

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Даниел Красимиров Костадинов

**„ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТНИЯ ПРОЦЕС НА ДИЗЕЛОВ
ДВИГАТЕЛ, РАБОТЕЩ С ДОБАВКА НА АЛКОХОЛ“**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”**

Варна
2025г.

Дисертационният труд съдържа 171 страници, включително 69 фигури, 10 таблици, 116 формули, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 78 заглавия, от които 22 на кирилица и 56 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на Г. от Ч. в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №/..... Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Актуалност на проблема

Изследването разглежда възможностите за използване на алтернативни горива за подобряване на ефективността и екологичните характеристики на дизеловите двигатели. В контекста на нарастващите изисквания за намаляване на вредните емисии и повишаване на енергийната ефективност, добавките към конвенционалното гориво предлагат потенциал за оптимизиране на горивния процес. Сред тях п-бутанолът се откроява като обещаваща алтернатива поради добрите си смесителни и горивни свойства. Проведените експериментални изследвания анализират ключови параметри като горивната ефективност, емисионните показатели и процесите на горене. Получените резултати могат да бъдат използвани за разработване на по-екологични и ефективни горивни смеси, като същевременно се осигурява по-устойчиво използване на енергийни ресурси.

2. Цел и задачи на дисертацията

Основната цел на дисертационния труд е изследване и анализ на работния процес на дизелов двигател, работещ с добавка на п-бутанол. Чрез провеждане на експериментални и теоретични изследвания, дисертацията цели да оцени влиянието на тази добавка върху основните енергийни, емисионни и индикаторни показатели на двигателя.

Задачите за постигане на поставената цел са:

- 1 Избор на теоретичен модел за пресмятане на работния процес на дизелов двигател при работа с дизелово гориво и смеси с п-бутанол.
- 2 Избор на теоретичен модел за пресмятане на работния процес в двигател, при работа с дизелово гориво и с добавка на алкохол (п-бутанол).
- 3 Разработване на методика и програма за изчисляване на ключовите параметри, определящи работния процес на изследвания двигател.
- 4 Провеждане на експериментални изследвания на двигател, при работа с дизелово гориво и добавка на п-бутанол в смеси N10, N20, N30, чрез снемане на товарни характеристики при различни честоти на въртене на колянвия вал.
- 5 Обработка на експерименталните данни, както и създаване на графични зависимости на базата на получените резултати.
- 6 Анализиране на получените резултати и изводи спрямо установените зависимости.

3. Обект и предмет на изследване

За обект на експерименталното изследване е избран двигател Fiat 1.9 JTD, монтиран в лаборатория на Русенски университет „Ангел Кънчев“.

4. Методи на изследване

В изследването са използвани експериментални и аналитични методи за анализ на работния процес на дизелови двигатели. За провеждането на експерименталните измервания е използвана специализирана измервателна апаратура, която позволява

заснемане и анализ на бързо променящи се параметри, характерни за работата на двигатели. За обработка на експерименталните данни са използвани математически и числени методи, както и специализирани компютърни софтуери за пресмятане, визуализиране и анализ на резултатите от измерванията. За верифициране на получените резултати са използвани методи за статистическа обработка на данните, които осигуряват точност и надеждност на направените изводи относно ефективността и емисионните характеристики на двигателя.

5. Място на изследване

Теоретичните и експерименталните изследвания, извършени в рамките на дисертационния труд, са проведени в катедра „Двигатели и транспортна техника“ на Русенския университет „Ангел Кънчев“.

6. Научна новост на изследването

Изследването предоставя детайлен анализ и експериментално потвърдени резултати за влиянието на n-бутанола върху работния процес на дизелов двигател, което допринася за разработването на по-ефективни модели за работа на двигателя и оптимизация на неговите експлоатационни параметри.

7. Практическа ценност на изследването

Резултатите от изследването могат да бъдат използвани за оптимизация на работния процес на дизелови двигатели, работещи с n-бутанол, с цел подобряване на горивната ефективност и намаляване на емисиите. Те могат да подпомогнат разработването на по-екологични горивни смеси и да бъдат приложени при изпитвания на двигатели, използващи алтернативни горива.

8. Аprobация на изследването

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

Конференции:

- Научна конференция „Интелигентната специализация – иновативна стратегия за регионална икономическа трансформация“ гр. Русе, 2016 г.. -1 публикация;
- 57-ма Научна конференция Индустрия 4.0. Бизнес среда. Качество на живот гр. Русе , 2018 г.. – 1 публикация;
- Научна конференция на Русенски университет „Ангел Кънчев“ – Русе, 2020 г.- 1 публикация;
- Научна конференция „Науката в служба на обществото - 2024. -1 публикация;

9. Публикации по дисертационния труд

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени и представени в 4 научни публикации, списък на които е приложен в края на автореферата. Един от публикуваните научни труда е самостоятелен, а останалите три са в съавторство с научния ръководител.

Номерацията на фигурите представени в автореферата е номерацията от дисертационния труд.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въведение

Нарастващите изисквания към транспорта налагат преход към по-ефективни и устойчиви технологии, включително използване на алтернативни горива. Биогоривата и алкохолните добавки, като n-бутанол, се разглеждат като обещаващи решения за намаляване на емисиите от дизеловите двигатели, които остават основен източник на замърсяване. Дисертационният труд е насочен към изследване на работния процес на дизелов двигател със съвременна система за впръскване на гориво при работа с алкохолни смеси. Целта е да се оцени влиянието върху горивната ефективност и екологичните характеристики на двигателя.

Глава 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Дизеловите двигатели са ключова технология в транспорта и индустрията поради високата си ефективност и издръжливост. Въпреки това, съвременните екологични изисквания и стремежът към намаляване на въглеродния отпечатък налагат търсенето на алтернативни горива. Основните предизвикателства пред двигателите с вътрешно горене включват намаляване на вредните емисии, подобряване на енергийната ефективност и намаляване на зависимостта от изкопаемите горива.

Образуването на вредни емисии е един от съществените проблеми, пред които са изправени съвременните двигатели с вътрешно горене. Основните замърсители, които се образуват вследствие на несъвършеното горене на горивото, включват:

- Неизгорели въглеводороди (НС);
- Въглероден оксид (CO);
- Азотни оксиди (NO_x);
- Дисперсни /твърди/ частици;
- Въглероден диоксид (CO₂).

Първите законодателни мерки на Европейската икономическа общност (ЕИО) за ограничаване на емисиите от превозни средства датират от 1970 година с приемането на Директива 70/220/ЕИО. През 1992 г. се въвежда първият EURO стандарт (EURO 1), приложим за нови леки автомобили, продавани на територията на Европейския съюз. Постепенно регулациите обхващат и тежкотоварни превозни средства, автобуси и извънпътна техника (съгласно т.нар. „Stage” стандарти), докато морските съдове и въздухоплавателните средства остават под компетенцията на международни организации като ИМО и ИКАО.

С развитието на стандартите от серията Euro се наблюдава не само последователно затягане на ограниченията за вредни емисии, но и разширяване на техния обхват с включване на нови източници на замърсяване. Най-новият стандарт – Euro 7, първоначално предложен през ноември 2022 г. като част от политиката за

постигане на климатична неутралност до 2050 г., беше свързан с амбициозни цели и съкратени срокове за въвеждане. След интензивни обществени и индустриални обсъждания, договорените през декември 2023 г. промени доведоха до по-умерен компромис: част от лимитите за основни замърсители като азотни оксиди (NO_x) и въглероден оксид (CO) остават непроменени спрямо Euro 6, но се въвеждат нови контролирани параметри, сред които емисии на амоняк (NH_3), спирачен прах, износване на гуми и трайност на батерии при електрифицирани превозни средства. Освен това, сроковете за задължително прилагане са значително удължени – до 2030 г. за леки автомобили и 2031 г. за тежкотоварни превозни средства.

При тежкотоварните превозни средства стандартът Euro 7 въвежда значително по-строги изисквания спрямо предходния Euro 6. Най-съществената промяна е намалението на допустимите емисии на азотни оксиди с около 50% при преходен режим на управление (WHTC), както и завишени изисквания за дълготрайност на системите за контрол на емисиите. За първи път се въвеждат ограничения за амоняк и се разширява прилагането на измервания в реални условия чрез мобилни системи (PEMS).

Освен с регулациите, насочени към ограничаване на емисиите от двигателите, Европейският съюз провежда паралелна политика за устойчивост на използваните горива. В този контекст централно място заема Директивата за възобновяема енергия (RED), чиято последна ревизия – RED III, в сила от октомври 2023 г., определя количествени и качествени цели за декарбонизация на сектора. Сред тях са минимален дял от 14,5% възобновяема енергия в транспорта и най-малко 29% намаление на емисиите на парникови газове от горивата до 2030 г., спрямо базовата стойност за дизелово гориво ($94 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$), изчислено по методологията за оценка на жизнения цикъл (LCA). Директивата поставя акцент върху ограничаването на горива с висок ILUC риск и насърчава употребата на биогорива от второ и трето поколение, които не конкурират производството на храни и притежават по-висока екологична стойност. По този начин се формира всеобхватна регулаторна рамка, която обединява технологичното усъвършенстване на двигателите с устойчивото използване на енергийни източници.

С увеличаващото се налагане на строги екологични стандарти, изследванията в областта на двигателите с вътрешно горене се насочват към търсене на устойчиви методи за намаляване на вредните емисии. В този контекст, добавянето на алкохоли към дизеловото гориво се оформя като обещаващ подход. Тези добавки имат потенциала не само да подобрят горивната ефективност, но и да намалят емисиите на вредни вещества, като едновременно с това поддържат или дори увеличават производителността на двигателя. Добавянето на алкохоли към дизеловото гориво води до създаването на горивни смеси с висока кислородна наситеност, което способства за по-пълно изгаряне на горивната смес и намаляване на вредните емисии.

Включването на алкохоли в горивната смес води до редица положителни ефекти:

- Съществено намаление на емисиите на въглероден диоксид, (CO), въглеводороди (HC) и димност;
- Потенциал за намаляване на емисиите на азотни оксиди (NO_x) при подходящи условия на работа;
- Възможност за устойчиво производство от възобновяеми суровини.

Наред с предимствата, алкохолните горива имат и редица недостатъци, които затрудняват широкото им приложение в дизелови двигатели:

- Ниско цетаново число, което затруднява samozапалването;
- Ниска топлотворна способност, водеща до по-висок разход на гориво;
- Проблеми с изпарението при ниски температури и трудности при студен старт;
- Склонност към разслояване на сместа;
- Лошо samozапалване, ограничено количество при двойно гориво или нужда от допълнителни добавки.

Чистото използване на алкохоли често изисква модификации на горивната система или прилагане на добавки за подобряване на самовъзпламеняването. Например, добавки като изопропилнитрат, пентилнитрат и циклохексанолнитрат могат да повишат цетановото число на алкохола до приемливи стойности.

Използването на алкохоли оказва влияние върху конструктивните и експлоатационни характеристики на дизеловите двигатели. Сред основните предизвикателства са:

- Намалена смазочност и вискозитет, което може да доведе до повишено износване на бутало-цилиндровата група, горивни помпи и впръсвачи;
- Хигроскопичност – риск от навлизане на влага, водеща до корозия и емулсифициране на горивото;
- Агресивност към някои полимерни материали – възможно повреждане на уплътнения;
- Възможност за натрупване на отлагания и разтваряне на примеси – което увеличава риска от запушване на дюзи и горивни филтри.

Алкохолите представляват обект на засилен научен интерес в контекста на алтернативните горива и устойчивия транспорт поради своя потенциал за намаляване на вредните емисии и възможността за производство от възобновяеми източници. Прилагането им в дизелови двигатели обаче изисква съобразяване с особеностите на горивната система и добро познаване на техните физико-химични свойства.

Най-често изследвани в тази насока са метанол, етанол, изопропанол и n-бутанол, които, макар и принадлежащи към една и съща химическа група, се отличават със специфични характеристики като структура, летливост, топлотворна способност и други. Именно тези различия обуславят тяхното уникално поведение при горивния процес и взаимодействието им с дизеловото гориво и компонентите на двигателя. Разликите в енергийното съдържание, цетановото число, хигроскопичността и съвместимостта с материалите в горивната апаратура поставят определени технически предизвикателства, които следва да бъдат отчетени при практическото им приложение в съвременните дизелови системи.

Бутанол

Бутанолът (C_4H_9OH) е алкохол с четири въглеродни атома, който съществува в четири изомерни форми, които се различават по подреждането на атомите в молекулата и следователно по физико-химичните си свойства. n-Бутанол (1-бутанол) се счита за най-подходящ при приложение като гориво. Той представлява безцветна течност с характерна миризма, сравнително висока долна топлина на изгаряне, ниска водоразтворимост и умерена токсичност. При контакт с кожата или при вдишване във високи концентрации може да предизвика дразнене на очите, лигавиците и

централната нервна система. n-Бутанолът се получава както чрез нефтопреработвателни процеси, така и по биотехнологичен път – чрез ферментация на захари или целулозни отпадъци.

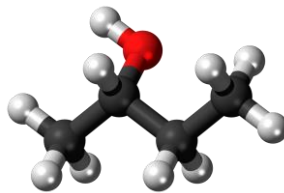
Историята на бутанола като технически продукт и гориво започва в началото на XX век. Първото мащабно промишлено приложение на биобутанола е свързано с разработването на т.нар. АВЕ процес (ацетон–бутанол–етанол), създаден през 1916 г. от Хаим Вайцман. По време на Първата световна война основната цел на този процес е производството на ацетон – ключова суровина за изработването на кордит, бездимен барут, използван във военната индустрия. Бутанолът в този контекст е страничен, но важен продукт, който впоследствие намира широко приложение в индустрията (23).

През 30-те години на XX век бутанолът вече се използва в производството на лакове и бои, а също така и като авиационно гориво – например в японските бойни самолети по време на Втората световна война. (23) Това бележи началото на интереса към бутанола като енергиен източник. Въпреки това, с навлизането на евтиния петрол в глобалната икономика през 50-те и 60-те години, биологичното производство на бутанол става икономически неизгодно. В началото на 60-те години в САЩ АВЕ процесът е окончателно преустановен поради конкуренцията от петролните продукти.

През 80-те години се прави опит за възобновяване на производството на биобутанол в Южна Африка, но поради икономически ограничения и този проект е прекратен. Истинското възраждане на интереса към бутанола започва след 2000 г., в условията на засилен фокус върху устойчивото развитие, енергийната сигурност и необходимостта от декарбонизация на транспорта. През 2008 г. Китай обявява изграждането на два завода за биобутанол, а през следващото десетилетие водещи компании като „Gevo“ (САЩ), „Green Biologics“ (Великобритания) и „Cathay Industrial Biotech“ (Китай) започват разработване на технологии за производство на второ поколение биобутанол от лигноцелуозна биомаса и органични отпадъци.

В периода 2020–2025 г. се наблюдава съществено раздвижване в индустриалното производство на биобутанол, особено чрез биотехнологични процеси, ориентирани към използване на възобновяеми суровини. Анализите на пазара (8) прогнозираят ръст от почти 30% годишно в производствения капацитет на биогорива до 2028 г., основно поради засиленото търсене на устойчиви горива за директно използване в съществуващите двигателни системи без необходимост от технически промени. Въпреки че конкретни данни за растежа на производствения капацитет на биобутанол не са налични, общата тенденция на увеличено търсене на биогорива предполага и нарастващ интерес към производството на биобутанол.

Биобутанолът изпъква като перспективно биогориво от второ поколение, благодарение на възможността да се произвежда от възобновяеми ресурси с нисък въглероден отпечатък. Той отговаря на критериите за устойчивост, заложиени в европейските регулаторни рамки RED II и RED III, включително чрез оценка на жизнения цикъл (LCA) и нисък ILUC риск. Важно е да се отбележи, че химичната структура и горивните свойства на биологично получения n-бутанол са идентични с



Фигура 1.5. Молекулен модел на бутанол

тези на неговия синтетичен аналог, което позволява биобутанолът да се използва добавка към дизеловото гориво без необходимост от модификации на двигателя (24).

Биобутанолът, най-често в изомера си *n*-бутанол (1-бутанол), представлява органичен алкохол с четири въглеродни атома, идентичен по молекулна структура и физико-химични свойства с промишлено произвеждания *n*-бутанол на петролна основа. Двата варианта имат една и съща химична формула (C_4H_9OH) и поведение в горивния процес, но се различават по произхода – биобутанолът се получава от възобновяеми суровини и попада в категорията на устойчивите биогорива, докато конвенционалният *n*-бутанол е продукт на нефтопреработката. По тази причина, биобутанолът може да отговори на изискванията на ЕС.



Фигура 1.6. Принципна схема на производство на биобутанол

Използват се технологии от първо, второ и трето поколение, като при второто поколение се предпочитат отпадъчни и неядливи суровини, което е в пълно съответствие с политиките на ЕС за устойчиво земеползване (ILUC) и декарбонизация. Значителен интерес има и към интеграцията на биобутанолово производство в концепцията за биорафинерии, където паралелно се добиват и други ценни съединения като ацетон и етанол, което повишава ефективността на процеса.

Водораслите се очертават като обещаваща суровина за производство на биогорива от трето поколение. За разлика от класическите земеделски култури, водораслите не изискват земеделска земя или прясна вода, а същевременно притежават висока биомасова продуктивност. Получените резултати от изследвания за производство на биобутанол от водорасли, ясно показват, че както микроводораслите, така и макроводораслите имат значителен потенциал като устойчива суровина за производството му, особено когато се използват остатъци след извличане на масло или от отпадъчни потоци.

Биобутанолът може да се разглежда като екологично устойчиво и технически съвместимо гориво от второ поколение, което да се използва в съществуващи дизелови системи без значителни модификации.

Изследвания на дизелово-алкохолни смеси

Разработването и изследването на дизелови смеси с алкохоли като добавки (етанол, метанол, изопропанол и *n*-бутанол) се превръща във все по-активно направление на научно-техническия прогрес в глобален мащаб

Експериментално изследване на изследователи показва, че добавянето на метанол към дизеловото гориво (стабилизиран с *n*-деканол) води до по-мек горене и понижение на вътрешноцилиндричното налягане и скоростта на нарастване на налягането с около 10–11%. Наблюдава се значително намаление на емисиите на

азотни оксиди (до 30%) и сажди (до 50%), но за сметка на леко повишение на въглеродния оксид, неизгорелите въглеводороди и специфичния разход на гориво.

Изследване, проведено от международен екип, оценява ефектите от добавяне на п-бутанол (5–20%) към дизеловото гориво в тежкотоварен двигател без конструктивни промени. Най-добър баланс между емисионни и горивни показатели е отчетен при 10% бутанол – с до 60% по-ниски емисии на твърди частици и намаление на въглеродния оксид. Отчита се повишение на въглеводороди (до 55%) и азотни оксиди при пълно натоварване. Специфичният разход на гориво се увеличава до 6%, но разходът на енергия намалява с до 2,3% при частично натоварване.

Експериментално изследване на екип от Политехническият университет в Мадрид показва, че добавянето на п-бутанол (5–20%) към дизеловото гориво в тежкотоварен двигател Euro V води до значително намаляване на въглеродния диоксид и твърдите частици – до 60% при 10% бутанол. Енергийният разход остава почти непроменен, а мощността леко намалява. Азотният диоксид намалява, но общите азотни оксиди леко нарастват при ниска и висока концентрация на бутанол. Емисиите на въглеводороди и CO се увеличават с концентрацията – THC до +55%.

Паралелно изследване от университетите в Кордоба и Бирмингам оценява влиянието на етанол и 1-пропанол върху емисиите в дизелов двигател при различни режими. Отчита се до 60% спад на сажди и органичната фракция благодарение на кислородното съдържание, но се наблюдава повишение на CO и HC при ниски натоварвания (до +30%) заради високата топлина на изпарение на алкохолите. При високи натоварвания ефектът се компенсира, а NO_x емисиите се увеличават умерено (до +8%) при високи температури. Разходът на гориво нараства с 5–8% поради по-ниската топлотворна способност на алкохолите.

Експериментално изследване на колектив от Техническият университет в Айндховен оценява възможността за използване на смеси от 80% етанол (EH80) или п-бутанол (BH80) с 20% п-хептан в дизелов двигател без добавка на стандартно дизелово гориво. п-хептанът служи като компонент за самозапалване. Резултатите показват, че и двете смеси осигуряват стабилна работа в широк диапазон на натоварвания (4–18 bar), с отчетливо по-ниски емисии на азотни оксиди и сажди спрямо дизела – под границите на Euro VI до 14 bar.

BH80 се отличава с по-висок индикаторен коефициент на полезно действие (над 50% при 8–14 bar), по-добра горивна ефективност и по-ниски температурни изисквания спрямо EH80, при който се налага подгриване на входящия въздух до 120 °C. И при двете смеси се отчита повишение на въглеводородите и въглеродния оксид при ниски натоварвания, но тези емисии са контролируеми с катализатор. В заключение, п-бутанолът се откроява като по-ефективна алтернатива спрямо етанола в концепции за дизелово горене с ниска температура.

В хода на литературния обзор са разгледани основните аспекти на използването на алкохоли като добавки в дизелови двигатели. Изследванията показват, че използването на алкохоли в дизеловото гориво може да доведе до намаляване на вредните емисии, като въглероден оксид (CO), неизгорели въглеводороди (HC) и твърди частици, като същевременно води подобряване на горивната ефективност. Също така добавянето на алкохол може да намали димността и саждите, но може да предизвика и повишение на емисиите на азотни оксиди (NO_x), особено при високи концентрации на алкохол и при определени натоварвания на двигателя.

Въпреки значителните постижения в изследванията на алкохолните добавки в дизелови двигатели, данните относно индицирането на дизеловите двигатели при работа с добавен алкохол са все още ограничени или липсват. Особено при автомобилни двигатели със съвременна система за впръскване тип „Common rail” и с добавяне на n-бутанол, изследванията, които се фокусират върху индицирането (характеристики на възпламеняването, забавяне на възпламеняването и ефективност на горенето), са изключително редки и почти липсват. Тези данни са от съществено значение за пълното разбиране на въздействието на n-бутанола върху работния процес на дизеловия двигател, тъй като правилното индициране е ключово за ефективността и оптимизацията на горивния процес.

ГЛАВА II - ТЕОРЕТИЧНО ПРЕСМЯТАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ В ДВГ ПРИ РАБОТА С ДИЗЕЛОВО ГОРИВО И БИОДИЗЕЛ

Теоретичните пресмятания са направени с помощта на специализиран програмен продукт AVL BOOST (впоследствие интегриран като модул в AVL CRUISE™ М след 2020 г. Софтуерът представлява симулационен инструмент за едномерно моделиране (1D) на потоци, топлообмен и горивни процеси в ДВГ. Той използва едномерни газодинамични уравнения и моделира всеки компонент чрез разделяне на малки обеми, за които се приемат постоянни скаларни параметри (налягане, температура, плътност и вътрешна енергия) и векторни параметри (скорост и масов дебит). Системата позволява прецизно изследване на параметри като топлинно отделяне, ефективност и емисии чрез въвеждане на реални данни за двигателя.

За да се създаде възможно най-точен модел съответстващ на реалния двигател, AVL BOOST изисква въвеждане на основните технически характеристики на изследвания двигател. Това включва параметри като брой на цилиндрите, диаметър и ход на буталата, степен на сгъстяване, дължина и диаметър на тръбопроводите на пълнителната и изпускателната системи, налягане на турбокомпресора и други ключови данни. Пресмятанията се осъществяват в заложените в продукта свойства на използваното гориво, както и движението на горивовъздушната смес.

Програмата пресмята свойствата на сместа във всеки момент от време и определя моментния ѝ състав, като това може да се осъществи по два различни подхода:

Класически вид пренос;

Основен вид пренос;

При класическия вид пренос се пресмята количеството въздух, което участва при изгарянето на горивото, както и гориво-въздушното отношение, характерно за продуктите на горенето (AFCP).

$$AF_{CP} = \frac{W_{CP} - W_{FB}}{W_{FB}} \quad (1.1)$$

WCP - масова част на продуктите на горенето;

WFB - масова част на изгореното гориво;

За да се определят свойствата на отработилите газове, гориво-въздушното отношение се използва като показател за техния състав. Това съотношение показва при какви условия е протекло горенето, довело до образуването на отделените газове.

Съставът на отработилите газове се изчислява на база химическо равновесие, като се отчита и дисоциацията на веществата, настъпваща при високите температури в цилиндъра.

При основния вид пренос на газовия състав може да се опише чрез произволен брой компоненти, които се задават от потребителя. Минималният необходим брой елементи е седем: гориво, кислород, азот, въглероден диоксид, вода, въглероден оксид и водород. За всеки от посочените компоненти се формира уравнение за запазване на масовата му част във всички елементи на модела.

В модела на BOOST определянето на горивните компоненти оказва влияние върху:

Дюза – количеството впрыскано гориво включва всички горивни компоненти, като се спазва предварително зададеното съотношение, освен ако не е променено локално в дюзата.

Цилиндър (впрыскване и изпаряване) – впрысканата и изпарена маса на горивото се разпределя между всички дефинирани горивни компоненти, като се използва точно определено съотношение.

След въвеждане на конструкционните параметри касаещи бутало-цилиндровата група, се пристъпва към разглеждане на процесът на топлоотдаване.

Топлинният поток, предаващ се от работната смес към стените на цилиндъра се пресмята по следната формула:

$$Q_{wi} = A_i \cdot a_w \cdot (T_c + T_{wi}) \quad (1.2)$$

Q_{wi} – топлинен поток към стените на цилиндъра;

A_i - топлообменна повърхнина;

a_w – коефициент на топлообмен;

T_c – температурата на горивовъздушната смес;

T_{wi} – температура на стените.

За да се моделират процесите в цилиндъра на двигателя се използват основни уравнение от термодинамиката. Термодинамичното състояние на цилиндъра се пресмята на основата на първия закон на термодинамиката (1.3)

$$\begin{aligned} \frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = & -p_c \cdot \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i \\ & - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} \cdot h - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt} \end{aligned}$$

Първият закон на термодинамиката за цикъл при високо налягане гласи, че промяната на вътрешната енергия в цилиндъра е равна на сумата от работата, извършена от буталото, внесеният количество топлина от горивото, топлинните загуби през стените и потока на енталпия, обусловен от процеса на продухване.

За пресмятане на коефициента на топлоотдаване a_w , програмният продукт осигурява следните модели на топлоотдаване:

- Уошни 1990 (Woschni 1990);
- Хохенберг (Hohenberg);
- Лоренц (Lorenz) (само за двигатели с разделени горивни камери);
- AVL 2000 Model;

- Bargende;

Моделът на Уошни от 1978 година е систематизиран (1.11):

$$\alpha_w = 130 \cdot D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \cdot \left[C_1 \cdot c_m + C_2 \cdot \frac{V_D \cdot T_{c,1}}{p_{c,1} \cdot V_{c,1}} \cdot (p_c - p_{c,o}) \right]^{0.8}$$

където

$$C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot c_u / c_m$$

$C_2 = 0,00324$ за двигатели с директно впръскване

D – диаметър на цилиндъра

c_m – средна скорост на буталото

c_u – периферна скорост

V_D – работен обем на цилиндър

$p_{c,o}$ – налягане на цилиндъра на двигателя

$T_{c,1}$ – температура в цилиндъра при затворен пълнителен клапан

$p_{c,1}$ – налягане в цилиндъра при затворен пълнителен клапан.

След създаването на виртуалния модел на изследвания двигател е необходимо първо да се оцени грешката спрямо реалния двигател, преди да бъде проведено самото изследване. Резултатите от сравнителния анализ показват грешка под 2%.

Това потвърждава, че симулацията на двигателя осигурява достатъчно достоверни данни спрямо реалните измервания.

ГЛАВА III - ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТНИЯ ПРОЦЕС НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ ФИАТ 1,9JTD

1. Цел на експерименталното изследване.

Основната цел на експерименталните изследвания е да се анализират работният процес на двигателя, токсичността на отработилите газове и ключови параметри при използване както на дизелово гориво (без биодизелова компонента), така и на смеси от дизел и n-бутанол с различни обемни съотношения: 90% дизел и 10% n-бутанол (N10), 80% дизел и 20% n-бутанол (N20) и 70% дизел и 30% n-бутанол (N30).

В рамките на експериментите са проведени следните измервания за четирите вида гориво:

- Товарни характеристики при обороти на колянния вал 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} , 2500 min^{-1} и 3000 min^{-1} , при съпротивителни моменти от 50 Nm, 75 Nm, 100 Nm и 125 Nm.

- Частични честотни характеристики при 40% положение на регулиращия орган за горивоподаване.

Основни задачи на експерименталното изследване са:

- Индициране на двигателя и анализ на топлоотделянето;
- Измерване и оценка на съдържанието на токсични компоненти в отработените газове;
- Сравнителен анализ на мощностните и икономическите характеристики на двигателя;
- Определяне на индикаторните и ефективните показатели на двигателя;
- Съпоставяне на изследваните параметри при работа с различните 3 горивни смеси.

1.1 Обект на изследване:

Експерименталните изследвания са проведени в лаборатория към Русенски университет „Ангел Кънчев“.

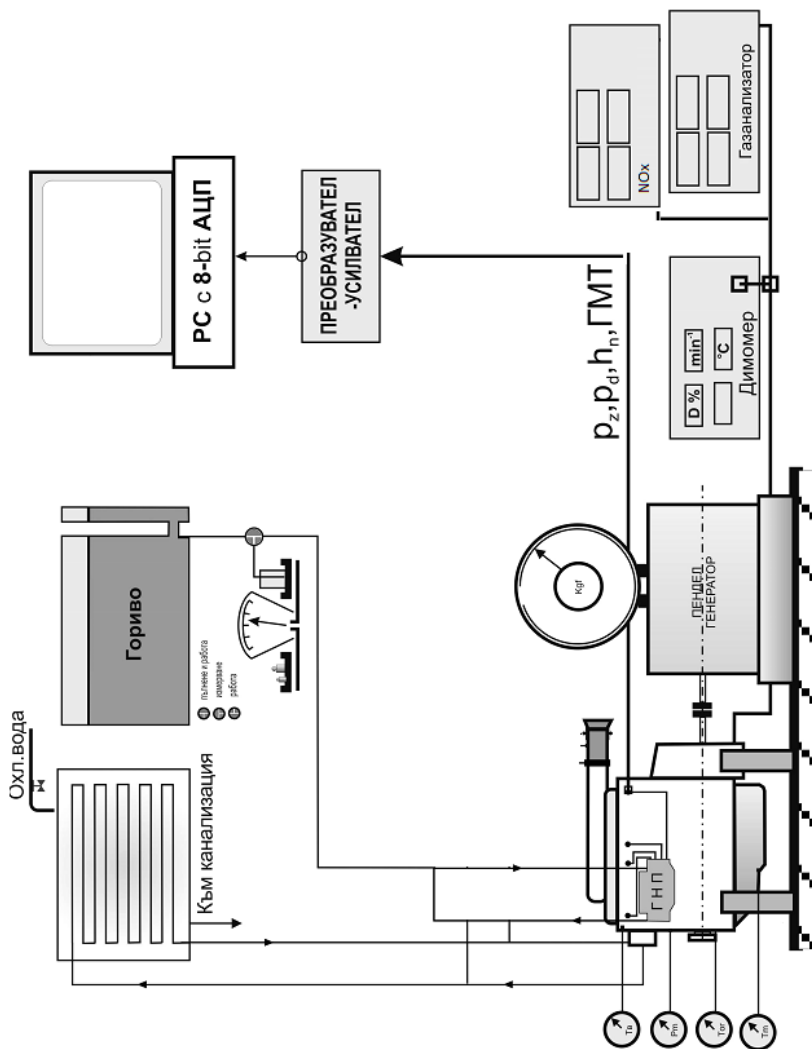
Обекта на изследване е дизелов двигател Fiat 1.9 JTD, с технически параметри показани на таблица 3.1.

№	Параметър	Стойност
1	Производител	Fiat
2	Година	2002
3	Код на двигателя	188 A2.000
4	Генерация	Palio Weekend (178)
5	Работен обем на двигателя [dm ³]	1,910
6	Диаметър на цилиндъра [mm]	82,00
7	Ход на буталото [mm]	90,40
8	Степен на сгъстяване	18,5
9	Номинална мощност при честота на въртене на колянния вал [kW/ min ⁻¹]	60/4000
10	Номинален въртящ момент при честота на въртене на колянния вал [Nm/ min ⁻¹]	196/1500
11	Ред на работа на двигателя	1-3-4-2
12	Тип охлаждане	Принудително – водно
13	Тактност	Четиритактов
14	Смесообразуване	Вътрешно
15	Пълнене	Принудително
16	Горивна система	Common-rail
17	Брой и разположение на цилиндрите	4, редови

1.2 Описание на експерименталната установка:

Изпитваният двигател е монтиран върху стойка, здраво закрепена към фундамента на лабораторията. Към изходящия вал на предавателната кутия е свързана уравновесена постояннотокова електрическа спирачка с независимо възбуждане. Охлаждането се осъществява чрез принудителна водна циркулация, като автоматична система поддържа работната температура в диапазона около 95°C.

От дясната страна на двигателя са разположени следните компоненти: термодвойка за измерване на температурата на отработените газове, система за охлаждане с електромагнитен клапан, дюза за отчитане на разхода на входящия въздух в двигателя, както и преобразувател за измерване на честотата на въртене.



Фиг. 3.1. Схема на експерименталната установка

От дясната страна на двигателя са разположени следните компоненти: термодвойка за измерване на температурата на отработените газове, система за охлаждане с електромагнитен клапан, дюза за отчитане на разхода на входящия въздух в двигателя, както и преобразувател за измерване на честотата на въртене.

1.3 Използвани горива

За провеждане на експерименталните изследвания са използвани дизелово

ЛУКОЙЛ „ЛУКОЙЛ БЪЛГАРИЯ“ ЕООД	ФИРМЕНА СПЕЦИФИКАЦИЯ	ФС 05-01-24
Гориво за изпитвателна техника и трактори (СР)		
Изготвил, Менеджър Метрология и Контрол по качеството М. Нинов	Утвърдил, Директор по разпореждане Г. Раков	

1. Технически изисквания

Показатели	Дименсия	Норми	Методи за изпитване
1	2	3	4
Цвят		max 1,5	ASTM D 1500 БДС ISO 2049
Корозия на медна пластинка (3h при 50°C)	клас	max 1	БДС EN ISO 2160 ASTM D 130
Плътност при 15°C	kg/m ³	815,0-845,0*	БДС EN ISO 3675 ASTM D 1298 БДС EN ISO 12185 БДС EN 116 IP 309
Гранична температура на филтруемост през студен филтър, СГРР зима	°C	max -15	
Дестилационни характеристики: - до 250°C дестилат - до 350°C дестилат - 95(V/V) % дестилат при	%(V/V) %(V/V) °C	max 65 min 85 max 360	БДС EN ISO 3405 ASTM D 86
Кинематичен вискозитет при 40°C	mm ² /s	2,0 – 4,50	БДС EN ISO 3104 ASTM D 445
Плътна температура в затворен тигел	°C	min 55	БДС EN ISO 2719 ASTM D 93
Съдържание на сярата	mg/kg	max 10,0	БДС EN ISO 20846 ASTM D 5453
Съдържание на вода	mg/kg	max 200	БДС ISO 12937
Общо количество онеочистения	mg/kg	max 24	БДС EN 12662 IP 440

 ЛУКОЙЛ „ЛУКОЙЛ БЪЛГАРИЯ“ ЕООД	ФИРМЕНА СПЕЦИФИКАЦИЯ		ФС 05-01-24
Гориво за изпитвателна техника и трактори (СР)			
Коксов остатък (на 10% остатък от дестилат)	% (m/m)	max 0,30	БДС EN ISO 10370 ASTM D 4530
Цетанов индекс		min 46,0	БДС EN ISO 4264
Цетаново число		min 49,0	БДС EN ISO 5165
Окислителна стабилност	g/m ³	max 25	БДС EN ISO 12205 ASTM D 2274
Смазочна способност при 60°C	µm	max 460	БДС ISO 12156-1
Полидисилични арили	% (m/m)	max 8	БДС EN 12916
Пепел	%(m/m)	max 0,01	БДС EN ISO 6245 ASTM D 482
Съдържание на метилови естери на мастни киселини (FAME)	% (V/V)	-	БДС EN 14078
Температура на помпелане (СР)	°C	max – минус 8	БДС EN ISO 3015
Съдържание на маганз	mg/l	max 2	БДС EN 16576

- * – Ниво Е зима – от 16.10. до 15.04.

2. Описание на продукта

Продуктът е лесно запалима течност. Предназначен е за двигатели с компресорно запалване за изпитвателна техника и трактори.

3. Метод на производство и вземане на проби

3.1. Получава се чрез смесване на дестилатни фракции от първична и вторична преработка на нефт. Допуска се влагане на присадки.

3.2. Вземането на проби се извършва на партиди съгласно БДС ISO 3170.

„Партида“ е количество от един и същ вид или марка течност, еднородно по качествените си показатели, произведено по една и съща технология, съхранявано в един или повече резервоари и съпроводено с един документ за изпитване.

Фиг.3.2, Спецификация на използваното дизелово гориво

гориво без био компонента и със спецификация показана на фигура 3.2 и нормален бутанол на фигура 3.3. Горивото за провеждането на експерименталните изследвания е с произход от „Лукойл България“ ЕООД. Алкохолът е с произход „Валерус“.

2. Методика за експерименталното изследване

Измервани и изчислявани величини:

При провеждане на експерименталните изследвания са измерени следните величини:

- Натоварване към двигателя;
- Честота на въртене на колянния вал;
- Разход на гориво;
- Разход на постъпващият в двигателя въздух;

ВАЛЕРУС [®]	http://www.valerus-bg.com
тел. +359 2 868 20 91	факс. +359 2 868 11 01
Офис и складова база:	София, жк „Дружба - I“, ул. Амстердам, 16
ЛАБОРАТОРНИ РЕАКТИВИ, ЛАБОРАТОРНА СЪПЛАНА И АПАРАТУРА	

СЕРТИФИКАТ ЗА КАЧЕСТВО

Продукт: 1-БУТАНОЛ /н-БУТИЛОВ АЛКОХОЛ/,
ЧИСТ
Формула: C₄H₁₀O
Кат. №: 0476
CAS-No. [71-36-3]



Партиден №:	Дата на производство:	Годен до:
31	август 2023	август 2027
№	Показател	Съдържание:
1.	Основно вещество	мин. 99%
2.	Вода	макс. 0,5%
3.	2-Бутанол	макс. 0,07%
5.	Разтворимост	66 гр/л
6.	Температура на кипене	116-118°C

B. Rusinov
Валери Русинов

Фигура 3.3. Спецификация на използван алкохол

- Изменение на налягането в цилиндър на двигателя;
- Начало на впръскване на горивото;
- Температурата на отработилите газове;
- Температура на охлаждащата течност;
- Температура на околната среда;
- Барометрично налягане на въздуха;
- Влажност на въздуха;
- Съдържание на CO, CO₂, O₂, HC, NO_x в отработилите газове;
- Димност (съдържания на твърди частици в отработилите газове).

След провеждане на експерименталното изследване са изчислени следните величини:

- Часов и специфичен разход на гориво;
- Количество гориво за един цикъл;
- Коефициент на пълнене;
- Въздушно отношение;
- Мощностно-икономически показатели;
- Индикаторни показатели;
- Изменение на температурата в цилиндъра;
- Скорост на нарастване на налягането;
- Скорост на топлоотдаване.

3. Обработка на получените експериментални данни

За регистриране диаграмите на изменение на налягането в цилиндъра се използва АЦП, като така се съкращава времето за последващата обработка на експерименталните данни. При използването на тази методика възникват проблеми от изчислително естество, като апаратни смущения, които се характеризират с големи и случайни отклонение на произволни места по изследваната крива, също така диаграмата на изменението на налягането в цилиндъра трябва да бъде гладка функция, която да може да се подложи на последващо диференциране.

След като се запишат няколко характеристики, те трябва да се обработят с цел получаването на една представителна характеристика. Следващата обработка на тази представителна характеристика има за цел да се определи динамиката на топлоотделяне и характеристиката на активното топлоотделяне на изследвания двигател.

Параметри на процеса горене:

При изпитването на двигателя се измерват и изчисляват различни величини, непосредствено характеризиращи работния процес на двигателя. Това са:

- Налягането на работното тяло в цилиндъра на двигателя по ъгъла на завъртане на колянвия вал, $p = f(\varphi)$;
- Скоростта на нарастването на налягането $dp/d\varphi$;
- Максималното налягане в цилиндъра p_z ;
- Средното индикаторно налягане p_i ;
- Моментната стойност на честотата на въртене на колянвия n ;
- Индикаторната мощност N_i ;
- Въртящият момент M_b ;
- Ефективната мощност N_e ;

- Токсичността на отработилите газове;
- Температурата на околната среда, охлаждащата течност и др. необходими за измерванията температури;

- Разходът на въздух и гориво;
- ход на иглата на дюзата и др.

На фигура 3.11 са показани някои от параметрите на процеса горене, които се отчитат от индикаторната диаграма:

За определяне на максималната скорост на нарастване на налягането е използвана следната формула:

$$\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_{\max} = \mu \cdot \text{tg}(\beta) \quad (3.35)$$

където: $\mu = \mu_p / \mu_f$ – мащабен коефициент на индикаторната диаграма.

За определяне на динамиката на топлоотделяне и характеристиката на активното топлоотделяне се използва анализ на топлоотделянето основан на първия закон на термодинамиката [11, 12, 13, 18, 21, 23, 49, 51, 55, 58]. Чрез обработка на данни от реална индикаторна диаграма, към получените резултати се добавят и топлинните загуби в следствие на износване на двигателя, увеличени хлабини и др. Затова при пресмятанията за определяне на характеристиката на активно топлоотделяне $X_a = f(\phi)$ се извършват без да се отчитат тези топлинни загуби при процеса горене.

При пресмятанията се използва метода на Б. Шароглазов [28], според която уравнението по линията на горене от индикаторната диаграма може да се раздели на отделни участъци за които може да се запише първия закон на термодинамиката в следния вид:

$$Q_{x_{1+2}} = \mu C_{v_{1+2}} \cdot (T_2 - T_1) + \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (3.36)$$

където: $Q_{x_{1+2}}$ – използваната топлина за повишаване на вътрешната енергия и за осъществяването на работа в разглеждания участък 1 ÷ 2 по индикаторната диаграма;

$\mu C_{v_{1+2}}$ – молен специфичен топлинен капацитет при постоянен обем в разглеждания участък 1 ÷ 2 по индикаторната диаграма;

$p dV$ – работа извършена от газовете при промяна на обема в цилиндъра от V_1 до V_2 ;

Температурата на газовете във всеки един момент се определя от уравнението:

$$T = \frac{T_{c'}}{p_{c'} \cdot V_{c'}} \cdot \frac{p \cdot V}{\beta} \quad (3.37)$$

където: β – действителен коефициент на молно изменение,

$\beta = M_0 + M_r + \Delta M / M_0 - M_r$, M_0 – маса на свежото работно вещество [kmol];

M_r – маса на отработените газове [kmol];

ΔM – увеличение на масата на работното вещество за интервал от време t . Когато $t = 0 \rightarrow \Delta M = 0$ и при $t = t_z \rightarrow \Delta M = \Delta M_{\max}$. За всеки един момент от време $\Delta M = \Delta M_{\max} \cdot X_a$.

T_c', p, V – температура, налягане и обем в момента на начало на видимото горене;

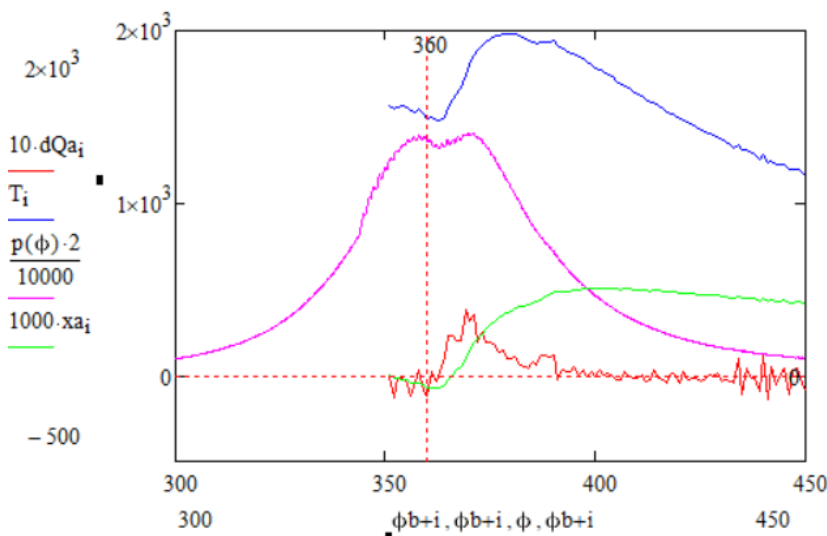
p, V – текущи налягане и обем на цилиндъра.

Характеристика на активно топлоотделяне X_a се нарича частта от отделеното количество топлина във функция от завъртането на колянния вал.

$$X_a = \frac{Q_x(\varphi)}{\xi_z \cdot H_u \cdot q_c} \quad (3.38)$$

където: $Q_x(\varphi)$ – количество топлина внесено в цилиндъра на двигателя по време на процеса горене в даден момент от завъртането на колянния вал;

ξ_z – коефициент на използване на топлината (отчита топлинните загуби вследствие на непълното изгаряне на горивото, несъвършенството на работния процес и т.н.);



Фигура 41 Резултати от пресмятията

H_u – долна топлина на изгаряне на горивото [kJ/kg];

q_c – циклова порция гориво.

Резултатите от пресмятията се представят в графичен вид, показан на фигура 3.12.

След направените пресмятия, от графиките могат да се отчетат:

$T_{\max}$ – максималната температура по време на процеса горене [K];

φ_Z – ъгъл от завъртане на колянния вал отговарящ на момента на максимално налягане в цилиндъра [deg];

p_Z – максимално налягане в цилиндъра на двигателя по време на процеса горене [MPa];

$Q_{\max}$ – максимална стойност на топлоотделянето [J/deg];

$X_{\max}$ – максимална стойност на отношението на активното топлоотделяне [%];

Изводи:

Разработената методика и програмите за изчисляване на параметрите на работния процес на двигателя, базирани на обработка на индикаторната диаграма, осигуряват необходимата точност и прецизност. Това позволява детайлен анализ на процесите, протичащи по време на горенето.

Прилагането на висококачествени измервателни преобразуватели за регистриране на налягането в цилиндъра и честотата на въртене на колянния вал, заедно с апаратурата на „Kistler“ и използването на „USB AUTOSCOPE“, гарантира изключително прецизно събиране и запис на данните. Тази комбинация свежда до минимум вероятността за допускане на грешки при измерванията и анализа на ключовите параметри.

Така се изпълнява успешно задача 2, формулирана в глава I.

Глава IV. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ:

Извършени са измервания с дизелово гориво без биокomпонента, както и със смеси, съдържащи n-бутанол в следните съотношения: 90% дизелово гориво и 10% n-бутанол (N10), 80% дизелово гориво и 20% n-бутанол (N20), 70% дизелово гориво и 30% n-бутанол (N30). В хода на експерименталните изследвания са записани товарни характеристики при честоти на въртене на колянния вал от 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹ и 3000 min⁻¹, както и при съпротивителен момент от 50 Nm, 75 Nm, 100 Nm и 125 Nm.

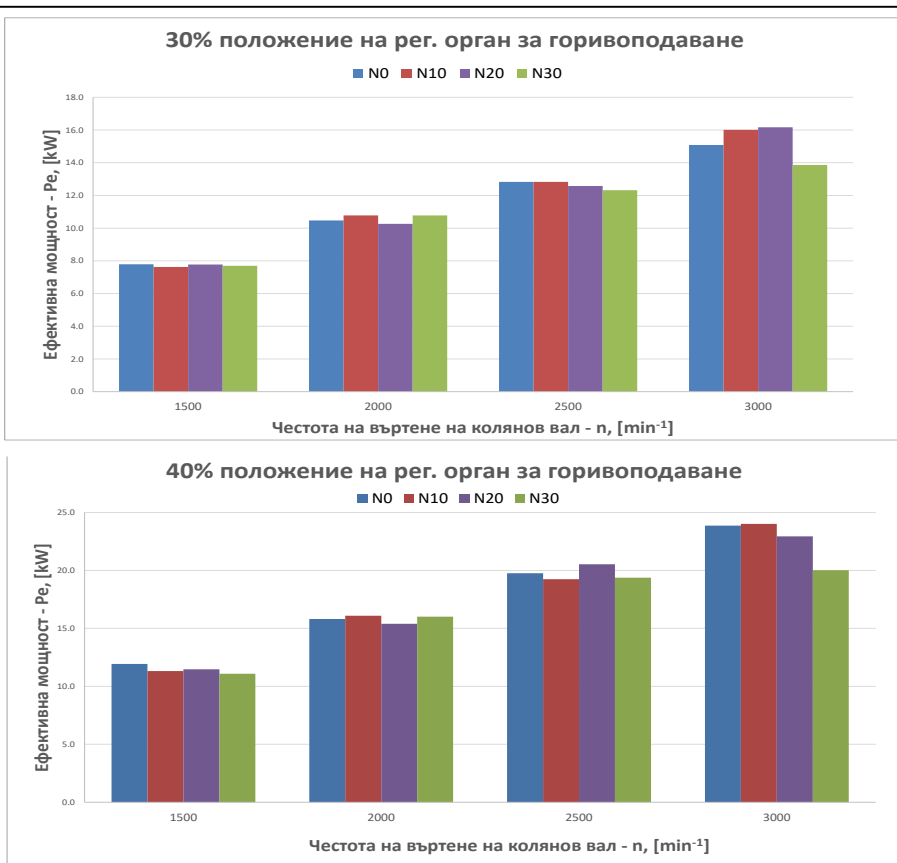
Представени са резултатите от изменението на ефективните, индикаторните и екологичните показатели. Резултатите са групирани в три категории:

- мощностно-икономически показатели;
- екологични показатели;
- индикаторни и ефективни показатели;
- показатели на работния процес.

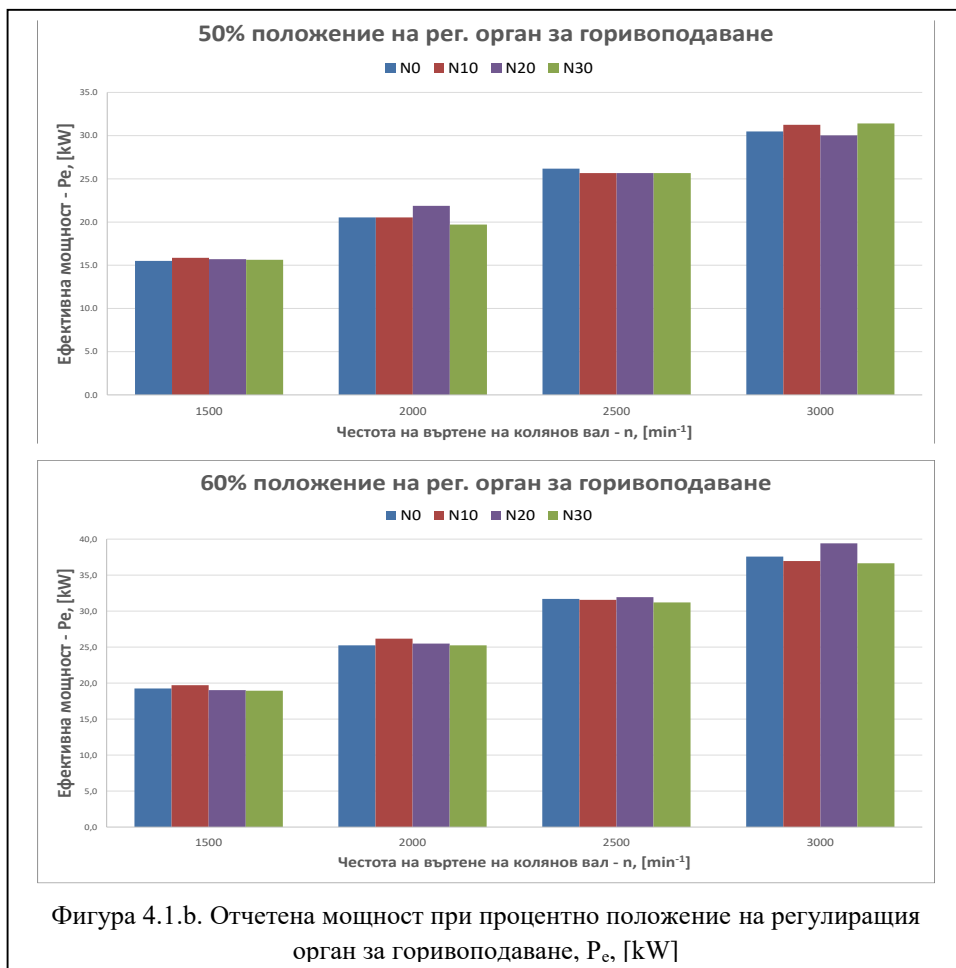
Мощностно-икономически показатели

На фигури 4.1.a и 4.2.b са представени резултатите от експерименталните изследвания на ефектите от добавяне на n-бутанол към дизеловото гориво върху ефективната мощност на двигателя при различни натоварвания (30%, 40%, 50% и 60%) и честоти на въртене на колянния вал в диапазона от 1500 до 3000 min⁻¹. Анализът показва, че при ниски натоварвания (30-40%) добавянето на n-бутанол (10%, 20% и 30%) има незначителен ефект или води до леко намаление на мощността. Най-същественият спад в мощността от 4,44% е отчетен при най-високото

съдържание на п-бутанол (N30), натоварване 40% и честота 3000 min⁻¹. С повишаване на натоварването (50-60%) и при високи честоти (2500-3000 min⁻¹) се наблюдава ясно изразено подобрене на мощностните показатели, като най-високите стойности са регистрирани при по-високите концентрации на п-бутанол (N20 и N30). Максималното отчетено подобрене спрямо дизеловото гориво без добавка е +4,73% за сместа с 30% п-бутанол (N30) при натоварване 60% и честота на въртене от 2500 min⁻¹. Следователно, при средни и високи натоварвания използването на смеси с п-бутанол оказва положително въздействие върху ефективната мощност на двигателя. При високи натоварвания и честоти на въртене предимствата на бутанола (наличието на кислород, подобреното горене и по-доброто смесообразуване) надделяват над основния му недостатък – по-ниската долна топлина на изгаряне. Именно по-ниската стойност за този параметър обяснява наблюдаваното леко понижение на мощността при ниски натоварвания и високи концентрации на п-бутанол.



Фигура 4.1.а. Отчетена мощност при процентно положение на регулиращия орган за горивоподаване, P_e , [kW]

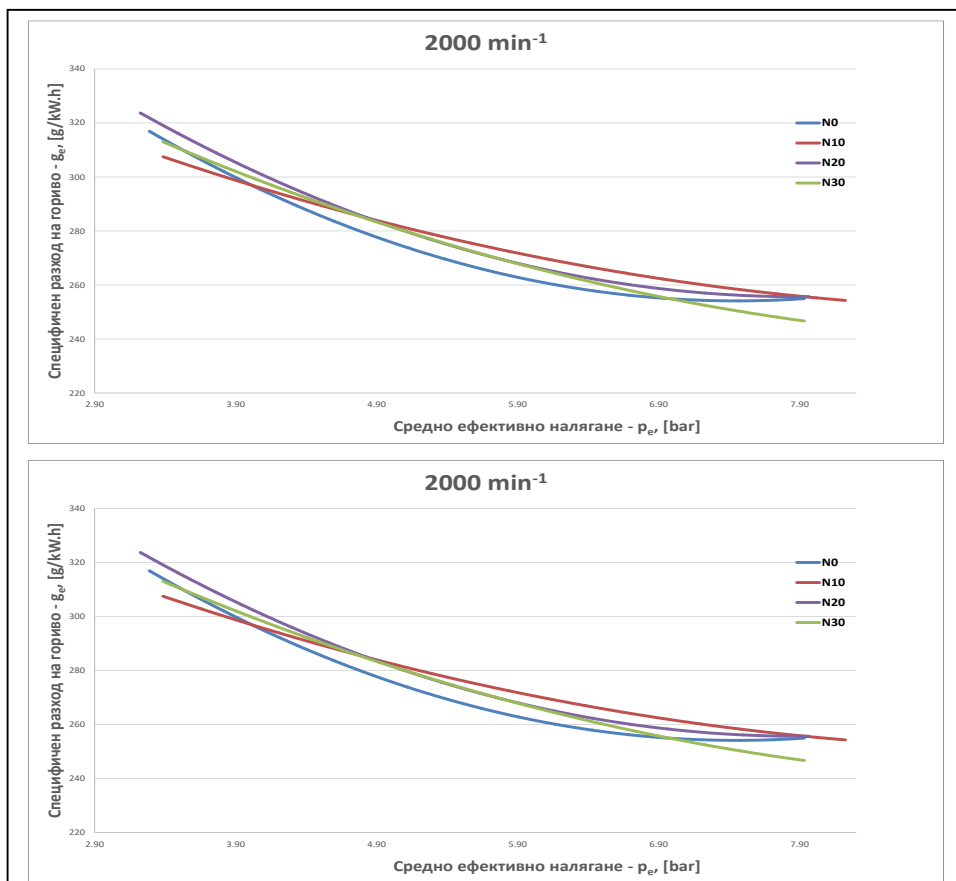


На фигури 4.2.a и 4.2.b са представени резултатите за изменението на специфичния разход на гориво (g_e) при добавяне на n -бутанол към дизеловото гориво при различни честоти на въртене на коляновия вал (1500, 2000, 2500 и 3000 min⁻¹) и различни степени на натоварване, изразени чрез средно ефективно налягане в диапазона приблизително от 3 до 8 bar. Резултатите показват, че при ниски честоти на въртене (1500–2000 min⁻¹) добавянето на n -бутанол води до увеличение на специфичния разход на гориво, като най-същественото повишение спрямо дизеловото гориво без добавка достига 19,2% за сместа с 30% n -бутанол (N30) при 1500 min⁻¹.

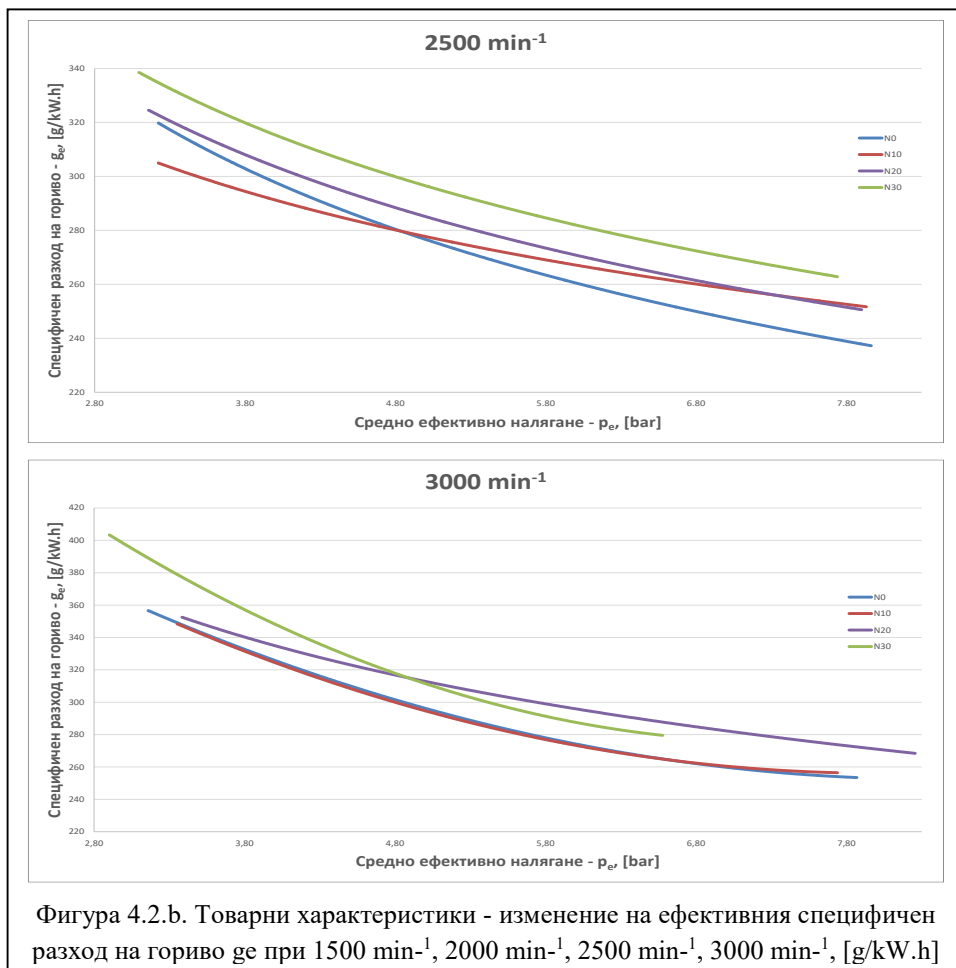
С нарастване на честотата на въртене до 2500–3000 min⁻¹ разликите между дизеловото гориво без добавка и смесите с по-ниско съдържание на n -бутанол намаляват, като при сместа N10 (10% n -бутанол) дори се наблюдава намаление на

специфичния разход до $-1,92\%$ при 2500 min^{-1} . Това представлява и най-голямото подобрение сред всички изследвани условия. При по-високи концентрации на n-бутанол (N20 и N30) се запазва тенденцията за по-висок разход спрямо дизеловото гориво без добавка, но с по-умерени отклонения (между $1,92\%$ и $13,8\%$).

Използването на смеси с n-бутанол при ниски честоти на въртене на колянвия вал и ниски натоварвания увеличава специфичния разход на гориво, главно поради по-ниската енергийна плътност на n-бутанола спрямо дизеловото гориво без добавка. При по-високи честоти на въртене и натоварвания обаче, подобреното смесообразуване и по-пълното изгаряне, дължащи се на физико-химичните свойства на n-бутанола, частично компенсират този недостатък. Това води до намаляване на специфичния разход, особено при ниски концентрации на n-бутанол (N10).



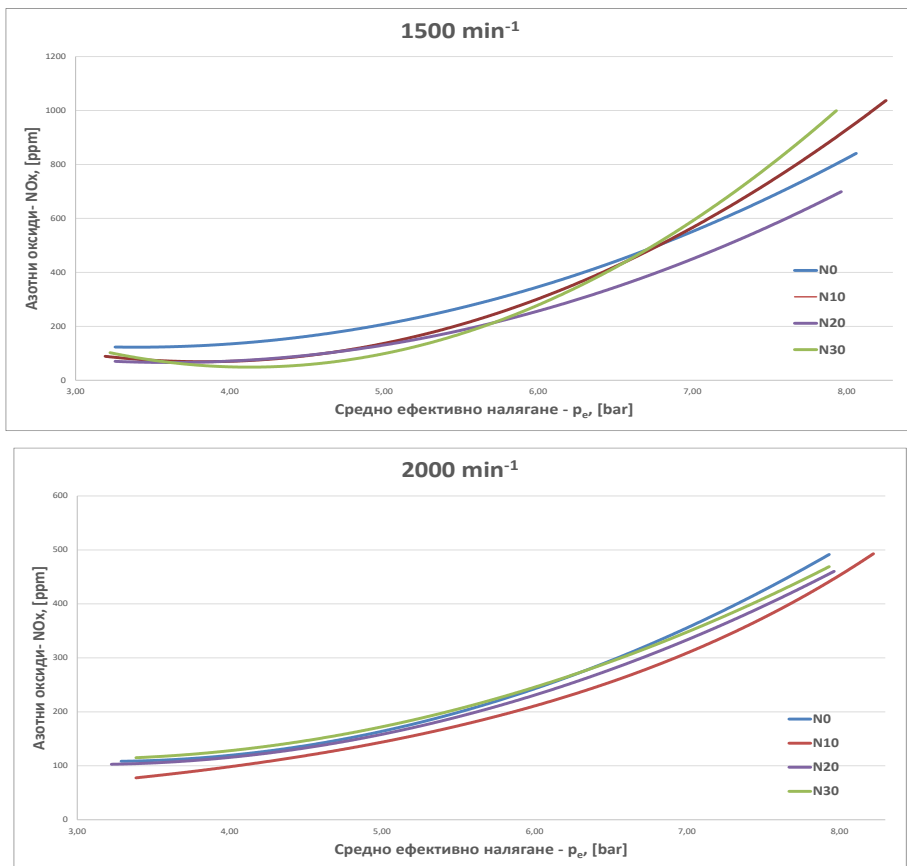
Фигура 4.2.а. Товарни характеристики - изменение на ефективния специфичен разход на гориво g_e при 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} , 2500 min^{-1} , 3000 min^{-1} , [g/kW.h]



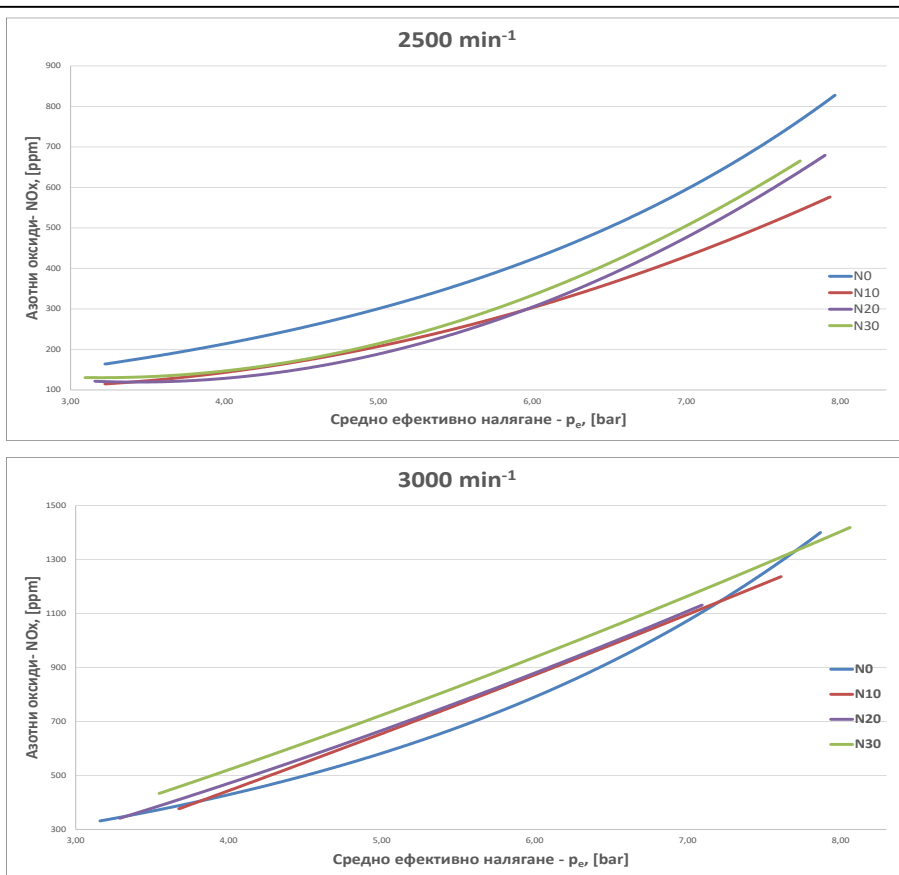
Екологични показатели на ДВГ

Изменението на концентрацията на въглероден диоксид (CO₂) в отработилите газове при използване на смеси от дизелово гориво и n-бутанол е представено на фигури 4.5.a и 4.5.b. При всички честоти, с нарастване на съдържанието на n-бутанол се наблюдава понижение в концентрацията на този показател в сравнение с дизеловото гориво без добавка. Най-съществените разлики са отчетени при по-ниски честоти на въртене (1500–2500 min⁻¹). За сместа N30 намалението достига до –13,11% спрямо дизеловото гориво. При N20 спадът е до –10,53%, а при N10 – до –6,45%. При честота на въртене 3000 min⁻¹ разликите между горивните смеси са минимални, като стойностите за всички случаи се изравняват в границите около 8,2–8,3%.

Поради по-ниската долна топлина на изгаряне на n-бутанола е необходимо впрыскване на по-голямо количество гориво. Въпреки това, отчетеното намаление на концентрацията на въглероден диоксид се обяснява с по-ниското съдържание на въглерод в молекулата на бутанола спрямо дизеловото гориво. Допълнително, наличието на кислород в структурата на n-бутанола подпомага по-пълното изгаряне. В резултат, концентрацията на въглероден диоксид намалява при ниски и средни честоти на въртене, докато при високи режими разликите между горивата се намаляват.

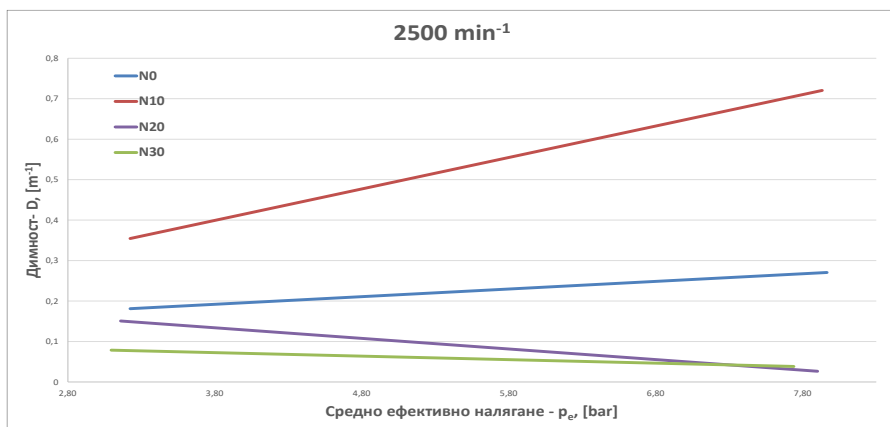
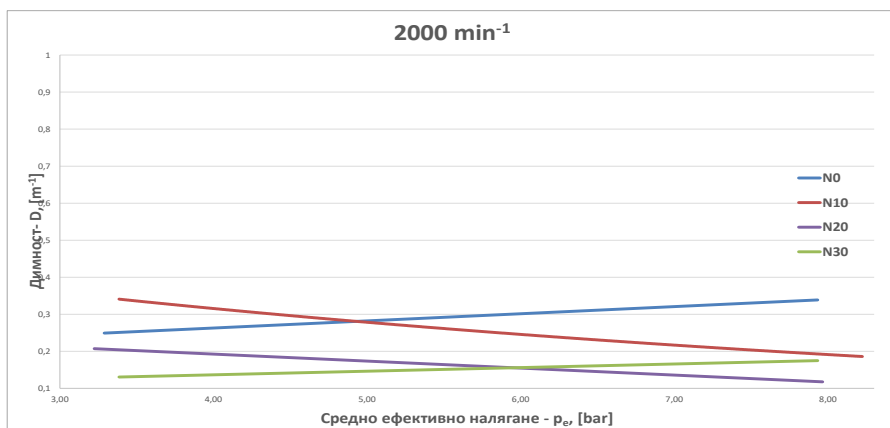
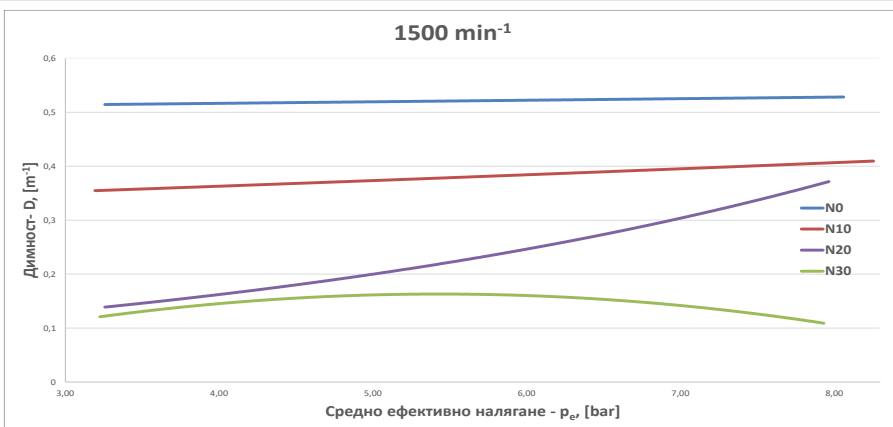


Фигура 4.7.а. Товарни характеристики- изменение на азотните оксиди- NOx при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [ppm]

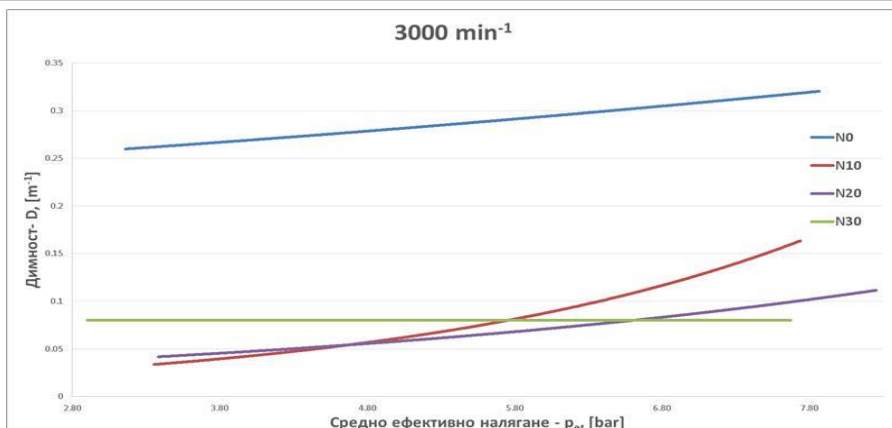


Фигура 4.7.b. Товарни характеристики- изменение на азотните оксиди- NO_x при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [ppm]

На фигури 4.9.a и 4.9.b е представено съдържанието на твърди частици (димността) в отработилите газове при различни честоти на въртене на колянвия вал (от 1500 до 3000 min⁻¹) при използване на дизелово гориво без добавка и смеси с n-бутанол (N10, N20, N30). Резултатите показват ясно изразена тенденция към намаление на димността при добавяне на n-бутанол, като ефектът се засилва с увеличаване на съдържанието му. Най-голямото намаление е отчетено при сместа N30, където димността спада с до -77% при 1500 min⁻¹ и до -73% при 3000 min⁻¹ в сравнение с дизеловото гориво без добавка. При N20 намалението варира между -36% и -68% в зависимост от натоварването. Сместа N10 също показва стабилно понижение, със спадове между -15% и -54%.



Фигура 4.9.а. Товарни характеристики- изменение на димността при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [m⁻¹]



Фигура 4.9.b. Товарни характеристики- изменение на димността при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [m⁻¹]

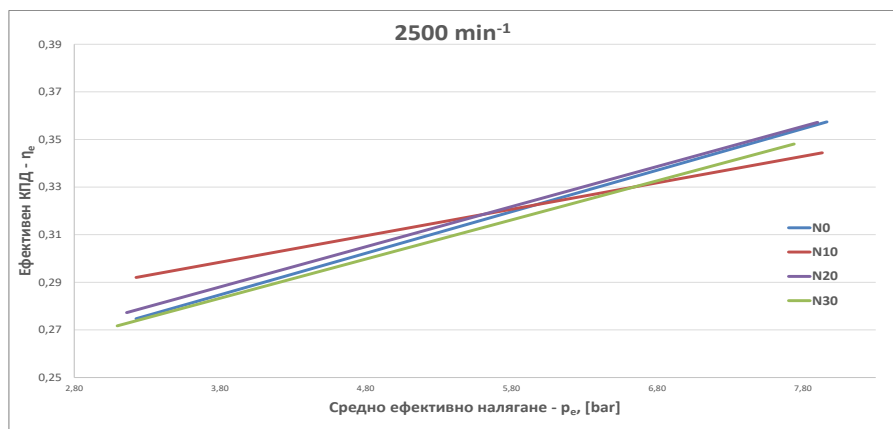
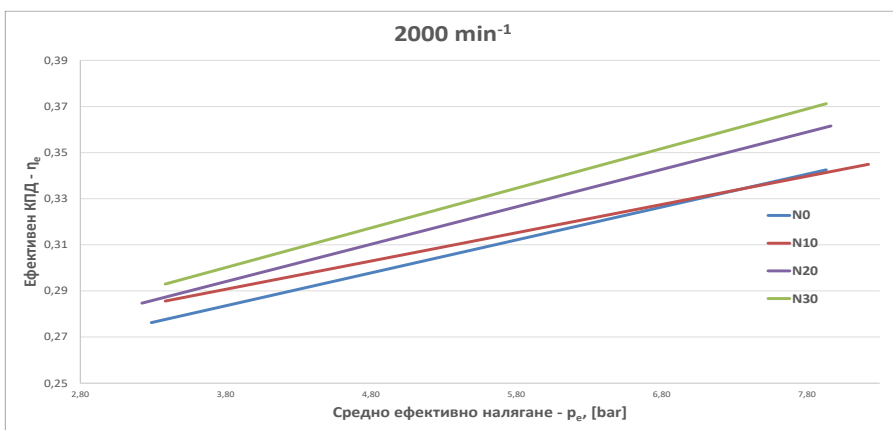
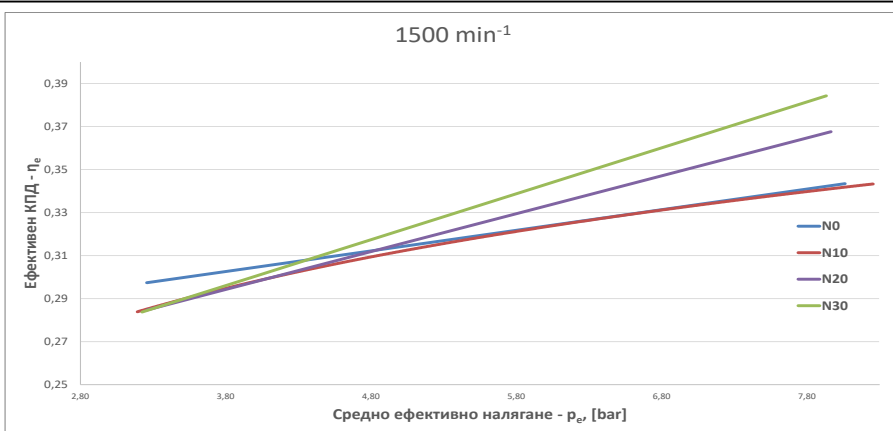
Намалението на съдържанието на твърди частици при използване на n-бутанол се дължи както на наличието на кислород в молекулата му, който подпомага по-пълното изгаряне и намалява образуването на сажди, така и на по-ниската температура на изпарение, която улеснява смесообразуването с въздуха. Това води до по-хомогенна горивна смес и по-ефективно окисление на въглеводородите, особено при висока честота на въртене, когато времето за смесообразуване е ограничено. Най-изразен е ефектът при по-високи концентрации на n-бутанол (N30).

Индикаторни и ефективни показатели

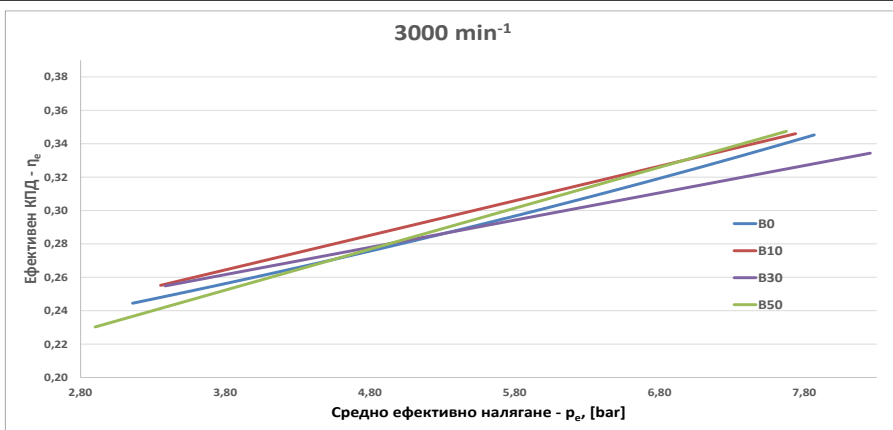
На фигури 4.14.a и 4.14.b са показани товарните характеристики, отразяващи изменението на ефективния коефициент на полезно действие (η_e) при използване на дизелово гориво без добавка (N0) и смеси с n-бутанол (N10, N20 и N30) при честоти на въртене на колянния вал 1500, 2000, 2500 и 3000 min⁻¹.

От графиките се вижда, че при 1500 и 2000 min⁻¹ добавянето на n-бутанол води до повишение на ефективния коефициент на полезно действие. Най-голямо увеличение е отчетено при N30 – с до +12,6% спрямо чистото дизелово гориво при 1500 min⁻¹ и до +13,9% при 2000 min⁻¹. При 2500 min⁻¹ максималната стойност на ефективния КПД е постигната от сместа N20 с +5,8% спрямо N0. При 3000 min⁻¹ най-висок ефективен коефициент на полезно действие е отчетен отново при N10 с до +4,4% повишение.

Причините за тези резултати се коренят в подобреното смесообразуване, по-доброто изгаряне и наличието на кислород в молекулата на n-бутанола. Това води до по-пълно изгаряне на горивото и съответно по-добро оползотворяване на постъпилата топлинна енергия. Ефектът е най-изразен при средни натоварвания и честоти, където времето за смесообразуване и условията за горене са благоприятни.



Фигура 4.14.а. Товарни характеристики- изменение на ефективен к.п.д. - η_{ei} при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [-]



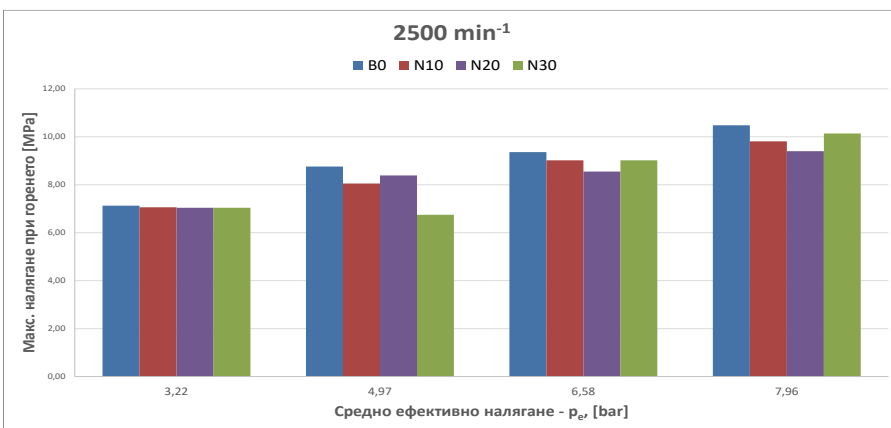
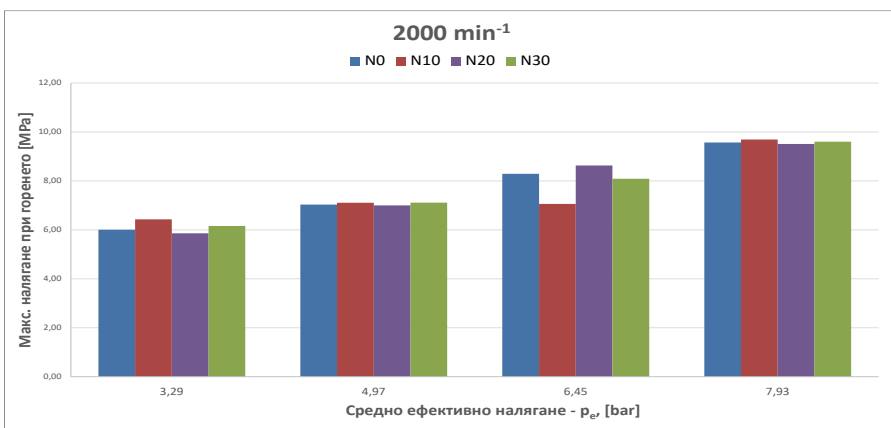
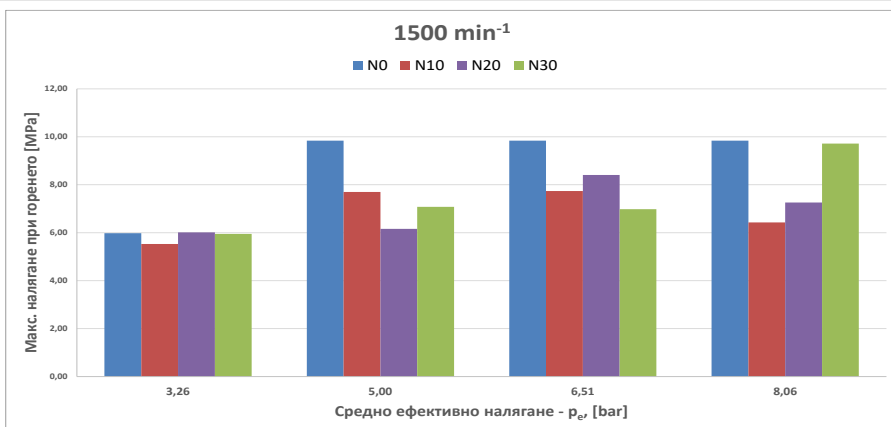
Фигура 4.14.b. Товарни характеристики- изменение на ефективен к.п.д. - η_e при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [-]

Показатели на работния процес

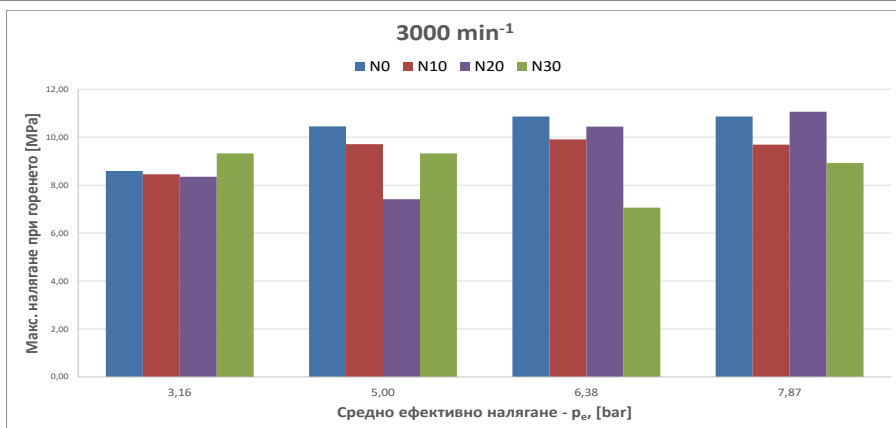
На фигури 4.16.a и 4.16.b са представени товарните характеристики, показващи изменението на максималното налягане при горене в цилиндъра при честоти на въртене на колянвия вал от 1500 до 3000 min⁻¹ и за различните смеси.

Резултатите показват, че при ниска честота на въртене (1500 min⁻¹) и ниски до средни натоварвания, смесите с n-бутанол водят до намаление на максималното налягане при горене. Най-голямото понижение е отчетено за N30 и достига -12% спрямо дизеловото гориво без добавка. При 2000 и 2500 min⁻¹ се наблюдава слабо повишение на налягането при смесите N10 и N20 при по-високи натоварвания – с до +5,5%. При 3000 min⁻¹ различията между горивата се редуцират, като при N10 и N20 налягането е близко до това на дизеловото гориво без добавка, а при N30 отново се наблюдава понижение от около -10%.

Причините за наблюдаваните отклонения са във физико-химичните свойства на n-бутанола. По-ниската долна топлина на изгаряне на n-бутанола води до по-малко топлинно отделяне и понижено налягане при горене, особено при високи концентрации (N30). При по-ниски концентрации (N10 и N20), по-доброто смесообразуване и съдържанието на кислород в бутанола частично компенсират този ефект, което обяснява наблюдаваните положителни отклонения при средни режими на работа.



Фигура 4.16.а. Изменение на максималното налягане при горенето при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [MPa]



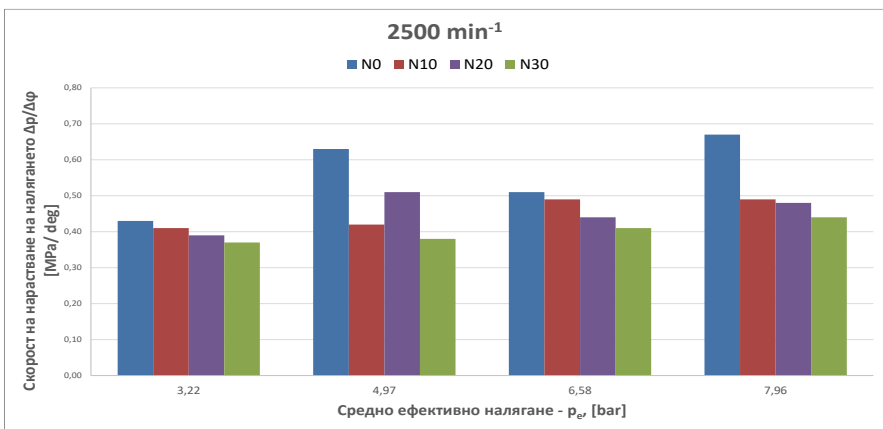
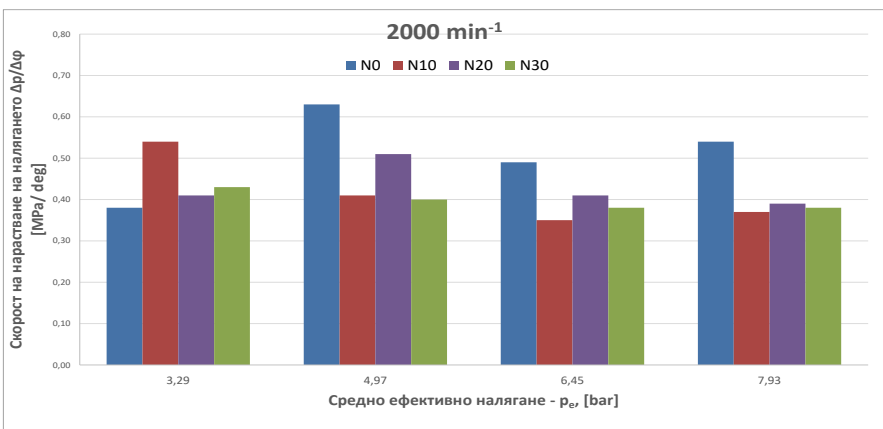
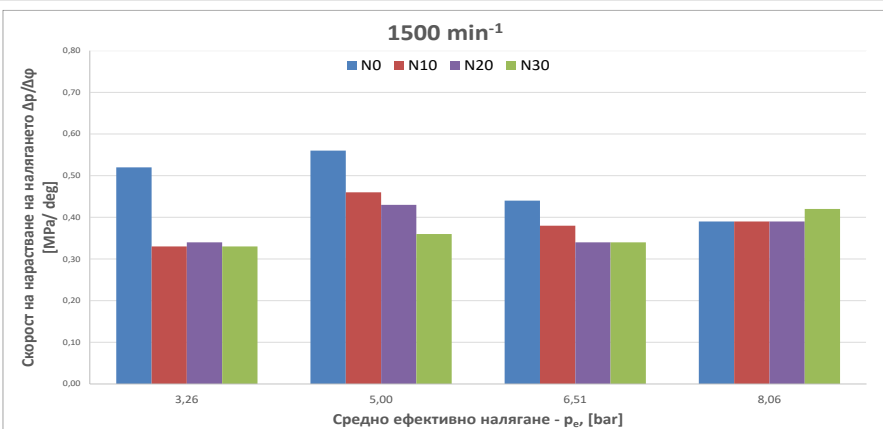
Фигура 4.16.b. Изменение на максималното налягане при горенето при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹, [MPa]

На фигура 4.17.a и 4.17.b са представени товарните характеристики, показващи изменението на скоростта на нарастване на налягането при горене ($dp/d\phi$) в зависимост от средното ефективно налягане и честотата на въртене на колянния вал. Показани са резултатите при четири честоти – 1500, 2000, 2500 и 3000 min⁻¹ – за дизелово гориво без добавка и горивни смеси с 10%, 20% и 30% обемно съдържание на n-бутанол (съответно N10, N20 и N30).

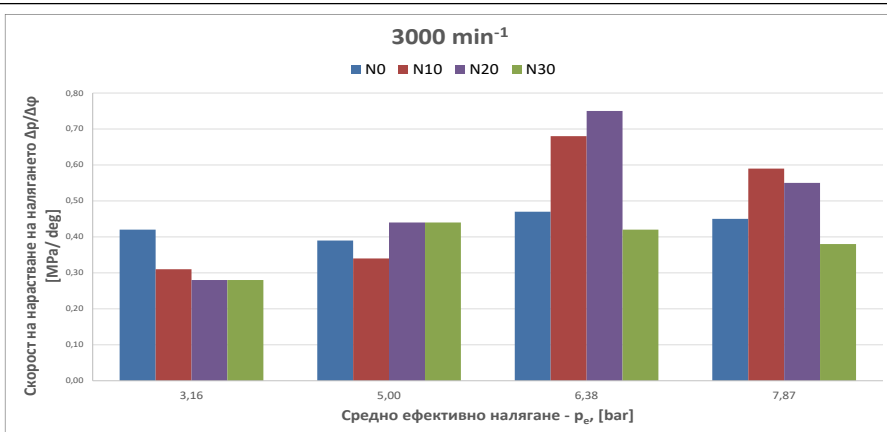
При по-ниски честоти на въртене (1500 и 2000 min⁻¹) се наблюдава тенденция към намаление на скоростта на нарастване на налягането при увеличаване на съдържанието на n-бутанол. Максималното намаление достига до -24,5% при N30 спрямо дизеловото гориво без добавка. При N10 и N20 също се отчитат по-ниски стойности, в границите от -10% до -20% в зависимост от режима. При честота от 2500 min⁻¹ разликите между отделните смеси започват да се изравняват, а при някои режими се наблюдава леко повишение на скоростта на нарастване на налягането за смесите N10 и N20, но в рамките на до +5% спрямо дизела.

Най-съществени изменения се наблюдават при 3000 min⁻¹, където смесите N10 и N20 водят до ускоряване на горенето, изразено в увеличение на $dp/d\phi$ с до +25,1% и +27,7% съответно спрямо горивото без добавка. Това показва значително по-интензивно горене при тези условия.

Отчетените резултати се обясняват с противоположното въздействие на физико-химичните свойства на n-бутанола. При по-ниски честоти и натоварвания, по-ниската долна топлина на изгаряне и високата топлиемост на n-бутанола водят до по-бавно освобождаване на топлината и по-ниска скорост на изгаряне. При високи честоти и натоварвания обаче, по-добрата смесобразуваща способност и кислородното съдържание на бутанола подпомагат по-интензивното горене, което води до по-високи стойности на $dp/d\phi$. Особено при смесите с 10% и 20% съдържание се наблюдава баланс между подобреното смесобразуване и достатъчно висока калоричност, който благоприятства по-бързото нарастване на налягането.

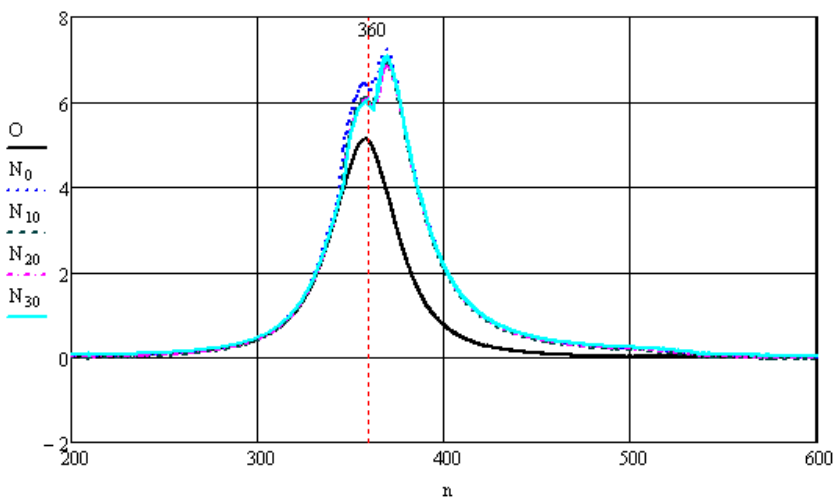


Фигура 4.17.а Изменение на средно нарастване на налягането ($\Delta p / \Delta \phi$) при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹,



Фигура 4.17.б. Изменение на средно нарастване на налягането ($\Delta p/\Delta \phi$) при 1500 min⁻¹, 2000 min⁻¹, 2500 min⁻¹, 3000 min⁻¹,

На фигури 4.20 и 4.21 са представени представителни индикаторни диаграми за различните горивни смеси при честоти на въртене на коляновия вал 1500 min⁻¹ (режим на максимален въртящ момент) и 3000 min⁻¹ (максимална изследвана честота), при натоварване от 75 Nm. За по-добра визуализация, диаграмите обхващат интервала от 160° преди до 240° след горна мъртва точка.

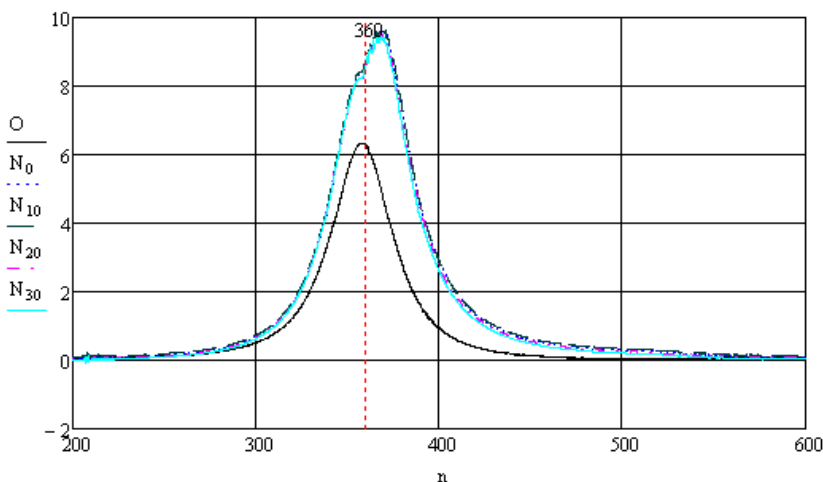


4.20. Индикаторни диаграми при 1500 min⁻¹, 75Nm, без горене, N0, N10, N20, N30

При 1500 min^{-1} (фиг. 4.20), се наблюдава ясно изразено отклонение между кривите със и без горене. Смесите с n-бутанол (N10, N20 и N30) показват по-високи стойности на налягане в сравнение с дизеловото гориво без добавка (N0), като максималното налягане се измества леко вляво от GMT, което е индикатор за ускорено възпламеняване и по-бързо отделяне на топлина. Тези резултати кореспондират с отчетените по-високи стойности на максимална температура на горене и повишена скорост на нарастване на налягането при използване на n-бутанол. Това потвърждава, че при ниски честоти и наличие на предварително впръскване, по-доброто смесообразуване и кислородното съдържание на алкохола ускоряват горивния процес.

При 3000 min^{-1} (фиг. 4.21), където предварителното впръскване е изключено, максималното налягане отново е най-ниско при дизелово гориво без добавка, докато смесите с n-бутанол достигат по-високи пикове. Разликата в максималното налягане спрямо N0 достига до около +40% при N30. Налице е също така изместване на началото на разширението към по-късен момент при дизелово гориво, докато смесите с n-бутанол постигат по-ранно и по-остро налягане след GMT. Това потвърждава предходните резултати за по-висока температура на горене и повишена ефективност на процеса при използване на алкохолна добавка, особено при по-високи честоти, където по-бързото изгаряне е от критично значение за реализиране на полезна работа.

Обвързването на индикаторните диаграми с анализирани по-рано параметри – максимално налягане, скорост на нарастване на налягането, температура и използвана топлина – ясно показва, че ефектът от n-бутанола води до по-енергичен и по-ранен горивен процес. Това е резултат както от физичните свойства на алкохола (по-ниска температура на изпарение и по-добро смесообразуване), така и от химичните му характеристики (наличие на кислород), които ускоряват горенето и влияят благоприятно върху термодинамичния цикъл.



4.21. Индикаторни диаграми при 3000 min^{-1} , 75 Nm , без горене, N0, N10, N20, N30

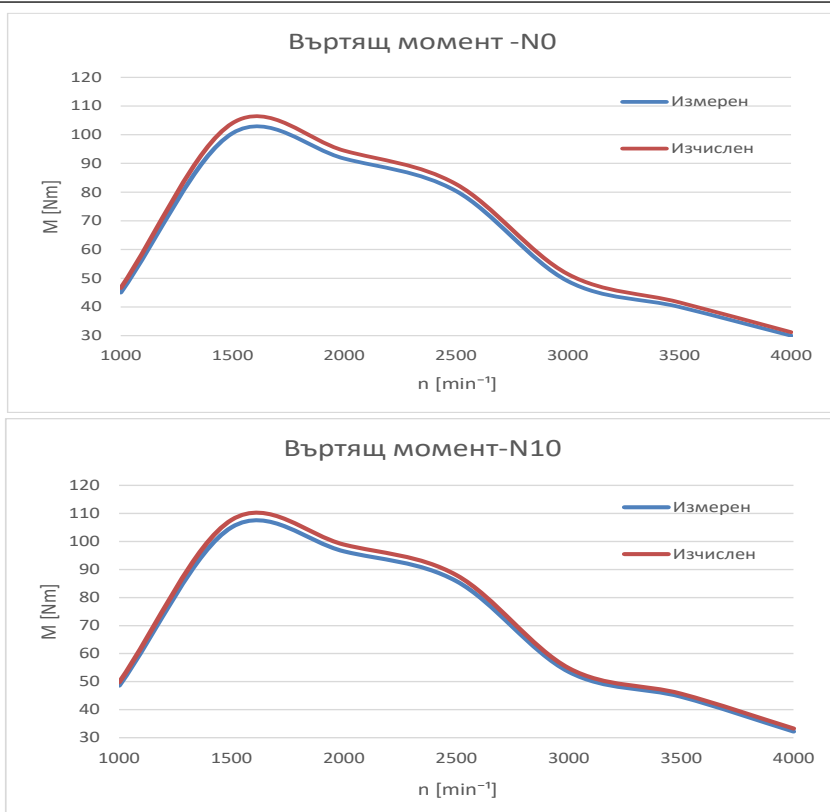
Апробация на изследването

С направените експериментални измервания са определени въртящият момент и специфичният разход на гориво, които са сравнени с изчислените стойности от програмния продукт AVL BOOST за следните горивни смеси: N0 (дизелово гориво без добавка), N10 (90% дизелово гориво и 10% n-бутанол) и N20 (80% дизелово гориво и 20% n-бутанол).

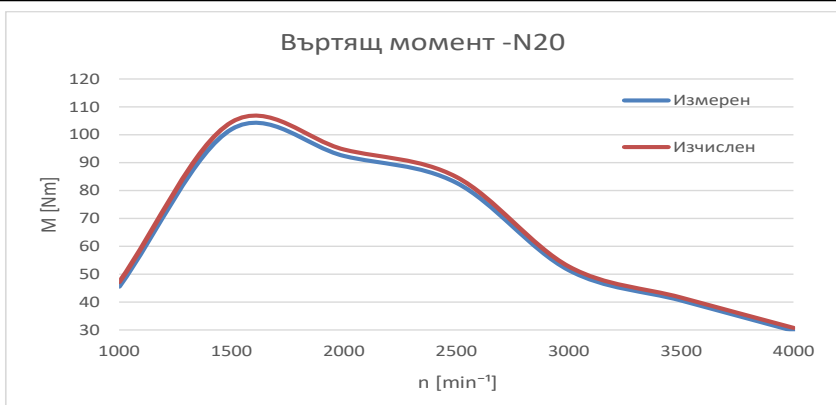
При използване на дизелово гориво без добавка, измереният въртящ момент е с до 4,7% по-висок от стойността, изчислена със симулацията (фиг. 4.22). За смесите N10 и N20 експериментално измереният въртящ момент превишава симулационните стойности с до 3,4%.

По отношение на специфичния разход на гориво, отчетените експериментални стойности са средно с около 3,8% по-високи спрямо изчисленията от програмата (фиг. 4.23).

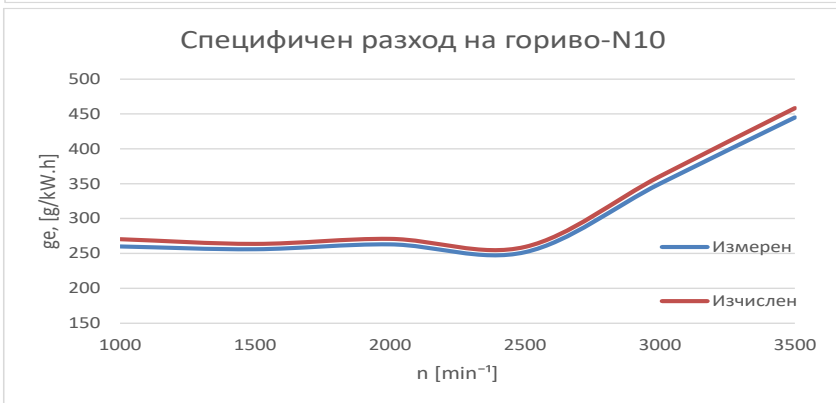
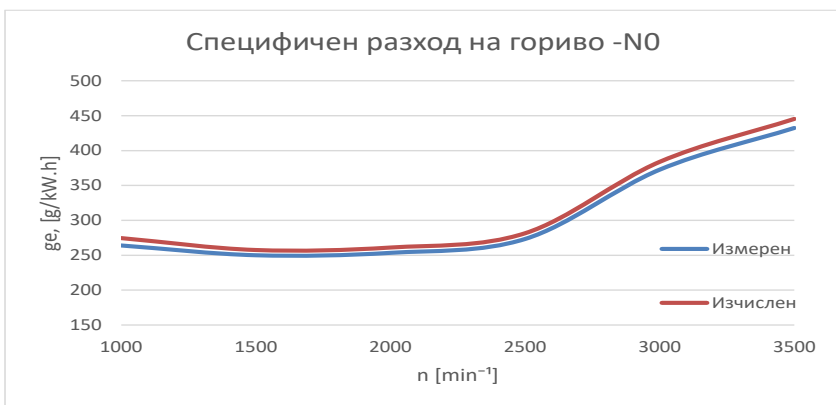
Тези резултати още веднъж потвърждават, че симулационният модел на двигателя, реализиран в AVL BOOST, осигурява достатъчна степен на достоверност спрямо реалните измервания.



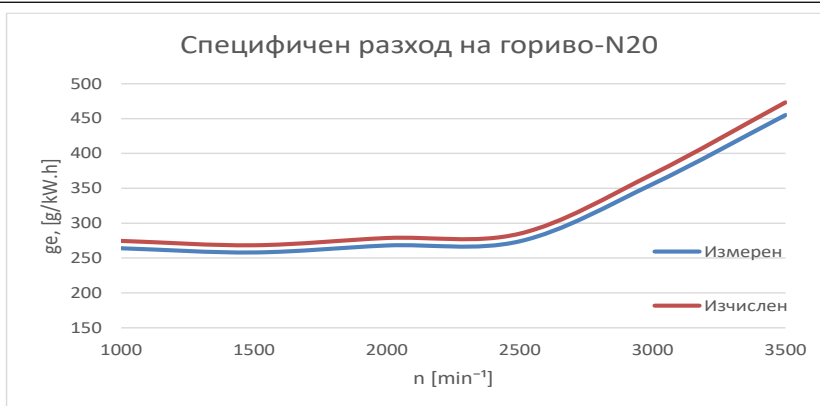
Фигура 4.22. Частична честотна характеристика при 40% положение на регулиращия орган на горивоподаване



Фигура 4.22. Частична честотна характеристика при 40% положение на регулиращия орган на горивоподаване



Фигура 4.23. Специфичен разход при частична честотна характеристика при 40% положение на регулиращия орган на горивоподаване



Фигура 4.23. Специфичен разход при частична честотна характеристика при 40% положение на регулиращия орган на горивоподаване

Основни изводи и заключение

Въз основа на анализа на експерименталните резултати за мощностно-икономическите показатели, емисиите на отработилите газове, индикаторните и ефективните показатели, както и показателите на работния процес, при работа с различни горивни смеси с *n*-бутанол (N0, N10, N20, N30), могат да се формулират следните обобщения и изводи:

1. При ниски натоварвания съдържанието на твърди частици в отработилите газове намалява средно с около 50%, като ефектът се засилва с увеличаване на съдържанието на *n*-бутанол. При високи натоварвания намалението достига до 77%. Разликите между отделните концентрации на *n*-бутанол са сравнително малки, което показва, че ефектът се проявява дори при по-ниски обемни дялове на добавката.

2. Емисиите на въглероден диоксид намаляват средно с около 10%, като максималната разлика достига около 13% при ниски честоти на въртене на колянвия вал (N30, до 2500 min^{-1}). С повишаване на натоварването и честотата тази разлика отслабва до около 8%, поради по-доброто изгаряне и по-ниското въглеродно съдържание на горивната смесь.

3. Емисиите на азотни оксиди при използване на *n*-бутанол се увеличават средно с около 25% при ниски режими, като максималното повишение достига +54% (N30, 1500 min^{-1}). При високи натоварвания и честоти се отчита средно понижение с около 15%, достигайки до -22% (N30, 2500 min^{-1}). Тези резултати отразяват взаимодействието между кислородното съдържание и охлаждащия ефект на бутанола.

4. Използването на *n*-бутанол като добавка умерено повишава ефективния коефициент на полезно действие на двигателя, средно с около 6-7%, като максималната разлика достига приблизително 14% (смесь N30, 2000 min^{-1}). С нарастване на честотата на въртене тези разлики намаляват. Това се дължи на

подобреното смесообразуване и по-пълното изгаряне, подпомогнати от присъствието на кислород в молекулата на бутанола.

5. Добавянето на n-бутанол към дизелово гориво води до повишаване на специфичния разход на гориво средно с 5-14%, като увеличението става по-значително при по-високо съдържание на алкохола. Причината е по-ниската долна топлина на изгаряне на n-бутанола, която изисква по-голямо количество гориво за еднаква мощност.

6. Максималната скорост на нарастване на налягането ($\Delta p/\Delta \phi$) намалява средно с около 10% при смесите с n-бутанол, като при N30 спадът достига до -24%. При 3000 min⁻¹, за смеси N10 и N20 се наблюдава увеличение до +28% вследствие на по-добро смесообразуване, което частично компенсира по-ниската долна топлина на изгаряне.

Изследването на работния процес на дизелов двигател, работещ с горивни смеси, съдържащи n-бутанол показва, че добавянето на n-бутанол към дизеловото гориво оказва положително влияние върху работния процес на двигателя при ниски концентрации. Въпреки повишения специфичен разход на гориво, дължащ се на по-ниската долна топлина на изгаряне на n-бутанола, се наблюдава и положителни ефект – намаление на концентрациите на твърди частици и въглеродния диоксид в отработилите газове, както и минимално повишение на ефективния коефициент на полезно действие. Емисиите на азотни оксиди показват двупосочно поведение, като нарастват при режими с ниско натоварване, а намаляват при режимите с високи натоварвания и честоти на въртене на колянния вал. Това е в следствие на влиянието на кислорода в молекулата на бутанола и температурните условия в горивната камера. При съдържание на n-бутанол до 10% се постига добър баланс между подобреното смесообразуване и запазване на ефективността, което показва потенциала на n-бутанола като устойчива добавка за дизеловото гориво.

В заключение, използването на n-бутанол като добавка в дизелово гориво е обещаваща алтернатива, която при правилно дозиране и адаптиране на работните параметри на двигателя може да съчетае екологични предимства с допустима икономическа ефективност на двигателя с вътрешно горене.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

А: НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Модифициран е математичен модел за пресмятане параметри на работен процес от записани индикаторни диаграми. Моделът отчита изменението на налягането в цилиндъра на двигателя през 0,1 градуса от завъртане на колянния вал.

2. Направен е сравнителен анализ на влиянието на добавките на n-бутанол към мощностно-икономическите, екологичните, индикаторните, ефективните показатели и параметрите на работния процес на дизелов двигател при различни концентрации на дизелово гориво и n-бутанол.

3. Установен е потенциалът на n-бутанола като алтернативна добавка към дизеловото гориво за намаляване концентрациите на твърди частици в отработилите газове. Най-добри показатели се получават при смес N10, без да се наблюдава понижаване на мощностно-икономическите показатели.

4. Разработен е модел за пресмятане параметрите на работния процес на дизелов двигател с висока степен на достоверност.

5. Установено е влиянието и са определени мощностно-икономическите, екологичните, индикаторните, ефективните показатели и параметрите на работния процес при работа на дизелов двигател с електронна система за впръскване на гориво без добавка и смеси с n-бутанол

6. Създадена е база данни от експериментални резултати за мощностно-икономически, емисионни и индикаторни показатели на дизелов двигател, работещ с горивни смеси с n-бутанол (N0, N10, N20, N30), при различни натоварвания и честоти на въртене на колянния вал. Получените данни могат да се използват за сравнителен анализ, моделиране и валидиране на симулационни изчисления.

В: ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Направен е сравнителен анализ на влиянието на алкохола към мощностно-икономическите, екологичните, индикаторните и ефективните показатели, както и промяната в параметрите на работния процес на дизелов двигател при различни смеси.

2. Потвърден е потенциалът на n-бутанола като алтернативна добавка за частична подмяна на дизеловото гориво с цел намаляване на емисиите, без значително влошаване на ефективността.

3. Усъвършенствана е опитна уредба за индициране на дизелов двигател със съвременна система за впръскване на гориво, която дава възможност за записване на бързопроменящи се величини при работа на двигателя при различни режими.

Списък на публикациите по дисертационния труд

Георгиева В., Костадинов Д. Богданов Кр. „Изследване показателите при работа на дизелов двигател с устройство Supertech“, 56-та Научни трудове на Русенски университет – 2017, том 56, серия 4, стр: 31- 33.

Димитров Р., Костадинов Д., Богданов Кр., „Equipment of a diesel engine working with gas fuel additives“, 6-та Научни трудове на Русенски университет – 2018, том 57, серия 4, стр: 31- 33.

Georgieva V., Kostadinov D., Bogdanov Kr., “Modelling of working process of diesel engine when working with addition of alcohol”, PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE - 2020, volume 59, book 4, p. 57-61

Костадинов Д., „Алкохолите, като добавка към дизелово гориво“, Научна конференция „Науката в служба на обществото - 2024“, известия на Съюза на учените – Варна, серия „технически науки“ – 1, стр. 15-17

Специални благодарности на:

Авторът изказва своята дълбока признателност към доц. д-р инж. Красимир Богданов и доц. д-р инж. Радостин Димитров за техния професионализъм, насоки и подкрепа по време на изготвянето на дисертационния труд. Благодарности се отправят към колегите от катедра „Транспортна техника и технологии“ при ТУ – Варна и от катедра „Двигатели и транспортна техника“ при Русенски университет „Ангел Кънчев“ за оказаното съдействие. Авторът благодари на управителя на „Химконсулт“ ЕООД – гр. Бургас, както и на всички близки и приятели, които оказаха подкрепа в различни етапи от работата.

Специална признателност се изказва на семейството – за подкрепата, разбирането и вярата, без които този труд не би бил възможен.

Извършена е проверка за плагиатство в AI Plagiarism Checker, като не е открито плагиатство и в приложение към дисертацията са приложени докладите от проверката.

Резюме:

Разширяването на възможностите за използване на алтернативни горива в дизеловите двигатели се превръща във важен научен и технологичен приоритет в условията на нарастващи екологични ограничения и изисквания за по-висока енергийна ефективност. Изследванията върху горивни добавки, които подобряват работата на двигателя и намаляват вредните емисии, са от съществено значение за бъдещото развитие на двигателите с вътрешно горене. В този контекст п-бутанолът представлява една от перспективните възможности за подобряване на процеса на горене и намаляване на замърсяването на околната среда.

Настоящата дисертация е фокусирана върху анализ на работния процес на дизелов двигател, работещ със смеси от дизелово гориво и п-бутанол. Основният акцент е поставен върху оценката на влиянието на п-бутанола върху ключовите характеристики на двигателя, включително горивна ефективност, емисионни показатели и индикаторни параметри. За тази цел са проведени експериментални изследвания върху дизелов двигател, работещ с чисто дизелово гориво, както и с три различни горивни смеси – N10, N20 и N30, съдържащи съответно 10%, 20% и 30% п-бутанол. Анализирани са промените в разхода на гориво, динамиката на горивния

процес, механичните натоварвания и отделяните емисии при различни режими на работа на двигателя.

Резултатите от изследването потвърждават, че добавянето на n-бутанол оказва значително влияние върху характеристиките на горенето и емисионните показатели. Наблюдават се промени в процеса на смесообразуване, които водят до различия в термодинамичните параметри на изгаряне. Установено е, че при определени условия се подобрява качеството на горенето и се намалява емисионният отпечатък на двигателя, като същевременно се регистрират изменения в специфичния разход на гориво и в индикаторните показатели.

Получените резултати предоставят експериментално потвърдени данни за поведението на дизеловия двигател при използване на n-бутанол като добавка към горивото. Те могат да бъдат използвани за оптимизация на работния процес и разработване на стратегии за намаляване на вредните емисии. Настоящото изследване допринася за по-доброто разбиране на взаимодействието между алтернативните горива и дизеловите двигатели, като създава основа за бъдещи разработки, насочени към подобряване на ефективността и екологичната устойчивост на двигателите с вътрешно горене.

Summary:

The expansion of alternative fuel applications in diesel engines is becoming an important scientific and technological priority in response to increasing environmental regulations and the demand for higher energy efficiency. Research on fuel additives that enhance engine performance and reduce harmful emissions is essential for the future development of internal combustion engines. In this context, n-butanol emerges as a promising option for improving the combustion process and reducing environmental pollution.

This dissertation focuses on analyzing the operational process of a diesel engine running on blends of diesel fuel and n-butanol. The primary objective is to evaluate the influence of n-butanol on key engine characteristics, including fuel efficiency, emission parameters, and indicator performance. To achieve this, experimental studies were conducted on a Fiat 1.9 JTD diesel engine, operating with pure diesel fuel and three different fuel blends—N10, N20, and N30—containing 10%, 20%, and 30% n-butanol, respectively. The study examines changes in fuel consumption, combustion dynamics, mechanical loads, and exhaust emissions under various engine operating conditions.

The results confirm that the addition of n-butanol significantly affects combustion characteristics and emission parameters. Changes in the fuel-air mixture formation process lead to variations in thermodynamic combustion parameters. Under certain conditions, improved combustion quality and a reduced emission footprint are observed, while at the same time, alterations in specific fuel consumption and indicator parameters are registered.

The findings provide experimentally validated data on diesel engine behavior when using n-butanol as a fuel additive. These results can be utilized for optimizing the operational process and developing strategies for reducing harmful emissions. This research contributes to a better understanding of the interaction between alternative fuels and diesel engines, laying a foundation for future advancements aimed at improving the efficiency and environmental sustainability of internal combustion engines.