

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.42:621.43

doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-45-52

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Александр Алексеевич Обозов^{1✉}, Дмитрий Владимирович Феськов², Дмитрий Олегович Титенок³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ obozov51@mail.ru

² dfeskov1998@mail.ru

³ dimatitenok@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматривается применение современных программных комплексов для компьютерного моделирования рабочих процессов дизельного двигателя с акцентом на прогнозирование топливно-экономических и экологических показателей. Анализируются основные подходы к созданию математических моделей, воспроизводящих процессы впрыска топлива, распыла, смесеобразования, сгорания и газообмена. Особое внимание уделяется многомерному CFD-моделированию в ANSYS Forte с использованием детализированных кинетических моделей горения, моделей распыла и образования загрязняющих веществ (NO_x, сажа, CO), а также термодинамическому моделированию в MATLAB на основе функции Вибе для расчёта индикаторных диаграмм и характеристик тепловыделения. Показана возможность виртуальной оптимизации конструкции камеры сгорания, параметров

впрыска и режимов работы двигателя на этапе проектирования без дорогостоящих натурных испытаний. Продемонстрировано, что комбинированный подход (MATLAB для предварительного анализа и калибровки, ANSYS Forte для детального CFD-расчёта) позволяет эффективно прогнозировать эмиссию токсичных компонентов и улучшать экологические характеристики дизелей в условиях ужесточения международных норм (Euro 6/7, EPA Tier 4 Final, China VI). Подчёркивается роль цифрового моделирования в сокращении сроков и стоимости разработки экологически чистых силовых установок.

Ключевые слова: двигатель, компьютерное моделирование, функция Вибе, сгорание, выбросы NO_x, сажа, токсичность, экологичность, оптимизация.

Ссылка для цитирования:

Обозов А.А. Моделирование рабочих процессов дизельного двигателя с помощью современных программных комплексов / А.А. Обозов, Д.В. Феськов, Д.О. Титенок // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 5. – С. 45-52. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-45-52.

Original article

Open Access Article

MODELING OF OPERATIONAL PROCESSES OF THE DIESEL ENGINE WITH THE HELP OF MODERN SOFTWARE PACKAGES

Aleksandr Alekseevich Obozov^{1✉}, Dmitry Vladimirovich Feskov², Dmitry Olegovich Titenok³

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ obozov51@mail.ru

² dfeskov1998@mail.ru

³ dimatitenok@yandex.ru

Abstract

The paper considers the use of modern software packages for computer simulation of diesel engine operational processes with an emphasis on forecasting

fuel, economic and environmental indicators. The main approaches to developing mathematical models simulating fuel injection, spraying, mixing, combustion and

gas exchange are analyzed. Particular attention is paid to multidimensional CFD modeling in ANSYS Forte using detailed kinetic models of combustion, spray models and formation of pollutants (NO_x, soot, CO), as well as thermodynamic modeling in MATLAB based on Vibe function for calculating indicator diagrams and heat release characteristics. The possibility is shown to optimize virtually the combustion chamber design, injection parameters and engine operating modes at the design stage without expensive field tests. It is also shown that the combined approach (MATLAB for preliminary analysis and calibration, ANSYS Forte for

detailed CFD calculations) makes it possible to effectively predict the emission of toxic components and improve the environmental performance of diesels under the conditions of stricter international standards (Euro 6/7, EPA Tier 4 Final, China VI). The role of digital modeling in reducing the time and cost of developing environmentally friendly power plants is emphasized.

Keywords: engine, computer simulation, the Vibe function, combustion, NO_x emissions, soot, toxicity, environmental friendliness, optimization.

Reference for citing:

Obozov AA, Feskov DV, Titenok DO. Modeling of operational processes of the diesel engine with the help of modern software packages. *Transport Engineering*. 2026;5:45-52. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-45-52.

Цель исследования: разработка и сравнительный анализ методик компьютерного моделирования рабочих процессов дизельного двигателя с использованием ANSYS Forte и MATLAB для прогнозирования эффективности и токсичности.

Задача, решению которой посвящена статья: оценка возможностей современных программных комплексов для воспроизведения процессов впрыска, сгорания и образования вредных выбросов, а также выработка рекомендаций по оптимальному применению этих инструментов на разных этапах проектирования дизельных двигателей.

Методы исследования: многомерное CFD-моделирование в ANSYS Forte (с секторной сеткой 45°, моделями распыла KH-RT или аналогичными, кинетическими механизмами горения, моделями сажи и NO_x), одномерное термодинамическое моделирование в MATLAB на основе аналитико-термодинамической модели с функцией Виббе, анализ индикаторных диаграмм, кривых тепловыделения и концентраций загрязняющих веществ.

Новизна работы: обоснование комбинированной стратегии моделирования (MATLAB для быстрой калибровки и анализа общих закономерностей, ANSYS Forte для детального воспроизведения физических процессов и точного прогнозирования эмиссии), демонстрация чувствительности результатов к параметрам сетки и выбору модели распыла в CFD, а также верификация моделей путём сопоставления расчётных индикаторных диаграмм с

типичными экспериментальными данными для дизеля типа Д-240.

Результаты исследования. В ANSYS Forte получены поля давления, температуры, концентраций CO, сажи и NO_x в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Процесс сгорания начинается вблизи ВМТ, максимальная температура достигает 1400...1500 К, давление — 6...7 МПа. Пик образования CO наблюдается сразу после ВМТ с последующим догоранием, сажа формируется в начальной фазе и окисляется при высокой температуре, NO_x интенсивно образуются после ВМТ при максимальных температурах.

В MATLAB расчёт по функции Виббе показал рост давления до ~6 МПа после ВМТ, максимум тепловыделения $dQ/d\theta$ в диапазоне 10–30° после ВМТ с последующим затуханием к 60° ПКВ.

Сравнительный анализ показал, что MATLAB целесообразен на предварительных этапах, ANSYS Forte – для уточнённого анализа эмиссии.

Выводы: Компьютерное моделирование является высокоэффективным инструментом оптимизации дизельных двигателей по критериям экологичности и топливной экономичности. Комбинированное использование MATLAB (для быстрой оценки режимных параметров и тепловыделения) и ANSYS Forte (для детального CFD-анализа распыла, горения и выбросов) позволяет существенно сократить объём натурных испытаний, повысить точность прогнозирования токсичности и ускорить разработку двигателей, соответ-

ствующих жёстким нормам *Euro 6/7*, *EPA Tier 4 Final* и *China VI*.

В условиях нарастающего экологического кризиса вопросы снижения антропогенного воздействия на окружающую среду приобретают первостепенное значение. Одним из ключевых источников загрязнения атмосферы остаются транспортные средства с дизельными двигателями, широко применяемые в грузовом и пассажирском транспорте, сельскохозяйственной и строительной технике, а также в стационарных энергетических установках. Несмотря на высокую энергоэффективность и надёжность дизельных двигателей, их эксплуатация сопряжена с выбросом значительного количества вредных веществ, что делает актуальным поиск путей минимизации экологического ущерба без потери функциональных характеристик силовой установки.

Дизельные двигатели при сгорании топлива генерируют комплекс загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека [1]:

- оксиды азота (NO_x) - способствуют образованию фотохимического смога и кислотных дождей, раздражают дыхательные пути, провоцируют астматические и бронхолёгочные заболевания;

- твёрдые частицы (сажа, PM) - проникают в лёгкие и кровоток, вызывая сердечно-сосудистые патологии и онкологические заболевания;

- углеводороды (C_xH_y) - участвуют в образовании озона у поверхности земли, обладают канцерогенными свойствами;

- оксид углерода (CO) - токсичный газ, нарушающий транспорт кислорода в организме;

- сернистые соединения (SO_x) - вызывают коррозию оборудования и кислотные осадки.

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха, в том числе от транспортных источников, ежегодно приводит к миллионам преждевременных смертей. В связи с этим международные регуляторы (Евросоюз, США, Китай) последовательно ужесточают нормы токсичности (стандарты *Euro 6*,

EPA Tier 4, *China VI*), устанавливая предельно допустимые концентрации выбросов для новых транспортных средств [2].

В условиях жёстких экологических требований перед разработчиками дизельных двигателей встаёт комплексная задача: снизить выбросы вредных веществ путем сохранения или повышения КПД, мощности и ресурса двигателя. Решение этой задачи традиционными методами (натурные испытания, эмпирическая настройка) сопряжено с высокими затратами времени и ресурсов. В этой связи особую актуальность приобретает компьютерное моделирование рабочих процессов, позволяющее:

1. Проводить виртуальные эксперименты с варьированием параметров (угол опережения впрыска, давление наддува, состав топливовоздушной смеси) без изготовления физических прототипов.

2. Анализировать нестационарные процессы (турбулентность, смесеобразование, горение) с детализацией, недоступной для экспериментальных методов.

3. Оптимизировать конструкцию камер сгорания, форсунок, систем газообмена на этапе проектирования.

4. Прогнозировать эмиссию загрязняющих веществ на основе кинетических моделей химических реакций.

5. Сокращать сроки и стоимость разработки за счёт уменьшения числа натурных испытаний.

Современные программные комплексы для моделирования ДВС, например, *Ansys Forte*, реализуют:

- многомерные CFD-модели (*Computational Fluid Dynamics*) для расчёта газодинамики и теплообмена;

- кинетические модели горения с учётом сотен химических реакций и промежуточных радикалов;

- методы сопряжённого анализа (*fluid-structure interaction*) для оценки термомеханических нагрузок;

- оптимизационные алгоритмы (генетические, градиентные) для поиска оптимальных параметров.

Таким образом, моделирование рабочих процессов дизельного двигателя представляет собой эффективный инструмент

решения экологической проблемы, позволяя сочетать требования энергоэффективности, надёжности и экологичности в

условиях ужесточающихся международных стандартов.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследование проводилось с использованием двух программных комплексов: *ANSYS Forte* для многомерного *CFD*-моделирования и *MATLAB* для одномерного термодинамического расчёта.

При моделировании в *ANSYS Forte* задается описание импульса [3] $P_T = var$ давления топлива в распылителе форсунки и далее рассчитывается текущая скорость течения топлива через сопла $W = \sqrt{2/\rho_T(P_T - P_{цил})}$ м/с (давление в единицах измерения «Па», плотность в «кг/м³»).

Сложность при моделировании работы ДВС представляет именно распыл. Выбор модели распыла может в значительной степени влиять как на быстроту получения результатов, так и на их точность.

Большинство используемых сегодня моделей распыла имеют высокую чувствительность к сеточному разрешению модели, что приводит к необходимости тратить ценное время на нахождение оптимального сочетания параметров сетки и модели распыла. Даже если удаётся откалибровать модель для конкретной сетки, остаётся неясным, насколько эффективной будет эта модель для другой конструкции цилиндра, в результате весь процесс, возможно, придётся повторять.

Первым шагом после построения геометрии сетки, включающей основные параметры двигателя (диаметр цилиндра, ход поршня, степень сжатия) является определение химической модели и построение параметров распыла (рис. 1).

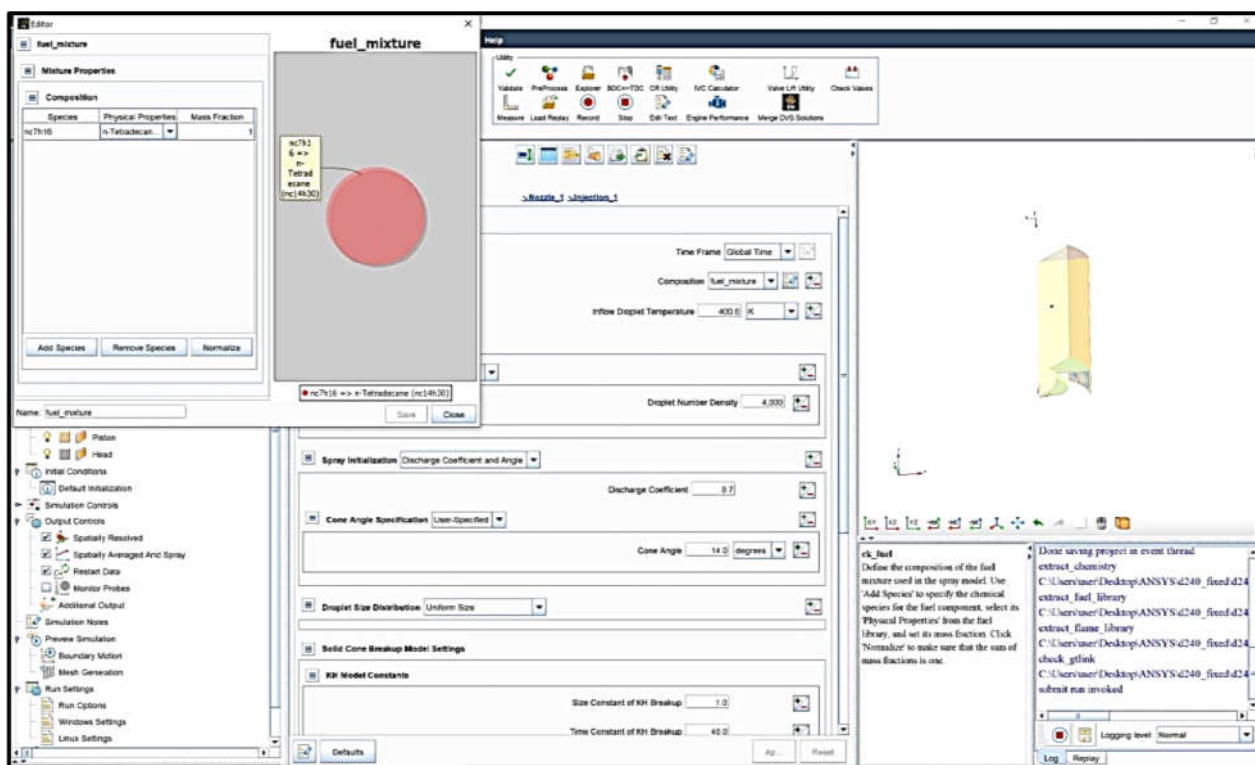


Рис. 1. Определение параметров распыла

Fig. 1. Determination of spray parameters

Для наиболее точного расчета, цилиндр представлен в виде сектора 45 градусов с целью создания более тонкой сетки моделирования. Следующим является

также немало важное указание модели выбросов сажи в дизельном двигателе. Одним из последних пунктов является определение начальных параметров рабочего

процесса (температура, давление, частота вращения двигателя) (рис. 2).

В *MATLAB* реализована аналитико-термодинамическая модель на основе уравнений рабочего процесса и функции Вибе для описания скорости тепловыделения. Модель позволяет быстро оценивать индикаторные диаграммы, максимальное давление и характеристики сгорания при варьировании режимных параметров [4, 5].

Методология включает последовательные этапы: построение геометрии и сетки → выбор/калибровка субмоделей → расчёт → анализ результатов (давление, температура, концентрации веществ). Комбинированный подход обоснован разным уровнем детализации и вычислительными затратами инструментов.

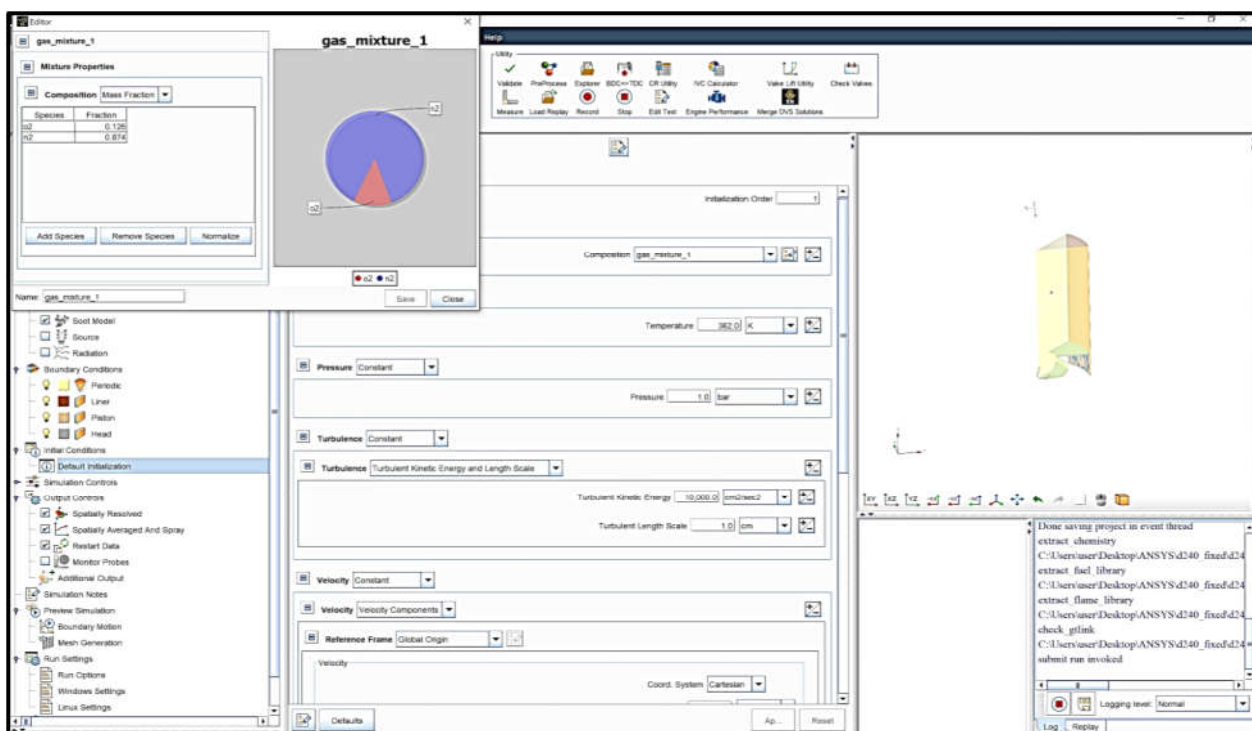


Рис. 2. Начальные условия моделирования
Fig. 2. Initial modeling conditions

Результаты

Результаты моделирования отображаются в отдельном окне программы и позволяют, в зависимости от запроса, отобразить запрашиваемые параметры моделирования рабочего процесса (рис. 3).

Из графиков давления и максимальной температуры видно, что процесс сгорания начинается вблизи верхней мёртвой точки (ВМТ), сопровождаясь резким ростом температуры до значений порядка 1400...1500 К и повышением давления до 6...7 МПа. После завершения сгорания температура и давление постепенно снижаются вследствие расширения газов.

Образование загрязняющих веществ. По данным моделирования, образование CO (угарного газа) наблюдается

вблизи ВМТ – момент, когда смесь ещё не полностью окислена и присутствует локальный дефицит кислорода. После 20...30° поворота коленчатого вала концентрация CO быстро снижается, что свидетельствует о догорании остаточных продуктов.

Формирование сажи также происходит в начальной фазе горения, достигая пика вскоре после ВМТ, а затем уменьшается по мере окисления частиц при повышенной температуре.

В свою очередь, образование EINOx (эквивалентных оксидов азота) начинается после ВМТ, когда температура в цилиндре достигает максимальных значений.

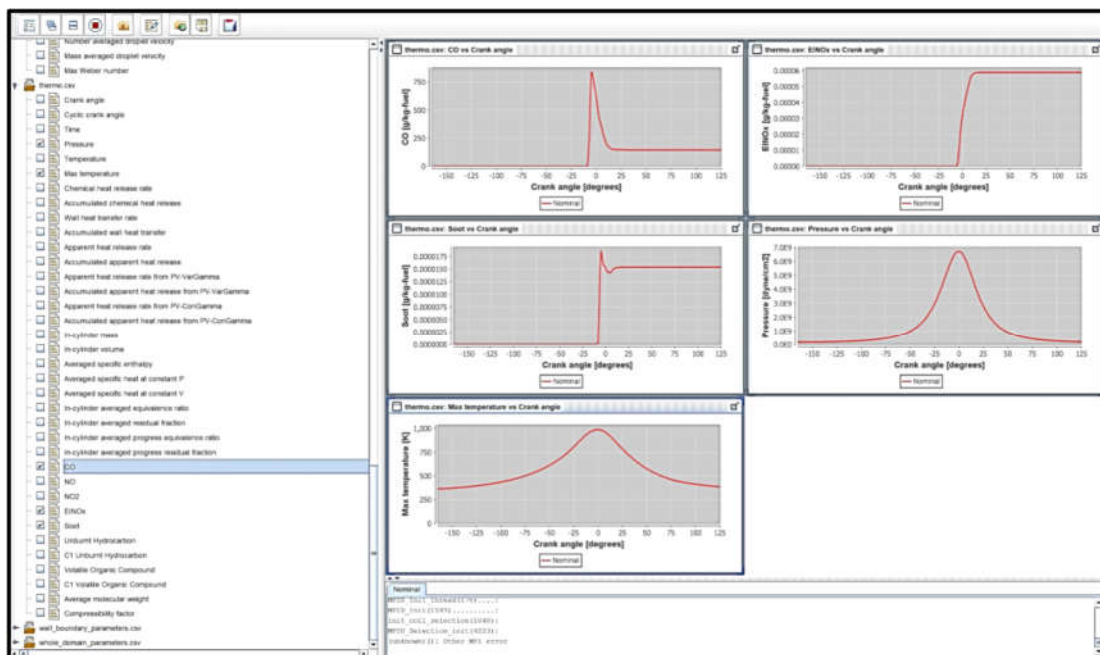


Рис. 3. Отображение результатов моделирования
 Fig. 3. Display of simulation results

На рис. 4 приведены индикаторные диаграммы дизеля Д-240, полученные в *MATLAB*, где реализована аналитико-термодинамическая модель [4,5] на основе упрощенных уравнений (в данном примере формула Вибе). В верхнем графике пока-

зано изменение давления в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ), а в нижнем – дифференциальная характеристика тепловыделения $dQ/d\theta$.

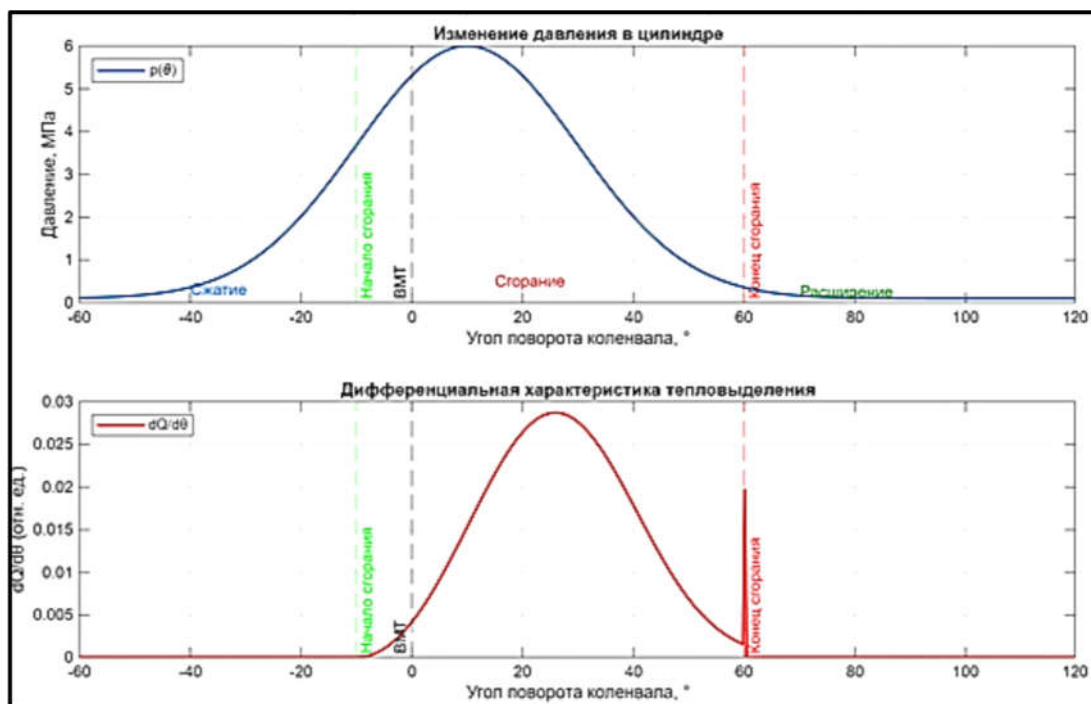


Рис. 4. Индикаторные диаграммы дизеля Д-240
 Fig. 4. Indicator diagrams of diesel engine D-240

На верхней диаграмме представлена кривая давления в цилиндре двигателя. В

процессе сжатия (углы ПКВ от -60° до 0°) давление плавно возрастает и достигает

максимума вблизи верхней мёртвой точки (ВМТ). После этого, с началом фазы сгорания, наблюдается резкий рост давления, который обусловлен выделением теплоты при сгорании впрыснутого топлива. Максимальное давление достигает примерно 6 МПа, после чего, по мере завершения сгорания и начала расширения, давление постепенно снижается. На нижнем графике представлена зависимость $dQd\theta$, отражающая интенсивность тепловыделения по углу поворота коленчатого вала. Кривая

показывает, что процесс тепловыделения начинается вблизи ВМТ и достигает максимума в диапазоне $10...30^\circ$ после ВМТ, что соответствует активной фазе сгорания топлива. После достижения пика интенсивность тепловыделения снижается и к 60° практически прекращается, что указывает на окончание сгорания.

Результаты согласуются с типичными экспериментальными индикаторными диаграммами, что подтверждает адекватность моделей.

Обсуждение/Заключение

С целью подведения итогов анализа компьютерного моделирования с помощью современных программных комплексов

(ПК) представлен сравнительный анализ обозреваемых ПК в табл., а также некоторые выводы.

Таблица

Сравнительный анализ *MATLAB* и *ANSYS Forte*

Table

Comparative analysis of MATLAB and ANSYS Forte

Критерий	MATLAB	ANSYS Forte
Тип модели	0D/1D термодинамическая	3D CFD, многопроцессная
Время расчёта	секунды	часы – сутки
Детализация процессов	Низкая (усреднённые параметры)	Высокая (распыл, химия, теплообмен)
Моделирование выбросов	Нет	Да (CO, NOx, сажа и др.)
Гибкость изменения модели	Очень высокая	Средняя
Требования к ресурсам	Минимальные	Высокие
Область применения	Быстрый анализ, визуализация данных	Инженерная оптимизация, НИР

Полученные результаты демонстрируют, что компьютерное моделирование позволяет детально воспроизводить ключевые процессы дизельного двигателя и надёжно прогнозировать как термодинамические (давление, температура, тепловыделение), так и экологические показатели (NOx, сажа, CO).

Новизна заключается в обосновании оптимальной двухуровневой стратегии: *MATLAB* эффективен на ранних стадиях для калибровки и анализа влияния режимных параметров на общие характеристики цикла, тогда как *ANSYS Forte* незаменим

для уточнённого *CFD*-анализа локальных процессов, распыла и образования токсичных веществ. Комбинированное применение этих инструментов существенно повышает точность прогнозирования, сокращает затраты на физические испытания и ускоряет достижение соответствия нормам *Euro 6/7*, *EPA Tier 4 Final* и *China VI*.

Таким образом, цифровое моделирование вносит значительный вклад в решение актуальной научно-технической задачи – создание высокоэффективных и экологически чистых дизельных двигателей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горбунов В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2008. 214 с.

2. Anenberg S.C. Impacts and mitigation of excess diesel-related NOx emissions in 11 major vehicle markets / S.C. Anenberg, J. Miller // Nature. 2017. P. 467-471.

3. ANSYS Forte Tutorials [Electronic resource] / ANSYS Inc. URL: <https://www.ansys.com/support> (дата обращения: 02.03.2026).
4. Дьяконов В. MATLAB 6: учебный курс / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

5. MATLAB.ru – Консультационный центр MATLAB [Электронный ресурс]. URL: <https://exponenta.ru/matlab> (дата обращения: 02.03.2026).

REFERENCES

1. Gorbunov VV, Patrakhaltsev NN. Toxicity of internal combustion engines. Moscow: Publishing House of RUDN University; 2008.
2. Anenberg SC, Miller J. Impacts and mitigation of excess diesel-related NOx emissions in 11 major vehicle markets. *Nature*. 2017:467-471.

3. ANSYS Forte Tutorials [Internet]. [cited 2026 March 02]. Available from: <https://www.ansys.com/support>
4. Dyakonov V. MATLAB 6: training course. St. Petersburg: Peter; 2001.
5. MATLAB.ru – MATLAB Consulting Center [[Internet]. [cited 2026 Feb 03]. Available from: <https://exponenta.ru/matlab>

Информация об авторах:

Обозов Александр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы».

Obozov Aleksandr Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems.

Феськов Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы».

Титенок Дмитрий Олегович – аспирант кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы».

Feskov Dmitry Vladimirovich – Postgraduate student at the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems.

Titenok Dmitry Olegovich – Postgraduate student at the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

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

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 04.03.2026; approved after review on 08.04.2026; accepted for publication on 27.04.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.