

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
« ____ » _____ 2025 г.

Разработка интерактивной системы расчёта технологических параметров
двигателей внутреннего сгорания

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУРГУ-090301.2025.405 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.т.н., доцент каф. ЭВМ
_____ Ю.Б. Кухта
« ____ » _____ 2025 г.

Автор работы,
студентка группы КЭ-405
_____ А.С. Демченко
« ____ » _____ 2025 г.

Нормоконтролёр,
ст. преподаватель каф. ЭВМ
_____ С.В. Сяськов
« ____ » _____ 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭВМ

_____ Д.В. Топольский

«___» _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу бакалавра
студентке группы КЭ-405

Демченко Анастасия Сергеевна

обучающемуся по направлению

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

1. **Тема работы:** «Разработка интерактивной системы расчёта технологических параметров двигателей внутреннего сгорания»
утверждена приказом по университету от 21 апреля 2025 г. № 648-13/12.
2. **Срок сдачи студентом законченной работы:** 01 июня 2025 г.
3. **Исходные данные к работе:**
Двигатель внутреннего сгорания 2AR-FE:
 - 3.1. Объем двигателя 2493 куб.см.
 - 3.2. Максимальная мощность 169-184 л.с.
 - 3.3. Расход топлива 7,9-11,2 л/100 км.
 - 3.4. Тип двигателя – рядный, 4-цилиндровый.
 - 3.5. Степень сжатия 10,4.

- 3.6. Диаметр цилиндра 90 мм.
- 3.7. Ход поршня 98 мм.
- 3.8. Количество клапанов на цилиндр 4.

4. Перечень подлежащих разработке вопросов:

- 1. Аналитический обзор научно-технической литературы в сфере разработки и использования интерактивных систем.
- 2. Разработка алгоритмов интерактивной системы.
- 3. Реализация интерактивной системы.
- 4. Тестирование интерактивной системы.

5. Дата выдачи задания: 2 декабря 2024 г.

Руководитель работы _____/Ю.Б. Кухта/

Студентка _____/А.С. Демченко /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Этап	Срок сдачи	Подпись руководителя
Аналитический обзор научно-технической литературы в сфере разработки и использования интерактивных систем	03.03.2025	
Проектирование интерактивной системы	22.03.2025	
Реализация интерактивной системы	12.04.2025	
Тестирование интерактивной системы	26.04.2025	
Компоновка текста работы и сдача на нормоконтроль	22.05.2025	
Подготовка презентации и доклада	30.05.2025	

Руководитель работы _____ / Ю.Б. Кухта /

Студентка _____ / А.С. Демченко /

Аннотация

А.С. Демченко. Разработка интерактивной системы расчёта технологических параметров двигателей внутреннего сгорания. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ВШ ЭКН; 2025, 58 с., 11 ил., библиогр. список – 15 наим.

В рамках выпускной квалификационной работы проведен аналитический обзор научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему.

Разработаны и реализованы алгоритмы и структуры данных, позволяющие визуализировать трехмерные модели двигателей внутреннего сгорания в виде интерактивных схем и графиков, что облегчает понимание технологических параметров и потенциальных мест поломок.

С использованием разработанной системы визуализации создана тестовая программа в результате выполнения которой была проведена проверка функционала модуля «Визуализация», по итогам которой получены корректные двухмерные представления технологических параметров двигателей внутреннего сгорания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В СФЕРЕ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ	9
1.1. ИНТЕРАКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	9
1.2. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ	12
1.3. ОБЗОР АНАЛОГОВ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ	14
1.4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	18
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ	21
2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И НЕФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ	21
2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	22
2.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИТЕРФЕЙСА ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ	29
3. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	34
4. ТЕСТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ	45
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	56

ВВЕДЕНИЕ

Применение технологии цифровых двойников позволяет существенно сократить затраты времени и средств на создание и постановку на производство новых изделий, модернизацию серийно выпускаемой продукции, оценить научную обоснованность и технологическую целесообразность разрабатываемого или готового изделия в условиях эксплуатации, проследить на различных стадиях жизненного цикла изделия принятые технические решения [15]. Перечисленное в полной мере относится к поршневым двигателям внутреннего сгорания (ДВС) – основному источнику энергии для наземных транспортных средств и малых энергетических установок [15].

В современном цифровом мире интерактивные веб приложения стали ключевым элементом нашей жизни. Они обеспечивают уникальное взаимодействие с пользователями, делая выполнение задач удобным и понятным. Главное преимущество – интерактивность, позволяющая пользователям активно взаимодействовать с контентом, а не просто его просматривать. Пользователи могут вводить данные, выполнять действия и получать обратную связь. Это создает персонализированный опыт и позволяет разработчикам создавать гибкие функциональные решения [5]. Именно эта интерактивность делает веб-приложения настолько востребованными и эффективными. Возможность активного участия в процессе, получения мгновенной обратной связи и контроля над происходящим повышает вовлеченность пользователей и значительно улучшает результаты.

Таким образом, объединение технологии цифровых двойников с интерактивными веб-приложениями может существенно повысить эффективность разработки и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Цифровые двойники позволяют моделировать поведение двигателей в

различных условиях, оптимизировать их конструкцию и прогнозировать потенциальные проблемы, что может быть представлено в интерактивном формате через веб-приложения. Это не только упрощает процесс проектирования и тестирования, но и делает его более доступным и понятным для пользователей.

Актуальность данной темы:

1. Активное использование цифровых технологий в имитации сложных технологических процессов.
2. Использование интерактивных систем для подготовки квалификационных кадров, способных эффективно использовать цифровые технологии в производстве.
3. Обеспечение более глубокого понимания принципов работы технологических процессов через практическое взаимодействие с интерактивными системами.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка интерактивной системы для расчёта технологических параметров двигателей внутреннего сгорания

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Аналитический обзор научно-технической литературы в сфере разработки и использования интерактивных систем.
2. Проектирование интерактивной системы.
3. Реализация интерактивной системы.
4. Тестирование интерактивной системы.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В СФЕРЕ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ

1.1. ИНТЕРАКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Интерактивная система (interactive system) – система компонентов аппаратного и программного обеспечения, которая получает информацию, вводимую пользователем, и передает ему свой ответ, помогая в работе или выполнении задачи [3].

Классификация интерактивных систем:

Интерактивные системы делятся на несколько видов таких как прототип (DTP), экземпляр (DTI), агрегированный двойник (DTA).

1. Прототип (DTP) – представляет собой виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства оригинала.
2. Экземпляр (DTI) – содержит данные обо всех характеристиках и эксплуатации физического объекта, включая трехмерную модель, и действует параллельно с оригиналом.
3. Агрегированный двойник (DTA) – вычислительная система из цифровых двойников и реальных объектов, которыми можно управлять из единого центра и обмениваться данными внутри [13].

Интерактивные системы используются в самых различных отраслях производства.

Отрасли, где используются системы:

1. Образование.
2. Бизнес и реклама.
3. Медицина и здравоохранение.

Рассмотрим более подробно про каждую из отраслей, приведенных в списке:

1. Образование.

Использование интерактивных систем в образовании стало одним из наиболее перспективных направлений в последние годы. Эти системы позволяют сделать процесс обучения более увлекательным, наглядным и эффективным. Основные компоненты интерактивных систем в образовании включают:

Интерактивные доски – это современная замена традиционным классным доскам. Они позволяют преподавателям использовать мультимедийные ресурсы, такие как видео, изображение и интерактивные симуляции, для иллюстрации сложных концепций. Ученики могут взаимодействовать с доской с помощью специальных стилусов или пальца, что делает процесс обучения более интерактивным;

Интерактивные презентации – это не просто статичные слайды, а динамические инструменты, которые могут включать видео, анимации и тесты. Они позволяют преподавателям создавать увлекательные уроки, которые держат внимание учеников и способствуют лучшему усвоению информации;

Образовательные игры – мощный инструмент для обучения. Они могут быть разработаны для различных возрастных групп и дисциплин, от математических задач до исторических событий. Игры делают процесс обучения увлекательным и мотивирующим, поскольку ученики могут получать награды за выполнение заданий и участвовать в соревнованиях;

Мультимедийные инструменты включают в себя широкий спектр технологии, таких как виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR) и 3D-моделирование. Эти технологии позволяют создавать иммерсивные образовательные среды, которые помогают ученикам лучше понять сложные концепции и взаимодействовать с ними на практике.

2. Бизнес и реклама.

использование интерактивных технологий в бизнесе и рекламе стало ключевым инструментом для привлечения клиентов, улучшения коммуникаций и повышение эффективности маркетинговых кампаний. Основные компоненты интерактивных технологий в бизнесе включают:

Сенсорные столы – эти устройства используются для проведения небольших презентаций в интерактивном режиме. Они позволяют менеджерам легко демонстрировать информацию о продуктах или услугах, делая презентации более увлекательными и интерактивными.

Информационные терминалы – эти терминалы имеют сенсорные экраны, на которых клиенты могут получить подробную информацию о продуктах или услугах. Также клиент может просматривать видео, фотографии и оформлять прямо на месте.

3. Медицина и здравоохранение.

Использование интерактивных систем в медицине стало ключевым фактором в улучшении качества медицинского обслуживания, обучения медицинских работников и коммуникацией между пациентами и медицинским персоналом. Основные области применения интерактивных систем в медицине включают:

Симуляция хирургических операций – интерактивные симуляторы позволяют медицинским работникам практиковать хирургические навыки на виртуальных моделях, что снижает риск ошибок и повышает уровень подготовки.

Анализ медицинских изображений – интерактивные системы, в сочетании с искусственным интеллектом (ИИ), позволяют более точно анализировать медицинские изображения. Что помогает в диагностике заболеваний.

Мониторинги здоровья – носимые устройства и мобильные приложения собирают данные о здоровье пациентов, что позволяет проводить раннюю диагностику и профилактику заболеваний.

Электронные медицинские карты – интерактивные системы облегчают ведение и доступ к электронным медицинским картам, что повышает эффективность работы медицинского персонала.

1.2. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ

Есть несколько способов создания интерактивных систем:

- графическая 3D-модель;
- модель на базе интернета вещей;
- интегрированные математические модели – такие как CAE-системы (Computer-aided engineering, решение для инженерного анализа, расчетов и симуляций) для инженерных расчетов;
- технологии визуализации – включая голограммы, AR и VR.

Этапы создания интерактивной системы выглядят следующим образом:

1) Исследование объекта.

Этот этап предшествует разработке только в том случае, если у цифрового двойника есть реальный прототип – например, работающее предприятие или система коммуникаций. Тогда разработчики составляют детальную карту прототипа, воспроизводят все процессы и характеристики. При этом важно изучить объект в разных условиях.

2) Моделирование цифровой копии объекта.

Этот этап может быть первым, если реального прототипа еще нет и создание цифрового двойника ему предшествует. Например, в строительстве или дизайне, когда вначале создается копия 3D-модель, а уже потом – оригинал заданий или другого объекта.

Для построения комплексной модели используются математические методы вычисления и анализа:

- метод конечных элементов (FEA – Finite Element Analysis), позволяющий рассчитать эксплуатационную нагрузку. Его применяют,

для расчета механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики;

- метод FMEA-модели (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) необходимы для анализа надежности систем и выявления наиболее критических шагов производственных процессов;
- метод CAD-модели (Computer Aided Design/Drafting, средства автоматизированного проектирования) используется, чтобы рассчитать внешние характеристики и структуру объектов, материалов и процессов.

3) Воплощение модели.

Рассчитанную ранее архитектуру цифрового двойника переносят на специальные платформы – такие как Siemens или Dassault Systems. Они объединяют математические модели, данные и интерфейс для управления цифровым двойником, превращая его в динамическую систему. Этот этап можно сравнить с трансформацией программного кода в программу или приложение с визуальным интерфейсом, который понятен любому пользователю.

4) Тестирование основных процессов работы на цифровом двойнике.

Главная цель этого этапа – спрогнозировать, как будет вести себя объект или система в обычном режиме и при внештатных ситуациях, чтобы избежать поломок и перегрузки после запуска. Для этого к процессу подключают технических аналитиков, которые собирают большой массив данных в ходе испытаний, чтобы просчитать алгоритмы для любых возможных условий и ситуаций.

5) Запуск и наладка.

Если предыдущий этап провели корректно, в процессе работы реального прототипа можно избежать до 90% сбоев и поломок. Однако часть ситуаций все же не удастся спрогнозировать, и тогда их отслеживают уже на этапе запуска и наладки цифрового двойника.

б) Корректировка и развитие оригинального объекта или системы.

Далее инженеры продолжают работать с интерактивными системами как с реальным физическим объектом до тех пор, пока не будут отлажены все системы и процессы. По результатам этой работы в оригинальный объект вносят изменения, чтобы добиться его максимальной эффективности.

1.3. ОБЗОР АНАЛОГОВ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ

Программы, использующиеся для расчетов параметров ДВС:

1. ДИЗЕЛЬ-РК.

Эта программа предназначена для расчетов и оптимизации двигателей внутреннего сгорания, включая дизели, бензиновые и газовые двигатели. Она позволяет рассчитывать различные параметры, такие как расход топлива, выбросы вредных веществ и оптимизировать топливную аппаратуру.

Основные функции, которые выполняет программа:

- тепловой расчет и оптимизация параметров двигателя (фазы газораспределения, системы наддува);
- моделирование сгорания с учетом формы камеры, вихревых потоков и характеристик впрыска (РК-модель);
- анализ многоразового впрыска, включая пилотные порции и низкотемпературное горение;
- расчет выбросов оксидов азота на основе схемы Зельдовича и кинетических показателей;
- поддержка многотопливных режимов (смеси дизеля с биотопливом).

Преимущества данной программы:

- высокое быстродействие для многопараметрической оптимизации;
- поддержка многотопливных режимов;
- интеграция с оптимизированными пакетами (IOSO NM);
- мастер настроек для начинающих пользователей.

Недостатки:

- не моделирует неравномерность работы цилиндров;
- Ограниченный анализ газодинамики в трубопроводах [4].

2. HYDSIM.

Эта программа предназначена для моделирования систем топливоподачи дизелей. Она является частью инструментов для автоматизированного проектирования двигателей и позволяет симулировать процессы в двигателях.

Основные функции программы:

- расчет характеристики впрыска (давление, форма факела, диаметр капли);
- анализ кавитации, турбулентности и взаимодействия струй топлива;
- моделирование электромагнитных форсунок с визуализацией процесса (2-D анимация);
- интеграция с CFD-программами (Ansys, fire) для анализа смесеобразования.

Преимущества данной программы:

- сокращение времени проектирования топливной аппаратуры;
- оптимизация формы камеры сгорания и параметров впрыска. [14]
- предварительная визуализация процессов посредством 2D-анимации;
- совместимость с Ansys и Fire для CFD-расчетов;
- динамический анализ гидравлических систем.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- требуется знания по гидродинамике [1].

3. ВПРЫСК.

Программа для моделирования процессов впрыска топлива в двигателях внутреннего сгорания. Это отечественный аналог зарубежных программ и широко используется в России.

Основные функции программы:

- гидравлические и двигательные расчеты ТПА (форсунки, магистрали, клапаны);
- проектирование традиционных и альтернативных схем топливоподачи;
- прогнозирование утечек, задержек впрыска и взаимодействие элементов системы.

Преимущества программы:

- адаптация под российские стандарты ДВС;
- простой интерфейс для обучения.

Недостатки:

- ограниченная функциональность по сравнению с HydSim;
- отсутствие оформления с CFD-пакетами.

4. PYSTON-DNT.

Программа создана для реализации вторичной кинематики поршня в цилиндрах главных дизельных двигателей. Она анализирует сложное взаимодействие между поршнем, поршневыми кольцами и стенками цилиндра с учетом тепловых и движущихся функций.

Основные функции программы:

- анализ поперечных смещений и угловых колебаний поршня в цилиндре;
- моделирование контактных сил между юбкой поршня и стенкой цилиндра;
- тепловые деформации юбки поршня и цилиндра;
- гидродинамические воздействия масляной пленки;
- прогнозирование износа цилиндропоршневой группы;
- снижение шума и вибраций для выбора оптимальных зазоров.

Преимущества:

- учет тепловых деформаций и смазочного слоя;

- снижение шума посредством оптимизации зазоров.

Недостатки:

- узкая специализация (только динамика поршня);
- ограниченная документация на английском языке.

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика по вышеперечисленным программам.

Таблица 1 – обзор аналогов

Преимущество/Программа	ДИЗЕЛЬ-РК	HYDSIM	ВПРЫСК	PISTON-DHT	Онлайн Калькулятор
Оптимизация топливной аппаратуры	+	-	-	-	-
Моделирование газообмена	-	-	-	-	-
Симуляция впрыска топлива	-	+	+	-	-
Расчет выбросов вредных веществ	+	-	-	-	-
Поддержка различных видов топлива	-	-	-	-	-
Расчет характеристик поршней	-	-	-	+	+
Визуализация поломки	-	-	-	-	-

Вывод: Из таблицы 1.1 видим, что различные программы специализируются на отдельных аспектах анализа и моделирования двигателей. Некоторые программы, такие как ДИЗЕЛЬ-РК, охватывают расчет выбросов вредных веществ, в то время как HYDSIM и ВПРЫСК фокусируются на симуляции впрыска топлива. Онлайн калькуляторы и PISTON-DHT предлагают расчет характеристик поршней.

1.4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Особенности работы двигателя внутреннего сгорания.

Двигатель внутреннего сгорания работает на основе термического расширения. Когда топливно-воздушная смесь воспламеняется внутри цилиндра, она сгорает, выделяя большое количество энергии. Эта энергия преобразуется в механическую работу благодаря расширению газов, которое толкает поршень вниз. Поршень, в свою очередь, связан с коленчатым валом, который преобразует возвратно-поступательное движение поршня в вращательное движение.

Этот процесс происходит в каждом цилиндре двигателя, и суммарная энергия от всех цилиндров передается на коленчатый вал, который вращает колеса транспортного средства или выполняет другую полезную работу.

Большинство современных двигателей внутреннего сгорания работают на четырехтактном цикле. Этот цикл включает в себя четыре основных такта:

1. Такт впуска – в этот момент клапан впуска открывается, и топливно-воздушная смесь засасывается в цилиндр через впускной коллектор. Поршень движется вниз, создавая вакуум, который втягивает смесь в цилиндр.
2. Такт сжатия – клапаны впуска и выпуска закрыты, и поршень движется вверх, сжимая топливно-воздушную смесь в камере сгорания. В бензиновых двигателях в этот момент свеча зажигания подает искру для воспламенения смеси, а в дизельных двигателях смесь воспламеняется из-за высокого давления сжатия.
3. Такт рабочий (воспламенение) – в этот момент смесь воспламеняется, и поршень толкается вниз. В бензиновых двигателях это происходит из-за искры от свечи зажигания, а в дизельных двигателях – из-за

самовоспламенения смеси. Расширение газов толкает поршень вниз, что вращает коленчатый вал.

4. Такт выпуска – клапан выпуска открывается, и поршень движется вверх, выталкивая отработанные газы из цилиндра через выпускной коллектор. Эти газы затем выводятся из двигателя через систему выпуска [2,6].

Существуют два основных типа двигателей внутреннего сгорания: бензиновые и дизельные.

Бензиновые двигатели – в этих двигателях топливно-воздушная смесь воспламеняется искрой от свечи зажигания. Бензиновые двигатели обычно имеют более высокие обороты и используют более легковоспламеняющиеся топливные смеси.

Дизельные двигатели – топливно-воздушная смесь воспламеняется из-за высокого давления сжатия. Дизельные двигатели обычно более эффективны и имеют крутящий момент на низких оборотах [12].

Двигатель внутреннего сгорания включает в себя несколько основных систем, которые обеспечивают его работу:

1. Впускная система – эта система подает воздух или топливно-воздушную смесь в цилиндры двигателя. Она включает в себя впускной коллектор, впускные клапаны и систему впрыска топлива.
2. Выпускная система – эта система удаляет отработанные газы из цилиндров и выводит их из двигателя. Она включает в себя выпускной коллектор, выпускные клапаны и систему выпуска.
3. Топливная смесь – эта система обеспечивает подачу топлива в двигатель. Она включает в себя топливный бак, топливный насос и форсунки для впрыска топлива в цилиндры [9, 11].

Двигатель внутреннего сгорания преобразует химическую энергию топлива в механическую работу. Этот процесс происходит благодаря сгоранию топливно-воздушной смеси внутри цилиндров, что приводит к

расширению газов и толканию поршней. Механическая энергия, полученная от поршней, передается на коленчатый вал, который преобразует возвратно-поступательное движение поршней в вращательное движение.

Это вращательное движение затем передается на коробку передач, которая распределяет мощность между колесами транспортного средства или другими механизмами, выполняющими полезную работу. Таким образом, двигатель внутреннего сгорания обеспечивает движение транспортных средств и работу различных машин и механизмов [7, 13].

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Проектирование веб-приложения для расчета технологических параметров двигателей внутреннего сгорания включает в себя разработку удобного интерфейса, который позволяет пользователям легко вводить необходимые данные и получать точные результаты. Основная суть этого приложения заключается в создании интерактивной среды, где пользователи могут моделировать различные сценарии и получать мгновенные результаты, что упрощает процесс проектирования и оптимизации двигателей. Целью проектирования является создание гибкой и масштабируемой системы, которая может быть обновлена и расширена для поддержки новых технологий и требований в области двигателестроения.

2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И НЕФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Функциональные требования:

Модуль расчета технологических параметров (8 тематических блоков с распределением по ключевым направлениям):

1. Определение эффективных показателей двигателя.
2. Расчет корпусных элементов двигателя.
3. Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, расчет поршневой группы.
4. Расчет поршневых колец, расчет поршневого пальца.
5. Расчет шатунной группы, расчет сечения I – I поршневой головки шатуна, расчет напряжений от запрессованной втулки.
6. Расчет кривошипной головки шатуна, расчет стержня шатуна, расчет шатунных болтов.
7. Расчет коленчатого вала, расчет коренных опор коленчатого вала.
8. Расчет элементов механизма газораспределения двигателя.

Интерактивные задачи в каждом блоке с:

- динамическими полями ввода параметров;
- встроенными формулами;
- автоматической верификацией результатов.

Модуль визуализации:

- анимация деформации при превышении нагрузки;
- интерактивная схема с маркерами уязвимых узлов.

Модуль справочный материал:

- предоставление справочного материала о двигателях внутреннего сгорания.

Нефункциональные требования:

- производительность – быстрая загрузка страниц и минимальная задержка при взаимодействии с визуализацией;
- пользовательский интерфейс – интуитивно понятный интерфейс с поддержкой различных устройств.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Математические параметры двигателя внутреннего сгорания образуют комплекс взаимосвязанных величин, определяющих его энергетические, термодинамические и конструктивные характеристики. Рассмотрим ключевые аспекты:

1. Среднее давление механических потерь для двигателей без наддува рассчитывается по формуле (2.1):

$$p_m = a + bc_m, \quad (2.1)$$

где p_m – давление газов перед турбиной, МПа;

a, b – эмпирические коэффициенты;

c_m – средняя скорость поршня, м/с.

Для двигателей с наддувом рассчитывается по формуле (2.2):

$$p_m = \left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{b_1} \cdot (a + bc_m) + p_{\text{нп}}, \quad (2.2)$$

где p_k – давление наддува, МПа;

p_0 – давление окружающей среды, МПа;

b_1 – эмпирические коэффициенты;

c_m – средняя скорость поршня, м/с;

$p_{\text{нп}}$ – среднее давление насосных потерь, МПа.

2. Для расчета средней скорости поршня использовалась следующая формула (2.3):

$$c_m = \frac{S \cdot n}{30}, \quad (2.3)$$

где c_m – средняя скорость поршня;

S – ход поршня, м;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

3. Среднее давление насосных потерь рассчитывается по следующей формуле (2.4):

$$p_{\text{нп}} = 0,0212 - 0,0919p_k + \frac{p_{\text{т}}}{p_k}(0,137p_k - 0,0497), \quad (2.4)$$

где $p_{\text{т}}$ – давление газов перед турбиной, МПа.

4. Для расчета эффективного КПД двигателя использовалась формула (2.5):

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m, \quad (2.5)$$

где η_e – эффективный КПД;

η_i – индикаторный КПД;

η_m – механический КПД.

Для механического КПД двигателя использовалась следующая формула (2.6):

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i}, \quad (2.6)$$

где η_m – механический КПД;

p_e – среднее эффективное давление, МПа;

p_i – среднее индикаторное давление, МПа.

5. Для того чтобы рассчитать удельный эффективный расход топлива приведем формулу (2.7):

$$g_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e}, \quad (2.7)$$

где g_e – удельный эффективный расход;

H_u – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

6. Диаметр цилиндра двигателя рассчитывается по формуле (2.8):

$$D = \sqrt[3]{\frac{1200 \cdot \tau \cdot N_e}{\pi \cdot \left(\frac{S}{D}\right) \cdot p_e \cdot i \cdot n}}, \quad (2.8)$$

где D – диаметр цилиндра двигателя;

N_e – эффективная мощность, кВт;

τ – тактность двигателя;

i – число цилиндров;

S – ход поршня;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

7. Ход поршня рассчитывается по формуле (2.9):

$$S = D \left(\frac{S}{D}\right). \quad (2.9)$$

8. Рабочий объём двигателя находится по формуле (2.10):

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S, \quad (2.10)$$

где V_h – рабочий объём двигателя.

9. Для нахождения литровой мощности используется формула (2.11):

$$N_l = \frac{N_e}{i \cdot V_h} \cdot S, \quad (2.11)$$

где N_l – литровая мощность.

10. Гильза цилиндра:

Гильзы цилиндров являются наиболее нагруженными деталями двигателя, испытывающими напряжения от действия сил газов, бокового давления поршня и термических нагрузений. Основные конструктивные размеры гильз цилиндров устанавливают с учетом получения необходимых прочности и жесткости, обеспечивающих отсутствие овализации цилиндра при сборке двигателя и во время его эксплуатации.

Толщину стенки гильзы цилиндра обычно принимают на основании данных прототипа и проверяют по формуле (2.12):

$$N_{\text{л}} = 0,5 \cdot D \left[\sqrt{\frac{\sigma_z + 0,4 \cdot p_z}{\sigma_z - 1,3 \cdot p_z}} - 1 \right], \quad (2.12)$$

где D – диаметр цилиндра, мм;

p_z – давление газов в конце сгорания, МПа;

σ_z – допустимое напряжение растяжения, МПа.

Предельно допустимые напряжения: $[\sigma_z] = 50 \dots 60$ МПа – для гильз из чугуна; $[\sigma_z] = 80 \dots 100$ МПа – для гильз из стали.

11. Растягивающие напряжения от действия максимальных сил газов находится по формуле (2.13):

$$\sigma_P = p_{z\max} \cdot \frac{D}{2\delta_{\Gamma}}, \quad (2.13)$$

где σ_P – растягивающие напряжения от действия максимальных сил газов;

$p_{z\max}$ – максимальное давление газов в цилиндре, МПа.

Предельно допустимые напряжения: $[\sigma_z] = 30 \dots 60$ МПа – для гильз из чугуна; $[\sigma_z] = 80 \dots 120$ МПа – для гильз из стали

12. Растягивающие напряжения по кольцевому сечению гильзы, формула (2.14):

$$\sigma'_P = P_{z\max} \cdot \frac{D}{4\delta_{\Gamma}}, \quad (2.14)$$

где σ'_p – растягивающие напряжения по кольцевому сечению гильзы;

Предельно допустимые напряжения: $[\sigma_z] = 35 \dots 65$ МПа – для гильз из чугуна; $[\sigma_z] = 85 \dots 125$ МПа – для гильз из стали.

13. Изгибающий момент рассчитывается по формуле (2.15):

$$M_{из} = N_{max} \cdot \frac{a \cdot b}{(a + b)}, \quad (2.15)$$

где $M_{из}$ – изгибающий момент, Н·м;

N_{max} – максимальная нормальная сила по результатам динамического расчета, МН;

a – расстояние от оси поршневого пальца до ВМТ, мм;

b – расстояние от оси поршневого пальца до НМТ, мм.

14. Для расчета напряжения изгиба используется формула (2.16):

$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W}, \quad (2.16)$$

где $\sigma_{из}$ – напряжение изгиба, МПа;

W – момент сопротивления поперечного сечения гильзы, м³.

15. Момент сопротивления поперечного сечения гильзы, формула расчета (2.17):

$$W = 0,1 \cdot \frac{(D_1^4 - D^4)}{D_1}, \quad (2.17)$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения гильзы;

D_1, D – наружный и внутренний диаметры гильзы, м.

16. Термические напряжения (2.18):

$$\sigma_t = E \cdot \alpha_{ц} \cdot \frac{\Delta T}{2(1 - \mu)}, \quad (2.18)$$

где σ_t – термические напряжения, МПа;

E – модуль упругости материала гильзы ($2,2 \times 10^5$ МПа – для стали, $1,1 \times 10^5$ МПа – для чугуна);

$\alpha_{ц}$ – коэффициент теплового расширения материала гильзы цилиндра, 1/К;

ΔT – разность температур наружной и внутренней поверхностей гильзы, К;

μ - коэффициент Пуассона.

17. Расчет головки блока (крышки цилиндра)

Напряжение разрыва в сечении х-х (2.19):

$$\sigma_p = \frac{P_{zmax}}{F_{x-x}}, \quad (2.19)$$

где σ_p – разрыв в сечении х-х, МПа;

P_{zmax} – расчетное разрывное усилие, МН;

F_{x-x} – площадь сечения х-х, м².

Максимальное напряжение разрыва $[\sigma_p]$ не должно превышать 10...15 МПа, поскольку приведенные зависимости не учитывают влияния теплового нагружения.

Для параметров расчетное разрывное усилие формула приведена (2.20):

$$P_{zmax} = p_{zmax} = \frac{\pi D_1^2}{4}. \quad (2.20)$$

Площадь сечения х-х, формула приведена на (2.21):

$$F_{x-x} = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}. \quad (2.21)$$

Данные технологические параметры нужны в дальнейшем для реализации расчетов.

Блок-схема модуля расчет технологических параметров приведена на рисунке 2.1:

На данной схеме показан алгоритм решения задачи. Пользователь вводит значения параметров. После того как пользователь ввел значения, программа проверяет на корректность введенных параметров: все поля заполнены или нет, проверка на то что введены числовые значения параметров. Если все введено корректно программа проверяет введены допустимые значения. Если значения не допустимые, то высвечивается

уведомление с предупреждением об ошибке, и пользователю дается право исправить не корректно введенное значение. Если всё корректно, то запускает расчет формулы.



Рисунок 2.1 – Блок-схема модуля расчет технологических параметров

Блок-схема модуля визуализация показана на рисунке 2.2:

На схеме показан алгоритм показа визуализации. Значения берутся из модуля решения задач. Когда пользователь вводит не корректные значения параметров программа подсвечивает красным цветом потенциальные места поломки на схеме ДВС. Если ошибок в значениях нет, то программа подсвечивает зеленым цветом отсутствие потенциальных мест поломок на схеме ДВС, и переходит к решению следующей задачи.



Рисунок 2.2 – Блок-схема модуля визуализация

2.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИТЕРФЕЙСА ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Веб-приложение для интерактивной системы расчета технологических параметров двигателей внутреннего сгорания включает в себя три основных модуля: модуль расчет технологических параметров, модуль визуализация и модуль справочный материал. Эти модули обеспечивают пользователям возможность практического применения знаний, теоретической подготовки и наглядной интерпретации результатов, что делает процесс обучения с двигателями более эффективным и понятным.

1. Модуль расчет технологических параметров.

Пример расчета

Задача: Максимальный вращающий момент двигателя при частоте вращения 3000 мин⁻¹ составил 116 Н·м. Определить величину эффективной мощности.

Поля для ввода:

- частота вращения коленчатого вала, единицы измерения мин⁻¹;
- максимальный вращающий момент двигателя, единицы измерения Н·м.

Кнопка рассчитать для запуска расчета.

Валидация форм:

- проверка на пустые поля;
- проверка на соответствие формату (числа);

Предупреждение об ошибке:

- если пользователь вводит значение, выходящее за пределы допустимых (например, отрицательную частоту вращения), отображается предупреждение об ошибке.

Отображение результатов:

- поле, отображающее рассчитанную мощность двигателя.

Пример макета «расчет технологических параметров» приведен на рисунке 2.3. На данном рисунке изображено следующее по середине находится название радела (в примере это «Определение эффективных показателей двигателя»), в левом верхнем углу расположена вкладка со справочным материалом, ниже приведен список параметров, которые можно рассчитать. В центре расположен блок с расчетом параметра (эффективная мощность) ниже представлено условие, поля для ввода значений и кнопка рассчитать.

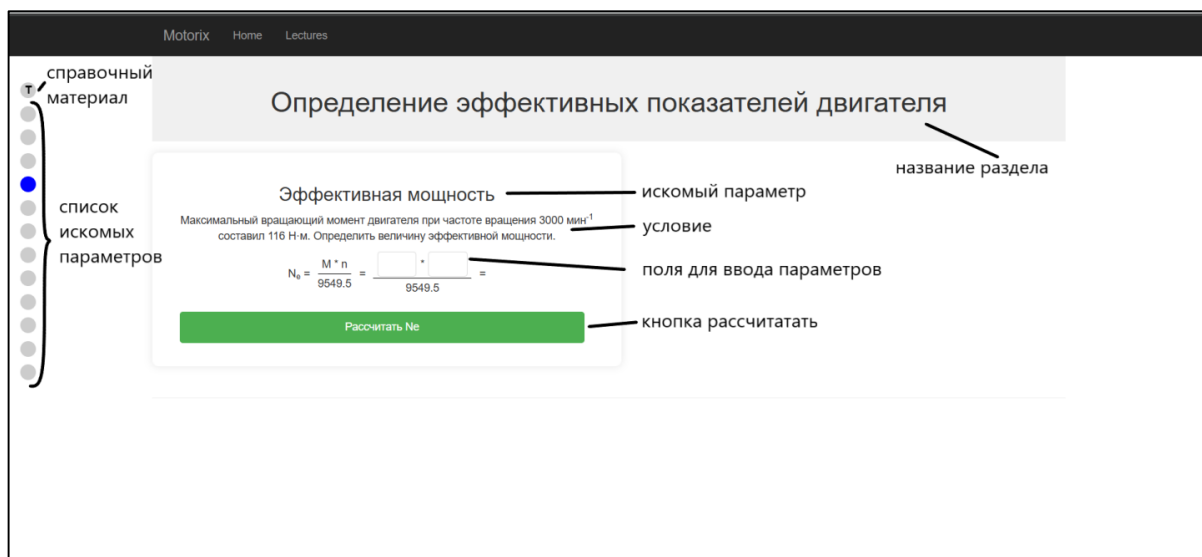


Рисунок 2.3 – Макет модуля расчет технологических параметров

2. Модуль справочный материал

В этом модуле пользователь имеет доступ к справочному материалу, которое включает теоретическую информацию о двигателях внутреннего сгорания, формулы для расчета мощности и других параметров.

Пример макета справочный материал изображен на рисунке 2.4. на рисунке представлена следующая информация по центру сверху представлено название раздела (расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, расчет поршневой группы), в верхнем углу слева находится сама вкладка со справочным материалом. По центру изображен сам справочный материал.



Рисунок 2.4 – Макет модуля лекционный материал

3. Модуль визуализация

Этот модуль связан с модулем расчет технологических параметров и визуализирует результаты расчета. Если пользователь вводит неверные параметры, модуль показывает потенциальные места поломки. Если параметры верны, модуль отображает успешное выполнение расчета.

Визуализация результатов:

- схема двигателя, показывающая потенциальные места поломки при неверных параметрах, и отсутствие поломок при верных значениях
- уведомление о том, что расчет параметра выполнен неверно, и где именно значение вышло за пределы допустимых значений;
- уведомление о том, что расчет параметра выполнен верно и можно перейти к следующему.

Пример макета модуля визуализация изображен на рисунке 2.5. На данном рисунке представлена следующая информация, сверху по середине находится название раздела (в примере это «расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, расчет поршневой группы»), в левом верхнем углу расположена вкладка со справочным материалом, ниже приведен список параметров, которые можно рассчитать. С права

расположен блок с расчетом параметра (напряжение изгиба в днище поршня) ниже представлено условие, поля для ввода значений и кнопка рассчитать. Справа расположена схема, на которой в данном случае изображено место поломки из-за того, что были введены значения, выходящие за пределы допустимых значений.

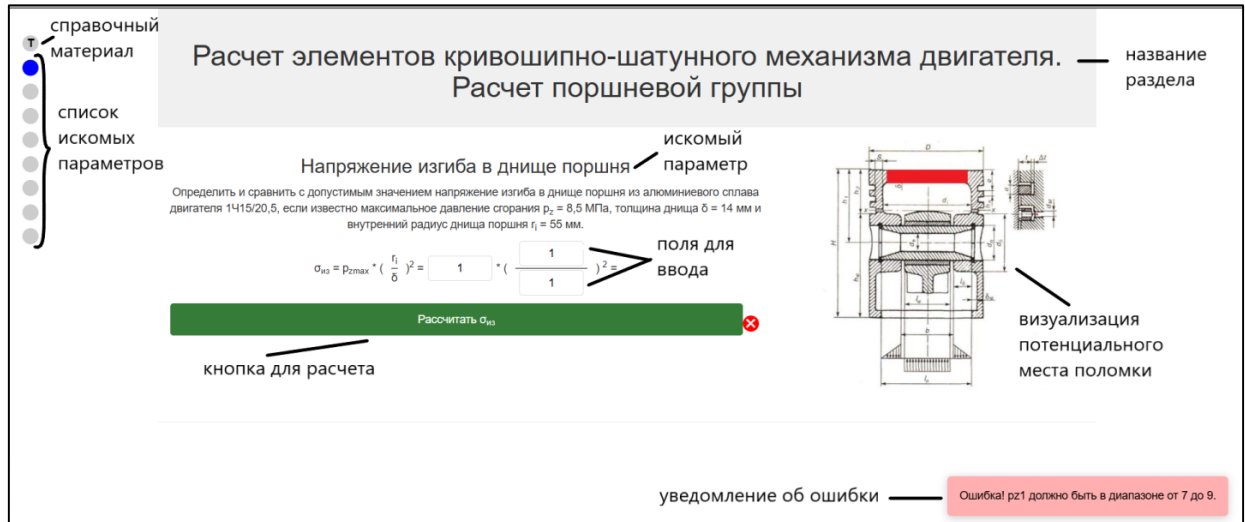


Рисунок 2.5 – Макет модуля визуализация

Выводы:

1. Рассмотрены функциональные и нефункциональные требования к разработке интерактивной системы расчёта технологических параметров двигателей внутреннего сгорания.
2. Выполнено математическое описание базовых технологических параметров двигателя внутреннего сгорания.
3. Представлены макеты и схемы с подробным описанием реализованной интерактивной системы.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Интерактивная система для расчета параметров двигателя внутреннего сгорания построена на основе многослойной архитектуры, которая включает в себя frontend и backend компоненты.

Frontend-часть приложения отвечает за создание интерфейса пользователя и обеспечивает взаимодействие с ним. Для реализации frontend использовались следующие технологии:

HTML (Hyper Text Markup Language) – используется для создания структуры веб-страницы, включая формы для ввода данных и элементы для отображения результатов;

CSS (Cascading Style Sheets) – применяется для стилизации интерфейса, обеспечивая его визуальную привлекательность и удобство использования.

JavaScript – добавляет интерактивность к странице, обрабатывая пользовательский ввод для получения результатов.

Backend-часть приложения отвечает за обработку запросов от frontend и выполнение бизнес-логики. Для backend использовался фреймворк Django на языке программирования Python. Django обеспечивает структуру приложения, обрабатывает запросы и выполняет необходимые расчеты на основе полученных данных.

Обработка данных.

В этом приложении данные обрабатываются в памяти приложения без сохранения в базу данных. Это означает, что все расчеты выполняются в реальном времени на основе введенных пользователем параметров, а результаты отображаются сразу же после обработки запроса. Такой подход

упрощает разработку и позволяет сосредоточиться на функциональности приложения без необходимости настройки и поддержки базы данных.

Эта архитектура позволяет разделить логику приложения на две части, frontend занимается интерактивностью и отображением данных, а backend – обработкой и выполнением расчетов. Такое разделение упрощает разработку и поддержку приложения, а также обеспечивает быстроту и простоту использования.

Блок с расчетом технологических параметров.

Страница «расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, расчет поршневой группы» состоит из 8 искомых параметров и справочного материала. Страница открывается с первого технологического параметра, который нужно посчитать. Для каждого параметра представлена визуализация, которая показывает потенциальные места поломок при не допустимых значениях. Код html страницы приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Структура html-страницы «расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, расчет поршневой группы».

<pre><header> <h1> Решение задач по расчету элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя. Расчет поршневой группы </h1> </header></pre>	<p>Шапка с заголовком, описывающим тему практической работы 3.</p>
<pre><div class="image-side"> <div class="image-wrapper"> расчетах" class="overlay-image" id="errorOverlay1"> <img src="{ % static 'app/images/3.1.2.jpg' % }" alt="Правильные расчеты" class="overlay-</pre>	<p>Блок с визуализацией, изначально показывается обычная схема поршня. Если не корректное значение, то появляется изображением «ошибка в расчетах» и мигает. При верных</p>

Продолжение таблицы 2

<pre>image" id="successOverlay1"> </div> </div></pre>	<p>значениях изображение расчеты).</p> <p>появляется «Правильные</p>
<pre><div class="task-nav"> <div class="task-dot" id="dot-0" onclick="showTask(0)"> T </div> <div class="task-dot" id="dot-1" onclick="showTask(1)"></div> <div class="task-dot" id="dot-2" onclick="showTask(2)"></div> <div class="task-dot" id="dot-3" onclick="showTask(3)"></div> <div class="task-dot" id="dot-4" onclick="showTask(4)"></div> <div class="task-dot" id="dot-5" onclick="showTask(5)"></div> <div class="task-dot" id="dot-6" onclick="showTask(6)"></div> <div class="task-dot" id="dot-7" onclick="showTask(7)"></div> <div class="task-dot" id="dot-8" onclick="showTask(8)"></div> </div></pre>	<p>Навигационные элементы в виде круглых точек, позволяющих переключаться между задачами и лекционным материалом.</p>
<pre><div class="task" id="task-0"> <div class="theory"> <h2>Теоретический материал:</h2> </div> </div></pre>	<p>Справочный материал</p>
<pre><div class="formula-container"> $\sigma_{из}$ = p<sub>zmax</sub> * (</pre>	<p>Формула для расчёта напряжение изгиба в днище поршня.</p>

Окончание таблицы 2

<pre> <div class="fraction"> r<sub>i</sub> δ </div> <sup>2</sup> = <div class="input-group"> <input type="number" id="pz1" placeholder="МПа"> </div> * (<div class="fraction-input"> <div class="numerator"> <input type="number" id="ri1" placeholder="м"> </div> <div class="divider"></div> <div class="denominator"> <input type="number" id="x1" placeholder="м"> </div> </div> <sup>2</sup> = <div id="y1"></div> </pre>	<p>Поля для ввода значений параметров.</p>
<pre> <div class="indicator-container"> <button onclick="checkAnswer1(1)">Рассчитать σ<sub>из</sub></button> <div class="indicator error_indicator" id="errorIndicator1" style="display: none;"> ✗ </div> <div class="indicator success_indicator" id="successIndicator1" style="display: none;"> ✓ </div> </div> <div id="result-1" style="display: none;"> <button class="next-task-button" onclick="nextTask()">Продолжить</button> </div> </pre>	<p>При не правильных значениях появляется красный индикатор с крестиком. При корректных значениях параметров возле кнопки рассчитать появляется зеленый индикатор с галочкой. И кнопка продолжить – перейти к следующей задаче данной практической работы.</p>

Стилизация html страницы с помощью CSS

Используется для визуально привлекательного и удобного интерфейса для пользователя. Стили применяются ко всем элементам страницы. описание стилей приведены в таблице 3.

Таблица 3 – стили CSS

<pre>.task-dot { width: 20px; height: 20px; margin: 5px; background-color: #ccc; border-radius: 50%; cursor: pointer; display: flex; justify-content: center; align-items: center; } .task-dot.active { background-color: blue; } .task-dot.green { background-color: green; }</pre>	<p>Этот класс стилизует небольшие круглые элементы, используемые для навигации между задачами.</p> <p>1. background-color: по умолчанию серый (#ccc), но может меняться на синий или зелёный в зависимости от состояния (active или green).</p> <p>2. cursor: pointer: указывает, что элементы кликабельны.</p>
<pre>.calculator { flex: 2; min-width: 300px; }</pre>	<p>Этот класс стилизует контейнер для калькулятора.</p> <p>flex: 2: указывает, что этот элемент должен занимать вдвое больше места, чем другие элементы в контейнере с flexbox.</p>
<pre>.image-container { width: 487px; height: 505px; position: relative; margin: 0 auto; overflow: hidden; border: 1px solid #ccc; }</pre>	<p>Этот класс стилизует контейнер для изображений.</p> <p>width и height: фиксированные размеры (487x505 пикселей),</p>

Окончание таблицы 3

	<p>что позволяет точно контролировать размеры изображений.</p> <p>position: relative: позволяет позиционировать дочерние элементы относительно этого контейнера.</p>
<pre>.numerator { display: block; justify-content: center; border-bottom: 1px solid black; padding-bottom: 2px; } .denominator { display: block; justify-content: center; padding-top: 2px; }</pre>	<p>Эти классы стилизуют числитель и знаменатель дроби:</p> <p>display: block: делает элементы блочными, что позволяет использовать вертикальное выравнивание.</p> <p>border-bottom: добавляет линию под числителем для визуального разделения.</p>
<pre>.notification { position: fixed; bottom: 20px; right: 20px; background-color: #FFAFAF; color: black;</pre>	<p>Этот класс стилизует уведомления:</p> <p>position: fixed: фиксирует уведомление в нижнем правом углу экрана.</p> <p>background-color: розовый (#FFAFAF), что</p>
<pre>padding: 15px; border-radius: 5px; box-shadow: 0 2px 10px rgba(0, 0, 0, 0.2); z-index: 1000; }</pre>	<p>привлекает внимание.</p>

JavaScript-логика

Используется для расчета формул и получения результата. Описание кода представлена в таблице 4.

Таблица 4 – JavaScript-логика

<pre>function showError(id) { const errorOverlay = document.getElementById(`errorOverlay\${id}`); const successOverlay = document.getElementById(`successOverlay\${i d}`); successOverlay.classList.remove('active'); errorOverlay.classList.add('blink'); setTimeout(() => { errorOverlay.classList.remove('blink'); }, 5000); }</pre>	<p>Эта функция используется для отображения ошибки при выполнении задачи. Она принимает идентификатор id, который соответствует номеру задачи. Функция находит элементы errorOverlay и successOverlay с соответствующим идентификатором и переключает их состояние: удаляет класс active у successOverlay и добавляет класс blink к errorOverlay. Через 5 секунд класс blink удаляется, что позволяет анимировать ошибку.</p>
<pre>function showTask(taskNumber) { const tasks = document.querySelectorAll('.task'); tasks.forEach(task => task.style.display = 'none'); document.getElementById(`task- \${taskNumber}`).style.display = 'block'; const dots = document.querySelectorAll('.task-dot'); dots.forEach(dot => dot.classList.remove('active')); document.getElementById(`dot- \${taskNumber}`).classList.add('active');</pre>	<p>Эта функция переключает видимость задач на странице. Она принимает номер задачи (taskNumber) и скрывает все задачи, а затем отображает только ту, которая соответствует переданному номеру. Функция также обновляет состояние</p>

Продолжение таблицы 4

<pre> completedTasks.forEach(task => document.getElementById(`dot- \${task}`).classList.add('green')); if (completedTasks.includes(taskNumber)) { document.getElementById(`result- \${taskNumber}`).style.display = 'block'; } currentTask = taskNumber; } function setButtonState(buttonId, state) { document.getElementById(buttonId).disabled = state; } </pre>	<p>навигационных точек (task-dot), добавляя класс active к текущей задаче и класс green к уже выполненным задачам. Если задача уже выполнена, функция отображает блок с результатом. Эта функция изменяет состояние кнопки на основе переданного идентификатора (buttonId) и состояния (state). Если state равен true, кнопка становится недоступной (disabled), а если false, то доступной. Это позволяет динамически управлять доступностью кнопок на странице.</p>
<pre> function showSuccess(id) { const errorOverlay = document.getElementById(`errorOverlay\${id}`); const successOverlay = document.getElementById(`successOverlay\${i d}`); errorOverlay.classList.remove('blink'); successOverlay.classList.add('active'); } </pre>	<p>Эта функция отображает успех при выполнении задачи. Она также принимает идентификатор id и находит элементы errorOverlay и successOverlay. Функция удаляет класс blink у errorOverlay (если он есть) и добавляет класс active к successOverlay, что делает его видимым.</p>

Продолжение таблицы 4

<pre>function showNotification(message) { var notification = document.getElementById('notification'); var messageElement =</pre>	<p>Эта функция отображает уведомление с заданным текстом (message). Она</p>
<pre>document.getElementById('notification- message'); messageElement.innerText = message; notification.style.display = 'block'; setTimeout(function () { notification.style.display = 'none'; }, 9000); }</pre>	<p>находит элемент уведомления и устанавливает в него переданное сообщение. Уведомление становится видимым, а через 9 секунд скрывается.</p>
<pre>function showErrorIndicator1(id, part) { const errorIndicator = document.getElementById(`errorIndicator\${par t}\${id}`); const successIndicator = document.getElementById(`successIndicator\${ part}\${id}`); errorIndicator.style.display = 'flex'; successIndicator.style.display = 'none'; }</pre>	<p>Эта функция отображает индикатор ошибки для определённой части задачи. Она принимает идентификатор (id) и часть (part), находит соответствующие элементы errorIndicator и successIndicator, и переключает их состояние: делает видимым индикатор ошибки и скрывает индикатор успеха.</p>
<pre>function checkAnswer1(taskNumber) { if (taskNumber === 1) { var pz1 = parseFloat(document.getElementById('pz1').val ue); var ri1 = parseFloat(document.getElementById('ri1').valu e);</pre>	<p>Функция checkAnswer1(taskNumber) проверяет введённые пользователем значения для первой задачи и выполняет</p>

Продолжение таблицы 4

<pre> var x1 = parseFloat(document.getElementById('x1').value); document.getElementById('errorIndicator1').style.display = 'none'; document.getElementById('successIndicator1').style.display = 'none'; if (isNaN(pz1) pz1 < 7 pz1 > 9) { showError(1); </pre>	<p>необходимые расчёты. Она извлекает значения из полей ввода (pz1, ri1, x1) и проверяет их на корректность, включая проверку на NaN и диапазон допустимых значений. Если какое-либо значение некорректно, функция вызывает функции showError, showErrorIndicator</p>
<pre> showErrorIndicator(1); showNotification("Ошибка! pz1 должно быть в диапазоне от 7 до 9."); return; } if (isNaN(ri1) ri1 < 0.0045 ri1 > 0.0065) { showError(1); showErrorIndicator(1); showNotification("Ошибка! ri1 должно быть в диапазоне от 0.0045 до 0.0065."); return; } if (x1 === 0) { showError(1); showErrorIndicator(1); showNotification("Деление на ноль!"); return; } if (isNaN(x1) x1 < 0.0010 x1 > 0.0020) { showError(1); showErrorIndicator(1); showNotification("Ошибка! x1 должно быть в диапазоне от 0.0010 до 0.0020."); return; } </pre>	<p>и showNotification, чтобы отобразить ошибку и уведомить пользователя. Если все значения корректны, функция выполняет расчёт по формуле и отображает результат в элементе y1. Если результат находится в допустимом диапазоне, функция отображает индикатор успеха и делает навигационную точку зелёной. Наконец, задача добавляется в список выполненных задач (completedTasks).</p>

Окончание таблицы 4

<pre> } var result = pz1 * ((ri1 / x1) ** 2); if (result < 50 result > 150) { showError(1); showErrorIndicator(1); showNotification("Ошибка! Результат должен быть в диапазоне от 120 до 150."); return; } let resultText = result.toFixed(3); document.getElementById('y1').innerTe xt = resultText + "МПа "; document.getElementById('result- 1').style.display = 'block'; document.getElementById(`dot- \${taskNumber}`).classList.add('green'); showSuccessIndicator(1); showSuccess(1); } completedTasks.push(taskNumber); } </pre>	
---	--

Вывод – реализована интерактивная система для расчета технологических параметров двигателя внутреннего сгорания.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Для проведения тестирования была создана программа с selenium-тестами, для проверки корректности ввода параметров и отображения визуализации.

Selenium-тесты – это автоматизированные тесты пользовательского интерфейса, которые работают через браузер, имитируя действия пользователя: клики, ввод данных, навигацию. Selenium-тесты проверяют, что веб-приложение работает правильно в реальном браузере, включая взаимодействие с элементами страницы и визуализацию.

Тестовая программа состоит из следующих тестов, приведенных в таблице 5.

Таблица 5 – selenium тесты

<pre>import unittest import time from selenium import webdriver from selenium.webdriver.common.by import By from selenium.webdriver.support.ui import WebDriverWait from selenium.webdriver.support import expected_conditions as EC</pre>	Подключение необходимых модулей
<pre>def setUp(self): self.driver = webdriver.Chrome() self.driver.get("http://localhost:65195") WebDriverWait(self.driver, 30).until(EC.presence_of_element_located((By.TAG_NAME, "body")))) target_text = "Calculation of connecting rod group. Calculation of stresses from pressed bushing" containers = self.driver.find_elements(By.CSS_SELECTOR,</pre>	Метод setUp подготавливает среду для тестов: Запускает браузер; Открывает главную страницу; Находит нужную задачу по тексту; Переходит по кнопке "Start"

Продолжение таблицы 5

<pre> "div.col-md-4") start_link = None for container in containers: if target_text in container.text: try: start_link = container.find_element(By.XPATH, "./a[contains(text(),'Start')]") break except: pass if not start_link: self.driver.quit() raise Exception(f"Кнопка Start для задачи '{target_text}' не найдена") start_link.click() WebDriverWait(self.driver, 10).until(EC.presence_of_element_located((By.ID, "pz1")))) </pre>	<p>именно для этой задачи;</p> <p>Ждёт загрузки страницы с формой.</p>
<pre> def test_successful_calculation(self): self.fill_inputs_and_click(8.5, 0.0055, 0.0014) driver = self.driver result_elem = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "y1")))) result_text = result_elem.text self.assertIn("МПа", result_text) value = float(result_text.replace("МПа", "").strip()) self.assertTrue(50 <= value <= 150) result_block = driver.find_element(By.ID, "result-1") self.assertTrue(result_block.is_displayed()) success_indicator = driver.find_element(By.ID, "successIndicator1") self.assertTrue(success_indicator.is_displayed()) </pre>	<p>Тест заполняет форму корректными данными.</p> <p>Нажимает кнопку расчёта.</p> <p>Ждёт появления результата.</p> <p>Проверяет, что результат корректно отображён и находится в ожидаемом диапазоне.</p> <p>Проверяет, что блок результата и индикатор успеха видимы. Если все проверки проходят, тест считается успешным.</p>

Продолжение таблицы 5

<pre>def test_error_pz_out_of_range(self): self.fill_inputs_and_click(6.5, 0.006, 0.0014) driver = self.driver error_indicator = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "errorIndicator1"))) self.assertTrue(error_indicator.is_displayed())</pre>	<p>Тест проверяет, что при вводе значения pz1, выходящего за допустимый диапазон, появляется сообщение или индикатор ошибки.</p> <p>Если индикатор ошибки виден - тест проходит успешно.</p> <p>Если индикатор не появляется - тест проваливается, так как приложение не корректно обработало ошибочный ввод.</p>
<pre>def test_error_ri_out_of_range(self): self.fill_inputs_and_click(8.5, 0.004, 0.0014) driver = self.driver error_indicator = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "errorIndicator1"))) self.assertTrue(error_indicator.is_displayed())</pre>	<p>Тест проверяет, что при вводе значения ri1, выходящего за допустимый диапазон, появляется уведомление, индикатор и визуализация поломки</p>
<pre>def test_error_x_zero(self): self.fill_inputs_and_click(8.5, 0.006, 0) driver = self.driver error_indicator = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "errorIndicator1"))) self.assertTrue(error_indicator.is_displayed())</pre>	<p>Тест проверяет, что при вводе значения $x1 = 0$, появляется уведомление что на ноль делить нельзя</p>
<pre>def test_error_x_out_of_range(self): self.fill_inputs_and_click(8.5, 0.006, 0.0006)</pre>	<p>Тест проверяет, что при вводе значения x1,</p>

Окончание таблицы 5

<pre> driver = self.driver error_indicator = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "errorIndicator1"))) self.assertTrue(error_indicator.is_displayed()) </pre>	<p>выходящего за допустимый диапазон, появляется уведомление, индикатор и визуализация поломки.</p>
<pre> def test_error_result_out_of_range(self): self.fill_inputs_and_click(12, 0.007, 0.0007) driver = self.driver error_indicator = WebDriverWait(driver, 5).until(EC.visibility_of_element_located((By.ID, "errorIndicator1"))) self.assertTrue(error_indicator.is_displayed()) </pre>	<p>Тест проверяет, что при вводе значений, приводящих к недопустимому результату, появляется сообщение или индикатор ошибки.</p>

В таблице представлены проводимые тесты для проверки корректности параметра – напряжение изгиба в днище поршня. По аналогии были разработаны тесты для проверки остальных параметров двигателя внутреннего сгорания.

Результаты тестов представлены на рисунках 4.1 – 4.5.

На рисунке 4.1 представлен первый тест, в данном случае были введены следующие параметры: максимальное давление сгорания = 8,5, толщина днища = 0,0014, внутренний радиус поршня = 0,0055. Все введенные параметры не выходят за пределы допустимых значений. Программа проверила корректность отображения визуализации (на схеме зеленым цветом показано отсутствие потенциальных мест поломки), так же рядом с кнопкой рассчитать появляется зеленый индикатор с галочкой

(только если все значения находятся в пределах допустимых) и появляется кнопка продолжить, а также отображение результата, который не выходит за пределы допустимых значений.

Motorix Home Lectures

Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя. Расчет поршневой группы

Напряжение изгиба в днище поршня

Определить напряжение изгиба в днище поршня из алюминиевого сплава двигателя 1Ч15/20,5, если известно максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа, толщина днища $\delta = 14$ мм и внутренний радиус днища поршня $r_1 = 55$ мм.

$$\sigma_{bz} = p_{zmax} * \left(\frac{r_1}{\delta} \right)^2 = 8,5 * \left(\frac{0,0055}{0,0014} \right)^2 = 131,2 \text{ МПа}$$

Расчитать σ_{bz} ✓

Продолжить

Рисунок 4.1 – Корректные параметры

На рисунке 4.2 представлено выполнение теста. Были введены следующие параметры: максимальное давление сгорания = 6,5, толщина днища = 0,0014, внутренний радиус поршня = 0,006. В данном случае максимальное давление сгорания выходит за пределы допустимых значений. Программа проверяет правильность отображения уведомления об ошибке (уведомление появляется в нижнем углу с права) и визуализации поломки (справа на рисунке предоставлена схема с красной подсветкой места где произойдет поломка). Также возле кнопки рассчитать появляется красный индикатор с крестиком, что сигнализирует о том, что данные не верны.

Motorix
Home
Lectures

Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя. Расчет поршневой группы

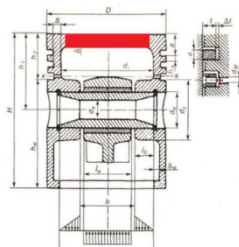
Напряжение изгиба в днище поршня

Определить напряжение изгиба в днище поршня из алюминиевого сплава двигателя 1Ч15/20,5, если известно максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа, толщина днища $\delta = 14$ мм и внутренний радиус днища поршня $r_1 = 55$ мм.

$$\sigma_{из} = p_{zmax} * \left(\frac{r_1}{\delta} \right)^2 = 6,5 * \left(\frac{0,006}{0,0014} \right)^2 =$$

Рассчитать $\sigma_{из}$

✖



Ошибка! pz1 должно быть в диапазоне от 7МПа до 12МПа.

Рисунок 4.2 - Неверный параметр pz

На рисунке 4.3 представлено выполнение теста. Были введены следующие параметры: максимальное давление сгорания = 8,5, толщина днища = 0,0014, внутренний радиус поршня = 0,004. В данном случае внутренний радиус днища поршня выходит за пределы допустимых значений. Программа проверяет правильность отображения уведомления об ошибке (уведомление появляется в нижнем углу с права) и визуализации поломки (справа на рисунке предоставлена схема с красной подсветкой места где произойдет поломка). Также возле кнопки рассчитать появляется красный индикатор с крестиком, что сигнализирует о том, что данные не верны.

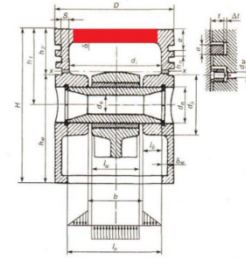
Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя. Расчет поршневой группы

Напряжение изгиба в днище поршня

Определить напряжение изгиба в днище поршня из алюминиевого сплава двигателя 1Ч15/20,5, если известно максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа, толщина днища $\delta = 14$ мм и внутренний радиус днища поршня $r_1 = 55$ мм.

$$\sigma_{из} = p_{zmax} * \left(\frac{r_1}{\delta} \right)^2 = 8,5 * \left(\frac{0,004}{0,0014} \right)^2 =$$

Рассчитать $\sigma_{из}$



Ошибка! r1 должно быть в диапазоне от 0.0050м до 0.0070м.

Рисунок 4.3 – Неверный параметр r_1

На рисунке 4.4 представлено выполнение теста. Были введены следующие параметры: максимальное давление сгорания = 8,5, толщина днища = 0, внутренний радиус поршня = 0,006. В данном случае толщина днища поршня выходит за пределы допустимых значений и равна нулю. Программа проверяет правильность отображения уведомления об ошибке (уведомление появляется в нижнем углу с права) и визуализации поломки (справа на рисунке предоставлена схема с красной подсветкой места где произойдет поломка). Также возле кнопки рассчитать появляется красный индикатор с крестиком, что сигнализирует о том, что данные не верны.

Motorix
Home
Lectures

Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя.

Расчет поршневой группы

Напряжение изгиба в днище поршня

Определить напряжение изгиба в днище поршня из алюминиевого сплава двигателя 1Ч15/20,5, если известно максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа, толщина днища $\delta = 14$ мм и внутренний радиус днища поршня $r_1 = 55$ мм.

$$\sigma_{из} = p_{zmax} * \left(\frac{r_1}{\delta} \right)^2 = 8,5 * \left(\frac{0,006}{0} \right)^2 =$$

Рассчитать $\sigma_{из}$

Деление на ноль!

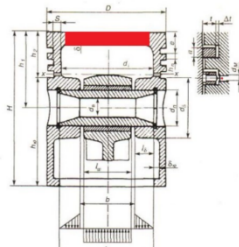


Рисунок 4.4 – Деление на ноль

На рисунке 4.5 представлено выполнение теста. Были введены следующие параметры: максимальное давление сгорания = 12, толщина днища = 0,0007, внутренний радиус поршня = 0,007. В данном случае напряжение изгиба в днище поршня выходит за пределы допустимых значений. Программа проверяет правильность отображения уведомления об ошибке (уведомление появляется в нижнем углу с права) и визуализации поломки (справа на рисунке предоставлена схема с красной подсветкой места где произойдет поломка). Также возле кнопки рассчитать появляется красный индикатор с крестиком, что сигнализирует о том, что данные не верны.

Motorix
Home
Lectures

T

Расчет элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя.

Расчет поршневой группы

Напряжение изгиба в днище поршня

Определить напряжение изгиба в днище поршня из алюминиевого сплава двигателя 1Ч15/20,5, если известно максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа, толщина днища $\delta = 14$ мм и внутренний радиус днища поршня $r_1 = 56$ мм.

$$\sigma_{из} = p_{zmax} * \left(\frac{r_1}{\delta} \right)^2 = 12 * \left(\frac{0,007}{0,007} \right)^2 =$$

Расчитать $\sigma_{из}$

Ошибка! Результат должен быть в диапазоне от 50МПа до 150МПа.

Рисунок 4.5 – Неверный параметр result

Результат выполненных тестов представлен на рисунке 4.6.

Все тесты успешно прошли проверку. Первый тест был выполнен за 7.933 секунд, второй тест был пройден за 5.859 секунд, третий тест прошел проверку за 6.134, четвертый тест был пройден за 5.530 секунд, пятый тест прошел проверку за 6.347 секунд, шестой тест пройден за 6.318 секунд.

```

D:\python\ DjangoWeb\ DjangoWeb\ env2\ Scripts\ python.exe

=== 3anyck testa: test_error_pz_out_of_range ===test_error_pz_out_of_range (__main__.PistonBendingStressTests)
...
DevTools listening on ws://127.0.0.1:58862/devtools/browser/8eb4e0b5-e0aa-4ef9-8aea-d47dc7dc10f9
okTect test_error_pz_out_of_range пройден успешно за 7.933 секунд
test_error_result_out_of_range (__main__.PistonBendingStressTests) ...

=== 3anyck testa: test_error_result_out_of_range ===

DevTools listening on ws://127.0.0.1:58891/devtools/browser/b946905e-8edc-484d-b29c-aeafac923c9f
okTect test_error_result_out_of_range пройден успешно за 5.859 секунд
test_error_ri_out_of_range (__main__.PistonBendingStressTests) ...

=== 3anyck testa: test_error_ri_out_of_range ===

DevTools listening on ws://127.0.0.1:58919/devtools/browser/1652bf8d-0501-4351-9c7f-ed4bc62a421c
okTect test_error_ri_out_of_range пройден успешно за 6.134 секунд
test_error_x_out_of_range (__main__.PistonBendingStressTests) ...

=== 3anyck testa: test_error_x_out_of_range ===

DevTools listening on ws://127.0.0.1:58948/devtools/browser/f492ae6f-ff7e-4c1a-8628-6b63a42a5c3a
okTect test_error_x_out_of_range пройден успешно за 5.530 секунд
test_error_x_zero (__main__.PistonBendingStressTests) ...

=== 3anyck testa: test_error_x_zero ===

DevTools listening on ws://127.0.0.1:58976/devtools/browser/365aea9b-f519-462e-a455-8ed92261f5f3
okTect test_error_x_zero пройден успешно за 6.347 секунд
test_successful_calculation (__main__.PistonBendingStressTests) ...

=== 3anyck testa: test_successful_calculation ===

DevTools listening on ws://127.0.0.1:59003/devtools/browser/ca81d965-9b74-457f-9499-ba211d206ad9
okTect test_successful_calculation пройден успешно за 6.318 секунд

-----
Ran 6 tests in 38.125s

OK
Press any key to continue . . .

```

Рисунок 4.6 – результат работы тестов

53

В результате тестирования были проверены результаты расчетов по основным функциям программы путем сравнения с реальными значениями параметров ДВС. В итоге можно констатировать, что цель проекта достигнута, т.е. спроектирована и реализована программная интерактивная система, позволяющая определять основные параметры работы ДВС.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой главе выпускной квалификационной работы был проведен аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по тематике работы, перечислены существующие аналоги, на основе которых определена актуальность работы.

Во второй главе было сделано математическое описание технологических параметров двигателя внутреннего сгорания, разработаны алгоритмы и структуры данных, определены функциональные и нефункциональные требования.

В третьей главе описана реализация разработанного ранее функционала, с комментариями по реализации отдельных элементов программы.

В четвертой главе разработана тестовая программа.

Для достижения данной цели были выполнены следующие задачи:

1. Выполнен аналитический обзор научно-технической литературы в сфере разработки и использования интерактивных систем.
2. Спроектирована интерактивная система.
3. Реализована интерактивная система.
4. Проведено тестирование приложения.

Использование представленного проекта позволит проводить вычислительные эксперименты, изменяя технологические параметры ДВС с возможностью отслеживания корректности работы элементов всей системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. AVL. Программное обеспечение для моделирования, виртуализации, автоматизации и разработки автомобильных систем. – Режим доступа: <https://www.avl.com/en/software>, свободный. – Дата обращения: 10.05.2025.
2. Буров, А.Л. Тепловые двигатели: учебное пособие / А.Л. Буров. – Моск. гос. индустр. ун-т. - 2-е изд., изм. и доп. - М.: Изд-во МГИУ, 2008. - 223 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9241-210-2012. Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 210. Человеко-ориентированное проектирование интерактивных систем. – М.: Стандартинформ, 2013. – 68 с.
4. ДИЗЕЛЬ-РК программа для расчета и оптимизации двухтактных и четырехтактных двигателей внутреннего цилиндра. – Режим доступа: <https://diesel-rk.ru/Rus/>, свободный. – Дата обращения: 10.05.2025.
5. Интерактивные веб-приложения: ключевые преимущества и технические аспекты разработки – Режим доступа: <https://webdesigngroup.ru/2023/11/05/interaktivnye-veb-prilozheniya-klyuchevye-preimushhestva-i-tehnicheskie-aspekty-razrabotki/>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата доступа: 13.05.2025.
6. Использование цифровых двойников – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=souru>. — Дата обращения: 18.11.2024.
7. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.
8. Луканин, В. Н. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 1: теория рабочих процессов / Кн.1: Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян; ред. В. Н. Луканин. - Изд. 2-е., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2005. - 479 с.
9. Малоземов, А.А. Моделирование процессов в системах охлаждения и смазки дизелей транспортных машин со средствами предпускового

- подогрева / А.А. Малоземов, М.П. Грабец, Д.В. Козьминых // Современные проблемы теории машин, 2024. – № 17. – С. 47–50.
10. Малоземов, А.А. Технология цифровых двойников для разработки двигателей внутреннего сгорания / А.А. Малоземов, В.Н. Бондарь, В.В. Егоров, Г.А. Малоземов // Труды Всемирной конференции по интеллектуальной промышленности (GloSIC-2018), 13–15 ноября 2018 г. Челябинск, Россия. IEEE, 2018. 6 с.
11. Наумов, А.В. Имитационная модель для определения показателей рабочих процессов в камере внутреннего дизеля в составе инверторной дизель-генераторной установки / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов // Состояние и перспективы развития 2023. Челябинск, 2024 – С. 364–369.
12. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных механизмов / под ред. А.С. Орлина, Д.Н. Вырубова. – М.: Машиностроение, 1971. – 400 с.
13. Рудометов, С.В. Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем: дис.... канд. техн. наук / С.В. Рудометов. – Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики, 2011. – 27 с.
14. Скрипник, А.А. Гидродинамический анализ процессов топливных систем типа в среде имитационного исследования AVL Boost Hydsim / А.А. Скрипник, В.В. Шишиков // Наука и образование: электронное научное издание. – 2022. – № 9. – Режим доступа: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/52657/view>, свободный. – Дата обращения: 10.05.2025.
15. Типы автомобильных двигателей – Режим доступа: <https://carsweek.ru/articles/typy-avtomobilnykh-dvigatelnykh/>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата доступа: 13.05.2025.