



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по транспорта

Катедра Двигатели, автомобилна техника и транспорт

маг. инж. Михаил Христов Пейчев

**ВЛИЯНИЕ НА ГАЗООБРАЗНО ГОРИВО ВОДОРОД ВЪРХУ
ПАРАМЕТРИТЕ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС И
ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.5 Транспорт, корабоплаване и авиация

Научна специалност: Двигатели с вътрешно горене

Научен ръководител: доц. д-р инж. Евгени Димитров

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Двигатели, автомобилна техника и транспорт“ към Факултет по транспорта на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 12.07.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.11.2021 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със Заповед № ОЖ-5.5-23/23.07.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Михаил Тодоров – председател
2. доц. д-р инж. Пламен Пунов – научен секретар
3. проф. д.т.н. инж. Петър Димитров
4. доц. д-р инж. Тодор Атанасов
5. доц. д-р инж. Пенко Петков

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Пламен Пунов
2. проф. д.т.н. инж. Петър Димитров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по транспорта на ТУ-София, блок №9, кабинет № 9310.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Двигатели, автомобилна техника и транспорт“ на Факултет по транспорта. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Михаил Пейчев

Заглавие: Влияние на газообразно гориво водород върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелов двигател

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертационният труд е концентриран над влиянието на водорода върху работата на дизелов двигател по газодизелов цикъл. Едно от основните предимства, които носи водородът като гориво, е подобряването на екологичните и икономичните показатели на двигателите. Показващите се равнища на замърсяване на въздуха и опасенията от настъпващи климатични промени в глобален мащаб упражняват все по-голям натиск върху индустрията на двигателите с вътрешно горене от гледна точка на замърсяване и токсичност. В този смисъл, използването на водорода като гориво е актуален проблем, защото дава възможност за подобряване на токсичните показатели на двигателите – дизелови и бензинови. Освен това, водородът като екологично чисто гориво е считан за бъдещ чист енергиен източник в глобален мащаб. На името му е създадена цяла концепция, наречена водородна икономика, която го поставя в центъра на индустрия, инфраструктура, транспорт и други сектори като екологичен и чист енергиен източник. Тази световна тенденция поставя допълнителен акцент върху използването на водорода като гориво за двигателите с вътрешно горене.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е: „Изследване на влиянието на газообразно гориво водород върху ефективните показатели и параметрите на горивния процес на дизелов двигател. Намиране на възможности за подобряване на тези показатели и параметри с помощта на резултатите от изследванията“. За изпълнението ѝ са формулирани пет основни задачи: Доизграждане, усъвършенстване и пренастройка за работа с водород на съществуваща експериментална уредба за изпитване на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл; Експериментално изследване на влиянието на водорода върху ефективните показатели на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл; Експериментално изследване на влиянието на водорода върху параметрите на горивния процес на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл; Разработване на компютърен симулационен модел за изследване на процеси, протичащи в едноцилиндрови дизелови двигатели, които работят по газодизелов цикъл с водород; Числено изследване на влиянието на водорода върху ефективните показатели на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл. За изпълнението на задачите и постигнато на целта са снети регулировъчни характеристики по съдържание на водород, снети са индикаторни диаграми на налягането в цилиндъра. Изграден е симулационен модел с програмата Wave на Ricardo

Software и е направен сравнителен анализ на база експерименталните данни за оценка на адекватността на модела.

Научна новост

На база проведените експериментални изследвания са предложени оптимални съотношения между водорода и дизеловото гориво в горивната смес за изпитвания двигател и подобни на него, които съотношения позволяват реализиране на оптимални ефективни показатели на двигателя при запазване на механичните натоварвания на детайлите му в допустимите граници. Усъвършенстваната изпитвателна уредба позволява измерване и записване в реално време на температури и шум при работа на двигател по газодизелов цикъл.

Практическа приложимост

Данните и резултатите от дисертационния труд могат да бъдат използвани при монтиране на водородни газови уредби на леки и товарни автомобили, автобуси, селскостопанска техника и др., като отправна точка за избор на горивни системи, вземане на конструктивни решения, настройка на параметрите на подаване на гориво и др.

Апробация

Резултатите от експерименталните изследвания, публикувани в научни статии са докладвани на международни научни конференции, включително Бултранс 2018, Бултранс 2020 и ЕКО ВАРНА 2021. Към изпитвателната уредба е свързан и изпитан генератор за Браунов газ, разработен от фирма, работеща в тази област.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в четири научни статии, от които една самостоятелна. Публикации в съавторство с научния ръководител и други автори са индексирани в Scopus.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 164 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 107 литературни източници, като 86 са на латиница и 8 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 99 фигури и 9 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1.1. Характеристика на водорода като химичен елемент

Водородът е първият и най-прост по строеж химичен елемент, вписан под номер едно в периодичната система. Част е от VIIA (IA) група на Менделеевата таблица. За първи път образуването на водород е наблюдавано в началото на XV век от шведски алхимик на име Парацелз при взаимодействието на железни стърготини със сярна киселина. За първи път газът е изолиран от Хенри Кавендиш през 1766г.

1.1.1 Физични свойства на водорода

Физичните свойства на водорода обуславят много от предимствата и недостатъците му като гориво за ДВГ. Основните от тях, които обуславят предимствата и недостатъците му като гориво за двигатели с вътрешно горене (ДВГ) са ниската му плътност при нормални условия ($0,1 \text{ kg/m}^3$) и високата му долна топлина на изгаряне ($120\,000 \text{ kJ/kg.K}$, близо 3 пъти повече от тази на дизеловото гориво).

1.1.2 Химични свойства на водорода

Основното химично свойство на водорода, свързано с употребата му като гориво, е взаимодействието с кислород (горене), при което се образува водна пара, без вредни емисии като продукти на реакцията. Още едно важно свойство е образуването на амоняк при взаимодействие с азот в условия, близки до тези в горивната камера. Амонякът е важен за намаляване на концентрацията на азотни оксиди в отработилите газове. Водородът също има висока скорост на горене и е силно запалим.

1.2. Методи за производство на водород

Съществуват много методи за производство на водород, най-разпространените от които са производство на водород от метан и чрез електролиза на водата. Значителен брой са и методите за производство на биологични източници – водорасли, глюкоза и др., които обаче трудно се реализират в индустриален мащаб.

1.3. Методи за съхранение на водород

Могат да се направят различни класификации на методи за съхранение, представена е една от най-разпространените в литературата.

1.3.1 Физични методи за съхранение

При тези методи се съхранява водород под високи налягания, при температури близки до абсолютната нула или комбинация от двата метода.

1.3.2 Химични методи за съхранение

Водородът образува химични съединения при постъпването си в системата за съхранение, които при потребление на горивото се разграждат. Недостатък са ниските скорости на пълнене и отдаване на горивото.

1.3.3. Адсорбция

Представлява съхранение на газа в обеми с пореста структура с голяма площ, като водородът се задържа с помощта на междумолекулни сили.

На този етап практическо приложение имат само физичните методи.

1.4. Приложимост на водорода като масово гориво за ДВГ – възможни предимства и недостатъци

На база анализираните свойства, методи за производство и съхранение, са изведени възможни предимства и недостатъци на водорода като гориво за ДВГ.

1.5. Използване на водорода като гориво за ДВГ

1.5.1. Системи за подаване на водорода в ДВГ

Системите за подаване на водород са два основни вида – директно и индиректно подаване. Индиректното е лесно за изпълнение от конструктивна гледна точка, използвано е и в настоящите изследвания, но понижава коефициента на пълнене на двигателя. Директното подаване на водород в цилиндъра е много по-ефективно по отношение на коефициента на пълнене, но се предявяват изключително високи изисквания към херметичността и бързодействието на впръсквачите на газово гориво.

1.5.2. Мерки за безопасност

Свойствата на водорода изискват спазването на важни мерки за безопасност при използването му, в т.ч. – поставяне на сензори за наличие на водород в близост до системите за съхранение и подаване на гориво, монтиране на еднопосочни клапани по пътя на горивото, подбиране на елементи по пътя на газа, които са неподатливи на водородна корозия.

1.6. Влияние на водорода върху показателите и параметрите на горивния процес на дизелов двигател

В дисертационният труд е направен подробен анализ на литературни източници за влиянието, което оказва водородът върху работата на дизелов двигател (работа по газодизелов цикъл). Резултатите от цитираните научни изследвания са систематизирани в таблица 1.3 като накратко е описано влиянието на газа върху всеки от ефективните показатели на двигателя и параметрите на горивния процес. За някои от изброените показатели и параметри в различните източници са изразени различни становища относно влиянието на водорода. Това дава възможност за провеждане на допълнителни изследвания с цел изясняване на въздействието на водорода върху даден показател или параметър.

Таблица 1.3-Обобщено влияние на водорода върху показателите и параметрите на горивния процес на Дизелов ДВГ

Показател/параметър на горивния процес	Влияние на водорода накратко	Влияние на нарастващия дял на водорода в горивото
Разход на гориво и специфичен ефективен разход на гориво	Положително	Понижава разхода на гориво и по-нисък специфичния ефективен разход на гориво. Подобрява икономичните показатели.
Коефициент на пълнене	Отрицателно	Намалява коефициента на пълнене.
КПД на двигателя	Положително	Повишава или не оказва влияние върху КПД на двигателя.
Димност на отработилите газове	Положително	Намалява нивата на димността на отработилите газове.
Концентрация на NO _x	Отрицателно	Повишава концентрацията на NO _x
Концентрация на НС	Не оказва влияние	Повишава или понижава концентрацията на НС. Противоречиви резултати.
Концентрация на СО и СО ₂	Положително	Понижава концентрацията на СО и СО ₂ .
Максимално налягане в цилиндъра	Не оказва влияние	Зависи от честотата на въртене и натоварването на двигателя, както и от параметрите на подаване на дизелово гориво. Двухзначни резултати.
Максимална скорост на нарастване на налягането в цилиндъра	Отрицателно	Повишава скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра.
Топлоотделяне	Оказва значително влияние върху характера на законите за топлоотделяне. Няма ясно изразено позитивно или негативно влияние.	Повишава скоростта на топлоотделяне. Оказва различно влияние върху момента на възпламеняване. Променя характера на кривите на скоростта на топлоотделяне.

1.7. Изводи от литературния обзор

Направеният литературен обзор, включително изброените физични и химични свойства на водорода, начините за производството и съхранението му, възможностите за използването му като гориво и влиянието, което оказва върху показателите и горивния процес на двигателите (съгласно цитирани научни изследвания), дава основание за формулиране на няколко основни извода:

1. Физичните и химичните свойства на водорода го правят подходящо и екологично чисто гориво за двигателите с вътрешно горене, в т.ч. и дизеловите двигатели;
2. На този етап от развитие на методите на съхранение на водород, единствено физичните методи, и по-специално - съхранението под високо налягане, е единственият приложим на практика метод;
3. Необходимо е да се вземат предпазни мерки при работа с водород: използване на сензори за съдържание на водород във въздуха, използване еднопосочни клапани по пътя на горивото, на клапани за спиране на подаването на водород и др.;
4. Директното подаване на водород в цилиндъра е по-ефективно от индиректното, защото не влияе върху коефициента на пълнене на двигателя. Преобладаващо обаче се ползва индиректно впръскване заради по-лесното му реализиране на практика;
5. Използването на водорода като допълнително гориво цялостно подобрява икономичните и токсичните показатели на дизеловите двигатели (има токсични показатели, които могат да се повлияят негативно). Има ограничен брой автори, които твърдят, че влиянието на водорода върху икономичните показатели е неблагоприятно.
6. Влиянието на водорода върху горивния процес е силно непостоянно. В изследванията на различни автори кривите на топлоотделяне се различават значително по форма и характер. Липсват достатъчно изследвания с резултати за скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра. Влиянието на газообразното гориво върху максималното налягане по време на горене също е противоречиво в различни изследвания;

Общо, може да се направи заключението, че водородът е перспективно гориво за подобряване на работния процес в дизеловите двигатели. Резултатите от изследвания на различните автори за дизелови двигатели, работещи по газодизелов цикъл с водород, обаче са противоречиви в някои аспекти. Влиянието върху икономичните и токсични показатели е преобладаващо добро, макар за някои показатели да е двузначно, а за други да липсва информация. Информацията относно параметрите на горивния процес е разнопосочна и трудно могат да се извлекат тенденции от цитираните в обзора литературни източници.

Така направените изводи и заключение дават основание за оформяне на цел и задачи на дисертационния труд.

1.8. Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е:

Изследване на влиянието на газообразно гориво водород върху ефективните показатели и параметрите на горивния процес на дизелов двигател. Намиране на възможности за подобряване на тези показатели и параметри с помощта на резултатите от изследванията.

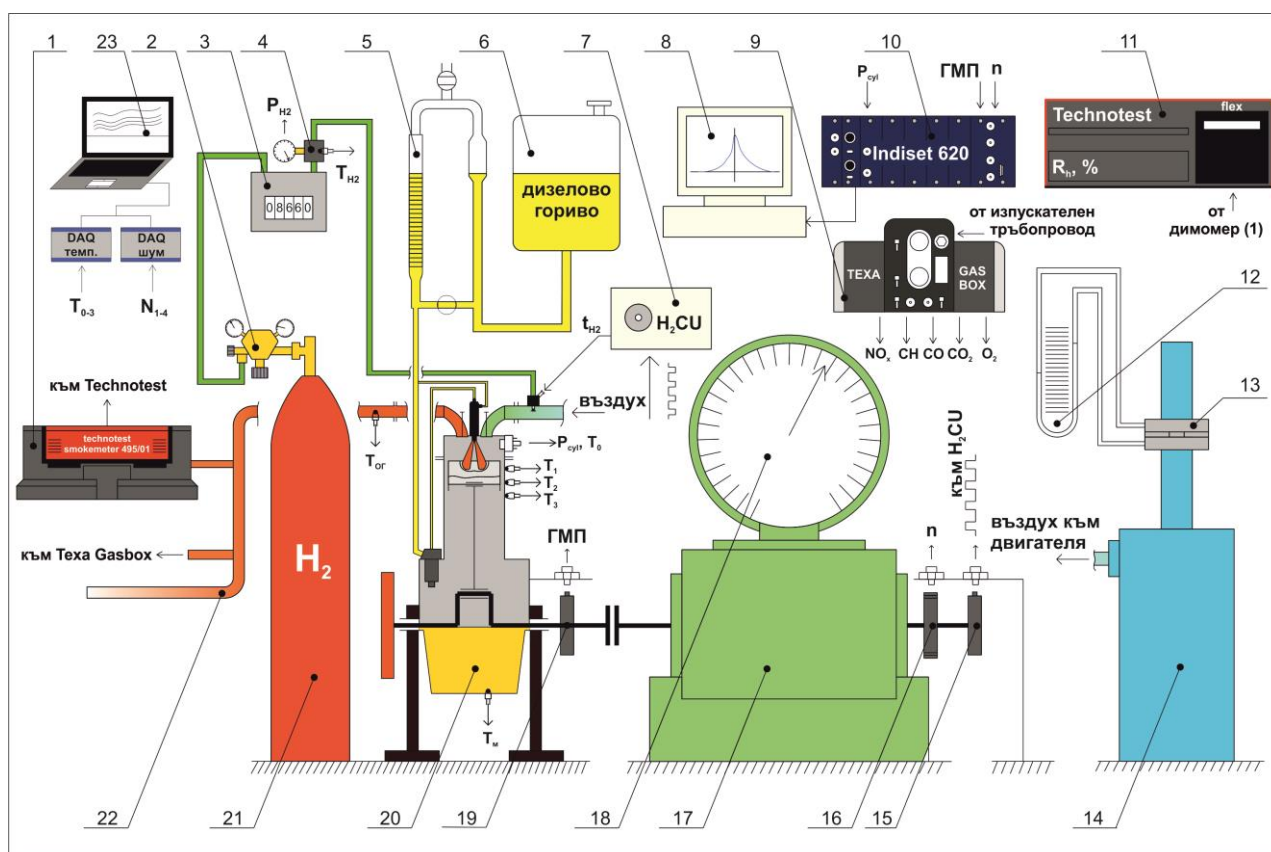
Постигането на целта на дисертационния труд е свързано с изпълнението на следните *задачи*:

1. Доизграждане, усъвършенстване и пренастройка за работа с водород на съществуваща експериментална уредба за изпитване на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл.
2. Експериментално изследване на влиянието на водорода върху ефективните показатели на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл.
3. Експериментално изследване на влиянието на водорода върху параметрите на горивния процес на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл.
4. Разработване на компютърен симулационен модел за изследване на процеси, протичащи в едноцилиндрови дизелови двигатели, които работят по газодизелов цикъл с водород.
5. Числено изследване на влиянието на водорода върху ефективните показатели на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл.

ГЛАВА 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА УРЕДБА

На фигура 2.1 е представена схема на експерименталната уредба за измерване на показателите на двигателя, работещ по газодизелов цикъл с водород. Едноцилиндров дизелов двигател 20 е свързан чрез карданен вал и предпазен палцов съединител към постояннотокова електрическа спирачка 17. Статорът на спирачката задейства силоизмерително устройство 18, което измерва спирачната сила. На колянвия вал на двигателя и на вала на спирачката са поставени зъбни колела (19 и 16) съответно за отчитане на горно мъртво положение на буталото и на честотата на въртене на двигателя. На вала на спирачката е монтирано колело (15) с щифт, който подава сигнал към модула за управление 7 на електромагнитния клапан за газово гориво. Промяната на разхода на водород се осъществява с модула за управление, който регулира времето за отворено състояние на електромагнитния клапан. Въздух в двигателя постъпва от ресивъра 14. На входа на ресивъра е

монтирана бленда 13, двете страни на която са свързани с диференциален воден манометър 12.



Фигура 2.1 – Схема на изпитвателна уредба

Посредством диференциалния воден манометър се измерва разреждането в пълнителната система на двигателя. Дизеловото гориво постъпва в двигателя от резервоар 6, минавайки през обемния разходомер 5 и оттам достига до горивонагнетателната помпа. Измерването на разхода на гориво се осъществява чрез засичане на времето, за което преминава предварително определен обем гориво през разходомера. За тази цел се ползва хронометър с точност $\pm 0,02$ s. Точността на обемния разходомер е ± 1 cm³. „Обратното“ гориво от впръсквача се връща в тръбопровода между разходомера и горивонагнетателната помпа, за да не се измерва повторно. Водородът се съхранява в съд за високо налягане 21. След напускането на съда газът минава през редуцир-вентил 2 и достига до обемния разходомер 3. Отново, аналогично на измерването на разхода на дизелово гориво, се засича времето, за което преминава определен обем водород през разходомера. Точността на обемния разходомер е $\pm 0,1$ dm³. За изчисляването на плътността и масовият разход на водорода се измерват параметрите на газа – налягане и температура, в малък обем 4, след обемния разходомер.

След изгарянето им в цилиндъра отработилите газове напускат двигателя през изпускателния тръбопровод 22. Към него са свързани димометър, състоящ се от две части – 1 и 11, за отчитане на димността на отработилите газове и газанализатор 9 за отчитане на токсичните компоненти.

Измерването на налягането в цилиндъра се извършва с помощта на пиезоелектричен възприемател, монтиран в цилиндровата глава. Сигналят от възприемателя се обработва от апаратура за индициране 10. Тя, от своя страна, е свързана към персонален компютър 8, който в реално време предоставя данни на потребителя за налягането в цилиндъра, закона за топлоотделяне и скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра.

В хода на измерванията към експерименталната уредба са добавени две системи – за измерване на шум и температури. Измерените стойности от възприемателите на двете системи се подават като входни данни на две DAQ устройства на National Instruments, монтирани на обща шина, която през USB кабел изпраща сигнал до персонален компютър 23. Компютърна програма обработва данните и в реално време показва стойности на шума и температурите. Визуализират се и се записват температурите от 4 термодвойки тип K: T_0 , T_1 , T_2 и T_3 . Термодвойката T_0 се монтира в цилиндровата глава. Термодвойките T_{1-3} са монтирани на външната стена на цилиндъра. Шумът се измерва от 4 шумомера Mastech по скала A и данните, както и при температурите, се визуализират и записват с помощта на компютърната програма. Подробно двете системи са описани в научни статии [2b][4b].

2.2. Измервателна апаратура, измервани и изчислявани величини. Грешки.

2.2.1. Измервателна апаратура и измервани величини

Сред по-важните измервани величини са: Честота на въртене, спирачна сила, обем от гориво, преминал през обемния разходомер (за дизелово гориво и водород), време за преминаване на горивото през разходомера, разреждане на входа на ресивъра, налягане на водорода, температури на: водорода, маслото, отработилите газове, стената на цилиндъра, цилиндровата глава. Измервано е също и налягането в цилиндъра. Измервани са и концентрациите на токсичните компоненти, както и параметрите на околната среда – температура и атмосферно налягане.

2.2.2. Изчислявани величини

На база измерените величини са изчислени ефективни показатели на двигателя, включително ефективна мощност и въртящ момент, часови разходи на гориво, специфичен ефективен разход на гориво, плътност на въздуха, разход на въздух, коефициент на пълнене, въздушно отношение, ефективен КПД на двигателя и др.

2.2.3. Грешки

В дисертационния труд са изчислени максималните относителни стойности на грешките, които могат да се получат при измерваните и изчисляваните величини. За база е използвана точността на измервателните уреди. Изчисленията на грешките са направени по методика, описана в [75].

2.3. Изводи от глава втора (Експериментална уредба)

От глава втора на дисертационния труд могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Усъвършенствана и пригодена за работа с газодизелов цикъл с водород е експериментална уредба, състояща се от едноцилиндров дизелов двигател с вътрешно горене, свързан с постояннотокова електрическа спирачка, и измервателна апаратура;
2. Експерименталната уредба дава възможност за измерване на мощностни, икономични и токсични показатели, както и налягане и скорост на нарастване на налягането в цилиндъра;
3. Експерименталната уредба дава възможност за снемане на регулировъчни характеристики при различни стойности на спирачната сила – от водород и от дизелово гориво;
4. Няма възможност за снемане на данни за режими с предварително дефинирано процентно масово съдържание на водород и управление на това съдържание в реално време;
5. Няма възможност за регулиране на ъгъла на изпреварване на впръскването на дизелово гориво в реално време;
6. Съставен е списък на измерваните и изчисляваните величини. Посочени са формулите, по които се пресмятат изчисляваните величини;

Пресметнати са максималните възможни относителни стойности на грешките за измерваните и изчисляваните величини. Най-малка се получава грешката при измерване на честотата на въртене на ДВГ – 0,0067%. Най-голяма стойност има грешката за енергийния дял на водорода в цикловата топлина, внесена с горивото – 32,52%, заради неколкостепенното участие на грешките при измерването на разходите на дизелово гориво и водород във формулата за изчисление.

ГЛАВА 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ И ПАРАМЕТРИТЕ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ РАБОТЕЩ ПО ГАЗОДИЗЕЛОВ ЦИКЪЛ С ВОДОРОД

3.1. Методика на провеждане на експерименталните изследвания

Методиката за провеждането на експерименти за изследване на работата на дизелов двигател по газодизелов цикъл е заимствана от научна статия [76]. В посочената статия е предложено решение за построяване на честотни и товарни характеристики на два етапа. На **първия етап** се снемат регулировъчни характеристики по процентно масово съдържание на водород в горивото. За количественото определяне на масовото съдържание на водород се въвежда коефициент K_{H_2} , числено равен на съотношението между масата на водорода и масата на общото количество гориво (формула 2.6).

Снемат се регулировъчни характеристики за определен брой режими на работа на двигателя – с различни натоварване и честота на въртене. Режимите, заедно с максималното процентно масово съдържание на водород за всеки от тях, са посочени в таблица 3.1. Броят на точките (съдържанията на водород в горивото) във всяка регулировъчна характеристика е ограничен от максималното съдържание на водород, което може да се подаде на съответния режим – след превишаване на определено съдържание на водород скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра може да достигне опасно високи стойности. Също е възможно да се получи нестабилен режим на работа при голямо количество водород заради малката циклова порция дизелово гориво, която се възпламенява по-трудно. Регулировъчни характеристики се снемат за всеки от режимите в таблица 3.1.

След снемането на всички регулировъчни характеристики по съдържание на водород, може да се премине към **втория етап** на построяването на честотни и товарни характеристики. За построяване на товарна характеристика се събират регулировъчните характеристики за всички натоварвания при желаната честота на въртене. Предварително се дефинира процентно масово съдържание на водород (стойност на коефициента K_{H_2}), за което ще се построява товарната характеристика – например $K_{H_2} = 10\%$. Тази стойност е използвана и при построяване на характеристиките в настоящата глава на дисертационния труд, защото това е максималното количество водород, което може да се подаде на част от режимите, без да стигне до прекомерно високи скорости на нарастване на налягането в цилиндъра. За получаване на информация за показателите на двигателя при $K_{H_2} = 10\%$ се интерполират данните от регулировъчните характеристики (съгласно методиката, дадена в [76]). Такава интерполация е направена за построяване на товарна характеристика при честота на въртене $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и $K_{H_2} = 10\%$. С интерполираните данни се построява товарна характеристика.

По аналогичен начин е построена и честотната характеристика, но без процес на интерполиране. Вземат се регулировъчни характеристики при едно и също натоварване, но при различна честота на въртене и данните за ефективните показатели се въвеждат директно в честотната характеристика. Това се налага, защото при честота на въртене $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ достигнатата максимална стойност на коефициента K_{H_2} е 6%. За останалите режими са взети стойности на K_{H_2} близки до 10%. Осреднената стойност на процентното масово съдържание на водород за целия диапазон на честотната характеристика се получава 9%.

При снемането на всяка точка от регулировъчните характеристики се записват индикаторни диаграми с помощта на системата за индициране AVL Indiset 620.

За извеждане на коректен закон за топлоотделяне се налага сметите индикаторни диаграми да се запишат на електронен носител и да се обработят с помощта на друг софтуер. Файлът за всеки един от изследваните режими

съдържа 30 индикаторни диаграми, записани за 30 последователни цикъла на двигателя. Осредняват се 30те диаграми и се свеждат до една единствена за съответния режим. За осредняването е написана програма в среда на Microsoft Excel на език VBA (Visual Basic for Applications).

Данните, получени от осредняването на индикаторните диаграми, могат да се използват за извеждане на закони за активно и пълно топлоотделяне. За извеждане на закони за топлоотделяне за целите на настоящия дисертационен труд е използвана програма, разработена от доц. Евгени Димитров [82]. Програмата има възможност да извежда закони за топлоотделяне за двигатели, работещи с различни съчетания от газови и течни горива. Предварително се въвеждат някои входни параметри – налягане в цилиндъра, разходи на гориво и др. Получават се интегрални и диференциални закони за активно и пълно топлоотделяне.

3.2. Резултати от експериментално изследване за влиянието на газообразно гориво водород върху показателите на дизелов двигател

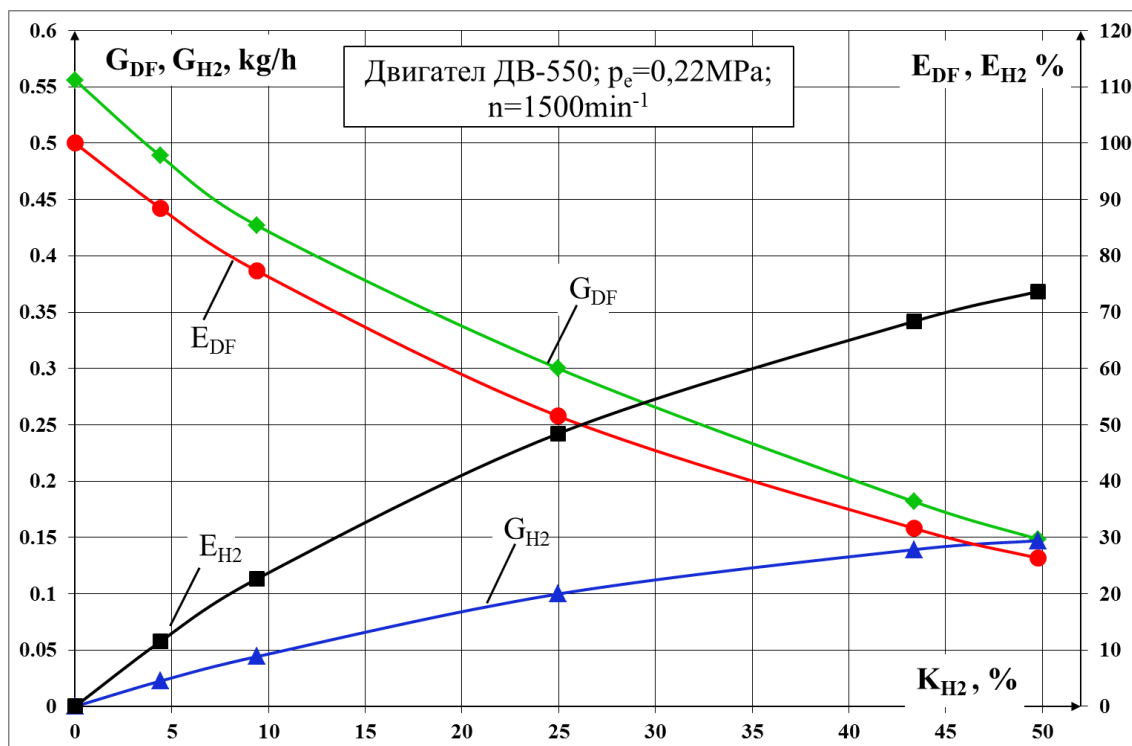
3.2.1. Сравнение по регулировъчни характеристики

Данни за снетите регулировъчни характеристики – честоти на въртене, натоварване и съдържание на водород, са обобщени в таблица 3.1. Вижда се, че при високите и при ниските натоварвания количеството на водорода е ограничено. Причините за това ограничение при високите натоварвания са уточнени по-горе. При ниските натоварвания за запазване на един и същи режим на двигателя (ефективна мощност и честота на въртене) при увеличаване на количеството на водорода се налага намаляване на количеството на постъпващото дизелово гориво. След даден момент обаче цикловата порция дизелово гориво се оказва недостатъчна за самовъзпламеняване на горивото. Следователно водородът също няма как да се възпламени и режимът на двигателя става все по-неустойчив с нарастване на K_{H_2} (процентното масово съдържание на водород в горивото). Това е основната причина, поради която са достигани относително малки количества на водорода при ниски натоварвания (до 25-35% по маса).

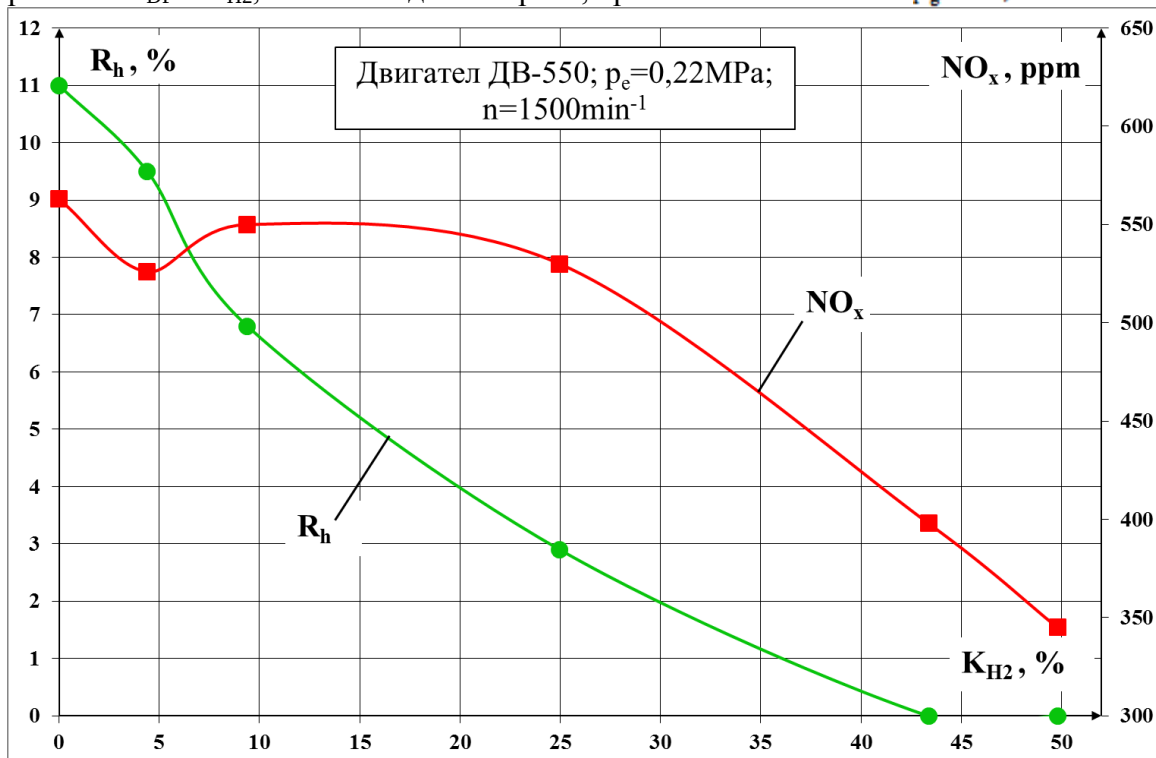
Таблица 3.1 Диапазон на процентното масово съдържание на водород в горивото при проведените експерименти

Диапазон на процентното масово съдържание на водород в горивната смес, %					
Натоварване, kgf	Честота на въртене, min ⁻¹				
	1500	1800	2000	2200	2500
0,7	0-29%	-	0-36%	-	-
1	0-50%	-	0-41%	-	0-13%
1,4	0-36%	-	0-23%	-	0-23%
1,7	0-22%	-	0-12%	-	0-15%
2	0-14%	0-6%	0-14%	0-14%	0-9%

По-долу са представени графики на някои от показателите на двигателя във функция от съдържанието на водород в горивото (фигури 3.1 и 3.4) за режим със средно ефективно налягане $p_e=0,22\text{MPa}$ и честота на въртене $n=1500\text{ min}^{-1}$.



Фигура 3.1 Изменение на часовите разходи на дизелово гориво G_{DF} и водород G_{H_2} и на енергиите - E_{DF} и E_{H_2} , внесени с двете горива, при $n = 1500\text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,22\text{ MPa}$



Фигура 3.4 Изменение на димността на отработилите газове R_h и на концентрацията на азотните оксиди NO_x , при $n = 1500\text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,22\text{ MPa}$

Представената графика за разходите на гориво (фигура 3.1) дава количествена информация за часовия разход на водород и на дизелово гориво. Съотношението между двете горива е видимо и от хоризонталната ос на графиката. Видно е, че кривата на енергията, която се внася с водорода, е значително по-стръмна от тази на часовия разход на водород и от тази, даваща енергията, внесена с дизеловото гориво. Това се дължи на високата долна топлина на изгаряне на водорода. Достигнатата стойност на енергията, внесена с водорода, е 73%. Това, сравнено с данните от различните автори, посочени в литературния обзор, може да се оцени като значителен масов дял на водорода.

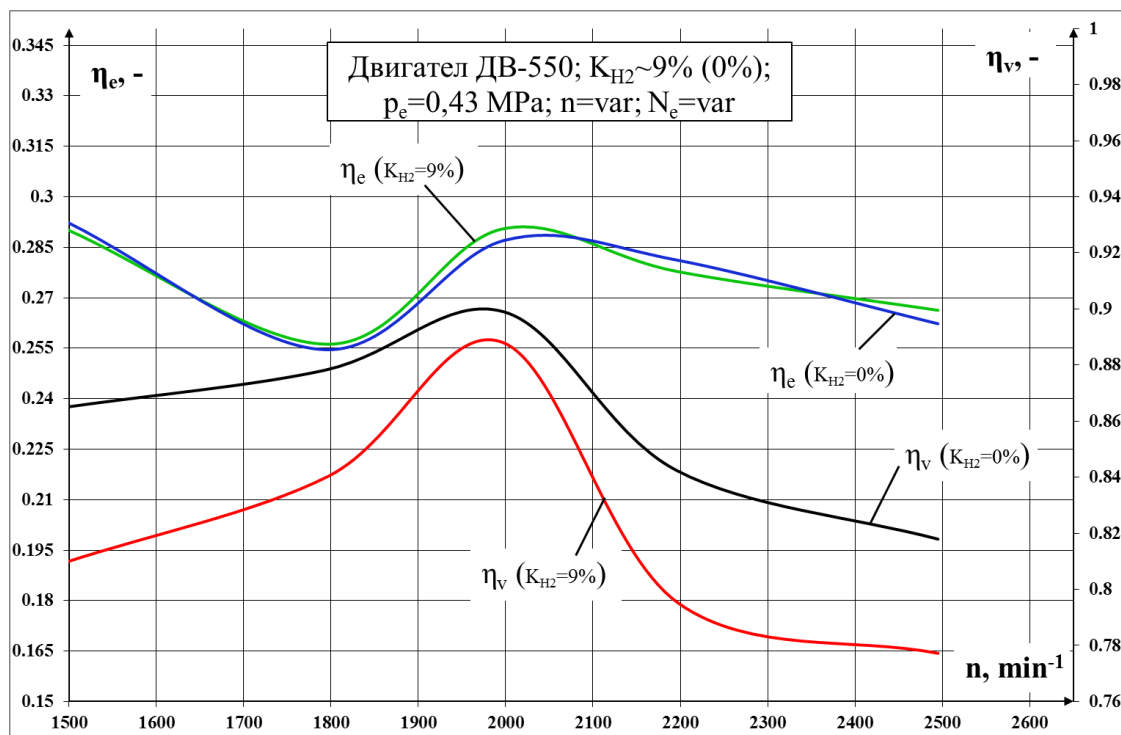
Димността на отработилите газове спада в целия диапазон на коефициента K_{H_2} (фигура 3.4) и спада до 0% при процентно масово съдържание на водород над 43%. При работа само на дизелово гориво на същия режим двигателят има димност от 11% по Хартридж. Следователно димността спада над 10 пъти. Това е значителен успех от гледна точка на подобряване на екологичните показатели на двигателя. Влиянието на газообразното гориво върху концентрацията на азотни окиси обаче е нееднозначно при различни натоварвания. При режим на ниско натоварване количеството на азотните окиси спада с 39% (фигура 3.4). Кривата има форма, подобна на тази на кривата на температурата на отработилите газове. Въздушното отношение на този режим се колебае в определени граници и почти не се променя от работа само на дизелово гориво до максимално съдържание на водород. Следователно в този случай то не оказва влияние върху съдържанието на азотни окиси. При високо натоварване ($p_e = 0,37 \text{ MPa}$) азотните окиси се покачват с 20% за целия диапазон на характеристиката. Кривата на концентрацията им отново е доста близка с тази на температурата на отработилите газове, която също нараства с нарастване на процентното масово съдържание на водород. Следователно промяната на концентрацията на азотни окиси основно зависи от температурата на изгаряне на гориво-въздушната смес.

3.2.2. Сравнение по честотни и товарни характеристики

3.2.2.1 Построяване на честотна характеристики при честота на въртене $1500\text{-}2500 \text{ min}^{-1}$, средно ефективно налягане $p_e = 0,43 \text{ MPa}$ и 9-процентно масово съдържание на водород в горивото.

Честотната характеристика е построена въз основа на данните от регулировъчните характеристики по съдържание на водород в горивото. За всеки от показателите, изобразени на графиките по-долу, са представени по две криви. Едната изобразява показателя във функция от честотата на въртене при 0 % масово съдържание на водород в горивото (работа само на дизелово гориво). Другата крива изобразява съответния показател във функция от честотата на въртене при 9-процентно масово съдържание на водород в горивото. Честотният диапазон е в границите $1500\text{-}2500 \text{ min}^{-1}$, а въртящият момент както и средното ефективно налягане са постоянни със

стойности съответно $M_e = 19,1 \text{ N.m}$ и $p_e = 0,43 \text{ MPa}$ (мощността се изменя в диапазона 3-5 kW). Графичните зависимости дават възможност за направа на сравнителен анализ за работата на двигателя по газодизелов цикъл с 9% съдържание на водород и при работата само с дизелово гориво.



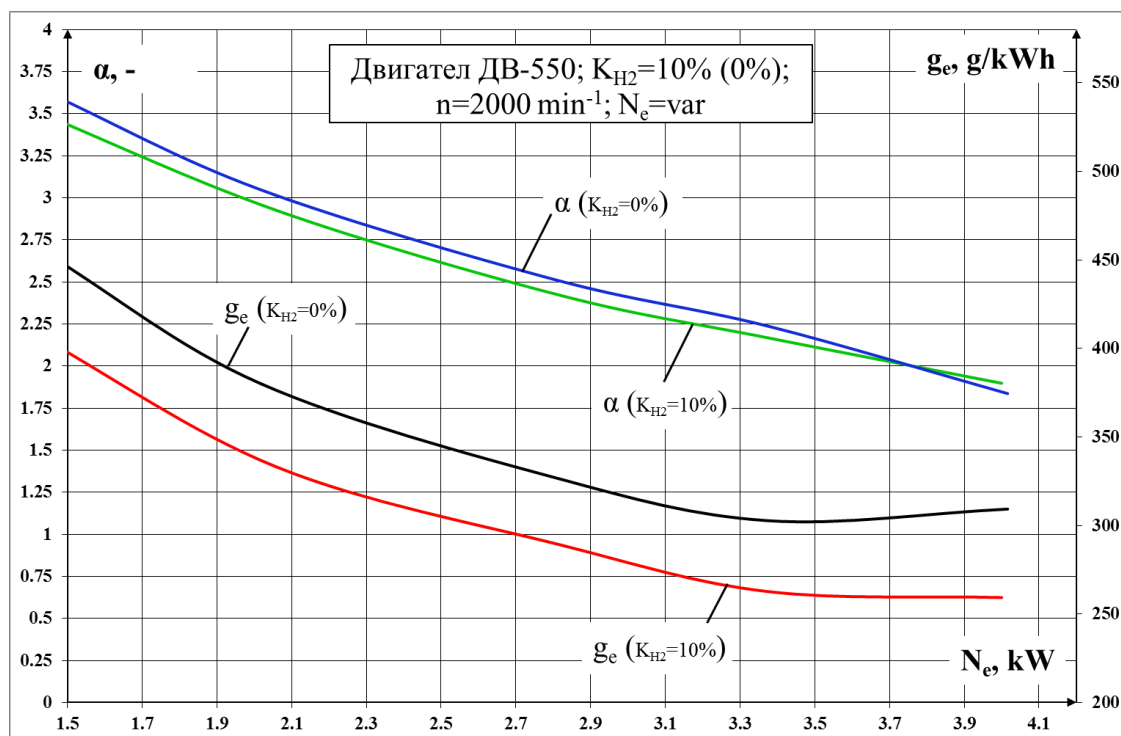
Фигура 3.13 Изменение на коефициента на полезно действие η_e и на коефициента на пълнене η_v , при средно ефективно налягане $p_e = 0,43 \text{ MPa}$, $K_{H_2} = 9\%$ и $K_{H_2} = 0\%$ и променлива честота на въртене ($n = 1500\text{-}2500 \text{ min}^{-1}$)

На фигура 3.13 е показана графика на ефективния КПД и на коефициента на пълнене на двигателя. Кривите на ефективния КПД по същество съвпадат при работа на дизелово гориво и по газодизелов цикъл. Вариациите са до 1,5% спрямо работата на дизелово гориво. И в двата случая η_e спада с приблизително 10% от минимална до максимална честота на въртене. Забелязва се голяма прилика в характера на кривите на въздушното отношение и на ефективния КПД. Процентните разлики при коефициента на пълнене η_v са с по-високи стойности като за всички честоти на въртене той е по-нисък при работа по газодизелов цикъл. Това се дължи на външното смесообразуване на водорода. Най-голяма е разликата при честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ – 6%. И двата коефициента имат максимум при $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, където стойностите им се различават с 1%. Явно е, че при тази честота вълновите процеси в пълнителния тръбопровод са най-благоприятни за осъществяване на процеса пълнене и успяват да компенсират ниската плътност на газовото гориво.

3.2.2.2 Построяване на товарна характеристика при честота на въртене 2000 min^{-1} и 10-процентно масово съдържание на водород в горивото.

Товарната характеристика носи информация за промяната на показателите на ДВГ при промяна на натоварването му. Настоящата товарна

характеристика е построена при честота на въртене $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и променливо средно ефективно налягане – от 0,15 до 0,45 МПа. Както и при честотната характеристика, тук са дадени два варианта – при работа по газодизелов цикъл с 10-процентно масово съдържание на водород в горивото и при работа само на дизелово гориво.



Фигура 3.17 Изменение на въздушното отношение α и на специфичния ефективен разход на гориво g_e , при честота на въртене $n=2000 \text{ min}^{-1}$, $K_{H_2}=10\%$ и $K_{H_2}=0\%$ и променливо натоварване ($p_e=0,15-0,45 \text{ МПа}$) на ДВГ

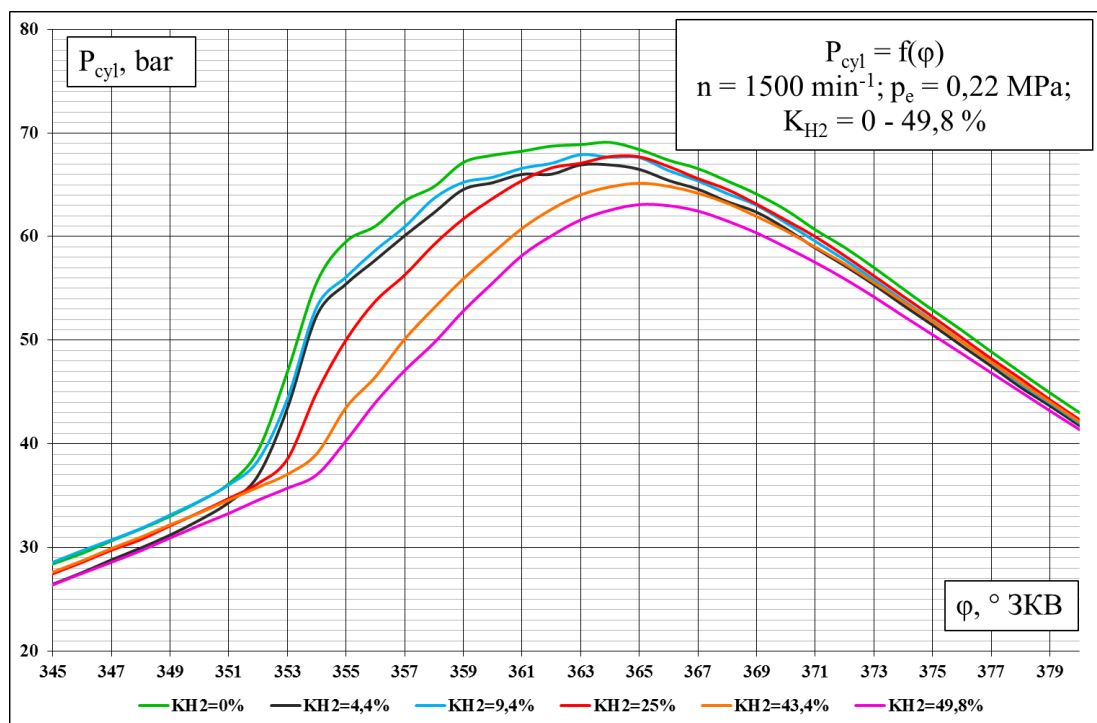
На фигура 3.17 е представена графика на въздушното отношение α и специфичния ефективен разход на гориво g_e при $K_{H_2} = 10\%$ и $K_{H_2} = 0\%$. Въздушното отношение за двата режима - работа с дизелово гориво и по газодизелов цикъл има близки стойности. Намалява във функция от натоварването, както е нормално за дизелов двигател, и се получава малко по-ниско при работа с водород заради по-ниския коефициент на пълнене. Специфичният ефективен разход на гориво при работа по газодизелов цикъл е с 8-16% по нисък за целия диапазон на натоварване, което са дължи на по-високата долна топлина на изгаряне на водорода. Двете криви (на специфичните ефективни разходи) са с близък характер.

3.3 Резултати от експериментално изследване за влиянието на газообразно гориво водород върху параметрите на горивния процес на дизелов двигател

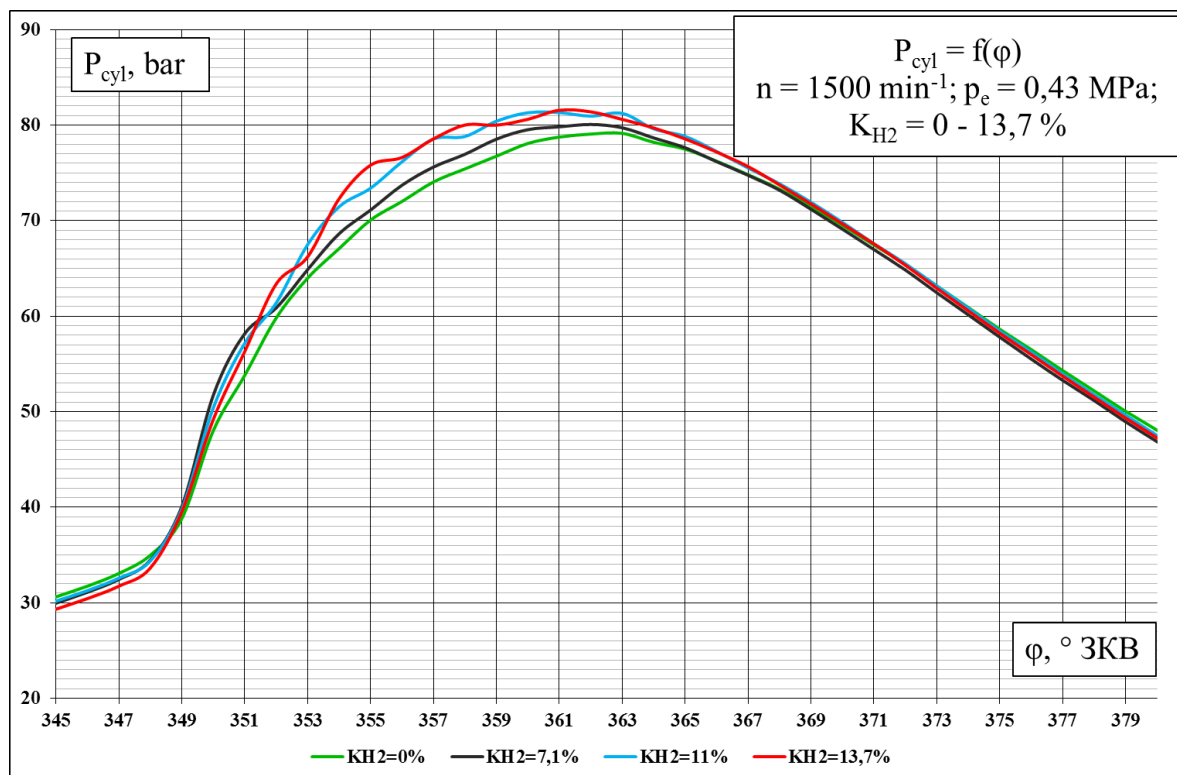
3.3.1 Индикаторни диаграми и налягане в цилиндъра

Индикаторните диаграми за режима с честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ и средни ефективни налягания $p_e = 0,22 \text{ МПа}$ и $p_e = 0,43 \text{ МПа}$ са представени на фигури 3.21-3.22. Графиките изобразяват зоната около максималното налягане при процеса горене, където са

основните разлики при наличие на водород в горивото. На фигура 3.21 (ниско натоварване - $p_e = 0,22 \text{ MPa}$), се вижда намаляване на максималната стойност на налягането в цилиндъра с нарастване на процентното масово съдържание на водород в горивото. Това може да се обясни от намаляването на цикловата порция дизелово гориво. С нея намалява и количеството на горивото, което се впръсква през периода на задържане на самовъзпламеняването, т.е. в горивната камера в буталото се натрупва по-малко количество дизелово гориво, което да изгори с висока скорост през периода на бързо горене. Намалява обемът на началните огнища на горене и въпреки високата скорост на горене на водорода налягането намалява, защото фронтът на пламъка трябва да измине значително разстояние до краищата на горивната камера. Докато измине това разстояние обемът на надбуталното пространство вече започва да нараства и налягането спада в сравнение с работата само на дизелово гориво. С нарастване на съдържанието на водород тази тенденция се засилва още повече. Съдейки по кривите на налягането, е много вероятно и да нараства периодът на задържане на самовъзпламеняването заради по-малката циклова порция дизелово гориво. Тези разсъждения дават едно възможно обяснение. Друго възможно обяснение е свързано с качеството на смесобразуване на водорода, който се впръсква още по време на процеса пълнене. Не се явяват зони с ниски локални стойности на въздушното отношение (с изключение на зоната на впръскване на дизеловото гориво), т.е. изгарянето на горивната смес става постепенно, без да се получават високи стойности на налягането.



Фигура 3.21 Изменение на налягането в цилиндъра (P_{cyl}) във функция от ъгъла на завъртане на колянвия вал в зоната около максималното налягане по време на процеса горене, честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, средно ефективно налягане $p_e = 0,22 \text{ MPa}$ и процентно масово съдържание на водород $K_{H_2} = 0 - 49,8 \%$



Фигура 3.22 Изменение на налягането в цилиндъра (P_{cyl}) във функция от ъгъла на завъртане на колянния вал в зоната около максималното налягане по време на процеса горене, честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, средно ефективно налягане $p_e = 0,43 \text{ MPa}$ и процентно масово съдържание на водород $K_{H_2} = 0 - 13,7 \%$

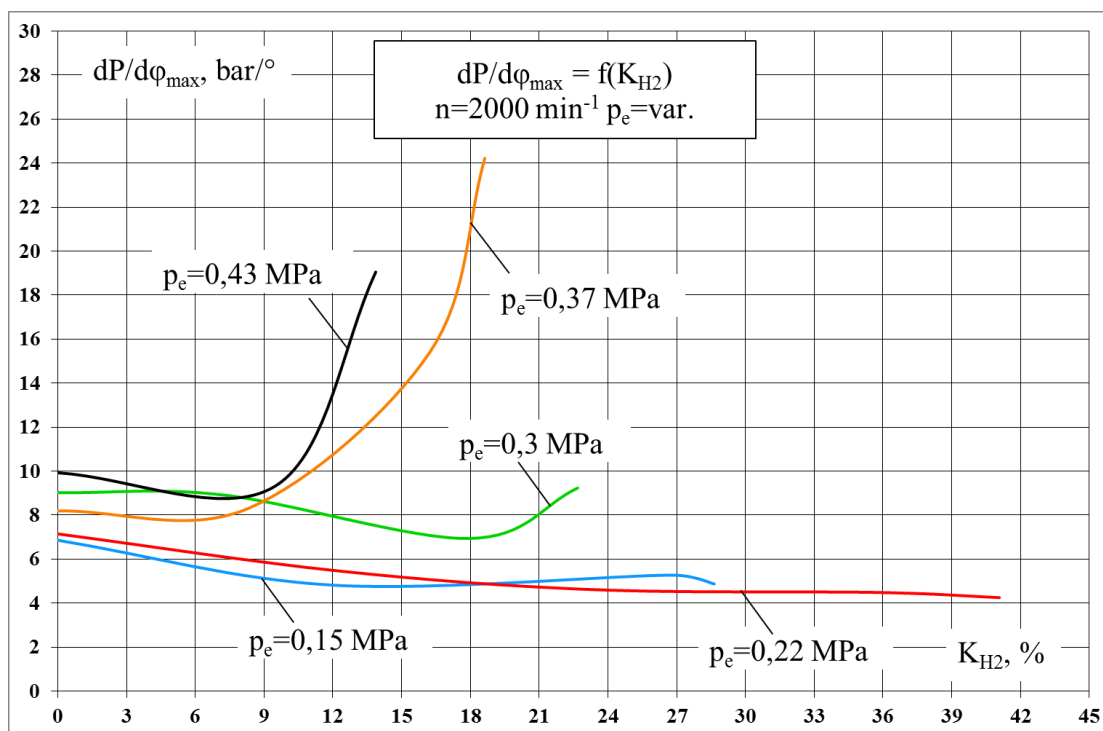
При по-високо натоварване ($p_e = 0,43 \text{ MPa}$) увеличаването на съдържанието на водород в горивото има обратен ефект върху стойностите на налягането в цилиндъра (фигура 3.22). Максималното налягане по време на горене се увеличава и има най-висока стойност при масово съдържание на водород 13,7% (най-голямото възможно съдържание за този режим). Обяснение отново може да бъде намерено в количеството дизелово гориво, обема на началните огнища на горене и скоростта на горене на водорода. При по-високо натоварване количеството на дизеловото гориво, което се впръсква по време на периода на задържане на самовъзпламеняването, е по-голямо, увеличават се първоначалните огнища на горене и обемът им заема значително по-голяма част от общия обем на горивната камера, което позволява бързо разпространение на фронта на пламъка и достигането му краищата на горивната камера докато буталото е в зоната около горно мъртво положение. Поради това максималното налягане се повишава с увеличаване на процентното масово съдържание на водород в горивото.

3.3.2 Скорост на нарастване на налягането в цилиндъра

Важен параметър, който характеризира протичането на горивния процес в двигателя, е скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра - $dP/d\varphi$. Обикновено се измерва в $\text{bar}/^\circ$ ($\text{MPa}/^\circ$) и показва с колко се покачва налягането в цилиндъра за един градус завъртане на колянния вал. Съществено значение за избягване на повреда или разрушаване на корпусните части на двигателя и детайлите на коляно-мотовилковия механизъм има максималната стойност на

скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра $dP/d\phi_{\max}$. Прието е тази стойност да не достига над $10 \text{ bar}/^\circ$ ($1 \text{ MPa}/^\circ$) [1, стр.98].

На фигура 3.31 е представена диаграма за максималните стойности на скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра за честота на въртене $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ при променливо масово съдържание на водород $K_{H_2} = \text{var}$. Дадени са криви за следните стойности на средното ефективно налягане p_e : $0,15 \text{ MPa}$; $0,22 \text{ MPa}$; $0,3 \text{ MPa}$; $0,37 \text{ MPa}$ и $0,43 \text{ MPa}$. При по-ниските натоварвания – $0,15 \text{ MPa}$ и $0,22 \text{ MPa}$, увеличаването на количеството на водорода оказва положително влияние върху скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра. Поради тази причина има възможност за достигането на по-високи процентни масови съдържания на водород – 29% и 41% съответно при $0,15 \text{ MPa}$ и $0,22 \text{ MPa}$. Увеличаването на средното ефективно налягане до $0,3 \text{ MPa}$ води до намаляване на максималното възможно количество водород, което може да се подаде – 23% по маса. Скоростта на нарастване на налягането се запазва относително постоянна на този режим. При 18% масов дял на водорода стойността ѝ спада до $6,9 \text{ bar}/^\circ$ и, от гледна точка на натоварване на двигателя и шумово замърсяване, това съдържание на водород е оптимално за този режим на работа на ДВГ. При средни ефективни налягания $p_e = 0,37 \text{ MPa}$, и $p_e = 0,43 \text{ MPa}$ съдържание на водород над 8-9% по маса започва да оказва негативно влияние върху $dP/d\phi_{\max}$. Поради това и товарната и честотната характеристики, дадени графично по-рано в настоящата глава от дисертационния труд, са направени при 9-процентно и 10-процентно масово съдържание на водород в горивото.



Фигура 3.31 – Изменение на максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра $dP/d\phi_{\max}$ във функция от процентното масово съдържание на водород K_{H_2} при $n=2000 \text{ min}^{-1}$ и променливо средно ефективно налягане p_e

3.4. Оптимално съдържание на водород в горивото за всеки от изследваните режими.

На база получените при експериментите показатели е построена таблица 3.3, в която са отразени оптималните съдържания на водород в горивото за всеки от изследваните режими. Съдържанията на газово гориво са подбрани по следния начин. На първо място е подбрано е токова съдържание на водород, при което максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра е под от допустимата. Второ – избрана е тази стойност на съдържание на водород, при която има най-ниски нива на преобладаващата част от токсичните показатели. На трето място са взети икономичните показатели на двигателя. Накратко – избрано е такова съдържание на водород, което с най-голям приоритет да осигурява нормална скорост на нарастване на налягането, след това – да осигурява подобряване на токсичните показатели и на последно място – подобряване на икономичните показатели.

Таблица 3.3 – Оптимално масово съдържание на водород в горивната смес K_{H_2} , % за изследваните режими на работа на двигателя.

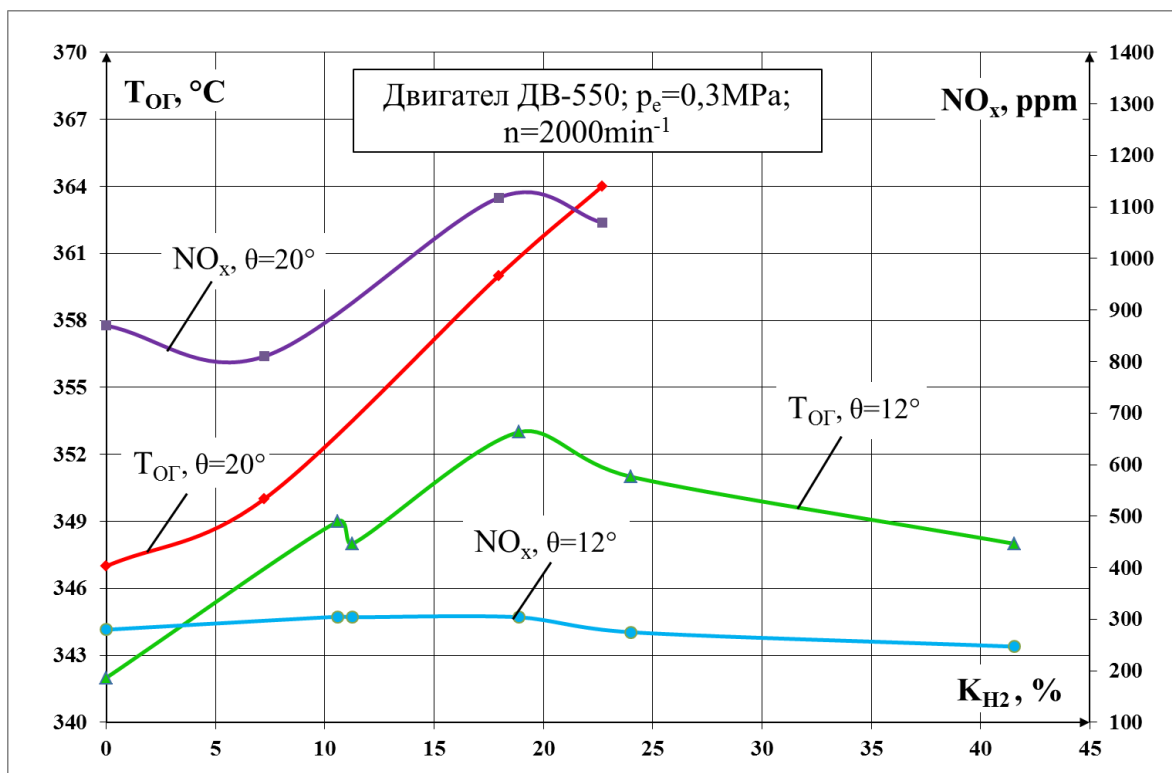
Оптимално съдържание на водород в горивната смес (K_{H_2}), %			
Натоварване, <i>kgf</i>	Честота на въртене, min^{-1}		
	1500	2000	2500
0,7	29%	28%	-
1	50%	41%	8%
1,4	36%	23%	12%
1,7	3-5%	10%	8%
2	2%	9%	0%

3.5. Резултати от експериментално изследване за влияние на водорода върху показателите и параметрите на горивния процес в зависимост от ъгъла на изпреварване на впръскването на дизелово гориво.

Резултати от експериментите, които дават възможност за кратък сравнителен анализ за двата ъгъла на изпреварване на впръскването, са показани в графичен вид на фигура 3.42. Резултатите са за режим с честота на въртене $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и средно ефективно налягане $p_e = 0,3 \text{ MPa}$.

Промяната на θ оказва значително влияние върху съдържанието на азотни оксиди NO_x . По-малка е промяната в температурата на отработилите газове $T_{ог}$. Съществено обаче е изменението в характера на кривите. При $\theta=20^\circ$ азотните оксиди нарастват във функция от увеличаващото се съдържание на водород, а при $\theta=12^\circ$ намаляват. Температурите за двата ъгъла θ са нарастващи до $K_{H_2} \sim 20\%$, но след това съдържание за $\theta=12^\circ$ температурата започва да спада. Кривите цялостно са с различен характер.

Основно предимство на коригирането на ъгъла θ обаче е достигането на почти двойно по-висока стойност на масово съдържание на водород в горивото. Следователно е добре за всеки режим да се избира подходящ момент на впръскване на дизелово гориво.



Фигура 3.42 – Изменение на температурата на отработилите газове $T_{ог}$ и съдържанието на азотни оксиди в отработилите газове NO_x във функция от процентното масово съдържание на водород K_{H_2} при $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,3 \text{ MPa}$ за различни стойности на ъгъла на изпреварване на впръскването на дизелово гориво - θ

3.6. Изводи от глава трета (Експериментално изследване на показателите и параметрите на горивния процес на дизелов двигател работещ по газодизелов цикъл с водород)

От глава трета на дисертационния труд и резултатите от проведените експериментални изследвания, могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Описана и пригодена за целите на настоящия дисертационен труд е методика за снемане на регулировъчни характеристики по процентно масово съдържание на водород в горивото, възприета от научна статия [76];
2. Снети са регулировъчни характеристики по процентно масово съдържание на водород. Построени са честотни и товарни характеристики съответно при 9-процентно и 10-процентно масово съдържание на водород в горивото и при работа изцяло на дизелово гориво. Представени са индикаторни диаграми за четири режима (натоварване и честота на въртене) с различни съдържания на водород. Диаграмите са обработени и са получени закони за топлоотделяне - активно, в диференциален вид, и пълно - в интегрален и диференциален вид;
3. Влиянието на водорода върху показателите и параметрите на горивния процес на двигателя е нееднозначно за режимите с високо и с ниско натоварване;

4. При ниско натоварване, независимо от честотата на въртене, нарастването на съдържанието на водород в горивото води до: понижаване на часовия разход на гориво G_F , и на специфичния ефективен разход на гориво g_e ; спад на стойността на коефициента на пълнене η_v ; ефективният КПД η_e се запазва сравнително постоянен като се променя нееднозначно; намаляване на съдържанието на азотни оксиди NO_x в отработилите газове; значителен спад на димността R_h на отработилите газове;
5. При ниско натоварване, независимо от честотата на въртене, нарастването на съдържанието на водород в горивото води до: намаляване на максималната стойност на налягането в цилиндъра P_{cylmax} ; намаляване на максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра $dP/d\varphi_{max}$ и отместване на ъгъла, при който се получава максимално налягане в цилиндъра, по посоката на въртене на колянвия вал, отдалечавайки го от ГМП. Намалява максималната стойност на скоростта на топлоотделяне $dX_a/d\varphi$, с нарастване на съдържанието на водород и кривите на топлоотделяне стават все по-полегати, без големи амплитуди;
6. При високо натоварване нарастването на съдържанието на водород в горивото води до: понижаване на часовия разход на гориво G_F , и на специфичния ефективен разход на гориво g_e ; намаляване на стойността на коефициента на пълнене η_v ; незначително намаляване на стойността на ефективния КПД η_e ; спад в димността R_h на отработилите газове, нарастване на съдържанието на азотни оксиди NO_x ;
7. При високо натоварване нарастването на съдържанието на водород в горивото води до: нарастване на максималната стойност на налягането в цилиндъра P_{cylmax} ; увеличаване и достигане на опасно високи стойности на максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра $dP/d\varphi_{max}$. Максимумът на налягането в цилиндъра при ниска честота се доближава до ГМП, а при по-висока се отдалечава;
8. При високо натоварване максималната стойност на скоростта на топлоотделяне $dX_a/d\varphi$ нараства в ниските честоти на въртене, а мястото ѝ по ъгъл на завъртане се запазва постоянно. При по-високи честоти на въртене максималната стойност на $dX_a/d\varphi$ почти не се променя, но се променя мястото ѝ по ъгъл на завъртане на колянвия вал. При по-високите честоти на въртене, се променят и стойностите на пикове на скоростта на топлоотделяне в зависимост от дяловете на двете горива, като се забелязват поне два отчетливи максимума за разлика от ниското натоварване и ниските честоти, където кривите са полегати;
9. И при ниско и при високо натоварване, кривите на въздушното отношение α и на ефективния КПД η_e във функция от процентното масово съдържание на водород K_{H2} в горивото имат много близък характер;
10. Силно влияние върху показателите и параметрите на горивния процес оказва ъгълът на изпреварване на впръскването на дизеловото гориво θ . Възможност за електронно регулиране може да доведе до подобряване на показателите и параметрите на горивния процес при високи натоварвания;

Водородът цялостно оказва положително влияние върху показателите на двигателя. Същото твърдение важи и за параметрите на горивния процес, но при ограничаване на максималния му дял в горивото на високи натоварвания.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ГАЗООБРАЗНО ГОРИВО ВОДОРОД ВЪРХУ ПАРАМЕТРИТЕ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС И ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ

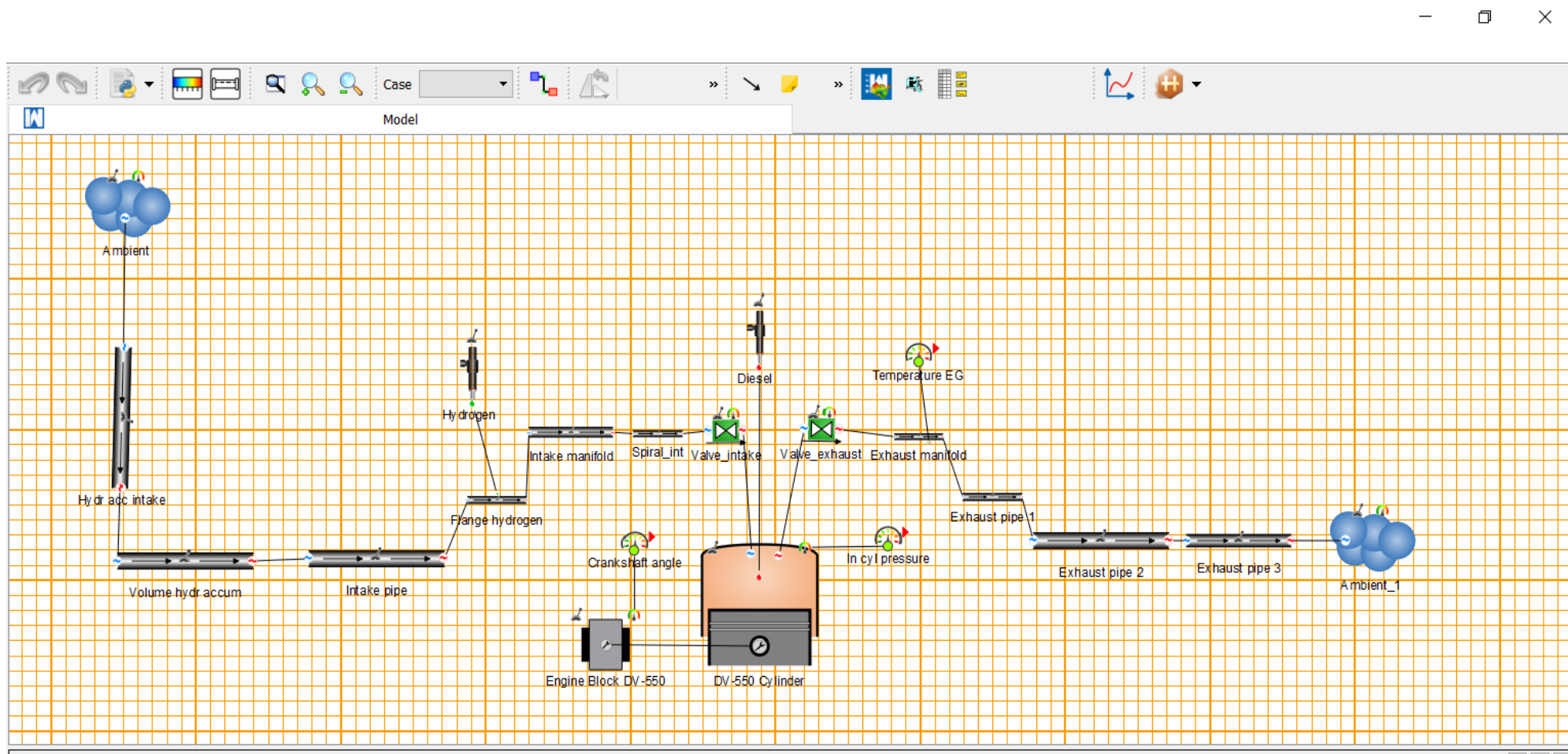
4.1. Изграждане на симулационен модел за числено изследване в среда на WAVE на Ricardo Software

За целите на численото изследване е разработен симулационен модел на двигателя, работещ по газодизелов цикъл, с помощта на софтуерния продукт WAVE на компанията Ricardo Software. Софтуерът дава възможност за работа едновременно с две горива. На фигура 4.1 е даден работният екран на програмата с разработения модел. Виждат се моделираните пълнителни и изпускателни тръбопроводи, клапаните – пълнителен и изпускателен, впръсквачите на дизелово гориво и водород, блокът и цилиндърът на двигателя и поставените възприематели. Възприемателите дават възможност за записване на важни параметри – налягане в цилиндъра и температура на отработилите газове в точката, в която е поставен възприемателят по време на експерименталните изследвания. Информацията от възприемателя за ъгъл на завъртане на колянвия вал и от този за налягане е използвана за генериране на индикаторни диаграми за моделираните режими. За изграждането на модела са въведени данни от различен характер – **геометрични параметри на двигателя** – размери на бутало, мотовилка, клапани.

Прецизирано е мястото на монтиране на впръсквача (с името Hydrogen на фигура 4.1) на газово гориво водород в пълнителния тръбопровод. Моделиран е цилиндричен съд с голям обем, който е поставен преди пълнителния тръбопровод на двигателя, за да играе ролята на хидравличен акумулатор на въздух (ресивър, глава 2, фиг. 2.1, позиция 14). В модела са въведени грапавост, температура на стените, топлинни капацитети (на фиг. 4.1 – Hydr acc intake, Volume hydr accum).

Въведени са също така **данни за уредбата за подаване на гориво**. Въведени са ъгъл на изпреварване на впръскването и закон за подаване на дизелово гориво за всеки от режимите. Въведени са също и данни за горивата в началото на изграждането на модела. Генериран е т.нар. горивен файл с информация за двете горива – плътност, долни топлини на изгаряне, състав.

Допълнително са въведени температура на двете горива (използвана е температура при стандартни атмосферни условия – 300 K) и фаза, при която се впръскват горивата. За дизеловото гориво е посочена течна фаза, а за водорода – газова. Въведени са и разходите на горива като съотношение между въздух и гориво. Въведена са също така и честота на въртене на двигателя и температура на стените на надбуталното пространство.



Фиг. 4.1. Симулационен модел на дизелов двигател ДВ 550, работещ по газодизелов цикъл с водород, в среда на WAVE

Въведени са още данни, необходими и за моделиране на процеса на горене. Основната информация, която използва софтуерът, е законът за топлоотделяне. При работа с две горива единствената възможност, която предлага програмата е апроксимиране на съществуващ или въвеждане на закон за топлоотделяне с две или повече криви на Вибе. По тази причина моделът е наречен “Multicomponent Wiebe”. Всяка от кривите се дефинира с няколко параметъра. Потребителят е длъжен да посочи и за кое гориво се отнася дефинираната крива. Една от възможностите, които дава програмата за моделиране в този аспект, е за горене на газовото гориво във въздуха, който взаимодейства с дизеловото гориво (Burn premixed fuel in shared air, фигура 4.3). Функцията е използвана при създадения модел. Въведени са общо по 5 криви на Вибе за всеки от режимите – 1 за водорода и 4 за дизеловото гориво.

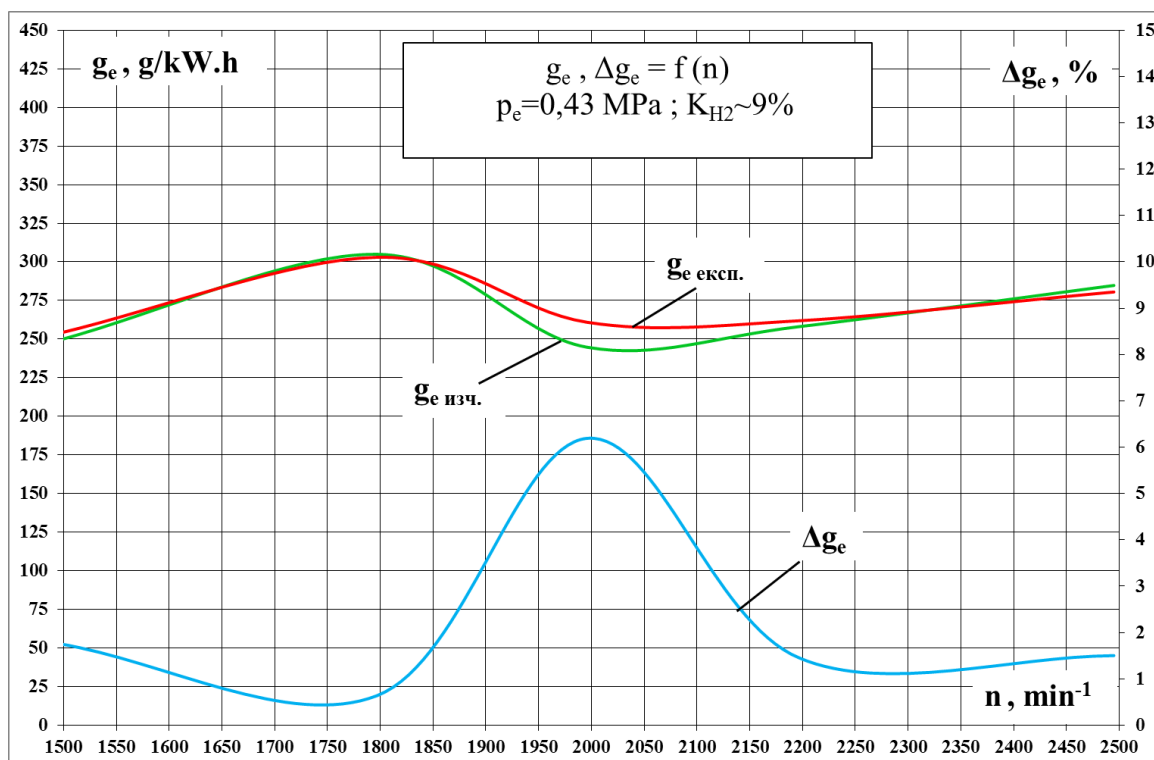
За моделиране на топлинните загуби към цилиндъра е използван стандартен модел на Вошни. Температурите на стените на надбуталното пространство са предварително въведени като приблизителни стойности. Като ориентир са ползвани температури, записани при експерименталните изследвания от външната стена на цилиндъра и от цилиндровата глава. Подробно тази част от изследванията е описана в научна статия [3b].

Използвана е и още една функционалност на програмата – за моделиране на емисии (азотни оксиди). Има възможност за настройка на два основни параметъра от уравнението на Арениус, с което работи софтуерът, и, което дава връзката между температурата на средата и скоростта и посоката на притичане на дадена химична реакция (в случая образуването на азотни оксиди, фиг. 4.4) [13a]. В повечето от режимите не се е налагало съществена промяна на двата параметъра, а са използвани стойностите по-подразбиране или близки до тях, което говори за добро моделиране на останалите процеси в двигателя.

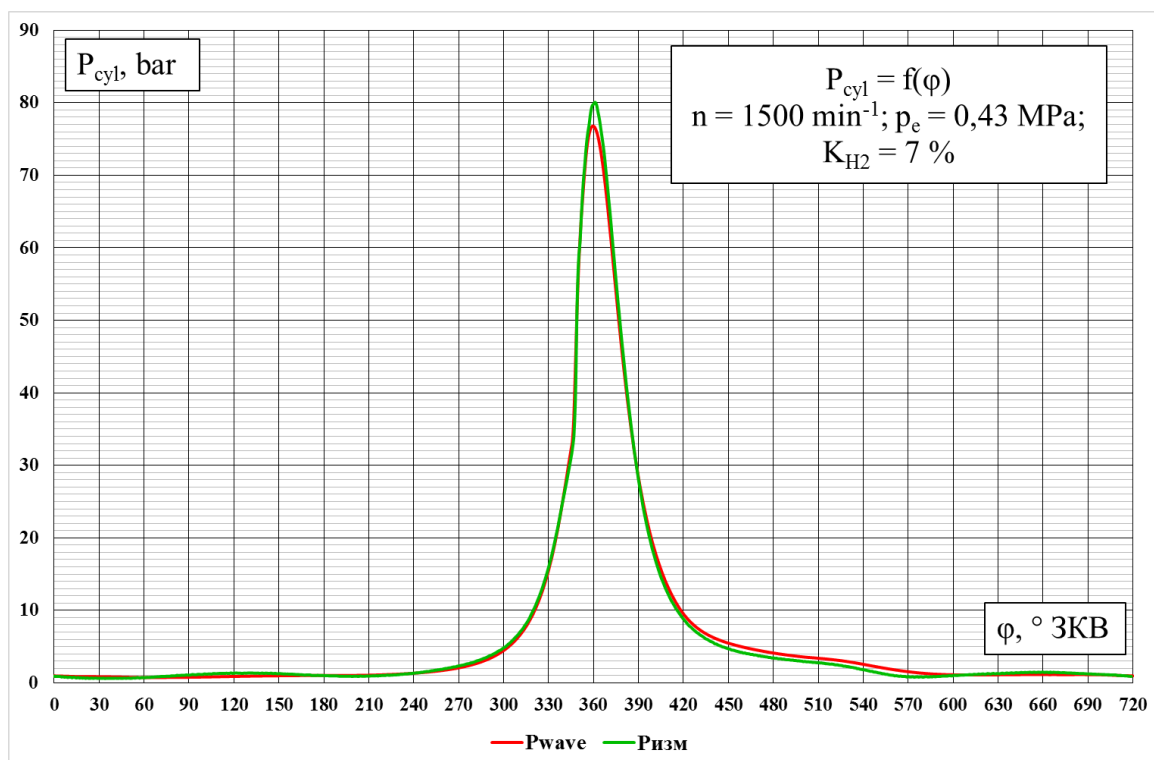
Показателите, които се извеждат от численото моделиране с помощта на симулационен модел, са следните: разход на въздух G_a , ефективна мощност N_e , специфичен ефективен разход за дизеловото гориво g_{eDF} , специфичен ефективен разход за водорода g_{eH2} (при събирането на двата се получава общ специфичен ефективен разход g_e), ефективен коефициент на полезно действие на двигателя η_e , коефициент на пълнене η_v , температура на отработилите газове $T_{ог}$ и концентрация на азотни оксиди NO_x . Получени са и стойности на налягането в цилиндъра. Допълнително, с данните за разхода на въздух и разходите на двете горива е изчислено и въздушното отношение α .

По-долу са представени част от резултатите от изчисленията за симулиране на честотна характеристика и за съпоставка на изчислената и експериментално получената индикаторна диаграма.

Кривите на специфичния ефективен разход на гориво (фиг.4.16, честотна характеристика) са много близки по характер и стойности, като грешката е до 6% при $n = 2000 \text{ min}^{-1}$. На останалите режими грешката е до 2%.



Фигура 4.16 Сравнение между изчисления от модела и експерименталния специфичен ефективен разход на гориво g_e , при променлива честота на въртене $n = 1500 - 2500 \text{ min}^{-1}$ и постоянна стойност на коефициента $K_{H2} = 9\%$



Фигура 4.21 – Сравнение на индикаторни диаграми при честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ и постоянна стойност на коефициента $K_{H2} = 7\%$

Специфичният ефективен разход на гориво е съотношение между часов разход на гориво и ефективна мощност. Максималната грешка в мощността е до 9%, а тази в часовия разход на въздух (респ. и в часовите разходи на гориво) е до 6%. Тъй като изчислените стойности и за мощността и за часовите разходи на въздух и гориво са по-високи от експерименталните, то съотношението помежду им се запазва и грешката в g_e се получава минимална.

На фигура 4.21 са показани две индикаторни диаграми на една графика, и двете при честота на въртене $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, средно ефективно налягане $p_e = 0,43 \text{ MPa}$ и $K_{H_2} \sim 7\%$. Едната от диаграмите е снета при проведените експериментални изследвания, а другата е получена при проведените симулации с разработения модел. Разликата между площите под двете криви е 0,52% и е изчислена на база площта под експерименталната крива. Отклонението в максималната стойност на налягането в цилиндъра е 4,13% на база експериментални резултати. Осреднената стойност на грешката в налягането в цилиндъра за всеки ъгъл на завъртане обаче достига 17%. Това е така заради ниските налягания по време на пълнене и изпускане. При тези процеси се наблюдават колебания на експерименталните стойности на налягането (от 0,6 до 1,2 bar при пълнене). Абсолютните отклонения в налягането между експерименти и симулации от 0,2 – 0,3 bar са пренебрежими на фона на максималното налягане в цилиндъра ($\sim 80 \text{ bar}$), но, отнесени към налягането при пълнене или изпускане ($\sim 1 \text{ bar}$), имат значително влияние.

4.5. Изводи от глава четвърта (Числено изследване на влиянието на газообразно гориво водород върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелов двигател)

От настоящата глава на дисертационния труд и резултатите от численото изследване със създадения симулационен модел могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. След въвеждането на данни за предварително избран двигател – геометрични параметри, параметри на подаването на гориво и някои данни за процеса на горене, с помощта на програмния продукт Wave, може да бъде създаден модел, който да симулира работата на двигателя по газодизелов цикъл;
2. За моделиране на двугоривния процес е необходимо въвеждането на закон за топлоотделяне с поне две криви на Вибе, за всяка от които следва да се посочи за кое гориво се отнася. Наличен закон за топлоотделяне може да бъде апроксимиран автоматично от софтуера с 1 до 4 криви на Вибе, но настройката на масовите дялове на горивата за всяка от кривите, след апроксимацията от софтуера, е почти невъзможна. Поради това не е използвана автоматична апроксимация в модела;
3. Създаденият модел предвижда добре мощностните, икономичните и токсичните показатели на двигателя, според сравнение, направено по регулировъчна и честотна характеристика. Преобладаващо разликите между изчислените и експерименталните показатели са под 5%. На

отделни режими някои показатели достигат отклонения от 7-9%. Максимално е отклонението в температурата на отработилите газове (12%) при честота на въртене $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ и 10% масово съдържание на водород;

4. Проведени са симулации за построяване на външна честотна характеристика на двигателя. Използвани са законите за топлоотделяне, въведени за симулациите по частична честотна характеристика. Изчислени са параметри за режими с честота на въртене $n = 2750 \text{ min}^{-1}$ и $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ (на които не са правени експериментални изследвания) при $K_{H_2} = 9\%$;

Моделът цялостно предвижда добре стойностите на показателите на двигателя. Отклоненията в сравнение с експерименталните стойности са малки. Може да се използва за подобни двигатели при настройването им за работа по газодизелов цикъл с водород.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Приложни приноси

1. Усъвършенствана е експериментална уредба за работа на дизелов двигател по двугоривен процес с индиректно подаване на газово гориво. Внедрени е вентилатор за принудително охлаждане на маслото в картера на двигателя, монтирани са възприематели за отчитане на горно мъртво положение на буталото и честота на въртене на двигателя. Внедрени са системи за измерване на температури и шум;
2. Експериментално е изследвано влиянието на водорода върху икономичните и токсичните показатели на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл с водород, както и върху параметри на горивния процес за двигател, работещ по такъв цикъл. Оформени са зависимости и закономерности на база проведените изследвания;
3. За всеки от режимите при експерименталните изследвания е определено оптимално съдържание на водород в горивото, за което се получават най-добри токсични и икономични показатели, но при спазване на допустима скорост на нарастване на налягането в цилиндъра. Избраните оптимални стойности на водородно съдържание могат да послужат като отправна точка при съставяне на „горивна карта“ за близък по параметри двигател, който е конвертиран за работа по газодизелов цикъл с водород;
4. Разработен е симулационен модел, който може да се използва за изчисляване на мощностни и икономични показатели както и параметри на горивен процес за двигател, работещи по газодизелов цикъл с водород. Може да се използва и за други дизелови двигатели, ако е на разположение приблизителен закон за топлоотделяне;

5. Проведени са симулации на режими на пълно натоварване на двигателя, за които режими не са проведени експериментални изследвания. Като резултат от симулационните изследвания е получена външна честотна характеристика на двигателя с данни за показателите му при пълно натоварване.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [1b] E. Dimitrov, B. Gigov, S. Pantchev, Ph. Michaylov and M. Peychev, A study of hydrogen fuel impact on compression ignition engine performance, MATEC Web of Conferences, volume 234, 03001, January 2018, DOI: 10.1051/mateconf/201823403001 (индексирана в Scopus)
- [2b] E. Dimitrov, M. Peychev, Ph. Michaylov and S. Pantchev, Study of hydrogen gaseous fuel influence on the thermal condition of a diesel engine, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, volume 1002, 012021, 2020, DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012021 (индексирана в Scopus)
- [3b] M. Peichev, Capabilities of Hydrogen as a Supplementary Fuel for Compression Ignition Engines – A Review, International Journal of Engineering and Applied Sciences, volume 7, Issue 12, ISSN: 2394-3661, December 2020, [https://dx.doi.org/ 10.31873/IJEAS.7.12.10](https://dx.doi.org/10.31873/IJEAS.7.12.10)
- [4b] E. Dimitrov, Z. Ivanov, S. Pantchev, Ph. Michaylov and M. Peychev, Study on the Noise of a Hydrogen-Diesel Dual-Fuel Engine, EKO Varna 2021, под печат (AIP), (индексирана в Scopus)

SUMMARY

The current PhD thesis with author Mihail Peichev is entitled “Influence of hydrogen gaseous fuel on the combustion process parameters and the performance, economy and emissions of a diesel engine”. It is concentrated on the usage of hydrogen as a supplementary fuel, substituting part of the diesel fuel during a diesel engine operation.

The main purpose of the study is to analyse the influence that hydrogen has on the combustion process parameters and the performance, economy and toxicity of a diesel engine and consequently, to find paths to improve these. Several tasks are defined in order to accomplish the goal, among which: improvement of an existing engine test bench; conduction of experiments to investigate the influence of hydrogen on combustion process and performance, emissions and engine economy; building a computer model with an appropriate software and using the model to make calculations for the engine operation with diesel and hydrogen.

The experimental studies are conducted using a 550cm³ single cylinder, air-cooled diesel engine, coupled to a direct current engine dynamometer. The test bench is equipped with the devices and apparatus, necessary to measure performance, emissions, economy, in-cylinder pressure, noise and temperature. The accuracies of the parameters – measured and later on – calculated, are described in the thesis.

Results from the experiments show that hydrogen has an influence on almost all engine parameters – fuel economy, engine efficiency, exhaust gas opacity and nitrogen oxides concentration in exhaust gas, cylinder pressure rise rate, etc. Most of these are positively influence by the growing hydrogen share in fuel, although some of them might retrograde at high engine loads. That is why hydrogen content in fuel should be limited at such engine modes. The data gathered from the experiments permits to create a table with the optimal hydrogen content in fuel for the corresponding engine speed and load. The table is placed in the thesis and could be used to primary set hydrogen gas systems in similar or future engines.

A model for computer simulations is created using WAVE of Ricardo Software. The model permits accurate prediction of engine performance, economy, emissions and combustion process parameters with accuracy of 5-10%. A limitation of the model is the necessity of a burn law, consisting of at least two combustion curves –one for hydrogen and one for diesel fuel which are hard to predict for non-existent engines. Yet, the model may be used during the construction of future diesel engines with similar dimensions or with different dimensions, if an approximate burn law is available.

As a general conclusion – hydrogen has a positive effect on diesel engine operation and could be used as a supplementary fuel for such engines in future.