваться постановка задачи и общий подход к восприятию реальной ситуации.

Сутью решения практических прикладных задач является прогноз поведения объекта в различных ситуациях. К построению алгоритма прогнозирования реальной ситуации в других случаях, отличающихся от исследованных во время процесса разработки модели, можно приступить только после завершения всех стадий, описанных выше. Каждая стадия этого процесса существенна. Пренебрежение любой из них может приводить к неверным выводам по существу решаемой практической задачи в результате таких ошибок, как вычисление с недопустимой, неконтролируемой погрешностью, несоответствие полученных результатов поставленной задаче (полученные результаты могут оказаться решением совсем другой задачи), неоднозначность решения при невозможности селекции, неполучение решения (алгоритм расходится или не может завершиться).

Математические модели основываются на математическом описании объекта, в которое входят взаимосвязи параметров объекта, что характеризует особенности функционирования. Такие связи могут представляться в виде:

1) вектор-функций $y = f(x, t)$;

2) неявных функций $F(y, x, t) = 0$;

3) обыкновенных дифференциальных уравнений

$$F(x, x', x'', \dots, x^m, t) = 0;$$

4) дифференциальных уравнений с частными производными

$$F\left(y, x, t, \frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial t}, \dots\right) = 0;$$

5) вычислительного алгоритма;

6) вероятностного (стохастического) описания.

Первые четыре из указанных видов носят обобщающее название – «аналитические зависимости».

Математическое описание включает в себя не только взаимосвязь элементов и параметров объекта (законы и закономерности), но и полный набор числовых и функциональных данных объекта (характеристики, начальные, граничные, конечные условия, ограничения), а также методы вычисления выходных параметров модели. То есть под математическим описанием понимается полная сово-

купность данных, функций и методов вычисления, позволяющая получать результат.

2.3. Общие подходы к построению простейших математических моделей

1. Применение фундаментальных законов природы. Наиболее распространенный метод построения моделей состоит в применении фундаментальных законов природы к конкретной ситуации. Эти законы общепризнанны, многократно подтверждены опытом, служат основой множества научно-технических достижений (законы сохранения материи, энергии, импульса). На первый план выдвигаются вопросы, связанные с тем, какой закон (или законы) следует применить в данном случае и как это делать.

2. Применение вариационных принципов. Еще один подход к построению моделей, по своей широте и универсальности сопоставимый с фундаментальными законами, состоит в применении так называемых вариационных принципов. Они представляют собой весьма общие утверждения о рассматриваемом объекте (системе, явлении) и гласят, что из всех возможных вариантов его поведения (движения, эволюции) выбираются лишь те, которые удовлетворяют определенному условию.

Обычно, согласно этому условию, некоторая связанная с объектом величина достигает экстремального значения при его переходе из одного состояния в другое.

3. Применение аналогий при построении моделей. Во многих случаях при попытке построить модель какого-либо объекта невозможно прямо указать фундаментальные законы или вариационные принципы, которым он подчиняется. Одним из плодотворных подходов к такого рода объектам является использование аналогий с уже изученными явлениями.

4. Иерархический подход к получению моделей. В редких случаях бывает удобным и оправданным построение математических моделей относительно простых объектов сразу во всей полноте, с учетом всех факторов, существенных для его поведения. Поэтому естественен подход, реализующий принцип «от простого к сложному», когда следующий шаг делается после подробного изучения не очень сложной модели. При этом возникает цепочка (иерархия) все более полных моделей, каждая из которых обобщает предыдущие, включая их в качестве частного случая.

Построение математической модели в прикладных задачах – один из наиболее сложных и ответственных этапов работы. Опыт показывает, что во многих случаях правильно выбрать модель – значит решить проблему более чем наполовину. Трудность данного этапа состоит в том, что он требует соединения математических и специальных знаний. Поэтому очень важно, чтобы при решении прикладных задач математики обладали специальными знаниями об объекте, а специалисты – определенной математической культурой, опытом исследования в своей области, знанием ЭВМ и программирования.

Особенностью математических моделей является то, что получение с их помощью каких-либо результатов связано с вычислениями. Так возникает необходимость ввести понятие вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент – это получение результатов с помощью математической модели для какого-либо конкретного случая исследований. Это может быть как единичный расчет одного параметра, так и комплекс расчетов целого спектра параметров модели во множестве определенным образом связанных условий. Во втором случае большое значение приобретает процедура планирования вычислительного эксперимента, целью которого является получение максимума достоверной информации при минимуме затрат. Под достоверностью результата вычислительного эксперимента понимается одновременное выполнение двух условий: во-первых, результат должен быть достаточно точным, во вторых, он не может быть опровергнут с помощью каких-либо дополнительных расчетов. В математической статистике этим понятиям соответствуют понятия несмещенности и состоятельности оценок, получаемых из наблюдений. При планировании вычислительного эксперимента используются многие методы математического моделирования – от простого здравого смысла до теории катастроф и методов математической статистики.

2.4. Адекватность модели

Центральным в теории математического моделирования является понятие адекватности.

Адекватность математической модели – это соответствие результатов вычислительного эксперимента поведению реального объекта. Это соответствие следует оценивать с точки зрения целей исследования. Поэтому возможны различные подходы к оценке адекватности различных моделей.

Для выявления этого соответствия для механических систем и процессов, характеризующихся измеримыми величинами – параметрами, необходимо провести сравнение параметров модели и оригинала в одних и тех же условиях. Очевидно, что сравнивать следует лишь соответствующие друг другу параметры между собой и только в той области функционирования объекта, в которой предполагается его исследовать.

Таким образом, для проверки адекватности необходимо иметь исчерпывающую информацию о реальном случае (что всегда трудно, а подчас практически невозможно), результаты контрольного вычислительного эксперимента, воспроизводящего известный реальный случай, критерии оценки точности и непротиворечивости математической модели (рис. 12).



Рис. 12. Схема адекватности модели

При построении критерия проверки адекватности необходимо учитывать как особенности модели, так и область ее применения:

- ограниченность допустимого диапазона изменения параметров системы (вследствие ограниченной области функционирования объекта, в которой он моделируется);
- соответствие математического описания условий реального и вычислительного экспериментов;
- возможную неоднозначность решений в вычислительном эксперименте;
- точность самого вычислительного эксперимента.

Если, например, предполагается исследовать поведение самолета, ограниченное разбегом по взлетно-посадочной полосе только при взлете, то нет необходимости добиваться адекватности моделирования таких явлений, как реверс тяги двигателей, торможение

колес, вертикальное движение самолета. Однако при моделировании посадки самолета с некоторой высоты все перечисленное оказывается необходимым.

2.5. Особенности математического моделирования подводных пусковых систем

Математические модели процессов пуска подводных изделий, как и любого типа систем, имеют свои особенности.

Традиционно вопросы движения выстреливаемых или бросаемых в пространстве тел рассматриваются в *баллистике*.

Различают внутреннюю баллистику, исследующую движение снаряда в канале орудия, ракеты в транспортно-пусковом контейнере, торпеды в трубе торпедного аппарата и т.п. в процессе выстрела, и внешнюю, которая исследует движение отделяемого тела после прекращения контакта с элементами ствола или пусковой установки и его движения по определенной траектории.

Особенность большей части подводных изделий заключается в наличии собственного двигательного-двигательного комплекса (ДДК), отвечающего за процесс перемещения по траектории после выстрела. Это приводит к тому, что подавляющее число задач, связанных с моделированием процесса пуска изделий, относится к задачам внутренней баллистики. Как уже отмечалось, для проектантов пусковых систем основным требованием является безаварийное отделение изделия от носителя, что подразумевает выполнение двух условий:

1) разгон изделия с нулевой скорости (статического положения) до заданной *выходной скорости* на длине пусковой установки (до момента потери контакта с ее элементами). Достижение заданного значения выходной скорости подразумевает, что изделие сможет безопасно разойтись с частями носителя и задействовать свой ДДК для реализации дальнейшего движения;

2) *максимально допустимые перегрузки* (ускорения) в процессе разгона изделия. Непревышение заданной величины ускорения (разности положительных и отрицательных ускорений) гарантирует, что составные части изделия (аппаратная часть, источник энергии, гидроакустический комплекс и т.п.) останутся работоспособными.

Таким образом, основными параметрами, определяющими успешность пуска, являются *скорость* и *ускорение* изделия. Именно для получения данных о скорости изделия строится большинство математических моделей.

В подавляющем большинстве моделей рассматривается одномерное движение изделия вдоль элементов ПУ. Часто это направление движения совпадает с продольной осью изделия (исключение – всплытие или погружение изделия под действием положительной или отрицательной плавучести). Все силы, действующие на изделие, проецируются на ось абсцисс (X), вдоль положительного направления которой осуществляется выстреливание. Характерный пример таких сил – гидродинамические силы от набегающего потока воды при траверсном пуске (перпендикулярном движению носителя). Их воздействие приводит к возникновению реакций опоры в местах контакта элементов изделия и направляющих ПУ, которые преобразуются в соответствующие силы трения.

2.6. Математическое моделирование в рабочей среде Matlab

Matlab – высокоуровневый интерпретируемый язык программирования, включающий основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования. Программы на Matlab бывают двух типов – функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции не компилируются в машинный код и сохраняются в виде текстовых файлов.

Matlab Simulink. Программа Simulink является приложением к пакету Matlab. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране создает из библиотеки стандартных блоков модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики. Достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере, и знаний той предметной области, в которой пользователь работает.

Simulink – достаточно самостоятельный инструмент Matlab, и при работе с ним не требуется знать сам Matlab и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям Matlab остается

открытым и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов содержит инструменты, встраиваемые в Simulink. Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей. При работе с Simulink пользователь может модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании можно выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования можно следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм, написанных как на языке Matlab, так и на языках C++, Fortran и Ada.

Базовые сведения о работе в Matlab. По умолчанию после запуска пакета Matlab на экране появляется комбинированное окно (рис. 13), в котором отображаются наиболее важные панели: Command Window (Командное окно), Workspace (Рабочее пространство) и Current Folder (Текущий каталог).

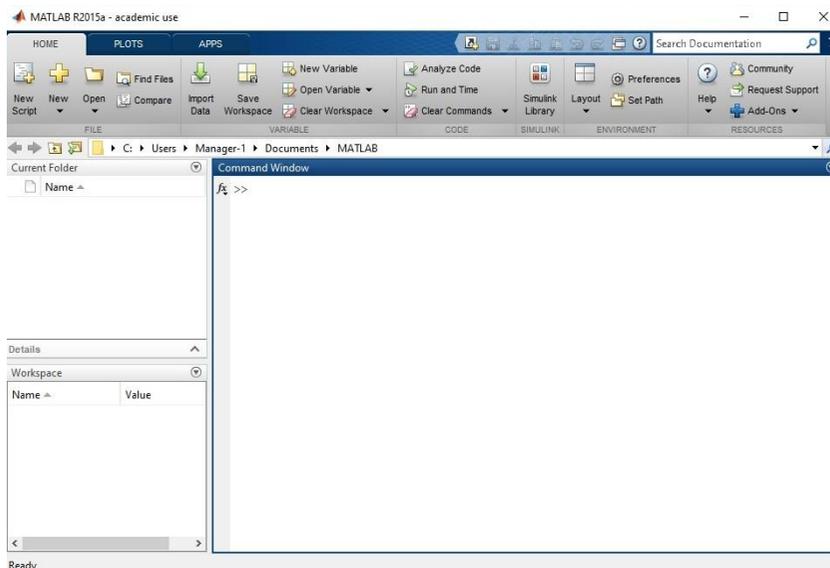


Рис. 13. Рабочая среда Matlab

Самой используемой панелью является Command Window. В ней набираются команды пользователя, подлежащие немедленному исполнению. Здесь же выдаются результаты выполненных команд. В командном окне можно обратиться за помощью по поводу того или иного термина с помощью одной из команд: doc, help или lookfor.

Окно Workspace отображает текущий набор переменных, введенных пользователем в командном окне, а также их имена (Name) и значения скалярных переменных (Value).

Библиотека стандартных блоков Simulink. Для вызова библиотеки стандартных блоков необходимо в окне *Command Window* набрать команду *Simulink* или нажать соответствующую иконку на панели инструментов *HOME*.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева. При выборе соответствующего раздела в правой части окна отображается его содержимое.

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы (рис. 14):

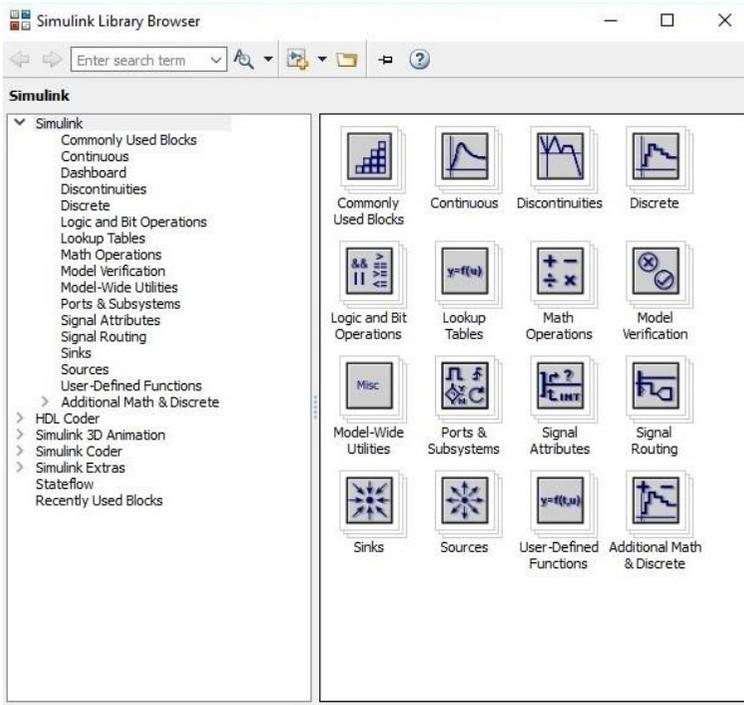


Рис. 14. Библиотека стандартных блоков

Commonly Used Blocks – часто используемые блоки;
Continuous – линейные блоки;
Discontinuities – нелинейные блоки;
Discrete – дискретные блоки;
Logic and Bit Operations – блоки логических и битовых операций;
Look Up Tables – блоки таблиц;
Math Operations – блоки математических операций;
Model Verification – блоки верификации сигналов;
Model Wide Utilities – раздел вспомогательных утилит;
Ports & Subsystems – порты и подсистемы;
Signal Attributes – блоки получения свойств сигналов;
Signal & Routing – блоки преобразования сигналов и вспомогательные блоки;
Sinks – приемники сигналов;
Sources – источники сигналов;
User defined Function – функции пользователя.

Для создания модели в Simulink необходимо осуществить ряд действий. Для начала создать новый файл модели с помощью команды *New Model* или используя соответствующую иконку. Вновь созданное окно модели показано на рис. 15. Расположить блоки в окне модели, открыты в соответствующий раздел библиотеки (например, *Sources* – Источники), и перетащить требуемый блок в созданное окно.

Параметры каждого блока настроены «по умолчанию»: их можно изменить в окне редактирования, которые вызывается двумя нажатиями правой кнопки «мышь» по блоку. В работу над блоками входят изменение параметров блока, соединение и перемещение блоков, а также форматирование.

В меню *Format* находится набор команд форматирования блоков. Команды форматирования разделяются на несколько групп:

- 1) изменение отображения надписей,
- 2) изменение цветов отображения блоков,
- 3) изменение положения блока и его вида,
- 4) прочие установки.

Перед выполнением расчетов необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню *Model Configuration Parameters* (рис. 16).

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню *Simulation/Run* или инструмента  на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню *Simulation/Stop* или инструмент .

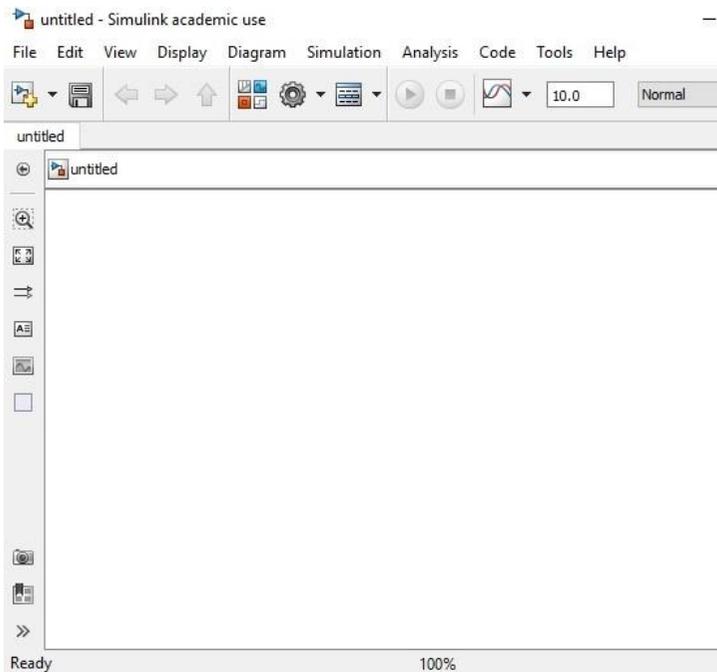


Рис. 15. Новая модель

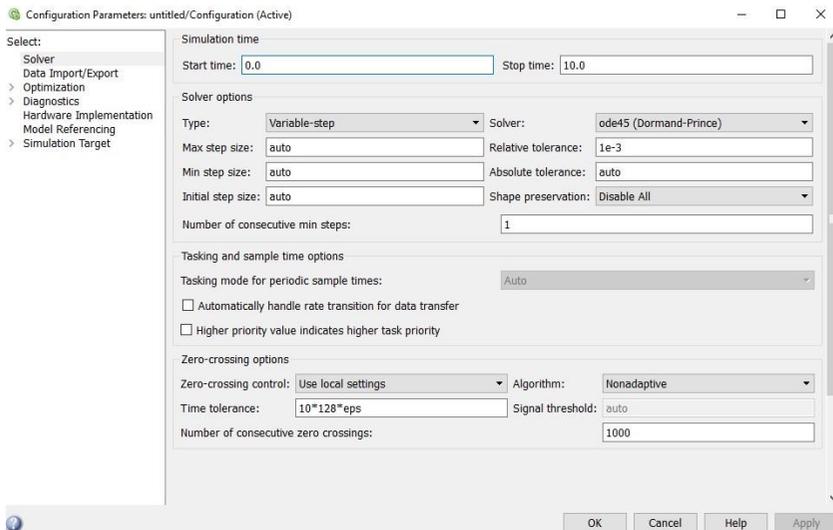


Рис. 16. Панель управления

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ С ПОРОХОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрим построение математической модели процесса пуска на примере идеализированной пусковой установки.

3.1. Расчетная схема пусковой установки

На рис. 17 приведена принятая схема ПУ с ПАД. Принцип ее действия аналогичен описанному в подразд. 1.2.

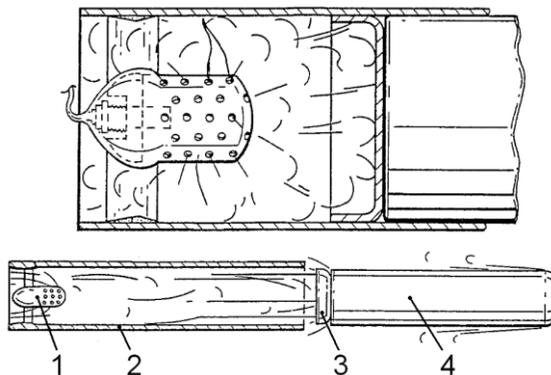


Рис. 17. Пример реализации пусковой установки с критическим ПАД по патенту США № 4,962,689: 1 – ПАД; 2 – пусковая труба; 3 – поршень; 4 – изделие

Исходя из принятой конструктивно-технологической схемы ПУ была составлена общая расчетная схема, представленная на рис. 18.

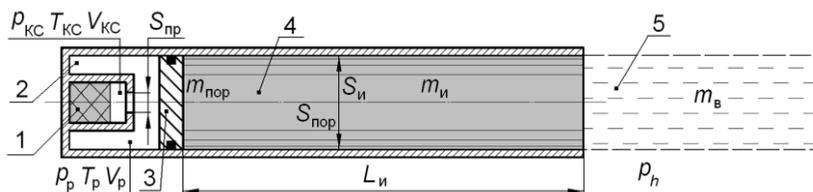


Рис. 18. Общая расчетная схема: 1 – камера сгорания (КС) ПАД; 2 – расширительная запоршневая полость; 3 – поршень; 4 – изделие; 5 – присоединенная масса воды

На схеме обозначены следующие величины (слева направо): $p_{КС}$ – давление в камере сгорания ПАД; $T_{КС}$ – температура в камере сгорания ПАД; $V_{КС}$ – объем полости камеры сгорания; p_p – давление в расширительной полости; T_p – температура в расширительной полости; V_p – объем расширительной полости; $S_{пр}$ – площадь проходного сечения сопла ПАД; $m_{пор}$ – масса поршня; $S_{пор}$ – площадь поперечного сечения поршня; $S_{из}$ – площадь поперечного сечения изделия; $L_{из}$ – длина изделия; $m_{из}$ – масса изделия; p_h – забортное давление; m_b – масса присоединенной жидкости (воды).

В качестве основных допущений при составлении математической модели приняты следующие:

1. В модели выделяется две газовые полости: камера сгорания и расширительная полость.

2. Для моделирования процессов в газовых полостях принята модель идеального газа, удовлетворяющая уравнению состояния Менделеева–Клапейрона.

3. Считается, что камера сгорания заполнена однокомпонентным газовым составом – продуктами горения, а расширительная полость до момента начала расхода смеси газов из камеры сгорания заполнена воздухом. После начала расхода из камеры сгорания в расширительную полость происходит ее наполнение смесью продуктов горения с воздухом.

4. В каждой выделенной газовой полости характеристики смеси газов по объему одинаковы (процессы равновесные).

5. Деформациями конструкций пусковой установки пренебрегаем.

6. Изделие – абсолютно твердое тело.

7. Площадь поперечного сечения изделия равна площади поперечного сечения поршня.

8. Жидкость несжимаема.

9. Струйные течения и ударно-волновые процессы не рассматриваются.

10. Тепловые потери в газовых полостях зависят от площади теплообмена и учитываются интегральными коэффициентами: $\chi_{КС}$ и $\chi_{л}$. Площадь теплообмена в камере сгорания принимается постоянной, а в расширительной полости – зависящей от перемещения изделия.

11. Принимается, что при движении поршня в процессе пуска на внутренней поверхности пусковой трубы не появляется вода, просачивающаяся через подвижные уплотнения поршня.

12. Рассматривается одномерное движение изделия.

13. Механическое трение считается постоянным на пути движения изделия.

Ниже приведены основные соотношения, применяемые при расчетах процессов в полостях установки.

3.2. Процессы в камере сгорания

В качестве математической модели процессов в газовых полостях ПУ принята модель, широко применяемая в практике работ БГТУ «Военмех».

Замыкающее соотношение (уравнение состояния Менделеева–Клапейрона) для расчета величины давления в камере сгорания:

$$\bar{p}_{КС} = \frac{m_{КС} R_{КС} T_{КС}}{V_{КС}},$$

где $R_{КС}$ – газовая постоянная продуктов сгорания пороха в камере. Ее величина зависит от состава пороха и начальных параметров среды (воздуха) в КС. Для расчетов можно принять величину, равную 358 Дж/(кг*К).

Определим массу газа, истекающего из КС.

Текущая величина расхода вычисляется в зависимости от режима истечения. Критический перепад давлений:

$$\bar{p}_{кр} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}},$$

где γ – показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей при постоянном давлении и температуре. Для упрощения вычислений показатель адиабаты может быть принят равным 1,27.

Текущий перепад давлений:

$$\bar{p} = \frac{p_p}{p_{КС}}.$$

Расход газа из камеры сгорания в расширительную полость определяется следующим образом.

Функция расхода:

$$q = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{p} < \bar{p}_{кр} \\ \sqrt{1 - \frac{(\bar{p} - \bar{p}_{кр})^2}{(1 - \bar{p}_{кр})^2}} & \text{при } \bar{p} \geq \bar{p}_{кр} \end{cases}.$$

Расход газа из КС в расширительную полость:

$$G = \mu S_{\text{пр}} \frac{p_{\text{КС}}}{\sqrt{R_{\text{КС}} T_{\text{КС}}}} q,$$

где μ – коэффициент расхода, принимаемый равным 0,7.

Закон скорости горения:

$$u = u_0 p_{\text{КС}(\text{атм})}^{\nu},$$

где давление в камере сгорания $p_{\text{КС}(\text{атм})}$ равно ($p_{\text{КС}} / 10^5 \text{ Па}$), а коэффициенты u_0 и ν могут быть приняты равными соответственно $u_0 = 0,37$ и $\nu = 0,7$. При этом сама скорость горения равна изменению толщины сгоревшего слоя:

$$\frac{de}{dt} = u.$$

Изменение объема камеры сгорания, вызванное сгоранием порохового заряда:

$$\frac{dV_{\text{КС}}}{dt} = S_{\text{гор}} u,$$

где площадь горения $S_{\text{гор}}$ зависит от размеров и формы заряда.

Наиболее часто применяемые формы зарядов и характерные зависимости горения приведены на рис. 19.

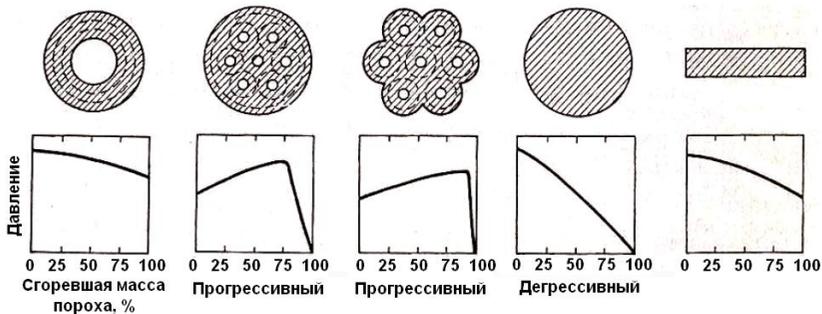


Рис. 19. Формы пороховых зарядов

В данном пособии рассматривается одноканальный пороховой заряд, параметры которого приведены на рис. 20.

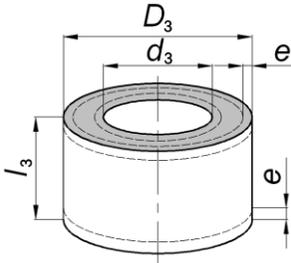


Рис. 20. Параметры заряда: D_3 – наружный диаметр; d_3 – внутренний диаметр; e – толщина сгоревшего слоя; l_3 – длина трубки заряда

Соответственно площадь горения заряда:

$$S_{\text{гор}} = 2 \frac{\pi}{4} ((D_3 - e)^2 - (d_3 + e)^2) + (l_3 - 2e) \pi ((D_3 - e) + (d_3 + e)).$$

Горение прекращается при выполнении одного из двух условий:

$$2e \geq l_3 \text{ или } 2e \geq D_3 - d_3.$$

Поступление продуктов сгорания вкладыша в камеру сгорания рассчитывается по формуле

$$\frac{dm_{\text{зар.}}}{dt} = \frac{dV_{\text{КС}}}{dt} \cdot \rho_{\text{зар.}},$$

где плотность заряда $\rho_{\text{зар}}$ можно принять равной 1600 кг/м^3 .

Соответственно изменение массы газов в КС можно записать следующим образом:

$$\frac{dm_{\text{КС}}}{dt} = \frac{dm_{\text{зар.}}}{dt} - G.$$

Изменение температуры газов в камере сгорания:

$$\frac{dT_{\text{КС}}}{dt} = \frac{\frac{dm_{\text{КС}}}{dt} (\chi_{\text{КС}} c_{p_{\text{КС}}} T_{p_{\text{КС}}} - c_{v_{\text{КС}}} T_{\text{КС}}) - T_{\text{КС}} R_{\text{КС}} G}{c_{v_{\text{КС}}} m_{\text{КС}}},$$

где $\chi_{\text{КС}} = 0,95$ – коэффициент, характеризующий тепловые потери в объеме КС; $c_{p_{\text{КС}}}$ – теплоемкость продуктов горения заряда при постоянном давлении; $c_{v_{\text{КС}}}$ – теплоемкость продуктов горения заряда при постоянном объеме.

Указанные теплоемкости могут быть приняты постоянными и равными:

$$c_{v_{\text{КС}}} = \frac{R_{\text{КС}}}{\gamma - 1}, \quad c_{p_{\text{КС}}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R_{\text{КС}}.$$

3.3. Процессы в расширительной полости

Изменение массы газа в расширительной полости:

$$\frac{dm_p}{dt} = G.$$

Изменение объема расширительной полости после начала перемещения поршня:

$$\frac{dV_p}{dt} = S_n v_n = S_n v_n,$$

где скорость поршня, ввиду принятого допущения о равенстве диаметров поперечного сечения поршня и изделия, будет равна скорости изделия.

Замыкающее соотношение (уравнение состояния Менделеева–Клапейрона) для расчета величины давления в расширительной полости:

$$p_p = \frac{m_p R_p T_p}{V_p}.$$

где R_p – газовая постоянная смеси продуктов сгорания заряда, поступивших из камеры сгорания, и воздуха, заполнявшего начальный объем расширительной полости.

Определим массовую долю продуктов сгорания заряда в смеси газов, заполняющих полость толкателя:

$$\frac{dq_{\text{ПС}}}{dt} = \frac{Gq_{\text{ПС}}G}{m_{\text{пост}} + m_{\text{p0}}}.$$

где $m_{\text{пост}}$ – масса поступивших в полость продуктов горения, равная:

$$m_{\text{пост}} = m_{\text{зар}} m_{\text{КС}}.$$

Соотношения для определения параметров газовой смеси в объеме установки:

$$R_p = q_{\text{ПС}} R_{\text{КС}} + (1 - q_{\text{ПС}}) R_{\text{возд}};$$

$$Cv_p = q_{\text{ПС}} Cv_{\text{КС}} + (1 - q_{\text{ПС}}) Cv_{\text{возд}};$$

$$Cp_p = Cv_p + R_p;$$

$$\gamma_p = \frac{Cp_p}{Cv_p}.$$

Изменение температуры в расширительной полости:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\frac{dm_p}{dt} (\chi_p C_{p_p} T_p - C_{v_p} T_p) - p_p S_{\text{и}} v_{\text{и}}}{C_{v_{\text{КС}}} (m_{\text{пост}} + m_{p0})},$$

где $\chi_p = \chi_{p0} + k_{\text{тепл}} l_{\text{и}}$ – коэффициент, характеризующий тепловые потери в расширительной полости; C_{p_p} – теплоемкость продуктов горения заряда при постоянном давлении; C_{v_p} – теплоемкость продуктов горения заряда при постоянном объеме.

3.4. Движение поршня и изделия

После начала поступления продуктов горения в расширительную полость давление в ней начинает расти, воздействуя на стенки расширительной полости и на заднюю стенку поршня. Повышение давления продолжается до момента, определяемого величиной забортного давления и силами трения, противодействующими перемещению поршня и изделия:

$$(P_p - P_h) S_{\text{п}} \geq N_{\text{п}} + N_{\text{мех.}} + N_{\text{м}}.$$

При первоначальном проектировании точно оценить указанные силы сложно, поэтому для базового выбора необходимых величин используются следующие соотношения.

Сила механического сопротивления движению поршня $N_{\text{п}}$ зависит от его диаметра (периметра уплотнительных колец) и может быть приблизительно оценена по формуле

$$N_{\text{п}} = 0,0003 \pi D_{\text{п}} (P_{h_{\text{max}}} - 10^5) = \text{const.}$$

Сила сопротивления движению оружия может быть приблизительно оценена в зависимости от его массы и принята для расчетов постоянной:

$$N_{\text{мех.}} = 0,3 m_{\text{и}} g = \text{const.}$$

Уравнение движения изделия:

$$\frac{dv_{\text{и}}}{dt} = \frac{[(P_p - P_h) S_{\text{п}} - N_{\text{п}} - N_{\text{мех.}} - R_{\text{гд}}]}{(m_{\text{в}} + m_{\text{и}} + m_{\text{пор.}})}.$$

где гидродинамическое сопротивление вычисляется по формуле

$$R_{\text{гд}} = C_x \frac{\rho_{\text{воды}}}{2} S_{\text{и}} v_{\text{и}}^2,$$

в которой $C_x = 0,3$ – коэффициент лобового сопротивления, $\rho_{\text{воды}} = 1030$ – плотность воды.

Моделирование прекращается при выходе изделия за пределы ПУ:

$$l_{\text{и}} \geq L_{\text{и}}.$$

3.5. Реализация математической модели в Matlab Simulink

Как явствует из рис. 21, основные соотношения, описывающие процессы в выбранных для моделирования полостях, и процессы, сопровождающие перемещение изделия и поршня, сведены в три S-функции: s_md1 (камера сгорания), s_md2 (расширительная полость) и s_md3 (перемещение поршня и изделия). Количество выходов каждой функции определяется количеством дифференциальных уравнений. Соответственно на входы функций поступают значения переменных, полученных в результате численного интегрирования дифференциальных уравнений. Добавив к схеме дополнительные блоки интегрирования и дифференцирования, можно получать текущие значения данных параметров применительно к определенной переменной. Это показано в правой части рисунка: дополнительно интегрируя получаемое значение скорости изделия (V_i), мы имеем значение перемещения изделия (L_i), а проводя дифференцирование, получаем ускорение изделия (dV_i). Очевидно, что стоп-функция срабатывает по достижении определенного значения перемещения изделия, задаваемого исходя из его длины.

Любой из получаемых в процессе расчетов параметров можно отобразить графически в виде зависимости от времени. Для этого на схеме размещены блоки Scope, «подключенные» к соответствующим связям.

Текстовая реализация формульного описания моделируемых процессов приведена в приложении 1. В приложении 2 приведены варианты параметров изделий, используемые для выполнения лабораторной работы по моделированию процессов пуска.

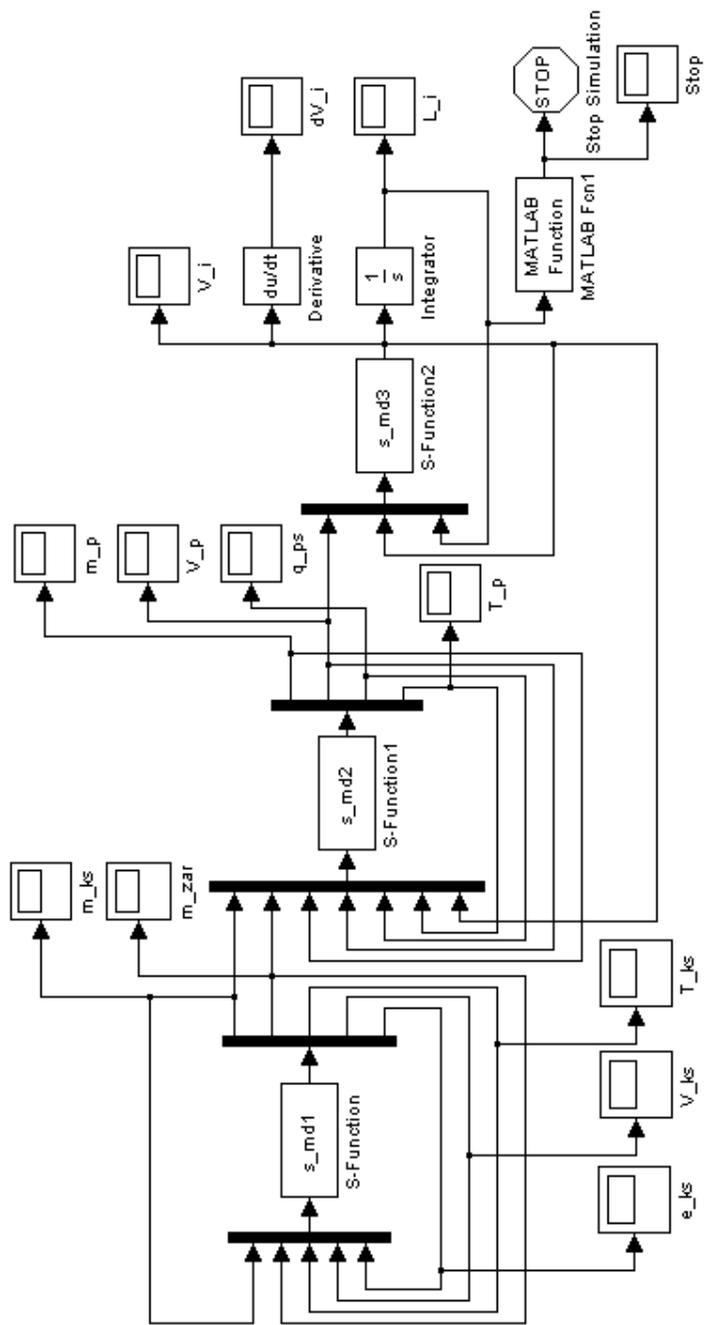


Рис. 21. Реализация математической модели процесса пуска в среде Matlab Simulink

Библиографический список

1. *Борисенко К.П.*, Ефимов О.И., Красильников Е.П. Торпедные аппараты подводных лодок: учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2002. 75 с.
2. *Бородачев С.М.*, Никишкин С.И., Халатов Е.М. Основы термодинамики реальных газов: учебное пособие. Ковров: КГТА, 2004. 36 с.
3. *Виноградов М.Е.*, Михлин В.Г., Урусов Р.А. Система воздушной стрельбы торпедных аппаратов подводных лодок: учебное пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2013. 172 с.
4. *Красильников А.В.*, Красильников Р.В., Мартынов В.Л., Маштаков А.П. Проектирование и испытания малогабаритных подводных пусковых устройств: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2017. 126 с.
5. *Математические* модели систем пневмоавтоматики: учебное пособие / Ю.Л. Арзуманов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 296 с.
6. *Трушенков В.В.* Морское подводное оружие зарубежных ВМС в XXI веке. Состояние и тенденции развития. СПб.: ОАО «Концерн «МПО – Гидроприбор», 2015. 293 с.
7. *Хализев О.А.*, Челпанов И.В. Комплексы оружия и вооружения подводных лодок: учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2005. 104 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Текстовая реализация программ

Описание процессов в камере сгорания

```
function [dV_ks,dm_zar,dm_ks,dT_ks,de_ks]=systemdu_1(t,x,u)
global G C_v_ks C_p_ks p_ks p_p;
m_ks=u(1);
m_zar=u(2);
T_ks=u(3);
V_ks=u(4);
e_ks=u(5);
rho_zar=1600;
D_zar=0.05;
d_zar=0.006;
l_zar=0.1;
d_pr=0.005;
mu=0.7;
S_pr=0.7855*d_pr^2;
R_ks=358;
gamma=1.27;
ksi_ks=0.95;
q=q_function(p_ks);
p_ks=(m_ks*R_ks*T_ks)/V_ks;
G=mu*S_pr*p_ks/sqrt(R_ks*T_ks)*q;
p_ks_atm=p_ks/(10^5);
C_v_ks=R_ks/(gamma-1);
C_p_ks=gamma*C_v_ks;
u=0.37*p_ks_atm^0.7;
if or((2*e_ks)<l_zar,(2*e_ks)<(D_zar-d_zar))
    S_gor=2*(pi/4)*((D_zar-e_ks)^2-(d_zar+e_ks)^2)+(l_zar-2*e)*pi*((D_zar-
e_ks)+(d_zar+e_ks));
else
    S_gor=0;
end;
dV_ks=S_gor*u;
dm_zar=dV_ks*rho_zar;
dm_ks=dm_zar-G;
dT_ks=(dm_ks*(ksi_ks*C_p_ks*T_ks-C_v_ks*T_ks)-
T_ks*R_ks*G)/(C_v_ks*m_ks);
de_ks=u;
```

Описание процессов в расширительной полости

```
function [dm_p,dV_p,dq_ps,dT_p]=systemdu_2(t,x,u)
global G C_v_ks C_p_ks p_p p_ks;
m_ks=u(1);
m_zar=u(2);
m_p=u(3);
V_p=u(4);
```

```

q_ps=u(5);
T_p=u(6);
V_i=u(7);
m_post=m_zar-m_ks;
V_p0=0.005;
rho_vozd0=1.2;
d_i=0.127;
S_i=pi/4*d_i^2;
ksi_p=0.95;
R_vozd=287;
C_v_vozd=0.717;
p_p=(m_p*R_p*T_p)/V_p;
R_p=q_ps*R_ks+(1-q_ps)*R_vozd;
C_v_p=q_ps*C_v_ks+(1-q_ps)*C_v_vozd;
C_p_p=C_v_p+R_p;
gamma_p=C_p_p/C_v_p;
dm_p=G;
dV_p=S_i*V_i;
dq_ps=(G-q_ps*G)/(m_post+m_p0);
dT_p=(dm_p*(ksi_p*C_p_p*T_p-C_v_p*T_p)-
p_p*S_i*V_i)/(C_v_ks*m_post+m_p0);

```

Описание процессов перемещения изделия и поршня

```

function [dV_i]=systemdu_3(t,x,u)
global p_p;
V_p=u(1);
V_i=u(2);
l_i=u(3);
P_h=2.5*1e5;
d_i=0.127;
d_por=d_i;
S_por=pi/4*d_por^2;
S_i=pi/4*d_i^2;
C_x=0.25;
rho_vod=1030;
m_por=3;
m_i=25;
m_v=5*d_i*(pi/4*d_i^2)*rho_vod;
N_por=100;
N_i=200;
N_meh= N_por+N_i;
R_gd=C_x*rho/2*V_i^2*S_i;
if and(((p_p-p_h)*S_i-N_meh-R_gd)<0,V_i<0)
dV_i=0;
else
dV_i=((p_p-p_h)*S_i-N_meh-R_gd)/(m_v+m_i+m_por);
end;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Параметры подводных изделий (варианты)

№ варианта	Калибр, м	Длина, м	Масса, кг
1	0,075	0,99	4,5
2	0,076	0,95	5,5
3	0,076	1,15	6,5
4	0,100	1,00	5,5
5	0,100	1,20	7,5
6	0,100	1,00	5,5
7	0,124	0,92	4,5
8	0,124	1,23	24,8
9	0,127	1,50	30,0
10	0,152	2,16	99,8
11	0,159	2,69	45,0
12	0,210	1,94	107,0
13	0,220	2,10	130,0
14	0,220	2,50	150,0
15	0,240	1,31	43,0
16	0,324	2,84	196,5
17	0,324	2,59	234,5
18	0,324	2,84	340,0
19	0,324	2,69	275,8
20	0,400	2,64	310,0
21	0,400	3,58	700,0
22	0,400	4,50	750,0
23	0,483	3,51	648,7
24	0,531	6,25	1200,0
25	0,533	5,38	1350,0
26	0,533	3,35	935,0
27	0,533	5,79	1558,0
28	0,533	5,79	1676,0
29	0,650	7,50	2200,0
30	0,650	11,30	4450,0

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПУСКОВЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ	3
1.1. Типы подводных изделий	3
1.2. Пусковые установки и методы пуска оружия	6
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	20
2.1. Общие понятия математического моделирования	20
2.2. Этапы моделирования	21
2.3. Общие подходы к построению простейших математических моделей	23
2.4. Адекватность модели	24
2.5. Особенности математического моделирования подводных пусковых систем	26
2.6. Математическое моделирование в рабочей среде Matlab	27
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ С ПОРОХОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ ДАВЛЕНИЯ	32
3.1. Расчетная схема пусковой установки	32
3.2. Процессы в камере сгорания	34
3.3. Процессы в расширительной полости	37
3.4. Движение поршня и изделия	38
3.5. Реализация математической модели в Matlab Simulink	39
<i>Библиографический список</i>	41
П Р И Л О Ж Е Н И Е 1. Текстовая реализация программ	42
П Р И Л О Ж Е Н И Е 2. Параметры подводных изделий (варианты)	44

*Жарова Светлана Сергеевна, Красильников Роман Валентинович,
Мартынов Виктор Леонидович*

Математическое моделирование процессов пуска подводных изделий

Редактор *Г.М. Звягина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *А.В. Мецеракова*

Подписано в печать 20.02.2020. Формат 60x84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. п. л. 2,625. Тираж 100 экз. Заказ № 33.

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1