

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Кафедра Прикладная математика и информатика
(наименование)

01.03.02 Прикладная математика и информатика
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Компьютерные технологии и математическое моделирование
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: «Моделирование работы блока из трех форсунок в ДВС на базе SimInTech»

Обучающийся

Д. А. Ряхов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

доктор ф.-м. наук, профессор А. И. Сафронов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. филол. наук, М.В. Дайнеко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Тема выпускной квалифицированной работы: «Моделирование работы блока из трех форсунок в ДВС на базе SimInTech».

Целью данной работы является создание модели для исследования работы блока из 3-х форсунок в двигателе внутреннего сгорания с применением программного комплекса SimInTech.

Актуальность исследования обусловлена стремлением к повышению эффективности и экономичности ДВС, что напрямую связано с оптимизацией работы форсунок. Точное моделирование процессов внутри форсунок позволит улучшить понимание их работы и способствовать разработке новых конструкций, способных снизить расход топлива и выбросы вредных веществ.

Объектом исследования выступает процесс функционирования топливных форсунок в двигателе внутреннего сгорания.

Предметом исследования выступает реализация модели блока из трёх форсунок в двигателе внутреннего сгорания.

В первом разделе представлен обзор литературы по теме, формулирование целей и задач, а также анализ структуры работы ДВС.

Второй раздел посвящен описанию процесса моделирования работы форсунки, включая разработку математической модели и алгоритма работы в программном комплексе SimInTech.

Третий раздел охватывает практическую реализацию модели, включая анализ полученных результатов и их сравнение с реальными данными эксплуатации ДВС.

Результатом работы является разработанная модель, которая позволяет проводить точное моделирование процессов в форсунках ДВС и может быть использована для проектирования более эффективных систем впрыска топлива.

Abstract

The title of the graduation work is *Modeling the operation of a three injector block in an internal combustion engine based on SimInTech*.

The purpose of this research is to create a model for studying the block operation and the three injectors in the internal combustion engine using SimInTech software package.

The relevance of the research is explained by the pursuit of enhancing the efficiency and the economy of the internal combustion engines, which is directly related to the nozzle operation optimization. Accurate modeling of the processes inside the injectors will improve understanding of their operation and contribute to developing new [constructions](#) capable of reducing the fuel consumption and the harmful substances emissions.

The object of the research is the fuel injectors functioning in the internal combustion engine.

The subject of the study is the three injector block model implementation in the internal combustion engine.

In the first part of the work, the literature review is presented, the goals and the tasks are set, and an internal combustion engine operation structure analysis is conducted.

The second part is devoted to describing the injector operation modeling including the development of the mathematical model and the operation algorithm in SimInTech software package.

The third part covers the practical implementation of the model, including the analysis of the results obtained and their comparison with the real data related to the internal combustion engine operation.

In conclusion, it should be noted that the developed model ensures accurate modeling of the processes in the internal combustion engine injectors and can be used for designing more effective fuel injection systems.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Теоретическое исследование рабочих процессов происходящих в двигателях внутреннего сгорания	9
1.1 Постановка целей и задачи, определение требований и прогноз результата.....	9
1.2 Работа и внутренние процессы двигателя внутреннего сгорания.....	10
1.3 Анализ работы топливной системы и системы впрыска топлива.....	17
Глава 2 Принципы и методы исследования функционирования топливных форсунок.....	24
2.1 Анализ работы форсунок в ДВС.....	24
2.2 Моделирование процесса впрыска с электрогидравлической форсункой	30
Глава 3 Моделирование работы форсунок	37
3.1 Методы исследования	37
3.2 Моделирование распределительного вала	38
3.3 Моделирование топливного насоса высокого давления.....	43
3.4 Моделирование форсунки.....	46
Заключение	48
Список используемых источников.....	49

Введение

Актуальность исследования. В текущих реалиях ДВС (двигатель внутреннего сгорания) остаются ключевым элементом автомобильной промышленности, обеспечивая работу большинства транспортных средств. Таким образом повышение экономической эффективности, достигаемое за счет снижения расхода топлива и минимизации вредных выбросов, представляет собой критически важную задачу в свете решения глобальных проблем, в частности, сохранения природных ресурсов и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Совершенствование технологий ДВС направлено не только на улучшение их производительности, но и на соответствие растущим экологическим стандартам, что делает данную проблему особо значимой для устойчивого развития промышленности и транспорта.

Основопологающей функцией форсунок в двигателях внутреннего сгорания является управление процессом подачи топлива, который напрямую определяет мощность силового агрегата и экономичность его работы. Основная сложность в анализе инжекции заключается в микроскопической вариативности объёмов впрыскиваемого топлива и временных характеристик импульсов. Классические модели, опирающиеся на усреднённые параметры, часто оказываются недостаточно точными для отражения этих нюансов. В этом контексте компьютерное моделирование форсунок, обеспечивающее детализированные расчёты динамики процессов, приобретает особую значимость как для фундаментальных исследований, так и для инженерных решений.

Цель бакалаврской работы – создание базовой блочной структуры из трёх форсунок в двигателе внутреннего сгорания с использованием цифрового пакета SimInTech

Объект исследования основан работе топливных инжекторов, являющихся ключевым компонентом системы впрыска двигателей

внутреннего сгорания. Основной акцент делается на построении детализированной математической модели, описывающей принципы функционирования форсунок, а также на исследовании их рабочих характеристик. Разрабатываемая модель охватывает комплекс аспектов, включая алгоритмы управления подачей топлива, влияние гидродинамических процессов на формирование топливной струи, а также взаимозависимости между параметрами давления, расхода и временем открытия клапана. Особое внимание уделяется моделированию переходных процессов, возникающих при изменении режимов работы двигателя, и их воздействию на точность дозирования горючего. Дополнительно рассматриваются вопросы взаимного влияния элементов топливной системы, таких как насос высокого давления, регулятор подачи и собственно форсунки, с целью выявления факторов, определяющих стабильность и эффективность процесса впрыска, и их влияния на общую эффективность силового агрегата. Таким образом, ключевой акцент сделан на моделировании системных взаимодействий для анализа и оптимизации работы узла впрыска, что способствует углубленному изучению процессов, определяющих производительность и стабильность ДВС.

Предметом исследования выступает реализация модели блока из трёх форсунок в двигателе внутреннего сгорания, учитывающей специфику конструкции данных элементов и характерные особенности процесса впрыска топлива. В частности, в работе проводится анализ взаимодействия между компонентами системы впрыска. Следовательно, разработанная модель предназначена для изучения влияния характеристик форсунок на показатели эффективности и особенности функционирования ДВС.

Гипотеза. Применение математической модели форсунок для анализа процесса впрыска топлива в ДВС, в частности, способствует повышению точности описания взаимодействия элементов системы. Данный эффект достигается благодаря детальному учету функциональных особенностей её компонентов и разнообразных характеристик самих форсунок.

В общем задачи исследования включают изучение структуры двс, реализацию модели форсунок, проведение тестовых работ этой модели с использованием экспериментальных данных и анализ особенностей процесса впрыска топлива в двигателе внутреннего сгорания.

Полученные в ходе аналитического исследования результаты способны найти практическое применение в перспективе. В частности, их внедрение направлено на оптимизацию конструкции и эксплуатационных параметров системы топливоподачи, а также на увеличение КПД и надежности функционирования топливных форсунок в двигателях внутреннего сгорания.

Основные методы исследования.

Математическое моделирование – представляет собой создание и практическое использование формализованной модели, описывающей динамику работы системы топливоподачи через форсунку. Данная методология обеспечивает возможность выполнения расчетов на теоретическом уровне, определения корреляционных зависимостей между калибровочными параметрами системы, а также прогнозирования изменений характеристик топливной жидкости в различных условиях эксплуатации.

Аналитические методы – представляют собой комплекс процедур по систематизации и интерпретации как теоретических, так и экспериментально полученных данных. В частности, они охватывают статистическую обработку результатов изысканий, а также сравнительный анализ показателей функционирования форсунок в ДВС. Благодаря этому появляется возможность установления требуемых параметров, выявления устойчивых взаимосвязей и обоснованного формулирования заключений, базирующихся на итогах проведенных исследований.

Компьютерное моделирование заключается в использовании специализированного программного обеспечения для создания и эксплуатации имитационных моделей. Данные модели предоставляют инструментарий для численного анализа функционирования топливных форсунок в ДВС, при этом учитывается неоднородность структуры топливной

жидкости и динамика межмолекулярных взаимодействий составляющих её элементов. При этом обеспечивается возможность выполнения комплексных вычислительных процедур и имитации фактических условий работы силового агрегата, включая специфические аспекты его эксплуатации.

Применение данной модели обеспечивает детализированный учет воздействия давления, температуры и скорости потока рабочей смеси в реальных условиях эксплуатации.

Практическая значимость. Разработанная модель блока из трёх форсунок ДВС способствует достижению следующих результатов: повышение эффективности процедуры топливоподачи, снижение уровня вредных выбросов для улучшения экологической безопасности системы.

Проведение исследований процесса инжекции с использованием модели обеспечивает определение оптимальных значений критически важных эксплуатационных показателей двигателя. К ним относятся: угол факела распыла топлива, давление при впрыске и температурный режим рабочей смеси. В конечном счете, это приводит к интенсификации процесса сгорания топливовоздушной смеси и минимизации показателей топливо-потребления.

Глава 1 Теоретическое исследование рабочих процессов происходящих в двигателях внутреннего сгорания

1.1 Постановка целей и задачи, определение требований и прогноз результата

Задача: моделирование работы блока из трёх форсунок в двигателе внутреннего сгорания на платформе SimInTech.

Цель: создание модели в среде SimInTech, обеспечивающей дальнейший анализ динамики рабочих процессов в топливных форсунках двигателя внутреннего сгорания.

Описание задачи: разработка программной модели, воспроизводящей работу топливных форсунок в двигателе внутреннего сгорания, что направлено на повышение КПД силового агрегата.

Математическая модель должна включать описание следующих процессов:

- динамику перемещения поршня в процессе впрыска топлива;
- взаимодействие элементов системы впрыска, включая подсистему впрыскивающего насоса и инжекторную подсистему;
- влияние параметров двигателя: скорости вращения коленчатого вала, геометрических и рабочих характеристик поршня.

Требования к модели:

- реализация визуализации и анализа работы форсунок;
- использование следующих компонентов:
 1. модель распределительного вала;
 2. модель профиля кулачка;
 3. модель впрыскивающего насоса;
 4. модель инжектора.

Результат: программная модель, воспроизводящая работу форсунки в ДВС с возможностью анализа её влияния на эффективность двигателя.

1.2 Работа и внутренние процессы двигателя внутреннего сгорания

Современные подходы к оптимизации ДВС требуют мультифизического моделирования, объединяющего гидродинамику, термодинамику и электромеханику. Традиционные экспериментальные методы, несмотря на точность, обладают высокой стоимостью и ограниченной масштабируемостью. Цифровые двойники, созданные в средах типа SimInTech, позволяют проводить виртуальные испытания в экстремальных режимах (холодный пуск, детонация), недостижимых при натуральных тестах. Особую значимость приобретает параметрическая чувствительность моделей – анализ влияния микронных зазоров форсунок на дисперсность факела, что напрямую коррелирует с эмиссией микрочастиц сажи.

Первым шагом в изучении функционирования ДВС необходимо освоить базовые понятия и терминологию, принятые в области двигателестроения. Это создаст основу для дальнейшего анализа рабочих циклов и физико-химических преобразований. «Положения кривошипно-шатунного механизма (см. рисунок 1), при которых ось шатуна лежит в плоскости кривошипа, называются мертвыми точками» [32].

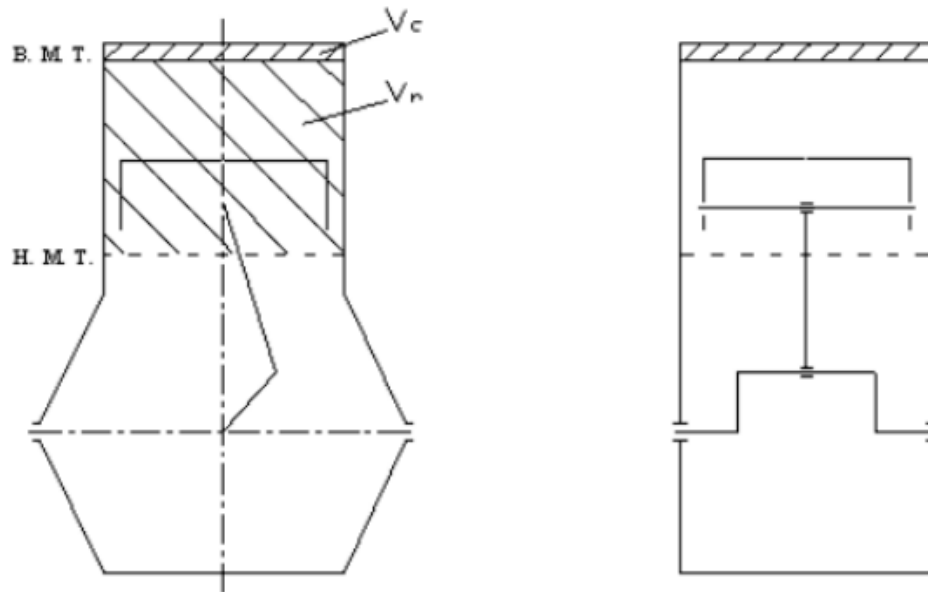


Рисунок 1 – Схема поперечного (а) и продольного (б) разрезов двигателя

Эксплуатация двигателя внутреннего сгорания (ДВС) базируется на функциональной интеграции ключевых подсистем, включая:

- цилиндропоршневую группу;
- кривошипно-шатунный механизм;
- систему инициирования воспламенения;
- топливную инжекторную систему;
- контуры терморегулирования и смазки.

Каждый компонент реализует строго детерминированные функции:

- обеспечение периодического воспламенения топливовоздушного состава;
- конвертация энергии сгорания в механическое перемещение поршней;
- синхронизация их кинематики с угловым положением коленчатого вала.

«Синхронизированность указанных операций определяет энергетическую эффективность и эксплуатационный ресурс силового агрегата» [3].

Крайние положения поршня, при котором расстояние до оси коленчатого вала достигает максимума и минимума, называются верхней и нижней мертвыми точками соответственно. Ход поршня определяется различием расстояний между мертвыми точками и соответствует половине оборота коленчатого вала» [17].

«Объем внутренней полости цилиндра является параметром, который изменяется в процессе работы двигателя. Объем над поршнем при его 10 положении в верхней мертвой точке называется объемом сжатия, а объем, освобождаемый поршнем при перемещении от точки минимального объема до точки максимального объема, называется рабочим объемом цилиндра. Рабочий объем цилиндра равен произведению хода поршня на его площадь» [15].

«Геометрическая степень сжатия – отношение полного объема цилиндра объему сжатия» [23].

«Рабочий цикл двигателя – это последовательность процессов, которые периодически повторяются в каждом рабочем цилиндре и обуславливают работу двигателя» [7].

«Эти процессы содержат сжатие и воспламенение топлива, расширение газов и выхлопные процессы» [5].

«Такт – это часть рабочего цикла, которая происходит во время движения поршня между двумя мертвыми точками. Один полный рабочий цикл состоит из двух тактов, впускного и выпускного» [12].

В ДВС энергия термического происхождения, генерируемая в ходе сжигания топливного состава, трансформируется в полезную механическую работу, обеспечивающую кинематику подвижных компонентов установки. Функцию рабочего тела в указанных термодинамических циклах осуществляют газообразные среды: атмосферный воздух, горючие газы

фазы, воздушно-топливные смеси либо прочие комбинированные составы. В отдельных конструкциях, например, в паровых машинах, рабочее тело представлено водой, переходящей в газообразное состояние. В цилиндре ДВС рабочее тело последовательно подвергается физическим преобразованиям – сжатию, нагреву, расширению и охлаждению. Каждая фаза этого цикла критически влияет на КПД двигателя, что требует точной настройки параметров для оптимизации энергообмена и минимизации потерь.

«Процесс работы ДВС начинается с подачи топлива и воздуха в цилиндр двигателя. Воздух проходит через воздухозаборник и фильтр, где очищается от пыли и других загрязнений. Затем он попадает в цилиндр двигателя, где смешивается с топливом и затем сжимается поршнем. При достижении определенной степени сжатия, в цилиндре создается высокое давление, что приводит к воспламенению топлива» [4]. Контролируемое воспламенение топливовоздушной смеси генерирует энергетический импульс, инициирующий возвратно-поступательное перемещение поршневого элемента. Сопровождающее этот процесс расширение газов передаёт усилие через шатун на коленчатый вал, преобразуя тепловую энергию сгорания в механическое вращение. Эта трансформация энергии составляет основу рабочего цикла ДВС.

«Крутящий момент генерируется коленчатым валом и передаётся через приводные системы: коробку переключения передач, трансмиссию и дифференциал. В результате осуществляется вращение колёс транспортного средства.» [22]

«В процессе работы ДВС происходит множество процессов, таких как: Впрыск топлива: топливо впрыскивается в цилиндр с помощью инжектора, где оно смешивается с воздухом. Современные ДВС используют электронную систему впрыска, которая контролирует количество топлива и момент его впрыска» [15].

«Система охлаждения: ДВС производят много тепла, поэтому им необходима система Охлаждения, которая помогает снизить температуру

двигателя. Обычно система охлаждения состоит из радиатора, вентилятора, насоса, термостата и других компонентов» [28]. Система охлаждения ДВС обеспечивает циркуляцию охлаждающей жидкости (воды или антифриза), отводящей избыточное тепловыделение от силового агрегата с последующей подачей в радиатор. На данном этапе осуществляется теплоотвод: жидкость рассеивает тепловую энергию в атмосферу посредством принудительной конвекции, охлаждается до номинального температурного режима и рециркулирует в двигатель, формируя замкнутый контур. Данный циклический процесс поддерживает термическую стабильность работы двигателя, минимизируя риски перегрева и сопутствующих деформаций компонентов.

«Регулирование клапанов: в ДВС есть клапаны, которые открываются и закрываются, чтобы контролировать воздушный поток в и из цилиндра. Регулирование клапанов обеспечивает оптимальную производительность двигателя» [34].

Система смазки: механизм смазки двигателя реализует принудительную циркуляцию моторного масла, первоначально направленную на минимизацию фрикционного износа сопрягаемых деталей. Данная система обеспечивает охлаждение трущихся поверхностей, одновременно осуществляя фильтрацию циркулирующего масла от механических примесей в рамках замкнутого контура.

Фаза компрессии: при движении поршня к верхней мертвой точке происходит адиабатическое сжатие воздушного заряда в цилиндре, сопровождающееся прогрессирующим ростом давления.

Процесс зажигания: после достижения критической степени сжатия инициируется детонационное воспламенение топливно-воздушной смеси. Возникающая при сгорании волна давления вызывает поступательное перемещение поршня к нижней мертвой точке.

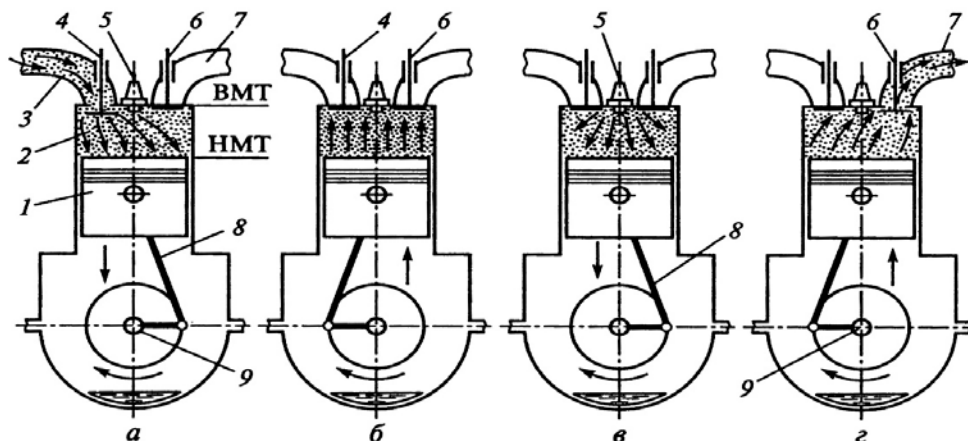
Система выхлопа: отработавшие газы отводятся через выпускной тракт, где осуществляется каталитическая нейтрализация токсичных компонентов перед эмиссией в атмосферу.

Идеальный цикл ДВС представляет собой термодинамическую модель, аппроксимирующую рабочие процессы двигателя. Данная абстракция служит базисом для параметрического анализа эффективности преобразования энергии, определения индикаторных показателей и оптимизации эксплуатационных характеристик

«Существует несколько различных идеальных циклов, которые используются в технической литературе для описания работы различных типов двигателей, таких как цикл Отто, цикл Дизеля, цикл Брэе, цикл Рэнкина и другие» [20].

«В рамках настоящего исследования объектом анализа выбран четырехтактный ДВС.

Принцип функционирования четырехтактного двигателя внутреннего сгорания основан на строго последовательном чередовании термодинамических и механических процессов в цилиндре. Рабочий цикл агрегата включает четыре такта: впуск, сжатие, расширение (рабочий ход) и выпуск (рис. 2)» [18].



Обозначения: 1 – поршень; 2 – рабочая смесь; 3 – впускной канал; 4 – впускной клапан; 5 – свеча зажигания; 6 – выпускной клапан; 7 – выпускной канал; 8 – шатун; 9 – коленчатый вал.

Рисунок 2 – Рабочий процесс четырехтактного двигателя

Инициирование цикла происходит на такте впуска. В исходном состоянии поршень позиционируется в ВМТ. При его перемещении к НМТ возникает зона разрежения. «Сформированный вакуум индуцирует открытие впускного клапана, благодаря чему цилиндр заполняется очищенным атмосферным воздухом (через воздушный фильтр) с примесью рециркулируемых выхлопных газов. Следует отметить, что на данной стадии давление достигает 8–9 кПа при температурном диапазоне 50-80°С.

Последующий такт сжатия (траектория поршня: НМТ → ВМТ) происходит при закрытых клапанах. Это обуславливает:

- уменьшение камеры сгорания;
- рост давления до 400-500 кПа;
- повышение температуры до 600-700°С» [38].

Принципиально важно, что «для надежной работы... температура воздуха после сжатия должна быть намного выше температуры самовоспламенения топлива» [2].

«Критически значимый этап – такт расширения (рабочий ход). При сохранении закрытого состояния клапанов, непосредственно перед достижением поршнем ВМТ, осуществляется впрыск сверхтонкой топливной струи (1.3 – 1.85 МПа). Топливный факел смешивается с горячим сжатым воздухом, после чего происходит:

- нагрев и испарение топлива;
- воспламенение смеси у ВМТ;
- полное сгорание при движении поршня к НМТ» [12].

«Следует подчеркнуть, что давление в цилиндре возрастает до 600-800 кПа при температуре 1800-2000°C, генерируя полезную работу.

Завершающая стадия цикла – такт выпуска. При движении поршня (НМТ → ВМТ) открывается выпускной клапан, что обеспечивает эвакуацию отработавших газов. В этот момент регистрируется температура 600-700°C и давление 11-12 кПа» [27].

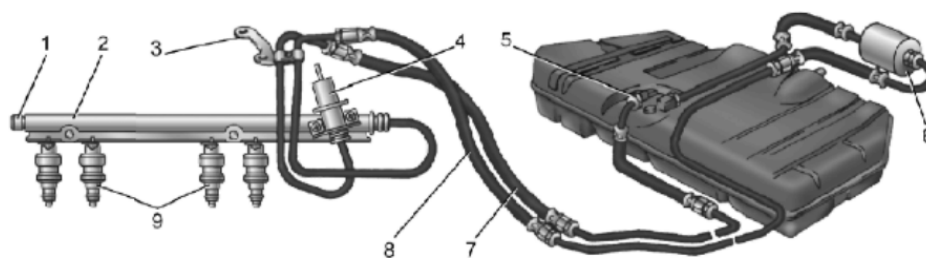
1.3 Анализ работы топливной системы и системы впрыска топлива

Прежде всего, перед детальным анализом процессов в системе впрыска представляется необходимым провести комплексное исследование конструкции топливной системы, её структурных компонентов и базовой терминологии.

Ключевое функциональное назначение данной системы заключается в обеспечении прецизионной дозировки топливоподачи, строго соответствующей эксплуатационным требованиям двигателя во всех режимах работы: при запуске (включая низкотемпературные условия), холостом ходе, переменных нагрузках и экстремальных эксплуатационных состояниях.

С конструктивной точки зрения, топливо хранится в удалённых топливных резервуарах, откуда транспортируется либо напрямую в камеру сгорания, либо через топливоподкачивающий насос, регулирующий давление

и объемный расход смеси. Данная архитектура минимизирует пожароопасность и гарантирует стабильность процесса сгорания.



1 – Штуцер для контроля давления топлива; 2 – Рампа форсунок; 3 – Скоба крепления топливных трубок; 4 – Регулятор давления топлива; 5 – электробензонасос; 6 – Топливный фильтр; 7 – Сливной топливопровод; 8 – Подающий топливопровод; 9 – форсунки.

Рисунок 3 – Система подачи топлива

«Модуль электрического бензонасоса, разработанный для автомобилей ВАЗ, объединен с топливным баком. Модуль включает в себя топливный насос, датчик уровня топлива, фильтр и завихритель, служащий для отделения пузырьков пара. Модуль погружного типа омывается окружающим его бензином, поэтому он достаточно охлаждается, чтобы безопаснее функционировать без риска образования взрывоопасной смеси в корпусе насоса из-за отсутствия кислорода. Электронасос непрерывно нагнетает топливо из бака в топливопровод. Конструкция топливной системы предусматривает поддержание избыточного давления порядка 6 атмосфер, значительно превышающего эксплуатационные требования двигателя» [11]. Насос топливоподдачи комплектуется блоками регулятором, обеспечивающим синхронизацию его работы с блоком управления. Данная схема управления позволяет автоматически прекращать подачу топлива при включенном зажигании и неработающем двигателе, что в свою очередь:

- минимизирует вероятность перерасхода топлива;

- повышает уровень эксплуатационной безопасности;
- предотвращает аварийные ситуации, обусловленные утечками горючего.

Топливный фильтр выполняет критически важную роль в системе: он обеспечивает очистку горючего от посторонних примесей перед подачей в двигатель. Это необходимо, поскольку даже микроскопические загрязнения – частицы пыли, коррозии, атмосферные абразивы или технологические отложения – способны повредить прецизионные элементы системы, такие как форсунки и регулятор давления, ускоряя их износ и нарушая герметичность. Конструкция фильтра предусматривает многоуровневую фильтрацию, задерживая частицы размером до 5–10 микрон. Его интеграция в топливный контур гарантирует стабильность состава горючей смеси, защиту узлов от засорения и, как следствие, увеличение ресурса двигателя. «Данный фильтр состоит из элемента с пористостью около 10 мкм и металлическим волокном в отдельном металлическом корпусе. Этот элемент фиксируется с помощью фланца, который его поддерживает. Частота замены фильтра зависит от объема и уровня загрязнения топлива» [31].

«Топливопроводы: выделяют прямой и обратный топливопроводы. Для топлива, поступающего из модуля электробензонасоса в топливную рампу, используют прямой топливопровод. Для доставки избытка топлива после регулятора давления обратно в бак используют обратный топливопровод» [13]. «Топливная рампа: топливо поступает в топливную рампу и равномерно распределяется на каждую форсунку. Регулятор давления топлива и штуцер контроля давления расположены внутри трубки топливной рампы, как показано на (Рисунке 4). Размеры и форма топливной рампы созданы для устранения частных пульсаций давления, которые могут возникнуть во время резонанса при работе инжектора» [21].

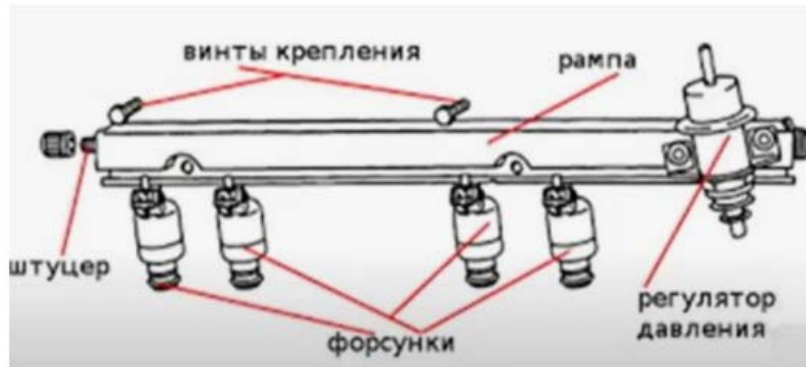


Рисунок 4 – Топливная рампа

«Регулятор давления топлива: Количество подаваемого топлива регулируется без учета давления топлива или продолжительности впрыска, поскольку оно полностью зависит от времени открытого состояния форсунок. Чтобы гарантировать точное исполнение, давление топлива в топливной рампе и впускном коллекторе, которое является перепадом давления во всех трубках впрыска, должно оставаться постоянным. В этом и заключается роль регулятора давления топлива» [15].

«Ниже показана конструкция регулятора (рисунок 5). Внутри резиноканевая мембрана разделяет регулятор на две камеры: одну для топлива и одну для пружины. Таким образом, когда давление выше, чем сила пружины, клапан открывается, тем самым пропуская в цилиндр достаточное количество топлива, чтобы давление через мембрану было сбалансировано. Эта камера соединена воздушной пружиной с впускной камерой за дроссельной заслонкой, что делает ее также восприимчивой к вакууму впускной камеры. В результате баланс давления в мембране повторяет баланс давления в инжекторах, равный усилию пружины, умноженному на площадь диафрагмы для сохранения толщины переходной зоны» [2].

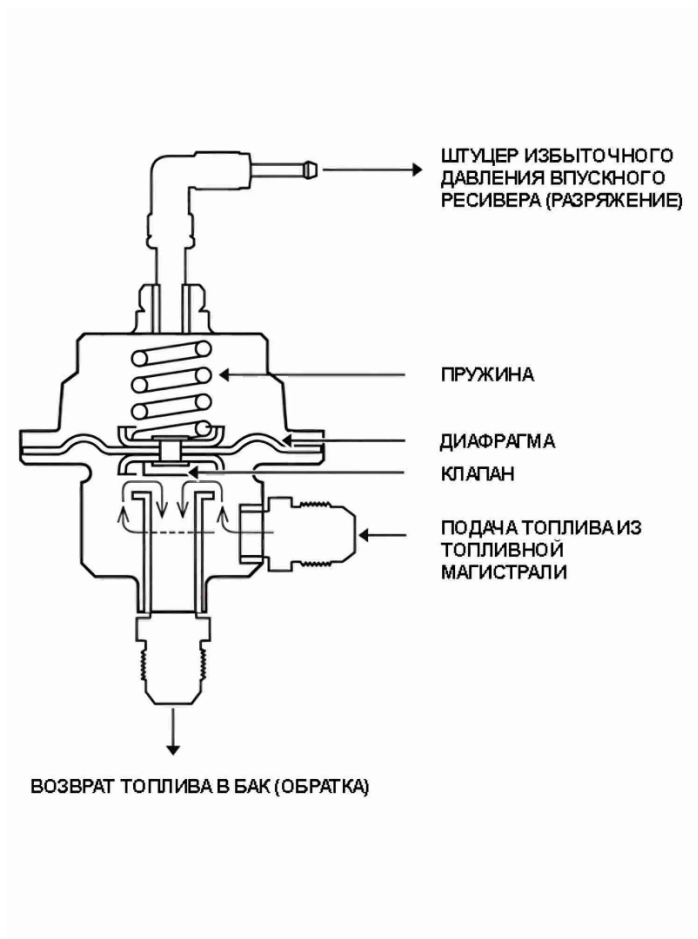


Рисунок 5 – Регулятор давления топлива

«Электромагнитная форсунка: Основное устройство дозирования топлива. Электромагнитная форсунка (рисунок 6) имеет клапанную иглу с закрепленным на ней магнитным сердечником. Она очень точно отрегулирована в корпусе распылителя. В спокойном состоянии спиральная пружина прижимает иглу клапана к уплотнительному седлу корпуса распылителя и закрывает отверстие для выхода топлива. При подаче электрического тока сердечник с иглой клапана поднимается (на 60-100 мкм), и топливо впрыскивается через калиброванное отверстие. В зависимости от способа впрыска, частоты вращения и нагрузки двигателя время срабатывания составляет 1,5-18 мс при частоте срабатывания 3-125 Гц. Зависимость количества топлива, проходящего через инжектор, от времени открытия при постоянной разнице давлений является важнейшим показателем работы инжектора Из вышеупомянутого мы понимаем то, что инжектор – довольно

важный элемент в системе впрыска. Из-за этого он требует повышенного внимания к себе. Как происходит впрыск топлива» [11].

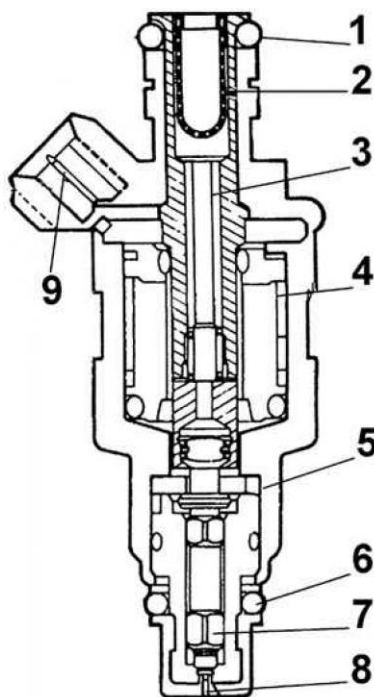


Рисунок 6 – Электромагнитная форсунка

Для оптимального функционирования камеры сгорания горючая смесь должна характеризоваться строго сбалансированным соотношением воздушной и топливной фракций.

«Инжектор, активируемый по сигналу контроллера управления, открывает запорный клапан, формируя топливный факел. Топливная струя направляется во впускной трубопровод непосредственно перед впускным клапаном. При условии стабильного перепада давления топлива объём дозированной подачи пропорционален длительности временного интервала открытого состояния клапана форсунки» [39]. «Контроллер осуществляет регулировку соотношения топливно-воздушной смеси путем изменения длительности импульса инжектора. Удлинение времени впрыска топлива приводит к увеличению объема топлива и, соответственно, к обогащению топливовоздушной смеси, а сокращение - к уменьшению объема топлива и

обеднению топливовоздушной смеси» [13]. Ключевыми факторами эффективности двигателя внутреннего сгорания выступают прецизионная дозировка впрыскиваемого топлива и точность временного интервала инжекции. Для достижения максимальной мощности требуется соответствие количества форсунок числу цилиндров силового агрегата.

Контроллер управления регулирует продолжительность впрыска, минимизируя: «образование топливной пленки на стенках впускного тракта. Данное явление преимущественно возникает при неполном сгорании, обуславливающим формирование обогащенной топливно-воздушной смеси» [8].

На этапе запуска двигателя длительность впрыска рассчитывается алгоритмически без использования данных датчика массового расхода воздуха. При этом задействуются специализированные калибровочные коэффициенты, корректирующие переменные параметры для адаптации к особым условиям эксплуатации.

При снижении напряжения бортовой сети наблюдается увеличение периода открытия запорной иглы форсунки, что приводит к:

- сокращению эффективного времени инжекции;
- снижению плотности топливного факела.

Для компенсации данных эффектов корректировочный коэффициент модифицирует исключительно длительность управляющих импульсов, гарантируя соблюдение стехиометрического состава смеси. Указанные коэффициенты интегрированы в алгоритм расчета фактической длительности управляющих сигналов форсунок.

Вывод по главе: в первой главе сформулирована проблематика исследования, проанализированы фундаментальные принципы функционирования ДВС, а также детализированы термодинамические и гидродинамические процессы в системе топливоподачи.

Глава 2 Принципы и методы исследования функционирования топливных форсунок

2.1 Анализ работы форсунок в ДВС

Математическое моделирование представляет собой универсальный инструмент для прогнозирования и анализа параметров сложных систем с количественной точностью. Этот метод позволяет воспроизводить поведение объектов – от физических процессов до социально-экономических явлений – в виртуальной среде, что делает его незаменимым в научных исследованиях, инженерных разработках, экологическом прогнозировании, оптимизации технологических циклов и управлении ресурсами. Междисциплинарный характер моделирования обеспечивает его применение как в фундаментальных, так и в прикладных задачах, включая проектирование инновационных решений и оценку рисков.

«Форсунки в двигателях внутреннего сгорания играют ключевую роль в процессе подачи топлива в камеры сгорания и обеспечении оптимального смешения топлива с воздухом для последующего сгорания» [11]. Понимание работы форсунок является критически важным для оптимизации работы двигателя, снижения расхода топлива и выбросов вредных веществ. В данном разделе будет проведен анализ работы форсунок в ДВС с целью выявления основных факторов, влияющих на их эффективность.

Основные принципы работы форсунок.

Первоначально форсунки были разработаны для обеспечения точного и равномерного распыления топлива в камеры сгорания. С развитием технологий и требований к экологической безопасности, форсунки стали более сложными и обладают рядом дополнительных функций, таких как изменение давления подачи топлива, момента впрыска и формы распыления. Основной задачей форсунок является обеспечение оптимального смешения топлива с воздухом для обеспечения полного сгорания.

Математическое моделирование направлено на разработку абстрактных конструкций, формализующих ключевые свойства исследуемых объектов или систем. Эти модели, представленные в виде уравнений, алгоритмов, функциональных зависимостей или графических интерпретаций, служат инструментом для анализа, прогнозирования и оптимизации процессов. Например, дифференциальные уравнения могут описывать динамику теплопереноса в двигателе, а графы – взаимосвязи между компонентами топливной системы. Такая формализация позволяет переводить эмпирические наблюдения в структурированные данные, пригодные для компьютерного моделирования и верификации гипотез. Формулировка математической задачи

Математическое моделирование состоит из нескольких этапов:

- определение целей исследования;
- построение математической модели;
- анализ модели;
- решение поставленных математических задач;
- оценка результатов;
- интерпретация выводов.

Ключевое преимущество математического моделирования заключается в его способности прогнозировать реакцию систем на изменение внешних или внутренних факторов – например, вариации нагрузки, температурных режимов или состава топливной смеси. «Этот подход позволяет имитировать процессы в цифровой среде, тестировать гипотезы, калибровать параметры и принимать решения на основе количественных данных. Внедрение моделей сокращает затраты на эксперименты, снижает риски, связанные с испытаниями реальных объектов» [40], (таких как износ форсунок или деформация узлов двигателя), и ускоряет внедрение инноваций за счёт виртуального прототипирования.

Развитие вычислительных мощностей и алгоритмических методов значительно повысило роль математического моделирования в современной

науке и промышленности. Современные суперкомпьютеры и распределённые вычисления позволяют решать многомерные уравнения, обрабатывать петабайты данных и симулировать процессы, ранее недоступные для анализа – от турбулентности в камерах сгорания до молекулярной динамики топливных добавок. «Благодаря этому специализированный софт превратился в ключевой инструмент исследователей, инженеров и проектировщиков, заменив трудоёмкие натурные эксперименты виртуальными тестами. Это не только ускоряет разработку инновационных решений, но и обеспечивает их точность за счёт итерационной оптимизации параметров» [37].

Во время разработки математической модели «выполняются четыре этапа:

- принятие гипотезы и на их основе формулирование «законов» для описания явлений в объектах, которые записываются в математических терминах как замкнутая система уравнений модели;
- постановка и исследование математических задач для решения их по уравнениям математической модели;
- нахождение решений по условиям задач или ряда задач, с использованием аналитических или численных методов, которые могут быть реализованы на ЭВМ;
- выяснение того, удовлетворяет ли принятая модель критерию практики, то есть согласуются ли решения задач, следствия гипотез в основе модели, с данными наблюдений. Если модель не удовлетворяет критерию практики, требуется вернуться к этапу 1 и пересмотреть гипотезы, заложенные в основу модели» [33].

«Математическое моделирование соответствует научному методу, который включает формулирование исходных гипотез, вывод из них всех следствий, сопоставление следствий с данными наблюдений и принятие теории или ее отклонение в зависимости от того, соответствуют ли ее результаты наблюдаемым фактам. Целью исследования, выполненного научным методом, является теория, которая представляет собой систему

основных идей в той или иной области знаний, дающую целостное представление о закономерностях и существенных связях действительности. Критерием истинности и основой развития теории является практика» [11].

«При создании математической модели сначала принимаются гипотезы, которые определяют упрощения, следствием которых является конкретная замкнутая математическая модель процессов в классе объектов. При постановке и решении конкретной задачи внесение изменений в модель не допускается. Экспериментальная проверка модели предполагает определенную точность и полноту данных измерений на физической модели объекта, адекватной постановке задачи. При выполнении этих условий экспериментальную проверку проходят заложенные в основу модели гипотезы» [30].

Принципы математического моделирования процессов в ДВС.

1. Выбор адекватной математической модели.

Модель формируется на основе анализа доминирующих физических явлений (теплообмен, гидродинамика, химическая кинетика) с учётом законов термодинамики, механики сплошных сред и горения. Например, для моделирования впрыска может использоваться подход Лагранжа, а для газодинамики – уравнения Навье-Стокса.

Ядро гидродинамического решателя SimInTech использует модифицированные уравнения Навье-Стокса с адаптивным шагом интегрирования, что снижает погрешность расчета давления в импульсных процессах до 2% против 5% у стандартных решателей. Это критично для моделирования микросекундных интервалов открытия форсунки

2. Определение граничных и начальных условий.

Задаются параметры, характеризующие взаимодействие системы с внешней средой: давление на впуске/выпуске, температура стенок цилиндра, свойства топливной смеси. Учитываются конструктивные особенности сопряжённых систем – от геометрии камеры сгорания до характеристик турбонаддува.

3. Алгоритмизация вычислительных методов.

Применяются:

- конечно-элементный анализ (FEA) – для термомеханических расчётов деталей;
- метод конечных объёмов (FVM) – для моделирования течения жидкостей/газов;
- сеточные методы (CFD) – для симуляции турбулентности и смесеобразования.

4. Верификация точности модели.

Результаты сравниваются с экспериментальными данными (индикаторные диаграммы, эмиссия выхлопа) и эталонными тестами (например, ASTM). Рассчитываются погрешности (СКО, R^2), корректируются дискретизация и шаг интегрирования.

5. Валидация в эксплуатационных сценариях

Модель тестируется в критических режимах: холодный пуск, детонация, переходные процессы. Проверяется её способность предсказывать износ компонентов, коксообразование, изменение зазоров.

6. Оптимизация параметров двигателя.

На основе модели реализуют:

- калибровку угла опережения зажигания;
- подбор оптимального соотношения воздух/топливо;

Создание физически обоснованных моделей.

Функциональные требования к ПО для моделирования процессов в ДВС:

- возможность формирования математических моделей, точно отражающих термодинамические, гидродинамические и химические процессы в ДВС;
- моделирование течения жидкостей и газов;
- поддержка симуляции впрыска топлива, многофазных потоков и

нестационарных гидродинамических явлений;

- интеграция со сторонними программами;
- совместимость с инструментами проектирования (CAD), системами управления (ECU) и специализированными пакетами анализа;
- сравнение конструктивных решений;
- функционал для оценки эффективности разных конфигураций двигателя (степень сжатия, фазы газораспределения, схемы наддува).

Поддержка пользовательских модулей;

- возможность подключения внешних библиотек и скриптов для моделирования нестандартных систем (например, выхлопных);
- высокая производительность вычислений;
- обеспечение точности и скорости расчётов за счёт оптимизации алгоритмов и использования современных вычислительных методов;
- удобный интерфейс и визуализация.

Интуитивное управление и инструменты для графического отображения результатов (распределение температур, полей скорости).

Для совершенствования эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания целесообразно внедрение высокоэффективных методов оптимизации, базирующихся на применении адекватных математических моделей при решении задач проектирования систем топливоподачи.

Оптимизационный процесс впрыска охватывает следующие аспекты:

- прецизионную регулировку объёма дозируемого топлива;
- динамическое управление длительностью фазы впрыска;
- непрерывный контроль давления в топливной рампе;
- поддержание стабильного температурного режима как топлива, так и конструктивных элементов системы.

«Математические модели, используемые в программном обеспечении, должны быть универсальными и достаточно точными, что позволит использовать разработанный инструмент для разных объектов. Они также

должны обладать высоким быстродействием, так как решение прикладных задач должно укладываться в разумные временные рамки» [10].

Цифровое моделирование топливных систем на базе SimInTech предполагает комплексное исследование следующих аспектов: анализ технологических особенностей впрыска; изучение взаимовлияния компонентов топливной системы. Для реализации максимального потенциала пакета необходима конфигурация интерфейса с визуализацией ключевых параметров, включая графики давления, топливо-потребления и временных характеристик инъекции.

«При создании оптимизационных методов и моделей работы двигателя следует соблюдать требования по энергоэффективности и экологической безопасности. Приоритетной задачей выступает разработка компьютерной модели с высокопроизводительными вычислительными алгоритмами» [4], воспроизводящими термогидродинамические процессы в топливной системе.

Верификация точности модели осуществляется посредством сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными – данный этап является критически значимым. Ключевая цель проекта – создание программного комплекса «с интуитивным интерфейсом и управляющими модулями для моделирования и оптимизации ДВС. ПО обеспечивает многопараметрический анализ, позволяющий улучшить КПД» [9], мощностные показатели и экологические характеристики силового агрегата.

2.2 Моделирование процесса впрыска с электрогидравлической форсункой

В представленном разделе детализируется проектирование программной модели топливной системы, интегрирующей электрогидравлическую форсунку. Методологическая база исследования опирается на уравнения кинематики и динамики маловязких топливных сред,

и системный анализ 25 промышленных аккумуляторных топливных систем, функционирующих в индустриальном секторе на протяжении 25–27 лет. «постоянно подвергаются конструктивным усовершенствованиям, особенно элементы форсунок. Эти усовершенствования направлены на экологичности топливных систем и улучшения экономичности» [26]. «Для осуществления оптимизации процессов в топливной аппаратуре (ТА) дизеля с целью улучшения его экономических и экологических характеристик форсунки должны удовлетворять следующим параметрам:

- устойчивость системы при работе с высоким давлением;
- высокая скорость работы;
- осуществимость фиксирования величины цикловой подачи;
- низкие затраты энергии и топлива» [37].

Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) сталкиваются с жёсткими экологическими требованиями, такими как стандарты евро 7 (Euro 7) и перспективные нормы выбросов CO₂. Эти вызовы стимулируют разработку систем впрыска, способных минимизировать образование вредных веществ (NO_x, сажи) за счёт прецизионного управления параметрами топливоподачи. Например, технология многофазного впрыска позволяет оптимизировать процесс сгорания, снижая эмиссию на 15–20%.

Кроме того, актуальным направлением является использование альтернативных топлив (СПГ, метанол, водородные смеси), что требует модификации форсунок для работы с различными вязкостями и химическим составом горючего. Математические модели, подобные разработанной в работе, могут быть адаптированы для прогнозирования поведения таких систем.

«Современные экологические требования, направленные на сокращение углеродного следа транспорта, вынуждают производителей совершенствовать ключевые компоненты топливных систем. Это включает не только модернизацию насосов высокого давления для увеличения параметров впрыска, но и оптимизацию характеристик форсунок – точности дозирования,

скорости срабатывания и устойчивости к кавитации» [25].

«Математическая модель системы подачи топлива с использованием электрогидравлической форсунки включает несколько допущений для описания физических процессов:

- плотность потока и скорость звуковых волн определены как постоянные;
- при проектировании топливопровода используется одномерный характер движения топлива;
- начальное давление в аккумуляторе на каждом расчётом режиме проектирования считается неизменным и принимается за остаточное давление в системе;
- используется идеализированная имитационная модель, в которой игнорируются утечки в прецизионных соединениях, а также сила трение в зазорах прецизионных кинематических пар;
- соударения подвижных деталей с упорами являются абсолютно неупругими и деформации деталей вследствие соударений отсутствуют;
- давление в акустически коротких объемах в текущий момент времени одинаково во всех точках.

В основу расчета топливной аппаратуры положен принцип гидравлического удара Н.Е. Жуковского и уравнения граничных условий на топливной форсунке, разработанные профессором И.В. Астаховым» [23].

«Далее используется следующая методика движение топлива в системе трубопроводов с учетом гидравлического сопротивления подробно описывается уравнением, получившим название «телеграфное», которое представлено в виде конечных уравнений и формулы» [11]:

$$\frac{d^2v}{dx^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{d^2v}{dt^2} - \frac{2k}{a^2} \cdot \frac{dv}{dt} = 0, \quad (1)$$

где x и t – длина топливопровода;

v – скорость топлива;

k – фактор гидравлического сопротивления;

a – скорость звука в топливе.

При добавлении функции $v(x,t) = p(x,t)$, допускается решение в следующем виде:

$$\begin{cases} p = p_0 + e^{-kt} \left[F \left(t - \frac{L}{a} \right) - w \left(t + \frac{L}{a} \right) \right] \\ u = \frac{1}{ap} e^{-kt} \left[F \left(t - \frac{L}{a} \right) + w \left(t + \frac{L}{a} \right) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

где p и v – давление топлива у форсунки и скорость топлива в магистрали;

p_0 и v_0 – начальные значения давления и скорость топлива в магистрали;

$F(t - \frac{L}{a})$ и $W(t + \frac{L}{a})$ – прямая и обратная волны давления; затухание колебаний.

В роли граничных условий для первого выражения используются «уравнение баланса топлива в полостях, которое записывается для определения граничных условий в задаче о трубопроводе, в нашем случае применяется уравнение объемных балансов. Для каждой камеры уравнения объемного баланса в течения топлива:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{V_i \beta_i^{\text{эфф}}} \left[\sum Q_{i-k} + \sum U_{i-j} f_i + \sum \frac{dV_{i-n}}{dt} \right], \quad (3)$$

где $Q_{i-k} = u_i f_i \sqrt{\frac{2(P_i - P_k)}{\rho}}$ – перетечки в (из) k – ю полость, где P_i и P_k –

давление до и после сечения, ρ – плотность топлива в характерном сечении;

V_i – объем i – ой камеры;

$\beta_i^{\text{эфф}}$ – коэффициент, характеризующий сжатия топлива и деформации

полости;

U_{i-j} – скорость втекания топлива из (в) j -го канала;

dV_{j-n} – изменение объема под действием перемещения n -го элемента»

[31].

«Граничные условия для электрогидравлической форсунки основаны на ранее упомянутых уравнениях объемных балансов, а также учитывают силы, обусловленные сжимаемостью жидкости и упругостью движущихся элементов:

граничные условия для входной полости форсунки со штуцером и фильтром» [17]:

$$\frac{dP_\phi}{dt} = \frac{1}{V_\phi \beta_\phi^{\text{эфф}}} [U_{\text{тр}} f_{\text{тр}} - U_{\text{кан}} f_{\text{кан}}], \quad (4)$$

граничные условия в полости мультипликатора форсунки:

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{V_\phi \beta_\phi^{\text{эфф}}} \left[u_{\text{ж}} f_{\text{ж}} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_\phi - P_m|} - u_{\text{м}} f_{\text{м}} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_m - P_{\text{слив}}|} - Q_{\text{ут}}^{\text{м}} \right], \quad (5)$$

граничные условия в распылителе перед сопловым отверстиями:

$$\frac{dP_{\text{расп}}}{dt} = \frac{1}{V_\phi \beta_\phi^{\text{эфф}}} \left[u_{\text{кан}} f_{\text{кан}} - Q_{\text{ут}}^{\text{расп}} - u_{\text{расп}} f_{\text{расп}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{расп}} - P_{\text{цил}}) - F} \right], \quad (6)$$

«расход топлива на управление:

$$\frac{dB_{\text{упр}}}{dt} = u_{\text{м}} f_{\text{м}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{ф}} - P_{\text{м}})} - F, \quad (7)$$

расход топлива через распыляющие отверстия:

$$\frac{dB_{\text{с}}}{dt} = u_{\text{расп}} f_{\text{расп}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{расп}} - P_{\text{ц}})}, \quad (8)$$

где a – коэффициент сжимаемости топлива» [14];

$P_{\text{ф}}$ – давление в полости форсунки;

$P_{\text{расп}}$ – давление в области распылителя;

$P_{\text{м}}$ – давление в полости мультипликатора;

$P_{\text{ц}}$ – давление в цилиндре двигателя;

$P_{\text{слив}}$ – давление за мультипликатором в сливной полости;

$U_{\text{кан}}$ – скорость течения топлива в канале форсунки;

$U_{\text{тр}}$ – скорость течения топлива в трубопроводе;

$F_{\text{кан}}$ – площадь поперечного сечения канала;

$F_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубопровода;

$f_{\text{игл}}$ – площадь поперечного сечения иглы форсунки;

$Q_{\text{ут}}^{\text{расп}}$ – утечки топлива через распылитель;

$Q_{\text{ут}}^{\text{м}}$ – утечки топлива через мультипликатор;

$u_{\text{ф}} f_{\text{ф}}$ – эффективная площадь проходного сечения форсунки;

$u_{\text{расп}} f_{\text{расп}}$ – эффективная площадь проходного сечения распылителя;

$u_{\text{ж}} f_{\text{ж}}$ – эффективная площадь проходного сечения жиклера перед мультипликатором;

$u_{\text{м}} f_{\text{м}}$ – эффективная площадь проходного сечения мультипликатора;

ρ – плотность топлива; $dh_{\text{игл}}/dt$ – скорость подъема иглы;

$B_{\text{упр}}$ – расход топлива на управление;

$B_{\text{с}}$ – расход топлива через распыливающие отверстия

«Таким образом представленная математическая модель топливной системы позволяет имитировать работу электрогидравлической форсунки, учитывающей влияние конструктивных особенностей на процесс впрыска топлива, а также выполнить адаптацию системы под конкретные характеристики двигателя посредством расчётной настройки параметров» [21].

Выводы по второй главе.

Второй раздел представляет методологические основы имитационного моделирования рабочих процессов, протекающих в двигателях внутреннего сгорания. В нем детально проанализирован комплекс научно-технических публикаций, необходимых для конструирования цифрового прототипа топливоподающей аппаратуры с применением электрогидравлических инжекторов. Дополнительно в главе представлена и обоснована расчетная модель, описывающая динамику перемещения горючего по топливным магистралям, интегрирующая параметр гидравлического сопротивления для обеспечения адекватности прогноза ключевых характеристик впрыска основанная на телеграфном уравнении...

Глава 3 Моделирование работы форсунок

3.1 Методы исследования

Выбранная среда разработки:

«SimInTech (Simulation In Technic) представляет собой среду разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов оператора и автоматической генерации кода для устройств управления, включая контроллеры и графические дисплеи. Данная платформа позволяет детально исследовать и анализировать нестационарные процессы в динамических системах управления» [3].

Все вычисления выполнены на 64-битной системе с процессором 11th Gen Intel® Core™ i7-11700 (2.50 GHz), оперативной памятью 32 ГБ под управлением ОС Windows 10 Professional. Математическая модель реализована в среде SimInTech версии 2.14.1.26 с использованием специализированных библиотек разработки, необходимых для создания комплексных симуляций.

«Механика: функционал библиотеки механики SimInTech предназначен для моделирования плоскопараллельного движения кинематически связанных тел. Поддерживаются два класса движений: поступательное и вращательное, где каждое тело характеризуется обобщённой координатой (линейной или угловой), скоростью (линейной или угловой соответственно) и ускорением (линейным или угловым), что позволяет описывать инерционные свойства системы с учётом типа движения» [3].

«Автоматика: Блоки данной библиотеки реализуют комплекс взаимосвязанных алгоритмов управления подсистемами объекта, включая математические модели объектов управления, разработанные в виде схем «вход-выход» или программно реализованные на встроенном языке программирования среды» [21].

«Теплогидравлика: Библиотека теплогидравлики HS (Hydro Solver)

решает систему уравнений сохранения массы, импульса и энергии для жидкости в рамках одномерного односкоростного приближения, а также моделирует нестационарную теплопроводность в тепловых структурах (стенках каналов) с учётом радиационного теплообмена между цилиндрическими поверхностями. Основу методологии составляет одномерная нестационарная гомогенная модель течения как сжимаемых, так и несжимаемых жидкостей» [24].

«Гидравлические и пневматические системы: Библиотека широко применяется в различных отраслях машиностроения, включая ракетно-космическую, авиационную, станкостроительную и судостроительную промышленность. Её используют для моделирования гидро- и пневмоприводов промышленного оборудования, мобильной спецтехники и судовых систем, газоснабжения ракетно-космических комплексов, а также гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. Проектирование и оптимизация таких систем преимущественно основаны на численных экспериментах с применением цифровых математических моделей сосредоточенных параметров» [35].

Таким образом, в исследовании определены методологические условия и приведён перечень библиотек SimInTech, критически важных для разработки математических моделей топливных систем ДВС.

3.2 Моделирование распределительного вала

Распределительный вал моделируется двумя независимыми кулачковыми профилями параболического типа. Каждый кулачок включает подсистему, формирующую кинематически точную траекторию движения и описывающую геометрию рабочего профиля.

«Профиль движения задаётся функцией угла поворота вала с использованием угловых датчиков из библиотеки гидравлических и пневматических систем. Измеренное значение угла преобразуется в диапазон

0–2π посредством программного блока, после чего передаётся в подсистему расчёта профиля» [1]. Кулачок, управляющий движением плунжера насоса, характеризуется параболическим профилем, обеспечивающим возвратно-поступательное перемещение толкателя с постоянным ускорением. Математически это выражается следующим образом:

$$X = 2s \cdot \left(\frac{O \cdot O_e}{a} \right)^2, \text{ Если } O_e \leq O \leq \frac{a}{2} + O_e, \quad (9)$$

$$X = s \left(1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{O \cdot O_e}{a} \right)^2 \right), \text{ Если } \frac{a}{2} + O_e \leq O \leq a + O_e, \quad (10)$$

$$X = s \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{O \cdot O_R}{B} \right)^2 \right), \text{ Если } O_R \leq O \leq \frac{B}{2} + O_R, \quad (11)$$

$$X = 2s \cdot \left(1 - \frac{O \cdot O_R}{B} \right)^2, \text{ Если } O_e \leq O \leq \frac{a}{2} + O_e, \quad (12)$$

где x – положение последователя;

s – ход последователя;

O – угловое положение кулачка (с учетом фазового угла);

O_e – угол начального выдвигания;

a – угол выдвигания;

O_R – угол начала втягивания;

B – угол втягивания.

Вследствие чего при задании начального угла выдвигания толкатель активирует вертикальное перемещение вверх до достижения крайнего верхнего положения. После этого вал совершает дополнительное вращение на определённый угол. Затем начинается этап обратного хода толкателя, амплитуда которого зависит от начального угла втягивания. Для корректного завершения полного цикла требуется определить величину этого угла. Финальный угол в полностью выдвинутом состоянии рассчитывается как разность между исходным углом запуска и суммой углов, отвечающих за

выдвижение и начало втягивания.

Для моделируемого двигателя принята последовательность срабатывания 1-2. Углы выдвижения и втягивания толкателя равны $\pi/4$ радиан. Угол остановки составляет $3\pi/2$ радиан при полностью выдвинутом положении толкателя.

На рисунке 7 представлена программная модель блока профиля кулачка на базе SimInTech.

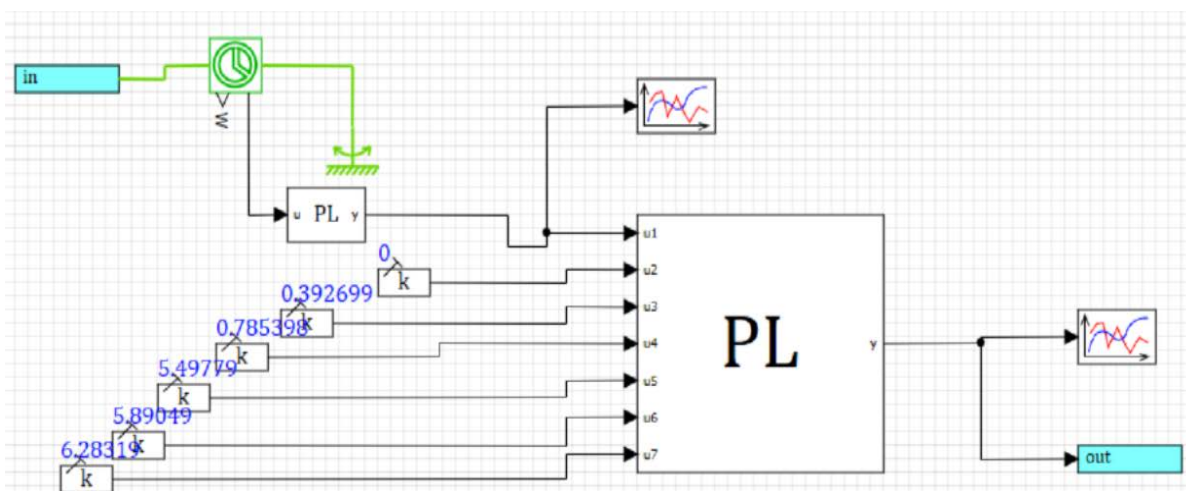


Рисунок 7 – Программная модель блока профиля кулачка на базе SimInTech.

На рисунке 8 представлен график рассчитанного угла с идеального датчика вращательного движения.

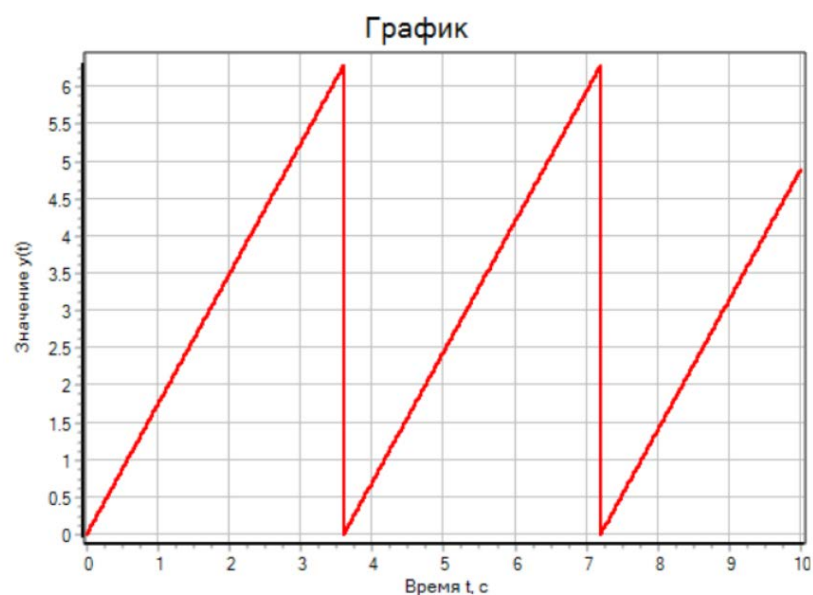


Рисунок 8 – График рассчитанного угла с идеального датчика вращательного движения

На рисунке 9 представлен график рассчитанной работы параболической камеры.

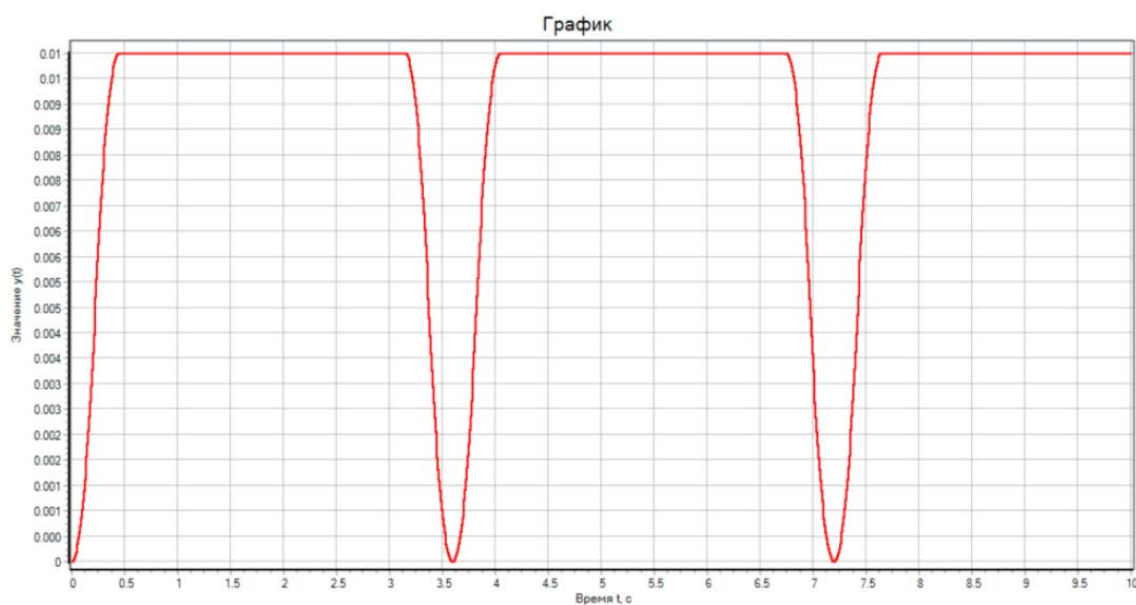


Рисунок 9 – График рассчитанной работы параболической камеры

На рисунке 10 представлен программная модель блока источника

позиционирования на базе SimInTech

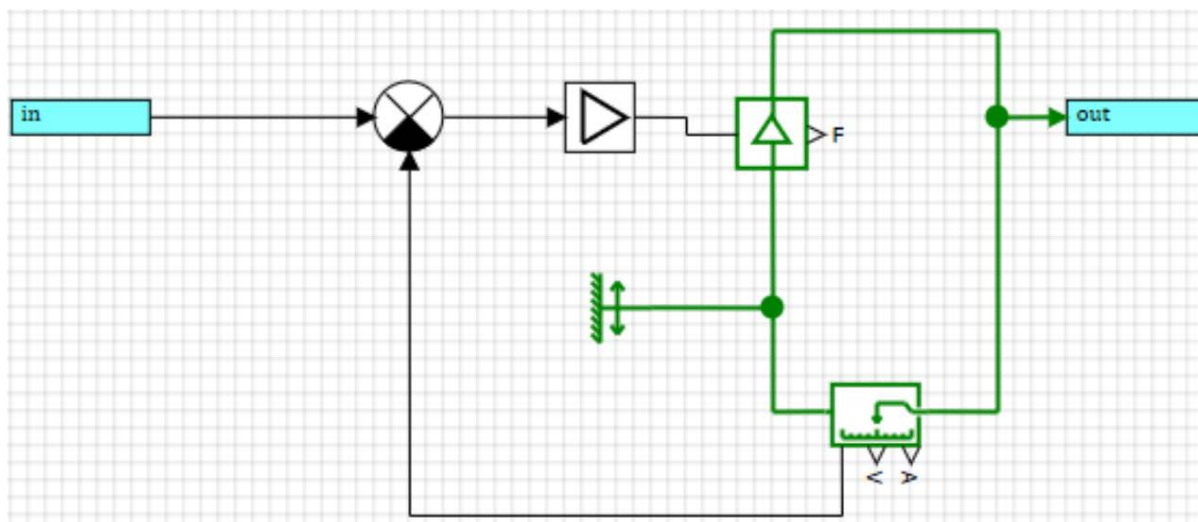


Рисунок 10 – Программная модель блока источника позиционирования на базе SimInTech

На рисунке 11 представлен график рассчитанной поступательной скорости.

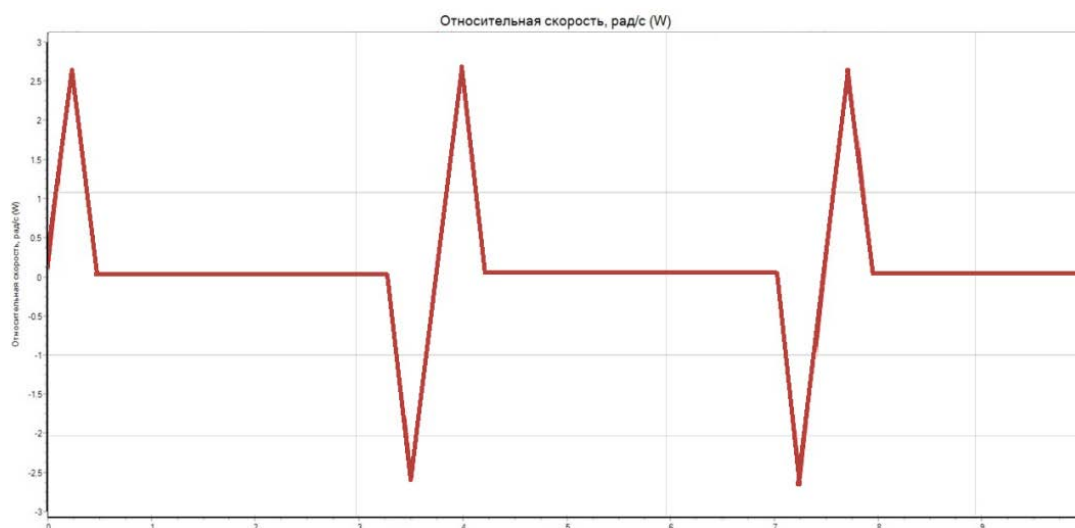


Рисунок 11 – График рассчитанной поступательной скорости

В результате была создана программная реализация распределительного вала, в которой интегрирована модель кулачка с параболическими формами.

Эта модель определяет траекторию движения блока, отвечающего за формирование положений.

3.3 Моделирование топливного насоса высокого давления

В данном разделе описано моделирование рядного топливного насоса высокого давления (ТНВД). Устройство представляет собой двухкомпонентную систему, где каждый идентичный по конструкции элемент подаёт топливо в отдельный цилиндр двигателя. Оба компонента, смоделированные с использованием одинаковых математических моделей, включают две подсистемы: насосную и форсунки. Насосный модуль состоит из механизма управления и плунжерной пары, тогда как модель форсунки интегрирована непосредственно на цилиндр ДВС, как визуализировано на рисунке 12.

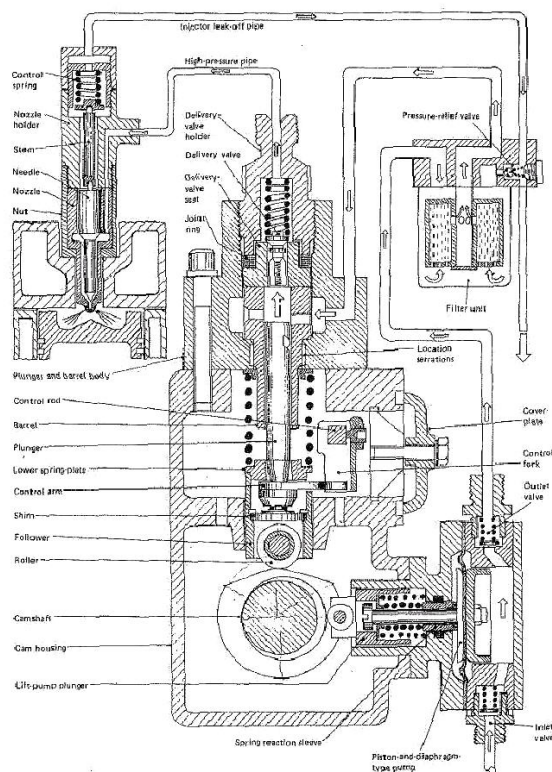


Рисунок 12 – Схема системы впрыска

«Плунжер насоса приводится в движение кулачком, создающим колебания внутри насосной системы. Конструктивно плунжер реализован блоком гидравлических цилиндров одностороннего действия. Блоки поступательного перемещения (жесткий упор и масса) моделируют контакт ролика плунжера с инерционной массой плунжерного узла, при этом кинематическая связь обеспечивается пружинными фиксаторами» [36].

При движении плунжера вниз топливо под давлением заполняет камеру через два канала: впускное и сливное отверстия, схематично представленные на рисунке 13.

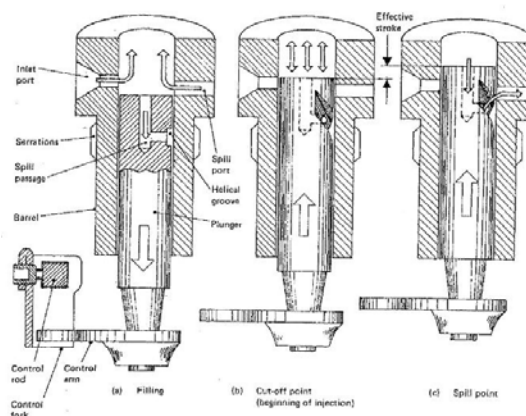


Рисунок 13 – Взаимодействие поршня с управляющими отверстиями в цилиндре

При достижении поршнем верхнего положения, при котором перекрываются оба отверстия впускной камеры, давление на выходе возрастает. При заданном уровне давления форсунка цилиндра двигателя активируется, обеспечивая подачу топлива в камеру сгорания.

«Впрыск топлива прекращается, когда спиральная канавка на боковой поверхности плунжера совмещается со сливным отверстием, соединяющим верхнюю камеру с областью низкого давления через внутренний канал плунжера. Положение спиральной канавки относительно сливного отверстия регулируется вращением плунжера посредством управляющей вилки, что

позволяет контролировать объём топлива, подаваемого в цилиндр» [19].

Программная модель механизма контроля плунжера разработана при следующих допущениях:

«В цепи управления предусмотрены три регулируемых гидроканала: сливное отверстие, впускное отверстие и переменное сечение, формируемое совмещением сливного отверстия со спиральной канавкой плунжера. Проходные сечения сливного и впускного каналов изменяются при перемещении плунжера, при этом открытие сливной канавки зависит от поступательного и вращательного движения плунжера. Для упрощения моделирования угловое смещение, вызванное вращением плунжера, преобразовано в эквивалентное линейное перемещение, комбинируемое с основным ходом плунжера» [3].

В качестве исходного состояния принято верхнее положение плунжера, где движение вверх соответствует положительному направлению оси X. При этом гидроканалы настроены следующим образом: сливное и впускное отверстия запрограммированы на открытие при отрицательном смещении по оси X, тогда как переменный канал (сливное отверстие/канавка) активируется при положительном смещении, синхронизированном с восходящим движением плунжера.

Впускное отверстие традиционно позиционируется выше сливного на установленном расстоянии 1 мм. Вращение плунжера регулирует начальное положение зоны совмещения спиральной канавки со сливным отверстием. Поскольку геометрия канавки статична, динамическая имитация её смещения достигается добавлением эквивалентного линейного перемещения к управляющим элементам. При увеличении амплитуды эквивалентного сигнала ускоряется открытие сливного канала, вследствие чего снижается объём топлива, подаваемого в цилиндр. Максимальное значение сигнала соответствует идеальному такту работы, при этом сливное отверстие сохраняет постоянную открытость в течение всего цикла.

Таким образом, реализована модель топливного насоса высокого

давления (ТНВД), обеспечивающая дозированную подачу топлива в целевой цилиндр двигателя.

3.4 Моделирование форсунки

Конструкция форсунки включает блок с игольчатыми клапанами и гидроцилиндр, функционирующий в одном направлении. Когда система находится в нерабочем состоянии, игла фиксируется под действием затянутой пружины, не позволяющей топливу вытекать. Процесс впрыска начинается при достижении давления в 1000 бар – это значение достаточно для сжатия пружины и открытия прохода, через который топливо поступает в цилиндр.

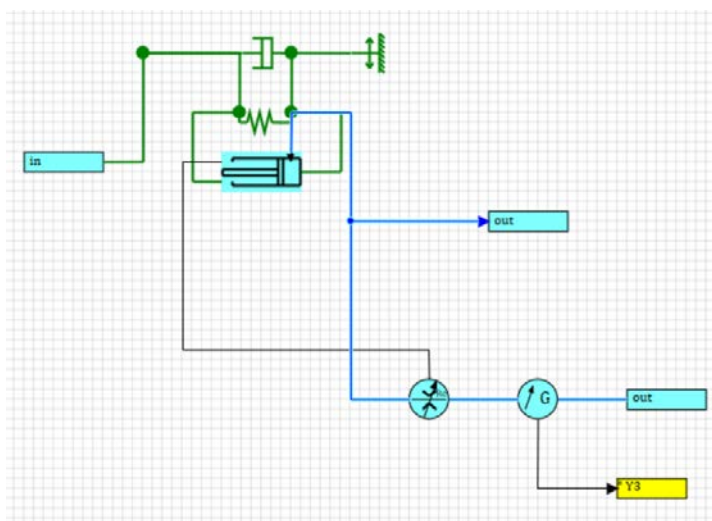


Рисунок 14 – Программная модель форсунки на базе SimInTech

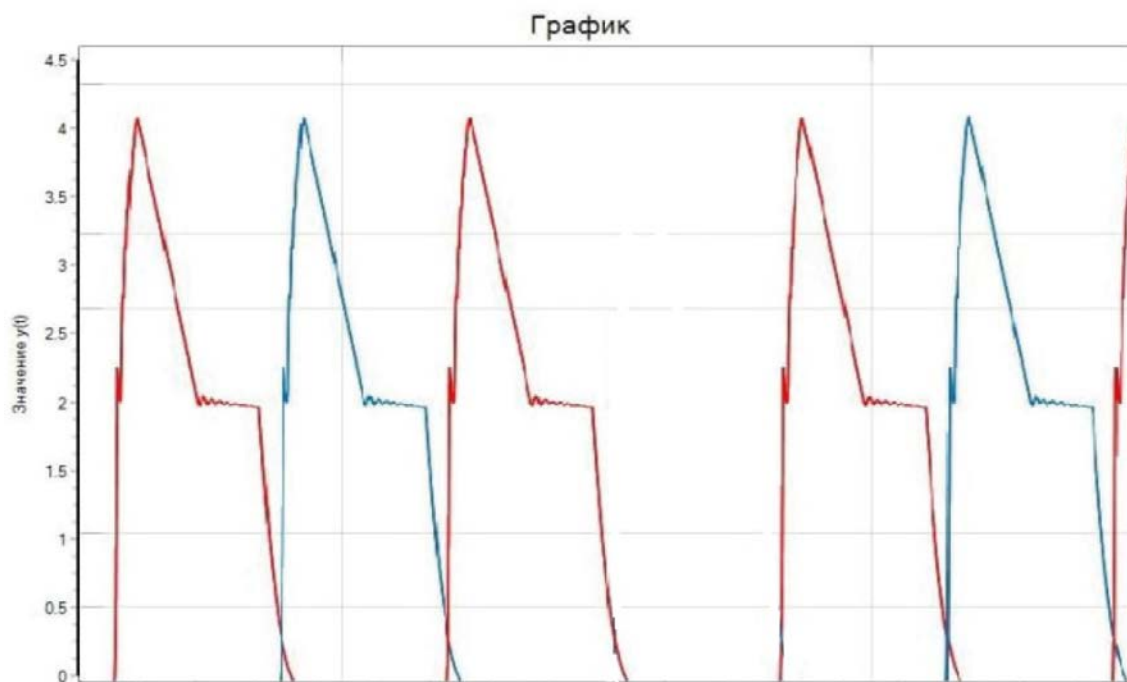


Рисунок 15 – График рассчитанной скорости потока

Выводы по третьей главе.

В данной главе представлена реализация цифровой модели топливной системы на базе SimInTech, в том числе разработка форсунки, реализация распределительного вала, построение модели впрыскивающего насоса, и наконец были представлены методы исследования.

Заключение

В данной бакалаврской работе на тему «Моделирование работы блока из трёх форсунок в ДВС на базе SimInTech» была разработана программная модель форсунки в ДВС.

Проведён физический анализ процессов, протекающих в системе подачи топлива двигателя внутреннего сгорания: подробно исследованы динамика потока, термодинамические параметры и конструктивные особенности каждого узла системы.

В среде SimInTech создана цифровая модель форсунки, позволяющая воспроизводить ход впрыска с высокой степенью точности и использовать полученные результаты для модернизации схемы подачи топлива и повышения КПД работы двигателя.

Исследование реализовано с применением отечественной платформы SimInTech при построении математических моделей, что повышает его научно-практическую ценность для отечественных инженеров: разработанный метод выступает инновационным инструментом расчёта и оптимизации топливной аппаратуры в рамках политики импортозамещения и укрепления технологической независимости.

В результате выполнения бакалаврской работы получены данные, имеющие ключевое значение для определения точных параметров топливоподачи. В частности, разработанная модель блока из трёх форсунок ДВС позволяет установить взаимосвязь между конструктивными характеристиками и эффективностью распыла топлива, что создаёт основу для оптимизации процесса впрыска.

Бакалаврская работа охватила исследование рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания, включая детальный анализ системы топливного впрыска. Разработана математическая модель блока из трёх форсунок ДВС с последующим изучением его характеристик.

Список используемых источников

1. Андреев В.П., Козлов А.В. Моделирование гидродинамических процессов в топливных форсунках. – М.: Техносфера, 2019. – 180 с.
2. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
3. Беляев Е.Н. SimInTech в задачах автоматизации инженерных расчетов. – СПб.: Лань, 2021. – 224 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. Гришин Ю.А., Кулешов А.С. Моделирование процессов впрыска топлива в ДВС. – М.: Машиностроение, 2015. – 204 с.
6. Гусев Д.А., Морозов И.И. Верификация математических моделей ДВС: методы и практика. // Двигателестроение. – 2022. – № 4. – С. 34-41.
7. Дмитриев А.В., Иванов В.П. Современные методы моделирования топливных систем двигателей. – СПб.: Политехника, 2018. – 156 с.
8. Ермаков С.В. Экологические аспекты оптимизации работы ДВС. – Новосибирск: Наука, 2020. – 156 с.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
10. Иванов А.А. Моделирование динамических систем в SimInTech: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2020. – 112 с.
11. Климов Д.М., Соколов А.Р. Численное моделирование распыления топлива в камере сгорания. – Казань: КНИТУ, 2018. – 98 с.
12. Кулешов А.С. Численные методы оптимизации процессов впрыска в ДВС // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2019. – № 5. – С. 45-57.
13. Лаптев А.Г. Современные системы впрыска Common Rail: теория и практика. – М.: За рулём, 2017. – 320 с.
14. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: URSS, 2016.

– 576 с.

15. Мизернюк Г.Н., Петров Л.И. Применение SimInTech для моделирования топливных форсунок // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 18-23.

16. Новиков А.С. Калибровка моделей в SimInTech на примере топливной системы. // Инженерный вестник. – 2021. – № 12. – С. 55-62.

17. Орлов А.А. Патент РФ № 2654321. Устройство форсунки ДВС с регулируемым распылением. – 2018.

18. Павлов С.В. Моделирование работы систем впрыска ДВС с использованием сред визуального программирования. – Казань: КГТУ, 2017. – 89 с.

19. Петров К.Л. Химическая кинетика в задачах горения топлива. – Томск: ТПУ, 2019. – 210 с.

20. Родионов А.И. Методы оптимизации в инженерии: учебник. – М.: Инфра-М, 2020. – 308 с.

21. Розенблит Г.Б. Тепломассообмен в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 2005. – 328 с.

22. Семёнов В.Ю. Сравнительный анализ SimInTech и MATLAB/Simulink для моделирования ДВС. // Цифровая инженерия. – 2023. – № 1. – С. 22-29.

23. Симсон А.Э. Импульсные процессы в топливных системах ДВС. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 144 с.

24. Тарасов Е.В. Экспериментальные исследования работы форсунок при высоком давлении. – Хабаровск: ДВГУПС, 2021. – 132 с.

25. Федоров Р.Н. Динамика многофазных сред в системах впрыска. – М.: Физматлит, 2017. – 278 с.

26. Фомин Ю.А. Топливная аппаратура дизелей: Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.

27. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 535 с.

28. Широков Д.А. Техническая диагностика форсунок ДВС. – Уфа: УГАТУ, 2019. – 114 с.
29. Яковлев А.А. Методология создания цифровых двойников в двигателестроении. // Вестник МАДИ. – 2022. – № 3. – С. 45-53.
30. Alkidas A.C. Fuel Injection Dynamics in Diesel Engines // SAE Techn. Pap. Ser. – 2016. – N 2016-01-0854. – P. 1-12.
31. Babajide Kolade, Thomas Morel. Coupled 1D-3D Analysis of Fuel Injection in Diesel Engines // SAE Tech. Pap. Ser. – 2020. – N 2020-01-0321. – P. 1-15.
32. Babajide Kolade. Advanced Fuel Injection Systems: Challenges and Solutions. – Springer, 2021. – 290 p.
33. Gustavsson J., Golovitchev V.I. CFD Modeling of Fuel Spray in Combustion Chambers // SAE Tech. Pap. Ser. – 2019. – N 2019-01-0287. – P. 1-20.
34. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. – 2nd ed. – McGraw-Hill, 2018. – 1024 p.
35. Hooke R., Jeeves T.A. Optimization of Fuel Injection Parameters Using Direct Search Methods // Journal of Automotive Engineering. – 2018. – Vol. 12. – P. 45-59.
36. Payri R., Desantes J.M. Fuel Injection Systems in Diesel Engines. – SAE International, 2019. – 180 p.
37. Reitz R.D. Advances in Modeling Atomization Processes in Diesel Engines // Atomization and Spray Technology. – 2021. – Vol. 34. – P. 112-130.
38. SimInTech Documentation: User Guide and Technical Reference. – SimInTech LLC, 2023. – URL: <https://simintech.com/docs> (дата обращения: 10.10.2023)
39. Stephenson P.W. Modeling of Intake and Injection Processes in Modern Engines // SAE Tech. Pap. Ser. – 2022. – N 2022-01-1005. – P. 1-14.
40. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. – 3rd ed. – Pearson, 2020. – 520 p.