



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Факултет по транспорта
Катедра „Двигатели, автомобилна техника и транспорт“

Маг. инж. Атанаси Минчев Ташев

**ВЛИЯНИЕ НА ГАЗООБРАЗНИ ГОРИВА 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
(шифър и наименование)

Професионално направление: 5.5 „Транспорт, корабоплаване и авиация“
(шифър и наименование на направлението в посочената област)

Научна специалност: „Двигатели с вътрешно горене“
(наименование на научната специалност)

Научен ръководител: доц. 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 15.02.2021 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 24.06.2021 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.5-04 от 24.02.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Евгени Цветанов Димитров
2. проф. д-р инж. Вълчо Николов Николов
3. проф. д.т.н. инж. Петър Иванов Димитров
4. доц. д-р инж. Пенко Цветков Петков
5. доц. д-р инж. Миряна Мирославова Евтимова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на „Факултет по транспорт“ 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. Атанаси Ташев

Заглавие: Влияние на газообразни горива 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

Съвременното двигателостроене е фокусирано към намаляването както на токсичните компоненти в отработилите газове на ДВГ така и на зависимостта на ДВГ от изкопаемите горива. Основната цел е усъвършенстването на ДВГ да става без да се правят съществени изменения по тяхната конструкция.

Дизеловите двигатели с вътрешно горене заемат все по-голям дял от съвременното двигателостроене. Това се дължи на високата им горивна икономичност, както и на все по-високата им надеждност.

Нарастването на броят на дизеловите двигатели води със себе си и редица екологични проблеми, главно свързани с високото съдържание на сажди и азотни окиси в отработилите газове. Саждите, които представляват въглерод в дисперсно състояние освен, че механично замърсяват атмосферата са вредни за хората поради това, че абсорбират полицикличните въглеводороди, които са силно канцерогенни, и стават техни разпространители. Емисиите на азотните окиси са силно токсични и участват в механизма, по който се формира фотохимичната мъгла (смог).

Намаляването на зависимостта на дизеловите двигатели от изкопаемите горива, както и концентрацията на някои токсични компоненти в отработилите газове до известна степен може да се постигне, чрез използване на различни газови горива, които да заместят част от конвенционалното дизелово гориво. За да се постигне това газовото гориво се подава в пълнителния тръбопровод или директно в цилиндъра (значително по-рядко използван метод, поради своята сложност), където се смесва с постъпващия в двигателя въздух. Така формираната газо-въздушна сме се възпламенява в цилиндъра посредством самовъзпламенението на малко количество дизелово гориво (пламна доза или нар. още пилотна доза).

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящият дисертационен труд е провеждане на допълнително изследване на влиянието на конвенционални газообразни горива: сгъстен природен газ и втечнен петролен газ върху параметрите на горивния процес и показателите на ниско и високочестотни дизелови ДВГ с неразделна и разделна горивна камера, с цел оптимизиране на приложението им като допълнително гориво в дизеловите ДВГ.

Постигането на поставената цел е свързано с изпълнението на следните задачи:

1. Разработване на методика за провеждане на сравнителни стендови изпитвания на двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл;
2. Създаване на експериментална уредба, позволяващи изследването на горивния процес и на факторите влияещи върху него при работа на ДВГ по газо-дизелов цикъл;
3. Провеждане на експериментално изследване на влиянието на различни газообразни горива върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелови двигатели с различна горивна камера;
4. Разработване на симулационен компютърен модел на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл;
5. Анализ на получените теоретични и експериментални резултати.

Научна новост

Дисертационният труд дава оценка на влиянието на конвенционални газообразни горива: сгъстен природен газ и втечнен петролен газ върху параметрите на горивния процес и показателите на ниско и високо честотни дизелови двигатели с разделни и неразделни горивни камери, работещи по газо-дизелов цикъл. Разработена е методика за изследване влиянието газови горива върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл. Методиката е приложима за различни смесообарзуващи системи, както и за различни газообразни горива. Също така е допълнен съществуващ математичен модел, който описва закона на пълното топлоотделяне и скоростта на неговото изменение при дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл. Посредством съществуващ софтуерен продукт е разработен симулационен компютърен модел на дизелов двигател с директно впръскване, работещ по газ-дизелов цикъл, който дава възможност за получаване на информация за изменението на налягането в цилиндъра във функция на ъгъла на завъртане на колянния вал при различен масов дял на газовото гориво от общото количество гориво, подавано в двигателя.

Практическа приложимост

Най-разпространените и лесно достъпни газообразни горива, приложими при дизеловите ДВГ са втечненият петролен газ (смес от пропан и бутан) и сгъстеният природен газ (метан). Използването на ВПГ и СПГ за организирането на газо-дизелов цикъл е практически приложимо при ниско и високочестотни дизелови ДВГ с неразделна и разделна горивна камера.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и одобрен на разширен катедрен съвет на катедра „Двигатели, автомобилна техника и транспорт“ на Техническия университет - София, състоял се на 15.02.2021 г..

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в пет научни публикации, всичките от които са представени на научната конференция БулТранс. Една от публикациите е самостоятелна а, останалите са в съавторство с научния ръководител и други съавтори.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 138 страници, като включва въведение, шест глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 89 литературни източници, като 67 са на латиница и 9 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 87 фигури и 10 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР, ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В направеният литературен обзор са разгледани основните физико-химични свойства на газовите горива, приложими при дизеловите двигатели с вътрешно горене. Направен е анализ на особеностите на горивния процес при двигателите със самовъзпламеняване на горивната смес, както и на методите за осъществяване на газо-дизелов цикъл. Разгледано е влиянието на водорода, съгъстеният природен газ (метан) и втечненият петролен газ (смес от пропан и бутан) върху параметрите на горивния процес и мощностните, икономичните и токсичните показатели на дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов.

На базата на направеното литературно проучване, целта на настоящият дисертационен труд е провеждане на допълнително изследване на влиянието на газообразни горива върху параметрите на горивния процес и показателите на ниско и високочестотни дизелови ДВГ с неразделна и разделна горивна камера, с цел оптимизиране на приложението им като допълнително гориво в дизеловите ДВГ. За постигането на поставената цел е необходимо разработване на методика и създаване на експериментална уредба, позволяващи изследването на горивния процес и на факторите влияещи върху него при работа на ДВГ по газо-дизелов цикъл. Също така постигането на поставената цел е свързано с провеждане на експериментално изследване на влиянието на различни газообразни горива върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелови двигатели с различна горивна камера. Освен изложеното до тук, изпълнението на целта на дисертационния труд трябва да се разработи симулационен компютърен модел на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл и да се анализ на получените теоретични и експериментални резултати.

Глава втора МЕТОДИКИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Основната цел на разработената методика за провеждане на сравнителни стендови изпитвания на дизелови ДВГ, работещи по газо-дизелов цикъл, е определянето на последователността от действия и необходимите технически средства, чрез които да се направи оценка на влиянието на различни газообразни горива върху показатели на ДВГ и параметрите на горивния процес при работата му по газо-дизелов цикъл.

2.1. Методики за оценка на влиянието на газообразни горива върху ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

Най-точна оценка на влиянието на газови горива върху показателите на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, може да се получи, когато сравнението на неговите показатели се осъществява при едно и също процентно съдържание на газово гориво в общото количество гориво, подадено в двигателя, при различните му режими на работа. Този метод е използван в.

При работата на дизелов двигател по газо-дизелов цикъл в цилиндрите му се подават два вида горива – дизелово и газово. Тези две горива са в определено процентно отношение спрямо общата им маса. Следователно, масовият дял на газовото гориво от общото количество гориво може да се определи от коефициента K :

$$(1) \quad K = \left(\frac{G_{\Gamma\Gamma}}{G_{\Gamma}} \right) \cdot 100, \%,$$

където $G_{\Gamma\Gamma}$ е часовият разход газово гориво, kg/h, а G_{Γ} – общият часов разход на гориво, kg/h.

Общият часов разход на гориво се изчислява от формулата:

$$(2) \quad G_{\Gamma} = G_{\Gamma\Gamma} + G_{\text{дг}}.$$

Най-често експерименталните изследвания на влиянието на газова горива върху работата на дизелов двигател се осъществяват чрез сравнение на неговите показатели по товарни характеристики, т.е. при постоянна честота на въртене и промяна на натоварването (промяна на средното ефективно налягане – p_e). При този тип изпитвания във всяка точка от съответната характеристика се поддържат едни и същи стойности на коефициента K . Тези методи най-общо се свеждат до измерване на времето, за което двигателят изразходва определена маса или обем гориво. Следователно, снемането на характеристики по натоварване (при постоянни стойности на коефициента K) чрез вариране на цикловите количества на газовото и дизеловото гориво (за всяка точка от характеристиката) до постигане на определено време, за което в двигателя постъпва определена маса от съответните горива (или обратното), е нецелесъобразно и трудно осъществимо.

В тази връзка, за провеждане на експериментални изследвания на влиянието на газова горива върху показателите на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл в стендови условия, е разработена методика за сравнение на ефективните показатели и параметрите на горивния процес при $n = \text{const}$, $p_e = \text{const}$ и $K = \text{var}$, а също така и при $n = \text{const}$, $K = \text{const}$ и $p_e = \text{var}$.

2.1.1. Сравняване на ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, при постоянна честота на въртене, постоянно средно ефективно налягане и различен масов дял на газовото гориво

За да се сравнят ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, е необходимо първо да се снемат пълна серия от характеристики, условно наречени „регулировъчни характеристики по масов дял на газовото гориво“. При този тип характеристика се поддържа постоянна честота на въртене – $n = \text{const}$ и постоянно средно ефективно налягане – $p_e = \text{const}$ (постоянна спирачна сила $P_{\text{сп}} = \text{const}$), а се променят цикловите количества на газовото и дизеловото гориво, т.е. часовият разход на газово – $G_{\Gamma\Gamma}$ и дизелово $G_{\text{дг}}$, а следователно и коефициента K . При режимите на пълно натоварване средното ефективно налягане може да е различно. Регулировъчните характеристики по масов дял на газовото гориво се снемат в следната последователност:

1. При избраната честота на въртене и средно ефективно налягане (избрана спирачна сила – $P_{\text{сп}}^{\text{избр}}$), се определят показателите на двигателя при работата му само с дизелово гориво, т.е. без подаване на газово гориво;

2. Избира се стъпка на намаляване на спирачната сила – $\Delta P_{\text{сп}}$ при работа на двигателя само с дизелово гориво на избраната честота на въртене;

3. При работа на двигателя със зададената честота на въртене само с дизелово гориво се намалява цикловото му количество до постигане на спирачна сила – $P_{\text{сп}}^i$:

$$(3) \quad P_{\text{сп}}^i = P_{\text{сп}}^{\text{избр}} - (i \cdot \Delta P_{\text{сп}}), \quad i = 1, 2 \dots N,$$

където N е броят на точките от характеристиката, в които двигателят работи по газодизелов цикъл;

4. При работа на двигателя само с дизелово гориво и спирачна сила $P_{\text{сп}}^i$ се включва подаването на газово гориво и цикловото му количество се увеличава до тогава, докато се постигне зададената спирачна сила при зададената честота на въртене ($P_{\text{сп}}^{\text{избр}}$), след което се определят показателите на двигателя и се изчислява коефициентът на масов дял на газовото гориво K_i ;

5. Определяне на изменението на икономичните, токсичните и други показатели на двигателя, както и показателите на горивния процес в зависимост от процентното съдържание на газово гориво в общото количество гориво при съответните честоти на въртене и средни ефективни налягания (фиг. 40), т.е. получаване на функционалните зависимости:

$$(4) \quad P_{zmax}, dp/d\varphi, G_z, g_e, CO, CH, NO_x, R... = f(K)$$

Така получените регулировъчни характеристики по масов дял на газовото гориво дават възможност да се оцени как добавянето на газово гориво влияе върху ефективните показатели на двигателя. Също така може да се оцени и зависимостта на показателите на дизелов двигател, работещ по газ-дизелов цикъл, от количеството на подаваното газово гориво.

При снемането на регулировъчните характеристики, в качеството на критерий за пределно допустимо увеличаване на процентното съдържание на газово гориво в общото количество гориво, подадено в двигателя, е целесъобразно да се използва максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра, от която зависи твърдостта на работа на двигателя. Използването на някои газови горива може да доведе до намаляване на $(dp/d\varphi)_{max}$ при определени товарни режими. В този случай, максималното количество газово гориво, подавано към двигателя, може да се определи от специфичните параметри на съответната системата за подаването му. Друг фактор, който влияе максималното количество газово гориво, подавано в двигателя, е достигането му на гранична стойност, след която се наблюдават пропуски във възпламеняването на работното вещество.

2.1.2. Сравнение на ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, при: постоянна честота на въртене, постоянен масов дял на газовото гориво и различно средно ефективно налягане

След като са налични пълна серия от регулировъчни характеристики по масов дял на газовото гориво, може да се сравнят ефективните показатели и параметрите на горивния процес на ДВГ, работещ по газо-дизелов, при различни натоварвания и постоянна честота на въртене и определена стойност на K . За тази цел е необходимо да се изберат конкретни стойности на K , за които да се определят показатели на двигателя, работещ по газо-дизелов цикъл. Това може да се осъществи по графичен или аналитичен начин от съответните регулировъчни характеристики. Използвайки вече определените стойности на показателите на двигателя за конкретен масов дял на газовото гориво може да се построи товарната характеристика при избрана честота на въртене и стойност на K . Примерният вид такава на товарна характеристика (само за един от показателите на ДВГ – g_e) е представена на фиг. 41.

След като е налична пълната серия от товарни характеристики може да се направи оценка на влиянието на газовото гориво върху ефективните показатели на двигател, работещ по газо-дизелов цикъл.

2.1.3. Методика за определяне на параметрите, характеризиращи горивния процес на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

Най-пълна и точна количествена оценка на показателите, характеризиращи протичането на отделните процеси от работния цикъл, може да бъде получена въз основа на математическата обработка на данните от експериментално снета индикаторна диаграма на двигателя.

Обработването на индикаторната диаграма се осъществява за периода, в който не се променя количеството на работното вещество в цилиндъра на двигателя, а именно от момента на затваряне на пълнителния клапан до момента на отваряне на изпускателния клапан.

По време на сгъстяването се изчислява текущата стойност на температурата на работно вещество в цилиндъра на двигателя – T_{cyl} и средната стойност на показателя на политропата на сгъстяването – n_1 . Използвани са известните от термодинамиката формули:

$$(5) \quad T_{cyl} = \frac{p_{cyl} V_{cyl}}{m_{fm} \cdot R_{fm}}$$

$$(6) \quad n_1 = \frac{\lg p_c - \lg p_a}{\lg V_a - \lg V_c},$$

където: p_{cyl} е текущата стойност на налягането в цилиндъра, Pa; V_{cyl} – текущата стойност на обема на цилиндъра, m^3 ; m_{fm} – масата на пряното работно вещество в цилиндъра, kg; R_{fm} – газовата константа на пряното работно вещество, J/kg.K; p_a , p_c и V_a , V_c са съответно налягането и обемът на цилиндъра в началото и края на сгъстяването. По време на сгъстяването газовата константа на работното вещество – R_{fm} не се променя и е равната или на тази на въздуха, или тази на сместа от въздух и гориво [23].

Обемът на цилиндъра се изчислява по известната от теорията и конструкцията на ДВГ формула:

$$(7) \quad V_{cyl} = \frac{\pi D^2}{4} \left\{ \frac{S}{\varepsilon - 1} + \frac{S}{2} \cdot \left[(1 - \cos \phi) + \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \phi}) \right] \right\},$$

където: D е диаметърът на цилиндъра, m; S – ходът на буталото, m; λ – отношението на радиусът на колянвия вал към дължината на мотовилката; ε – степента на сгъстяване; ϕ – ъгълът на завъртане на колянвия вал, rad.

Обработката на индикаторната диаграма през процесите горене и разширение се базира на първия закон на термодинамиката. Методиката по която се извършва съответната обработка се състои в определяне на скоростта на промяната на коефициента на пълното топлоотделяне, след което се изчислява температурата на работното вещество в цилиндъра на двигателя, посредством диференциалните уравнения, предложени от *Р. М. Петриченко*:

$$(8) \quad \frac{dX}{d\phi} = \frac{m_{ws} \cdot c_v \cdot T_{cyl}}{m_{fuel} \cdot H_u} \cdot \left(\frac{d \ln p_{cyl}}{d\phi} + k \cdot \frac{d \ln V_{cyl}}{d\phi} + \frac{1}{m_{wm} \cdot c_v \cdot T_{cyl}} \cdot \frac{dQ_w}{d\phi} \right);$$

$$(9) \quad \frac{dT_{cyl}}{T_{cyl}} = \frac{1}{m_{wm} \cdot c_v \cdot T_{cyl}} \cdot (m_{fuel} \cdot H_u \cdot dX - dQ_w) - (k - 1) \cdot \frac{dV_{cyl}}{V_{cyl}},$$

където: m_{ws} , kg; c_v , J/kg.K и k са съответно масата, специфичният топлинен капацитет при постоянен обем на работното вещество и показателят на адиабатата на работното вещество; H_u – долната топлина на изгаряне на горивото, J/kg; $dQ_w/d\phi$ – количеството топлина, която се отдава на стените на надбуталното пространство, J/deg. Диференциалното уравнение за промяната на коефициента на активното топлоотделяне – $dX_a/d\phi$ е същото като (8), но без да се отчитат топлинните загуби, т.е. $dQ_w/d\phi = 0$.

диференциалът – dQ_w , се изчислява от уравнението:

$$(10) \quad dQ_w = \alpha_w \cdot F_{cyl} \cdot (T_{cyl} - T_w) \cdot dt = \alpha_w \cdot F_{cyl} \cdot (T_{cyl} - T_w) \cdot \frac{d\phi}{6n},$$

където: α_w е коефициентът на конвективен топлообмен между работното вещество и стените на надбуталното пространство, W/m².K; F_{cyl} – площта на надбуталното пространство, m²; T_w – средната температура на стените на цилиндъра, K. Коефициентът на конвективен топлообмен – α_w се изчислява по формулата на *Вошни* [6]:

$$(11) \quad \alpha_w = 127,93 \cdot D^{-0,2} \cdot p_{cyl}^{0,8} \cdot W^{0,8} \cdot T_{cyl}^{-0,53},$$

където W е характерната скорост на работното вещество в цилиндъра, която се изчислява, съгласно изложеното в.

През процеса горене работното вещество е газова смес, състояща се от пряно работно вещество и отработили газове. Тази смес непрекъснато променя състава си пропорционално на реагиралото количество гориво, т.е. пропорционално на коефициента на пълното топлоотделяне. По време на горенето термодинамичните свойства (масови специфични топлинни капацитети при постоянен обем – c_v и постоянно налягане c_p ,

газова константа – R и показател на адиабатата k) на работното вещество се изчисляват по известните формули, например:

$$(12) \quad c_v = \frac{m_{fm}}{m_{ws}} \cdot c_v^{fm} + \frac{m_{eg}}{m_{ws}} \cdot c_v^{eg},$$

където: c_v , c_v^{fm} , c_v^{eg} and m_{ws} , m_{fm} , m_{eg} са съответно специфичните топлинни капацитети при постоянен обем и масите на работното вещество, прясното работно вещество и отработилите газове.

При работа на двигателя по газодизелов цикъл термодинамичните свойства на отработилите газове се изчисляват в зависимост от масовото съдържание на основните им компоненти:

$$(13) \quad c_v = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{vi},$$

където: m_i е масовият дял на съответната компонента, а c_{vi} е нейният специфичен топлинен капацитет при постоянно налягане. Масовите дялове на компонентите (въглероден двуокис – CO_2 , въглероден окис – CO , водна пара – H_2O , въглеводороди H_nC_m , свободен кислород – O_2 и азот – N_2) на отработилите газове се изчисляват в зависимост от елементния състав на горивото и въздушното отношение.

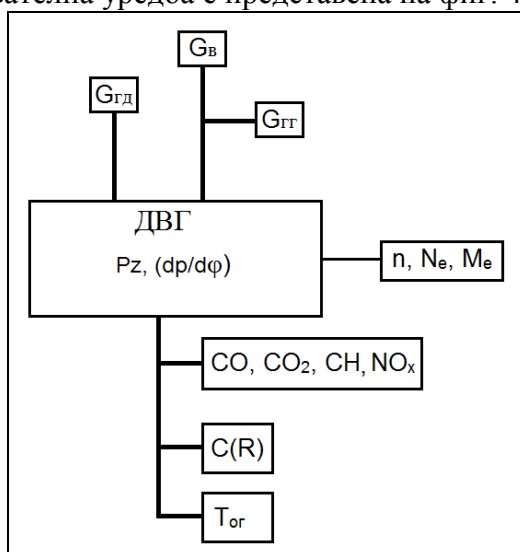
Средната стойност на показателя на политропата на разширението се изчислява по формула (6) като наляганията и обемите в точките a и c се заместват с тези в точките z и b .

На база изложената методика за обработка на индикаторната диаграма е разработена изчислителна програма в среда на *Matlab* от доц. Евгени Димитров, научен ръководител на настоящия дисертационен труд.

Глава трета

НАЧИНИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВЕЛИЧИНИ, ХАРАКТЕРИЗИРАЩИ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ, РАБОТЕЩ ПО ГАЗО-ДИЗЕЛОВ РАБОТЕН ЦИКЪЛ

За да бъде определено влиянието на газовите горива върху показателите на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, е необходимо отчитането на редица параметри, като честота на въртене на колянвият вал, разход на въздух, разход на гориво, ефективна мощност, налягане в цилиндъра и др. За целта е необходимо изграждане на изпитвателна уредба, позволяваща регистрирането на всички необходими величини. Функционална схема на такъв тип изпитвателна уредба е представена на фиг. 42.



Фиг. 42. Функционална схема на изпитвателна уредба за отчитане на показатели, служещи за оценка на влиянието на газови горива върху показателите на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

Измервателната апаратура трябва да отговаря на следните изисквания:

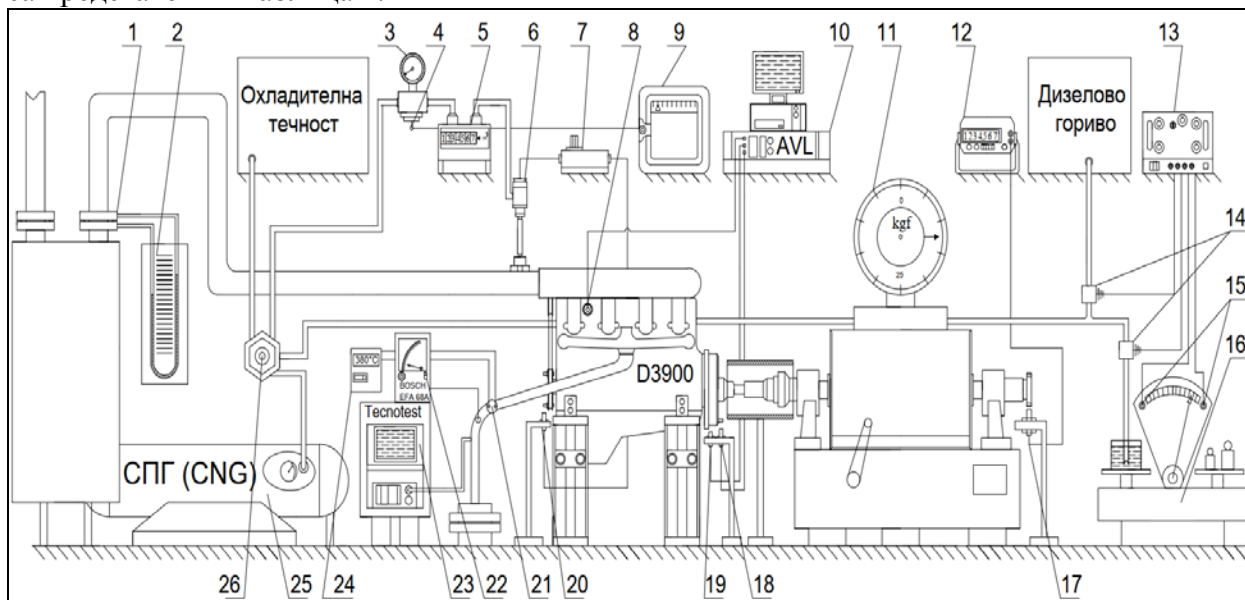
- да не внася изкривявания (шум) в измервания параметър;
- да има широк амплитуден обхват, позволяващ измерването на величини с малки и големи стойности с необходимата точност;
- да осигурява зададената точност на измерването на съответните величини;
- да има стабилни показания, които да не се влияят от външни смущаващи фактори, действащи при реални условия на измерването. Такива смущаващи фактори са вибрации, изменения в захранващото напрежение, температура на околната среда, атмосферно налягане и др.;
- да позволява дистанционно отчитане на измерваните величини;
- да има възможност за автоматично измерване и отчитане на голям брой, различни по характер величини.

Глава четвърта

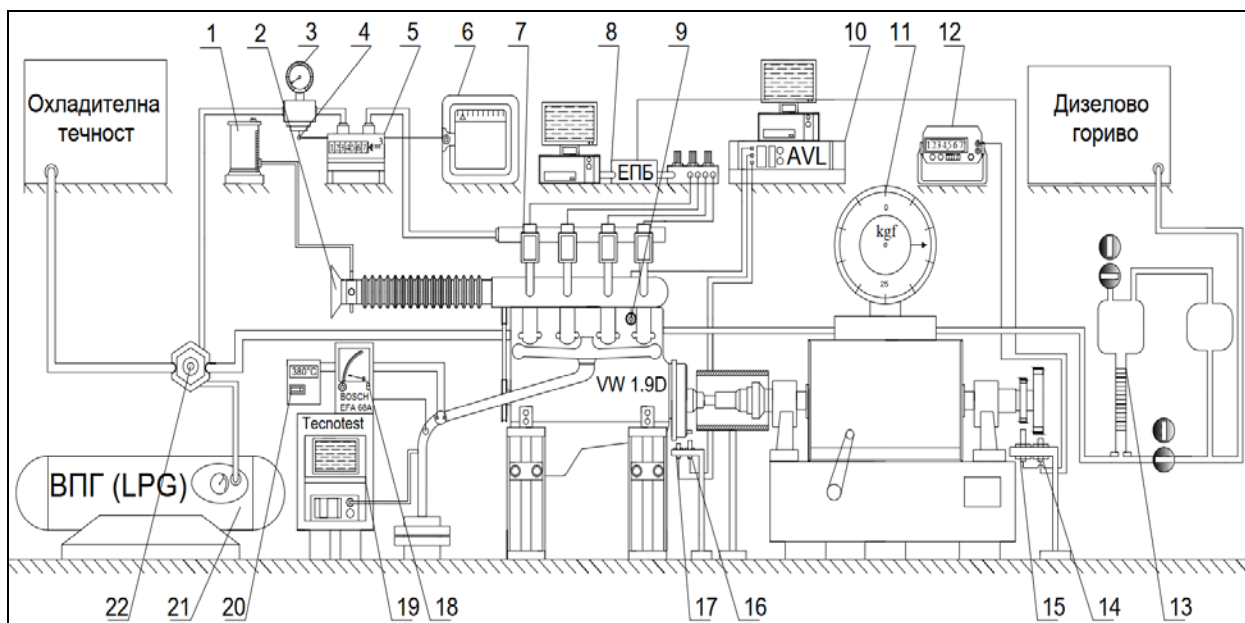
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ УРЕДБИ И ИЗМЕРВАТЕЛНА АПАРАТУРА

4.1. Описание на експерименталните уредби и използваната измервателна апаратура

За провеждането на сравнителните стендови изпитвания на двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл, са изградени две изпитвателни уредби, пригодени за работа с различни газови горива (пропан-бутан и природен газ). Задачата на съответните уредби е определяне на показателите на различни дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл. Използваните дизелови двигатели при двете експериментални уредби са *Volkswagen 1.9D* и *D 3900*. Някои от по-важните показатели и параметри на двигателите, използвани за експерименталните изследвания, описани в текущият дисертационен труд, са представени в таблица 4.



Фиг. 43. Функционална схема на изпитвателна уредба с двигател *D3900*



Фиг. 44. Функционална схема на изпитвателна уредба с двигател Volkswagen 1.9

Изпитвателните уредби са снабдени със следните системи и устройства, позволяващи отчитане влиянието на газовите горива върху параметрите на горивния процес и показателите на дизеловите двигатели:

Двигател Д 3900 (според фиг. 43):

- постоянно токова електрическа спирачка - 11, позволяваща измерването на ефективна мощност до $N_e = 125 \text{ kW}$, при честота на въртене $n = 3000 \text{ min}^{-1}$;
- система за измерване разхода на въздух, постъпващ в двигателя, състояща се от дроселиращо устройство тип бленда -1 и диференциален манометър-2;
- уредба за подаване на газово гориво към двигателя, изградена от: резервоар за съхранение на втечнен природен газ – 25; редуктор – 26; електронно устройство – 7; управляващо продължителността на отворено състояние на бързодействащия електромагнитен клапан – 6, като момента на подаване на газовото гориво се определя от съвместната работа на индукционен възприемател – 20 и щифтове, монтирани на ремъчната шайба на двигателя;
- система за измерване на количеството газово гориво, подавано в двигателя, състояща се от манометър – 3, обемен газов расходомер тип G4 – 5 и термодвойка – 4, работеща съвместно с електронен пищещ дванадесет позиционен потенциометър 21 ЭПП-09МЗ - 9;
- система за отчитане на разхода на дизелово гориво, състояща се от електронно управляващо устройство – 13, два електромагнитни клапана – 14, фотоелектрични възприематели – 15, монтирани на контролна везна – 16;
- измервателната апаратура за отчитане на съдържанието на токсични компоненти и димността на отработилите газове на двигателя, съответно с газоанализатор – модел 473 на фирмата “Tecnotest” (Италия) – 23 и димометр “Bosch”– EFAW 68A (Германия) - 22.
- уред за отчитане на температурата на отработилите газове – 24;
- уред за отчитане на честотата на въртене на двигателя – 12, получаващ сигнал от индукционен възприемател – 17;
- система за индициране - Indiset 620 на фирмата AVL (Австрия) - 10, която е комплектувана с пиезоелектричен възприемател за налягане в цилиндъра (монтиран в надбуталното пространство) – 8 и два индукционни възприемателя за честота на въртене и ъглово положение на колянвият вал на двигателя, съответно – 19 и 18;

Двигател Volkswagen 1,9D (според фиг. 44):

- постоянно токова електрическа спирачка - 11, позволяваща измерването на ефективна мощност до $N_e = 50 \text{ kW}$, при честота на въртене $n = 6000 \text{ min}^{-1}$;
- система за измерване разхода на въздух, постъпващ в двигателя, състояща се от дроселиращо устройство тип дюза -2 и микро манометър – 1;
- система за подаване на газово гориво в двигателя, изградена от резервоар за съхранение на втечнен петролен газ – 21; редуктор-изпарител – 22; електронен програмируем блок – 8, управляващ продължителността на отворено състояние на газовите впръсквачи – 7, и момента на подаване на газовото гориво, който се определя от съвместната работа на индукционен възприемател – 14 и зъбно колело с 36 зъба, от които един е премахнат;
- система за измерване на количеството газово гориво, подавано в двигателя, състояща се от манометър – 3, обемен газов разходомер тип G4 – 5 и термодвойка – 4, работеща съвместно с електронен пишещ дванадесет позиционен потенциометър 21 ЭПП-09МЗ - 6;
- обемен разходомер за дизелово гориво - 13;
- измервателната апаратура за отчитане на съдържанието на токсични компоненти и димността на отработилите газове на двигателя, съответно с газоанализатор – модел 473 на фирмата “Tecnotest” (Италия) – 19 и димомер “Bosch”– EFAW 68A (Германия) - 18.
- уред за отчитане на температурата на отработилите газове – 20;
- система за индициране - Indiset 620 на фирмата AVL (Австрия) - 10, която е окомплектована с пиезоелектричен възприемател за налягане (монтиран във вихровата камера, на мястото на подгревната свещ) – 9 и два индукционни възприемателя за честота на въртене и ъглово положение на колянвият вал на двигателя, съответно – 17 и 16;
- уред за отчитане на честотата на въртене на двигателя – 12, получаващ сигнал от индукционен възприемател – 15.

Така изградените изпитвателни уредби позволяват определянето на следните величини: спирачна сила; честота на въртене на двигателя; разход на въздух; разходът на дизелово и газово гориво; температура на охладителната течност, постъпващия в двигателя въздух, газовото гориво и отработилите газове; токсичност на отработилите; налягане в цилиндъра.

Направена е оценка на грешките на експериментално измерваните величини. В следствие на направеният анализ е установено, че максималната грешка на по-голямата част от измерваните величини не превишава 5 %.

Глава пета

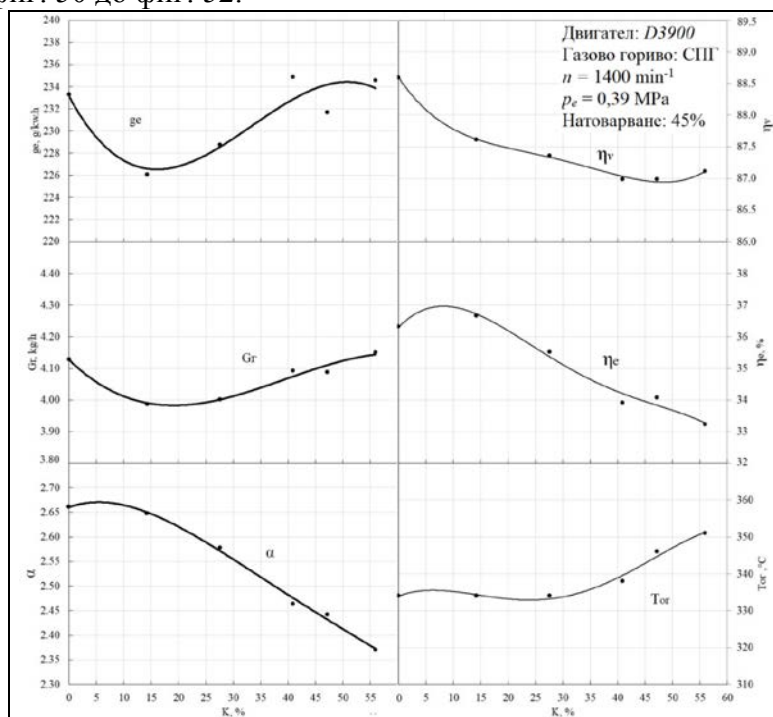
РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

5.1. Резултати от експерименталните изследване на влиянието газообразни горива върху ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

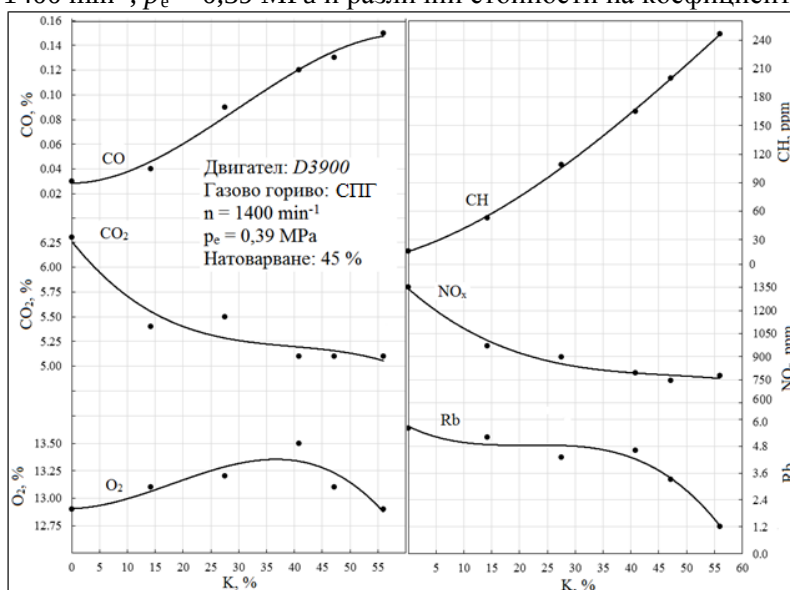
5.1.1. Влияние на СПГ върху ефективните показатели на двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

За да се оцени влиянието на СПГ върху ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл е проведено експериментално изследване на двигател Д 3900. За целите на анализа е снета регулировъчна характеристика при постоянна честота на въртене ($n = 1400 \text{ min}^{-1}$), постоянно средно ефективно налягане ($p_e = 0,39 \text{ MPa}$) и различен масов дял на газовото гориво ($K = \text{var}$) съгласно методиката

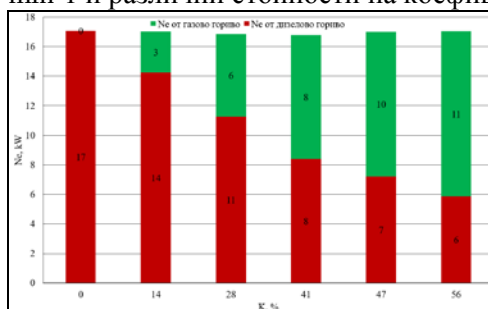
посочена в глава втора. Резултатите от проведеното експериментално изследване са представени на фиг. 50 до фиг. 52.



Фиг. 50. Ефективни показатели на двигател *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл с метан, при $n = 1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ и различни стойности на коефициента K



Фиг. 51. Екологични показатели на двигател *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл с метан, при $n=1400 \text{ min}^{-1}$ и различни стойности на коефициента K



Фиг. 52. Принос на газовото гориво към ефективната мощност на двигател *Д 3900*, използващ СПГ за организирането на газо-дизелов цикъл ($n = 1400 \text{ min}^{-1}$)

От анализа на получените експериментални резултати на двигател *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл с метан, могат да се направят следните изводи:

- Посредством проведените стендови изпитвания на *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл, може да се определи какъв е приносът на метана към ефективната мощност. Това се осъществява посредством регистрирането на ефективната мощност преди и след подаването на газовото гориво (фиг. 52). На база получените резултати се наблюдава, че при $K = 56$ приносът на СПГ към ефективната мощност е 11kW, докато този от конвенционалното дизелово гориво е 6 kW т.е. приносът на СПГ е почти два пъти по-голям от този на дизеловото гориво;

- При проведените стендови изпитвания на двигател *Д 3900*, използващ метан за организирането на газо-дизелов работен цикъл, се наблюдава подобряване на икономичните показатели (намаляване на g_e и G_T) при стойности на коефициента K под 30%. След увеличаване на количеството газово гориво, подавано в двигателя ($K > 30\%$), разликата между икономичните показатели на двигателя при работата му по газо-дизелов цикъл, спрямо тези при работата му само с конвенционално дизелово гориво не превишава 2 %

- Подаването на СПГ в двигателя при конкретния товарен режим води до намаляване на ефективния коефициент на полезно действие при стойности на коефициента K по-високи от 20 %. При по-ниско съдържание на газово гориво, от общото количество гориво ($K < 20\%$) ефективният к.п.д. на двигателя се увеличава (спрямо този при работата му само с дизелово гориво), главно поради по-ниските стойности на g_e при тези условия (фиг. 50);

- Подаването на газово гориво в пълнителния тръбопровод води до слабо понижаване (под 1,6 %) на коефициента на пълнене. Това се дължи на заместване на част от постъпващия, в двигателя въздух с газовото гориво (фиг. 48). По-малкото количество въздух, постъпващо в двигателя както и по-високите стойности на l_0 на СПГ водят до обогатяване на гориво-въздушното смес ($\alpha_{k=0} > \alpha_k > 0$) (фиг. 50);

- При увеличаване на подаването в двигателя газово гориво се наблюдава повишаване на температурата на отработилите газове (фиг. 50). Причина за това е увеличеният индукционен период и изнасяне на горивния процес по линията на разширение;

- По-ниските стойности на α , когато двигателя работи по газо-дизелов цикъл са, причината за повишаване на съдържанието на CO в отработилите газове (фиг. 51);

- По-ниското съотношение на C към H в СПГ, спрямо това на конвенционалното дизелово гориво, обосновава намаляването на емисиите CO_2 , както и на димността на отработилите газове на изпитвания двигател при работата му по газо-дизелов цикъл (фиг. 51);

- Въпреки ясно изразеното обогатяване на гориво-въздушната смес при работа на двигател *Д 3900* по газо-дизелов цикъл съдържанието на кислород в отработилите газове се увеличава, спрямо това при работа на двигателя само с дизелово гориво (фиг. 51). Причината за това е не пълното окисление на цикловото количество гориво. За това свидетелстват повишените нива на CO и CH емисиите, които са продукт на непълното окисление и редуцирането на CO_2 емисиите, които съответно са продукт на пълното окисление;

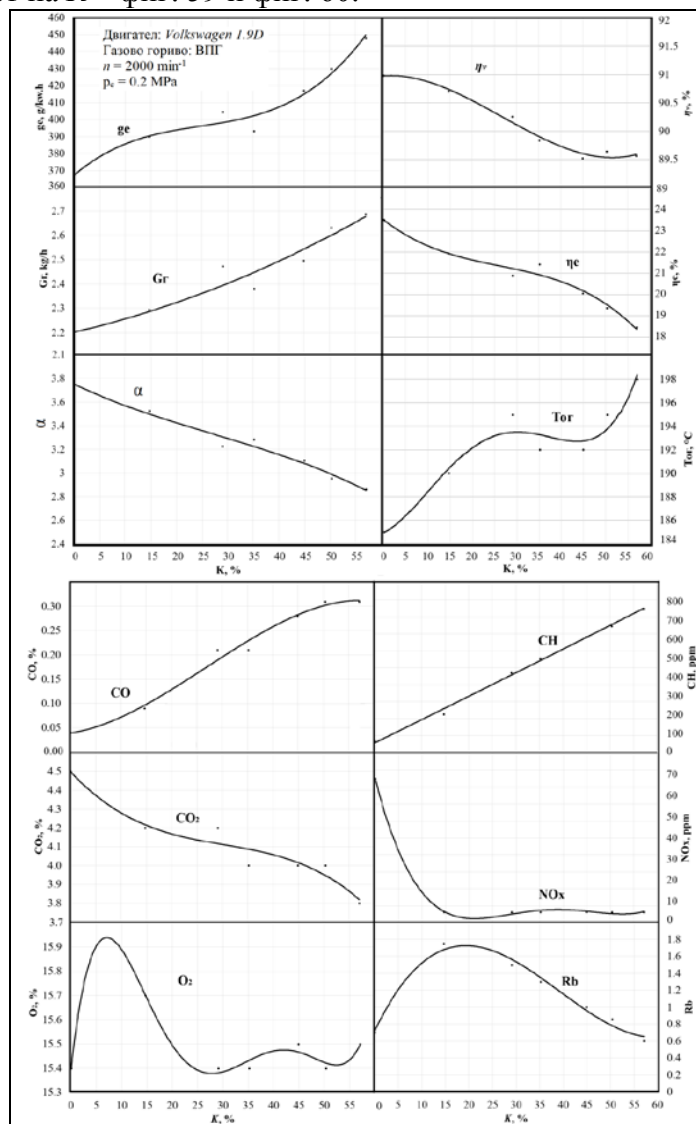
- Увеличеното съдържание на CH в отработилите газове може да се дължи на преминаването на част от газо-въздушната смес от работното пространство в изпускателния тръбопровод по време на препокриване на фазите на газоразпределение (фиг. 51). Друга причина за повишаване на нивото на CH в отработилите газове е по-ниските скорости на горене на силно обеднената газо-въздушната смес както и наличието ѝ в близост до стените на горивното пространство, където нейното окисление е

затруднено. По-трудното възпламеняване на слоя газове гориво, намиращ се в близост до стените на горивната камера, е следствие на интензивния топлообмен между относително студените стени на горивното пространство и фронта на пламъка;

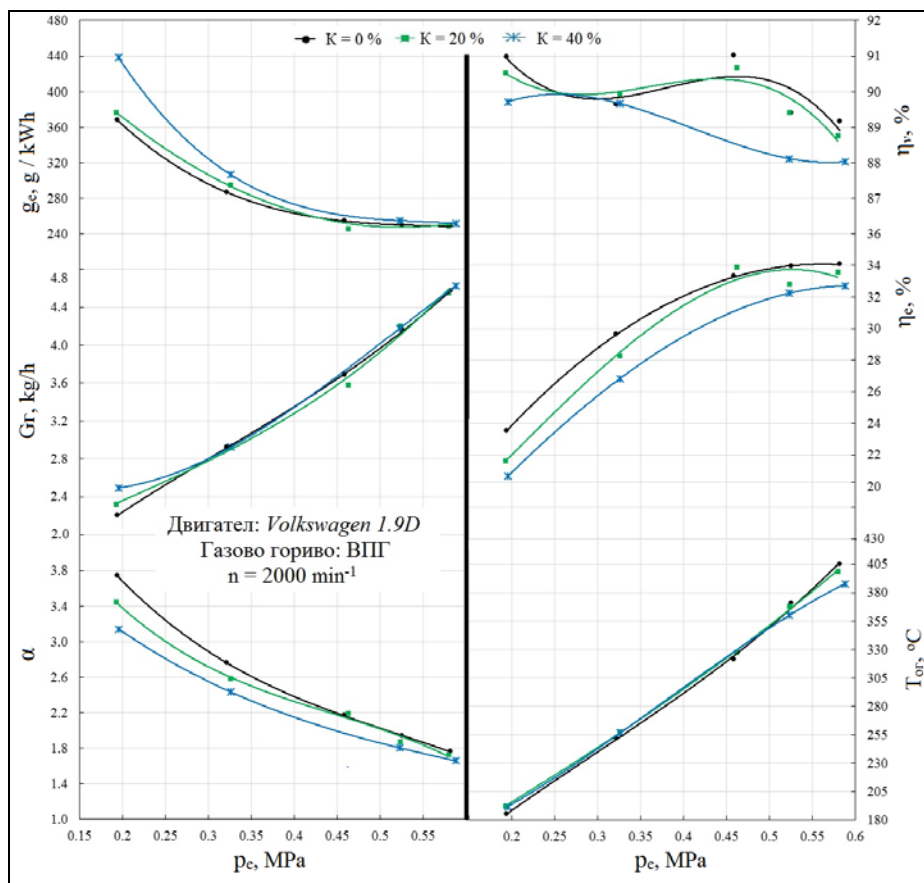
- Регистрираните по-ниски стойности на NO_x при снетата регулировъчна характеристика по съдържание на газовото гориво в общото количество гориво (фиг. 51), подавано в двигател $D 3900$ се дължи на по-ниската максимална температура в горивното пространство и намаляването на количеството кислород, постъпващ в двигателя.

5.1.2. Влияние на ВПГ върху ефективните показатели на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

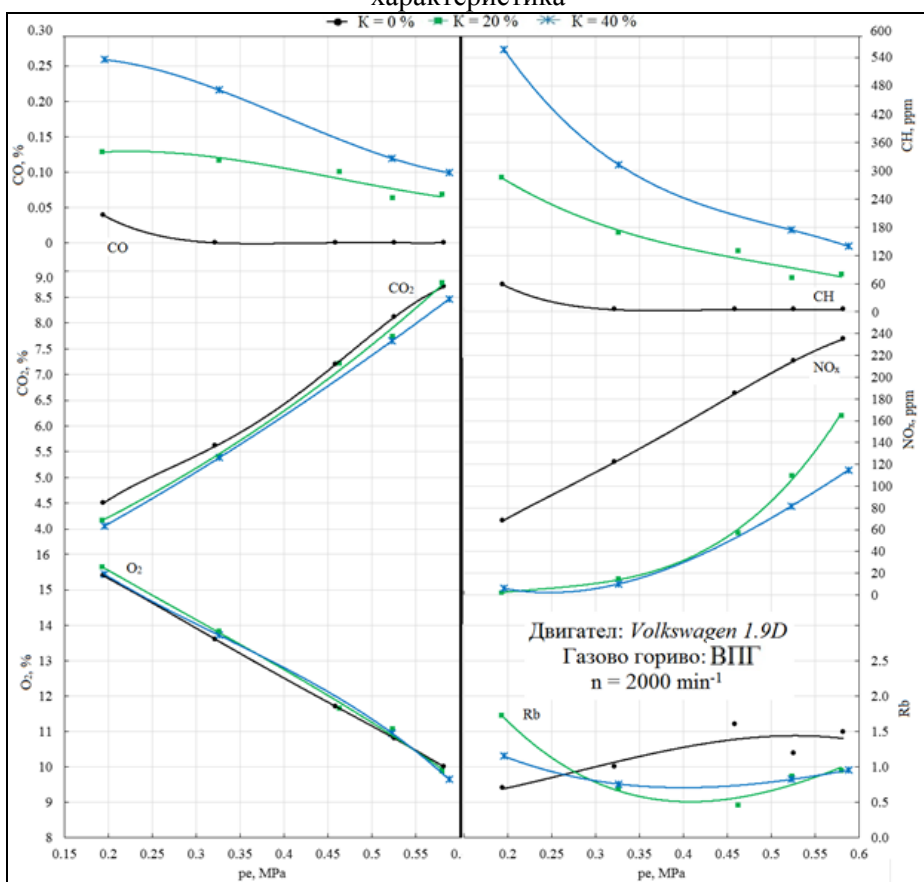
За да се оцени влиянието на ВПГ върху показателите на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл е проведено експериментално изследване на двигател *Volkswagen 1,9D*. За целите на анализа са снети серия от регулировъчна характеристика при постоянна честота на въртене ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$), постоянно средно ефективно налягане (като за различните характеристики p_e варира от 0,2 до 0,57 МПа) и различен масов дял на газовото гориво ($K = \text{var}$), съгласно методиката посочена в глава втора. На база данните от регулировъчните характеристики при постоянна честота на въртене, постоянно средно ефективно налягане и различен масов дял на газовото гориво са сравнени ефективните показатели на двигателя при различни натоварвания, постоянна честота на въртене и определена стойност на K – фиг. 59 и фиг. 60.



Фиг. 53. Регулировъчна характеристика по масов дял на газовото гориво на двигател VW1,9 D при $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,2 \text{ MPa}$



Фиг. 59. Ефективни показатели на двигател Volkswagen 1,9D при работа по товарна характеристика



Фиг. 60. Екологични показатели на двигател на двигател Volkswagen 1,9D при работа по товарна характеристика

От анализа на получените експериментални резултати на двигател *Volkswagen 1,9D*, работещ по газо-дизелов цикъл с втечен петролен газ – смес от пропан и бутан, могат да се направят следните изводи:

- Както при стендовите изпитвания на двигател *D 3900*, така и при *Volkswagen 1,9D*, когато двигателя работи при определено натоварване само с дизелово гориво, подаването на газово гориво води до увеличаване на ефективната мощност. Това позволява да се определи какъв е приносът на втечненият петролен газ към ефективната мощност;

- От получените експериментални резултати е установено увеличаване на g_e при работа на двигателя по газо-дизелов цикъл, спрямо g_e при използване само на дизелово гориво. Тази разлика е най-значителна при ниски натоварвания, като с увеличаване на натоварването тя значително намалява. Причина за това е затрудненото окисление на слоя от газово гориво, намиращ се в близост до относително студените стени на горивното пространство. Друга фактор за повишаване на g_e при ниски натоварвания и работа на двигателя по газо-дизелов цикъл е малкото количество пилотно дизелово гориво, самовъзпламеняването на което отделя недостатъчна енергия за иницирането на горивен процес, който да обхване цялото горивно пространство и да осигури високи скорости на разпространение на фронта на пламъка на газо-въздушната смес;

- Заместването на част от постъпващия в двигателя въздух с газово гориво води до намаляване на коефициента на пълнене и на гориво-въздушното отношение. Обогащането на горивната смес се дължи също така и на по-високото l_0 на газовото гориво, спрямо това на конвенционалното дизелово гориво. По-високият g_e , регистриран при работа на двигател *Volkswagen 1,9D* по газо-дизелов цикъл, също обосновава понижаването на α ;

- По-ниските стойности на η_e при работа на двигател *Volkswagen 1,9D* по газо-дизелов работен цикъл се дължат освен на по-високия ефективен специфичен разход на гориво, но и на по-високата долна топлина на изгаряне на газовото гориво;

- При $p_e < 0,5$ МПа температурата на отработилите газове е по-висока, когато двигателя работи по газо-дизелов цикъл, спрямо тази при работата му само с конвенционално дизелово гориво. Когато натоварването нарасне $p_e > 0,5$ МПа, използването на ВПГ за организирането на газо-дизелов работен цикъл води до понижаване на $T_{ог}$;

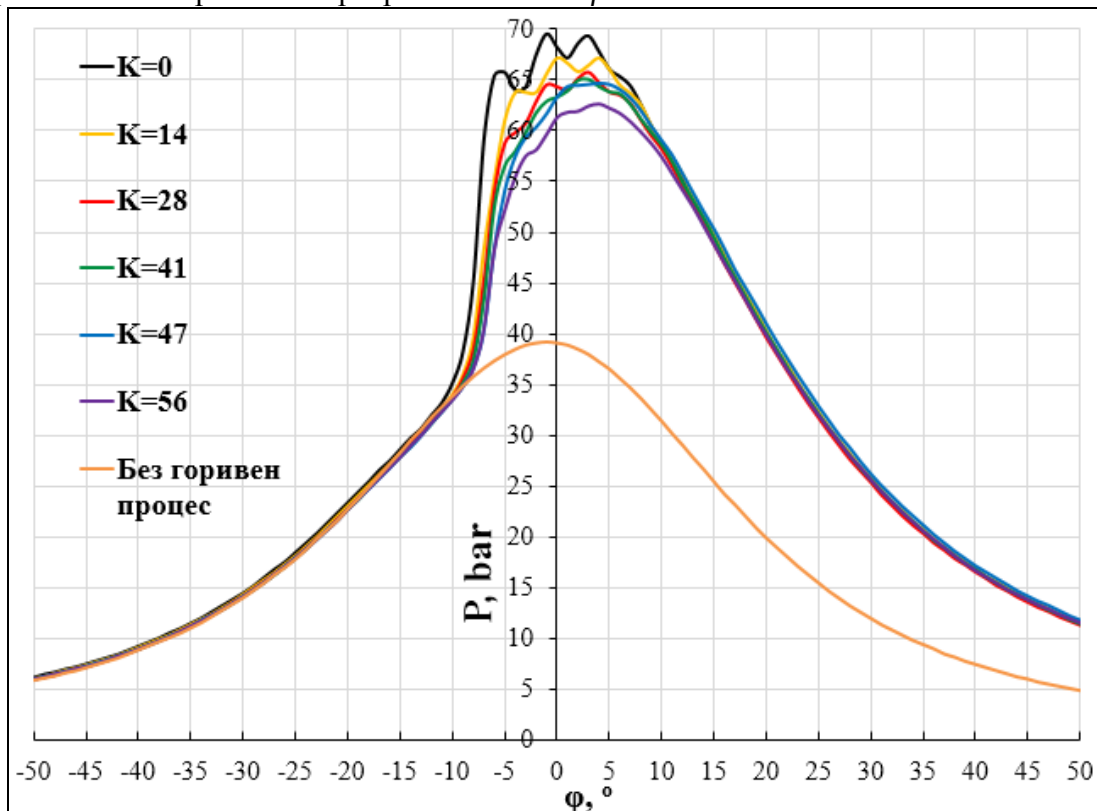
- Характерът на изменение на екологичните показатели при работа на двигател *Volkswagen 1,9D* по газо-дизелов цикъл е аналогичен на тези при работата на двигател *D 3900*. И при двигател *Volkswagen 1,9D* се наблюдава повишаване на CO емисиите в отработилите газове, когато работи по газо-дизелов цикъл, което се обосновава с по-ниските стойности на α . Също така са регистрирани и по-ниски стойности на CO_2 емисиите, както и на димността на отработилите газове поради по-ниското съотношение на C и H в газовото гориво, спрямо тези при конвенционалното дизелово гориво. Единствено при ниски натоварвания (≈ 25 %) димността на отработилите газове на двигателя е по-висока, когато той работи по газо-дизелов цикъл, вероятно поради формирането на региони около пламната доза дизелово гориво в които локалното въздушно отношение е твърде ниско;

- Стойностите на CH в отработилите газове на двигател *Volkswagen 1,9D* при работата му по газо-дизелов цикъл са по-високи спрямо тези при работата му само с конвенционално дизелово гориво, тъй като част от газо-въздушната смес преминава от цилиндъра в изпускателния тръбопровод по време на препокриване на фазите на газоразпределение.

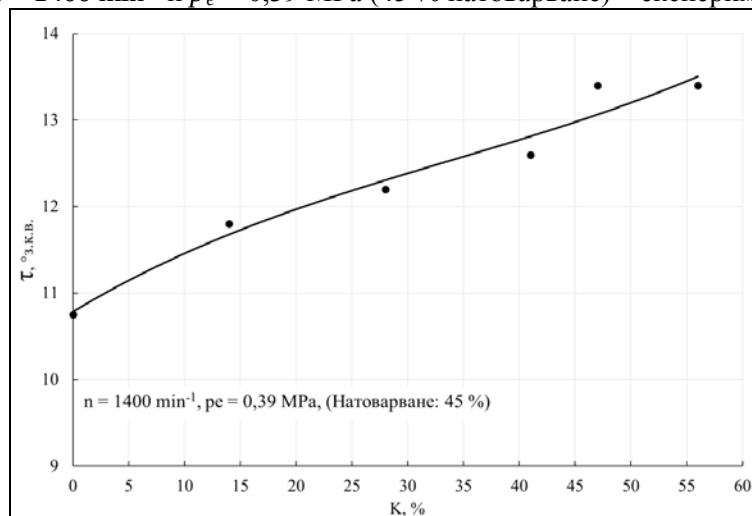
5.2. Резултати от експерименталното изследване на влиянието на газообразни горива върху параметрите на горивния процес на дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл

5.2.1. Влияние на СПГ върху параметрите на горивния процес на двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

За да се оцени влиянието на СПГ върху параметрите на горивния процес на двигател Д 3900 експериментално са снетите серия от индикаторни диаграми (изменението на налягането в цилиндъра във функция от завъртане на колянвия вал) при постоянна честота на въртене, постоянно средно ефективно налягане и различен масов дял на газовото гориво от общото количество гориво – фиг. 61. Както се вижда от фигурата диаграмите са построение в програмата *Microsoft Excel*.



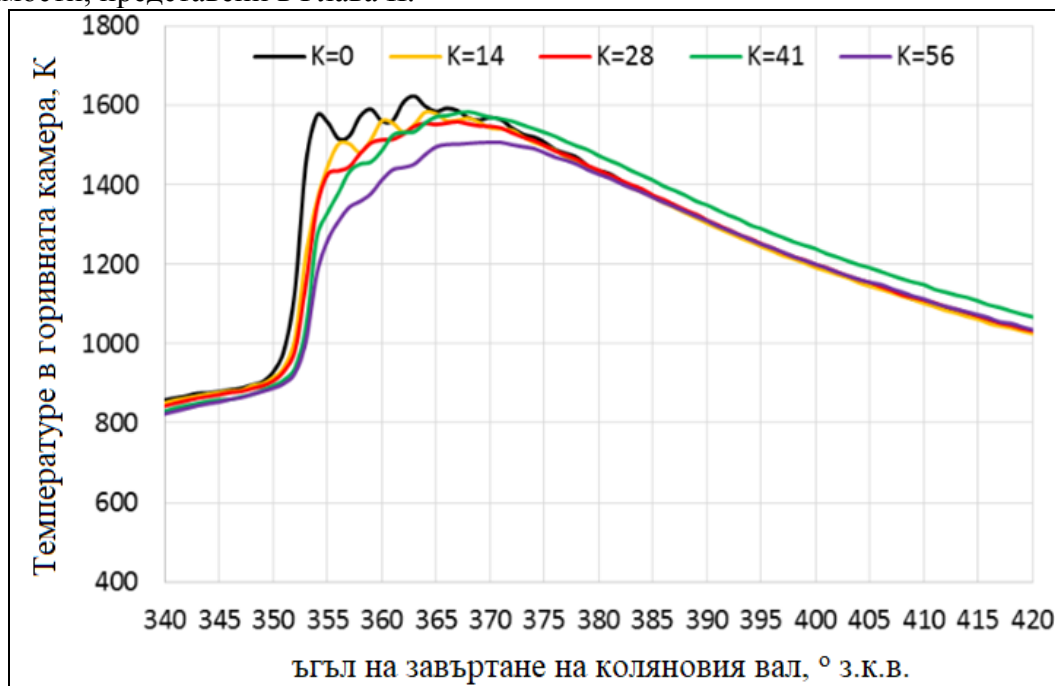
Фиг. 61. Изменение на налягането в цилиндъра на двигател Д 3900 при различни стойности на коефициента K , $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ (45 % натоварване) – експериментални резултати



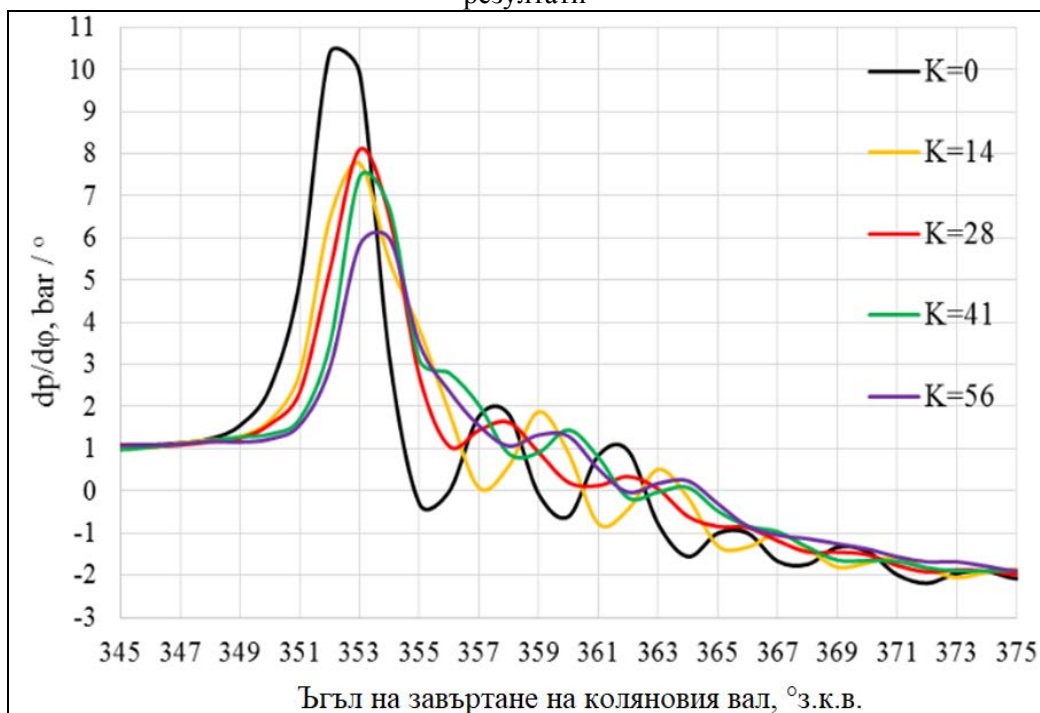
Фиг. 62. Изменение τ на двигател Д 3900 при различни стойности на коефициента K и $n = 1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ (45 % натоварване) – експериментални резултати

5.2.1.1. Определяне на параметри на горивния процес чрез обработката на експериментално снети индикаторни диаграми на ДВГ, работещ по газо-дизелов цикъл с добавка на ВПГ

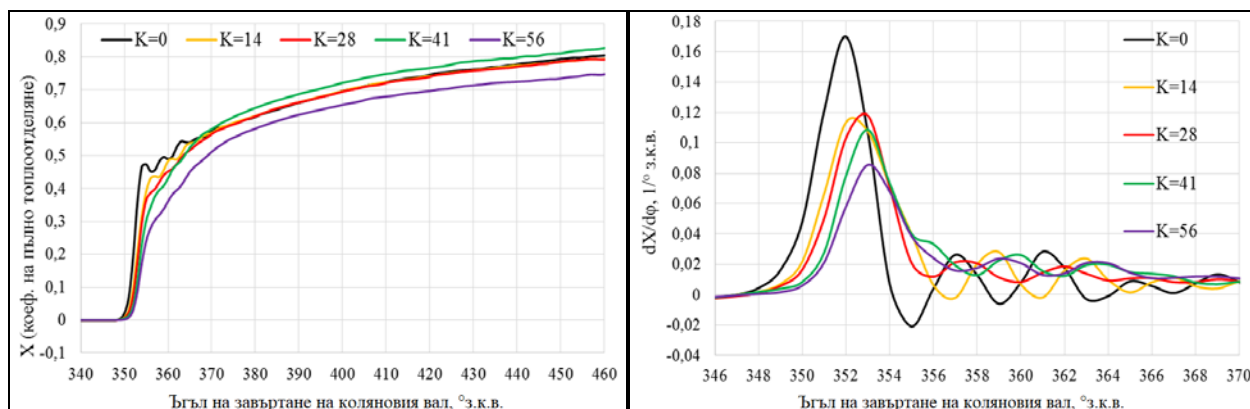
За обработване на снетите индикаторни диаграми на двигател Д 3900, използващ СПГ за организираното на газо-дизелов работен цикъл е използвана изчислителна програма, разработена в среда на *Matlab* от доц. Евгени Димитров, научен ръководител на текущия дисертационен труд. Програмният продукт е базиран на математичните зависимости, представени в Глава II.



Фиг. 63. Изменение температурата в горивното пространство на двигател Д 3900 при различни стойности на коефициента K и $n = 1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ (45 % натоварване) – експериментални резултати



Фиг. 64. Изменение скоростта на нарастване на налягането в цилиндъра на двигател Д3900 при различни стойности на коефициента K и $n = 1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ (45 % натоварване)



Фиг. 65. Промяна на коефициента на пълно топлоотделяне и на неговата скорост на изменение при двигател Д 3900 при различни стойности на коефициента K и $n=1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$ (45 % натоварване) – експериментални резултати

От анализа на получените експериментални резултати, свързани с параметрите на горивния процес на дизелов двигател Д 3900, работещ по газо-дизелов цикъл с метан, могат да се направят следните изводи:

- При снемането на регулировъчна характеристика по съдържание на газовото гориво (природен газ) от общото количество гориво на двигател Д 3900, използващ СПГ за организирането на газо-дизелов работен цикъл, се наблюдава намаляване на максималното налягане в цилиндъра на двигателя с увеличаване на количеството газово гориво, подавано в него (фиг. 61). Това се дължи на невъзможността на част от газовото гориво да бъде окислено, поради формираната твърде бедна газо-въздушна смес. Друга причина за понижаване на максималното налягане в цилиндъра е увеличаването на индукционния период (фиг. 62) и получаване на максималното налягане в цилиндъра при по-голям ъгъл на завъртане на колянвия вал (съответно по-голям обем на работното пространство), когато двигателя работи по газо-дизелов цикъл. Това рефлектира и върху увеличаване на температурата на отработилите газове с увеличаване на количеството газово гориво, подавано към двигателя (фиг. 63);

- По-голямата продължителност на τ (фиг. 62) е следствие от постъпването в цилиндъра на газо-въздушна смес, чиито специфичен топлинен капацитет е по-висок от този на въздуха. Поради разликите в специфичния топлинен капацитет на въздуха и газо-въздушната смес по време на периода на съгъстяване температурата на работното вещество в цилиндъра е по-ниска при работа на двигателя по газо-дизелов цикъл спрямо тази при работа само с дизелово гориво;

- По-ниските стойности на налягането в цилиндъра, когато двигателя работи по газо-дизелов цикъл с добавка СПГ рефлектират върху намаляване на $(dp/d\phi)_{\max}$ (фиг. 64);

- От направените измервания се наблюдава, че с увеличаване на количеството газово гориво, подавано в двигателя, температурата в горивното пространство намалява, както и скоростта на топлоотделяне – фиг. 65. Причина за изменението на тези показатели с увеличаване на количеството СПГ, подаван в двигателя, са по-ниската стойност на максималното налягане в цилиндъра и увеличения период на задържане на самовъзпламенявато, следователно и изместване (в посока след ГМП) на ъгъла при, който се достига максималното налягане в цилиндъра. В допълнение към до тук посочените причини може да се добави и факта, че резултатите са получени при натоварвания под средните, поради което окислението на част от газо-въздушната смес е затруднено, поради относително студените стени на горивното пространство и малкото количество на подаваното дизелово гориво, самовъзпламеняването на което не отделя достатъчно топлина за окислението на цялото количество газово гориво, постъпило в цилиндъра.

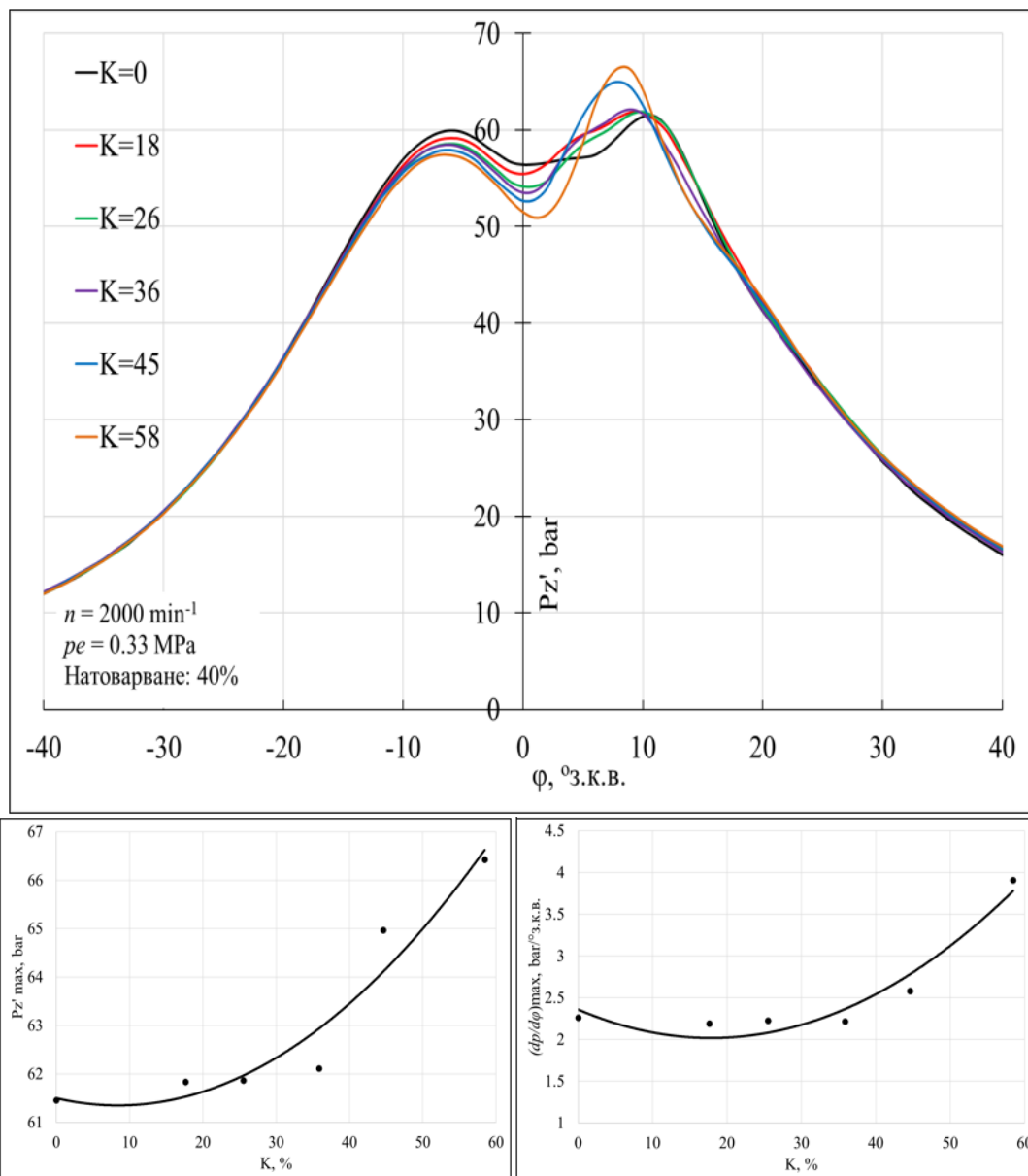
Като допълнение на посочените по-горе функции, разработеният софтуерен продукт дава синтезирана и подробна информация за ъглите на топлоотделяне и характерните стойности от индикаторната диаграма (таблица 7). От получените резултати се наблюдава, че работата на Д 3900, използващ СПГ за организирането на газ-дизелов цикъл води до увеличаване на ъгъла на завъртане на колянвият вал при който се получава $T_{\max}$ и $(dp/d\varphi)_{\max}$. Също е налице намаляване на: $dXa/d\varphi$ ($dX/d\varphi$) $_{\max}$, $X_{\max}$, $Xa_{\max}$ и φ_z .

Таблица 7

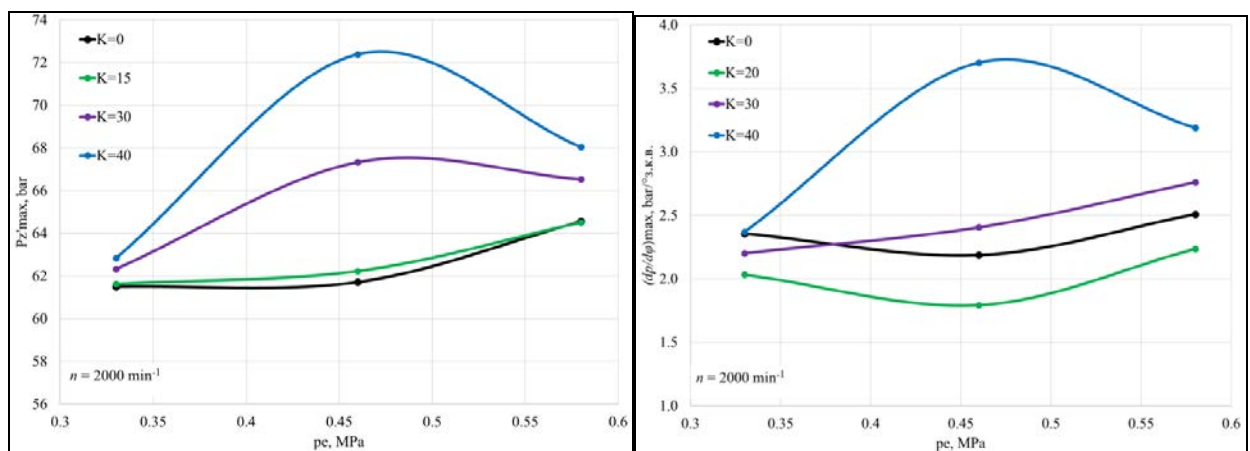
K, %	P_i средно bar	P_{Cmax} bar	φ_{Pсmax} °з.к.в	T_{max}, К	φ_{Tmax}, °з.к.в	(dp/dφ)_{max} bar/°з.к.в	φ_{(dp/dφ)max}, °з.к.в	(dX/dφ) max 1 / °з.к.в
0	3,9	69,5	363	1624	363	10,4	352	0,170
14	3,8	66,8	360	1583	364	7,8	353	0,114
28	3,9	65,6	363	1559	367	8,1	353	0,118
41	4,2	65,6	362	1584	368	7,4	353	0,109
54	4,0	62,5	365	1508	370	6,0	354	0,085
K, %	φ(dX/dφ)_{max} 1/°з.к.в	X_{max}	φX_{max} °з.к.в	(dXa/dφ) max 1 / °з.к.в	φ(dXa/dφ) max 1/°з.к.в	Xa_{max}	φXa_{max} °з.к.в	φ_z, °з.к.в
0	352	0,82	474	0,168	352	0,65	474	127
14	352	0,81	474	0,112	352	0,64	472	128
28	353	0,81	473	0,116	353	0,64	473	126
41	353	0,84	474	0,107	353	0,68	474	127
54	353	0,76	472	0,084	353	0,62	472	125
K, %	n₁	φ_c (X0) °з.к.в	φX10 °з.к.в	φX20 °з.к.в	φX30 °з.к.в	φX50 °з.к.в	φX70 °з.к.в	φX80 °з.к.в
0	1,33	347	351,3	352,1	352,6	361,1	401,3	456,1
14	1,34	346	352,0	352,9	353,8	362,7	401,2	469,5
28	1,33	347	352,3	353,2	354,1	363,5	401,9	467,7
41	1,32	347	352,7	353,7	355,0	363,8	394,0	440,8
54	1,34	347	353,1	354,4	356,8	369,0	421,7	0,0

5.2.2. Влияние на ВПГ върху параметрите на горивния процес на двигател, работещ по газо-дизелов цикъл

При изпитването на двигател Volkswagen 1,9D, използващ ВПГ за организирането на газо-дизелов цикъл, са снети серия от регулировъчни характеристики по масов дял на газовото гориво. При тези характеристики се определя влиянието на коефициента K върху някои от параметрите на горивния процес при постоянна честота въртене и постоянно натоварване ($K = \text{var}$, $n = \text{const}$, $p_e = \text{const}$). Информацията от серията регулировъчни характеристики по масов дял на газовото гориво е използвана за определяне влиянието на ВПГ върху някои от параметрите на горивния процес при постоянна честота на въртене, постоянен масов дял на газовото гориво и различно натоварване ($n = \text{const}$, $K = \text{const}$, $p_e = \text{var}$).



Фиг. 67. Изменение на налягането в вихровата камера (Pz') на двигателя *Volkswagen 1,9 D* при различни стойности на коефициента K и $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,33 \text{ MPa}$ (40% натоварване)- експериментално резултати



Фиг. 70. Изменение на налягането в вихровата камера (Pz') и на максималната му степен на нарастване $(dp/d\varphi)_{max}$ на двигателя *Volkswagen 1,9 D* при различно натоварване ($p_e = \text{var}$) и постоянни стойности на K – експериментални резултати

От получените експериментални резултати, свързани с параметри на горивния процес на двигател *Volkswagen 1,9D*, работещ по газо-дизелов цикъл с втечен петролен газ, могат да се направят следните изводи:

- Работата на двигателя по газо-дизелов цикъл се характеризира с увеличаване на максималното налягане във вихровата камера (спрямо това при работа на двигателя само с конвенционално дизелово гориво). Тази разлика се увеличава с повишаване на количеството втечен петролен газ, подаван в двигателя. Причина за този ефект е наличието на газо-въздушна смес във вихровата камера, а не само въздух както е при работата на двигателя по конвенционален дизелов процес, което в комбинация с по-високата долна топлина на горене на ВПГ води до нарастване на максималното налягане във вихровата камера;

- Подаването на ВПГ в малки количества ($K < 20 \%$) в двигател *Volkswagen 1,9D* води до слабо понижаване на максималната скорост на нарастване на налягането във вихровата камера $((dp/d\varphi)'_{\max})$. С увеличаване на коефициента K на 20% $((dp/d\varphi)'_{\max})$ е по-високо спрямо това при работа на двигателя само с дизелово гориво. Достигнатите високи стойности на $((dp/d\varphi)'_{\max})$ ограничават максималното количество ВПГ, което може да се подава в двигателя, без това да доведе до неговата повреда.

Глава шеста

РАЗРАБОТВАНЕ НА СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ, РАБОТЕЩ ПО ГАЗО-ДИЗЕЛОВ ЦИКЪЛ

6.1. Математично описание на законите на пълното топлоотделяне на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл, чрез многостепенна функция на Вибе

Към софтуерния продукт, използван за обработка на индикаторната диаграма, разработен от доц. Евгени Димитров, е добавен допълнителен модул, посредством който може да се определя пълното топлоотделяне и скоростта на неговото изменение чрез използване на Вибе функции. За да може да се опише възможно най-точно характера на топлоотделяне при работа на ДВГ по газо-дизелов цикъл, е използвана многокомпонентова функция на Вибе, съгласно уравнение 38 и 39.

$$(38) \quad X = X_1 + X_2 + X_3 + X_4;$$

$$(39) \quad \frac{dX}{d\varphi} = \frac{dX_1}{d\varphi} + \frac{dX_2}{d\varphi} + \frac{dX_3}{d\varphi} + \frac{dX_4}{d\varphi},$$

където X_1 , X_2 , X_3 и X_4 са четирите компоненти формиращи общия коефициент на топлоотделяне.

X_1 , X_2 , X_3 и X_4 могат се определят от съответните зависимости:

$$X_1 = g_{12} \cdot \left[1 - e^{-a \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}} \right)^{m_1+1}} \right]; X_2 = g_{11} \cdot \left[1 - e^{-a \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}} \right)^{m_2+1}} \right];$$

$$X_3 = g_{13} \cdot \left[1 - e^{-a \left(\frac{\varphi_3}{\varphi_{z3}} \right)^{m_3+1}} \right]; X_4 = g_{14} \cdot \left[1 - e^{-a \left(\frac{\varphi_4}{\varphi_{z4}} \right)^{m_4+1}} \right],$$

където $g_{11..4}$ е частта от общото количество гориво окислено през X_1 , X_2 , X_3 и X_4

a – параметър на функцията на Вибе ($a = 6,908$);

$\varphi_{1..4}$ е ъгълът на началото на съответната Вибе функция;

$\varphi_{z1..4}$ е продължителността на съответната функция;

$m_{1..4}$ е параметърът определящ характера на Вибе функцията.

Както става ясно, от уравнения 38 и 39, за да се изчисли коефициентът на топлоотделяне и скоростта на неговото изменение трябва да се въведат необходимите параметрите ($g_{11..4}$; $\varphi_{1..4}$; $\varphi_{z1..4}$; $m_{1..4}$).

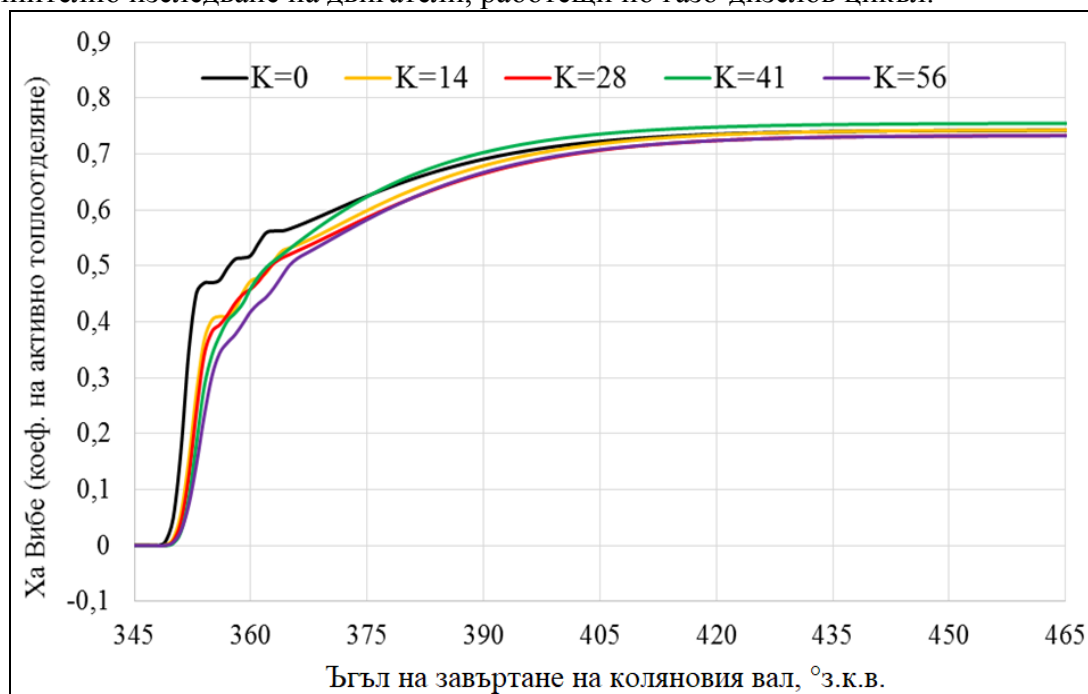
За да бъдат изчислени коефициентът на топлоотделяне и скоростта на изменението му за двигател *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл посредством математичния модел, разработен в *Matlab*, е необходимо да се въведат параметрите, посочени в таблица 8. Съответните параметри са определени за избраният товарен режим ($n = 1400 \text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,39 \text{ Мра}$).

Чрез използването на разработения програмен продукт и параметрите от таблица 8 посредством многопараметрова функция на Вибе са пресметнати коефициентите на топлоотделяне и скоростта на тяхното изменение на двигател *Д 3900*, работещ по газо-дизелов цикъл с добавка сгъстен природен газ – фиг. 71 и фиг. 72. Също така са определени стойности на коефициента на активно топлоотделяне за периода на бързо горене – таблица 9.

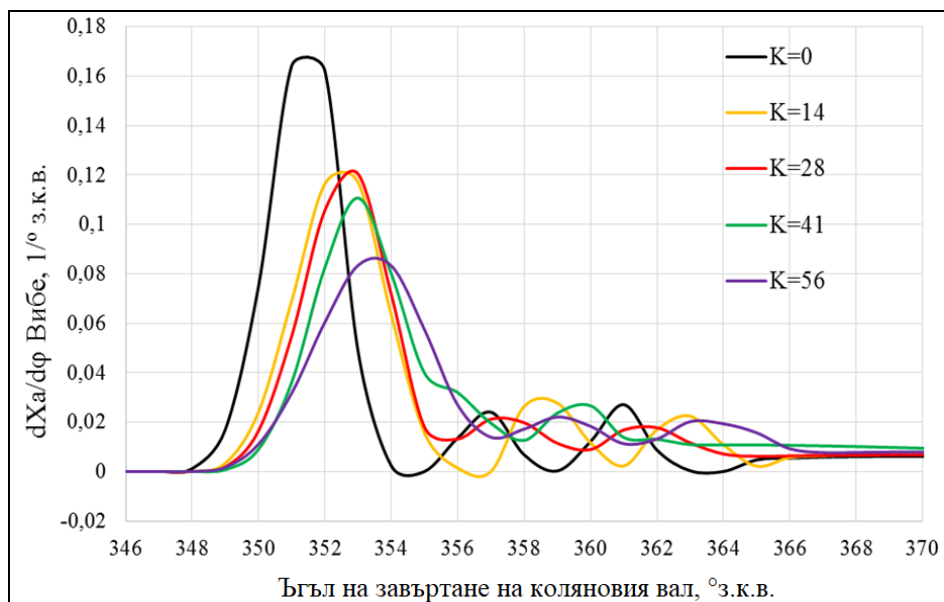
Таблица 8

K, %	m_1	m_2	m_3	m_4	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
14	2,9	1,15	1,35	2,9	348	357	361	365
28	3,2	1,3	1,8	3,2	348	355	359	360
41	3,6	2,3	1,9	3,6	348	353	357	361
56	1,8	2,42	2,25	0,25	350	355	360	364
K, %	φ_{z1}	φ_{z2}	φ_{z3}	φ_{z4}	g_{r1}	g_{r2}	g_{r3}	g_{r4}
14	8	5	5	102	0,41	0,07	0,053	0,21
28	8	7	6	102	0,39	0,07	0,038	0,235
41	8	6	6	102	0,335	0,08	0,075	0,265
56	8	8	7	102	0,325	0,076	0,065	0,23

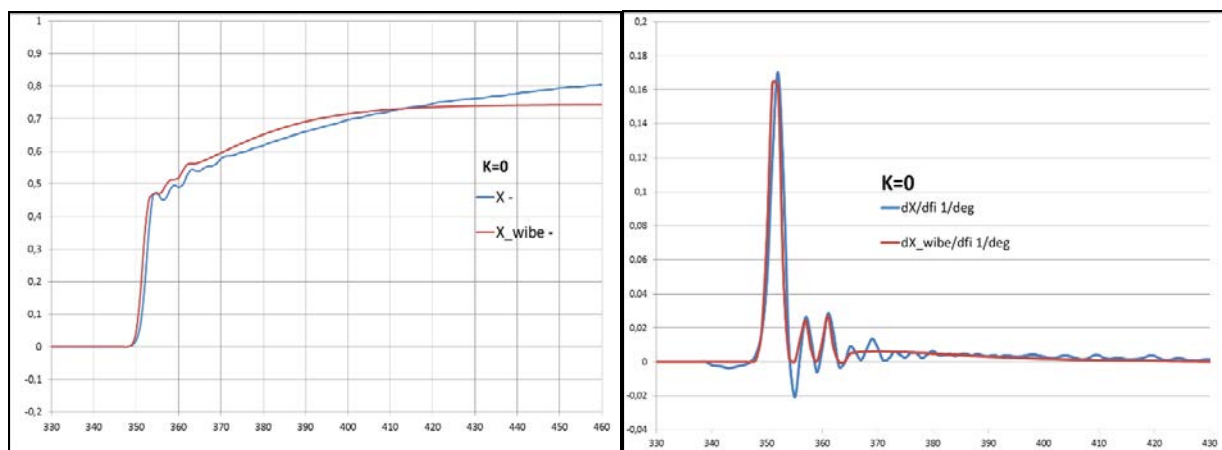
За да се оцени достоверността на численото изследване получените стойности на коефициента на топлоотделяне и скоростта му на изменение са сравнени с действителните такива – фиг. 73 - 77. От направеното сравнение дава ясна информация за степента на достоверност на разработения софтуерен продукт и неговите възможности за допълнително изследване на двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл.



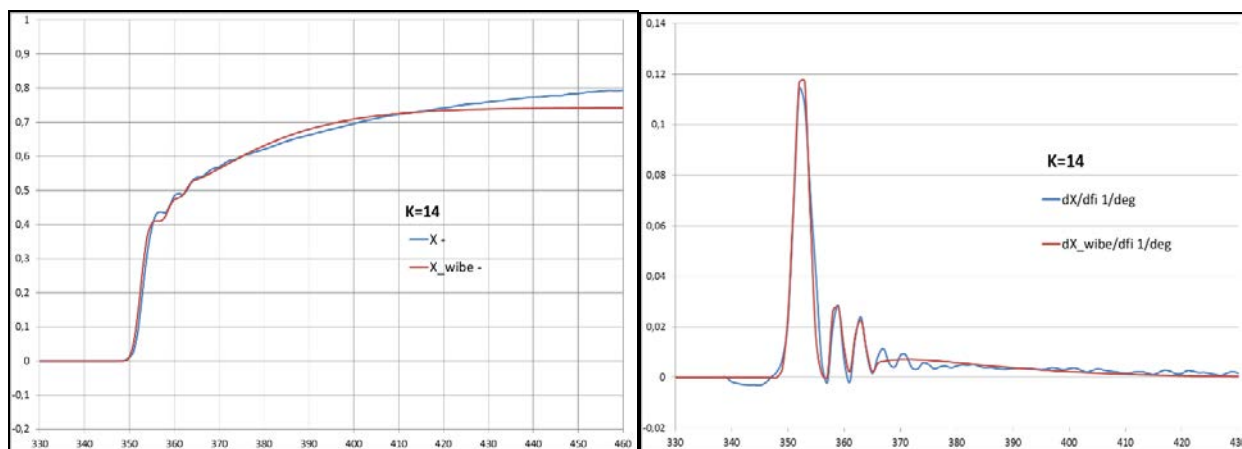
Фиг. 71. Теоретично определяне на коефициента на топлоотделяне посредством многопараметрова функция на Вибе (двигател *Д 3900*, $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ и $p_e = 0,39 \text{ Мра}$)



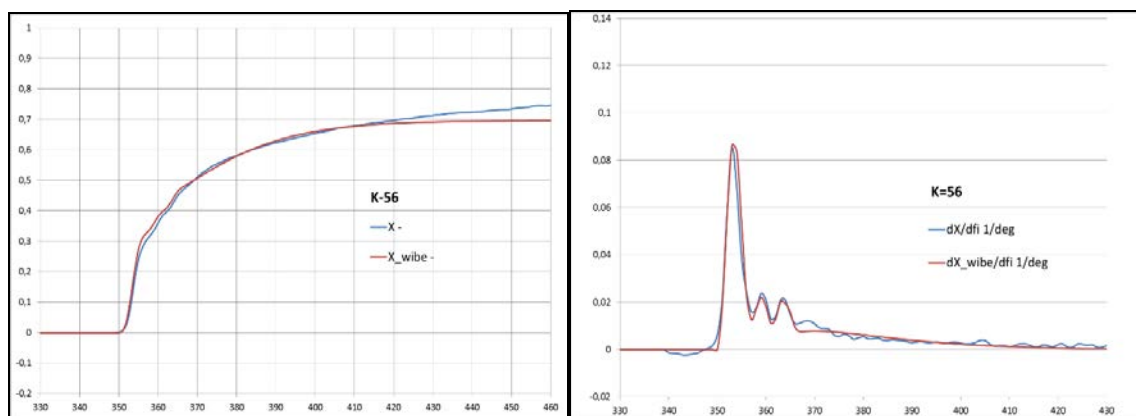
Фиг. 72. Теоретично определяне на скоростта на изменението на коефициента на топлоотделяне посредством многопараметрова функция на Вибе (двигател $D\ 3900$, $n = 1400\ \text{min}^{-1}$ и $p_e = 0,39\ \text{MPa}$)



Фиг. 73 Сравнение на изчислените стойности на коефициента на топлоотделяне и скоростта на неговото изменение посредством многокомпонентна функция на Вибе и действителните такива при $K = 0$ (двигател $D\ 3900$, $n = 1400\ \text{min}^{-1}$ и $p_e = 0,39\ \text{MPa}$)



Фиг. 74 Сравнение на изчислените стойности на коефициента на топлоотделяне и скоростта на неговото изменение посредством многокомпонентна функция на Вибе и действителните такива при $K=14$ (двигател $D\ 3900$, $n = 1400\ \text{min}^{-1}$ и $p_e = 0,39\ \text{MPa}$)



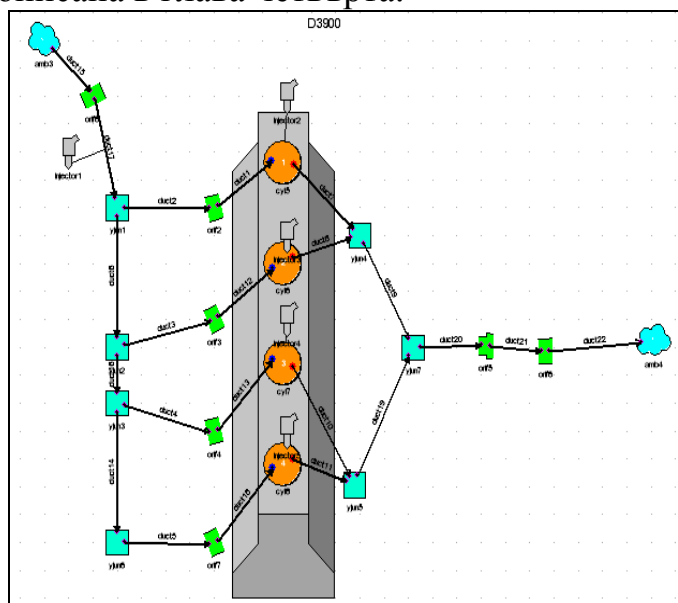
Фиг. 77 Сравнение на изчислените стойности на коефициента на топлоотделяне и скоростта на неговото изменение посредством многокомпонентна функция на Вибе и действителните такива при $K=56$ (двигател $D\ 3900$, $n = 1400\ \text{min}^{-1}$ и $p_e = 0,39\ \text{MPa}$)

Таблица 9

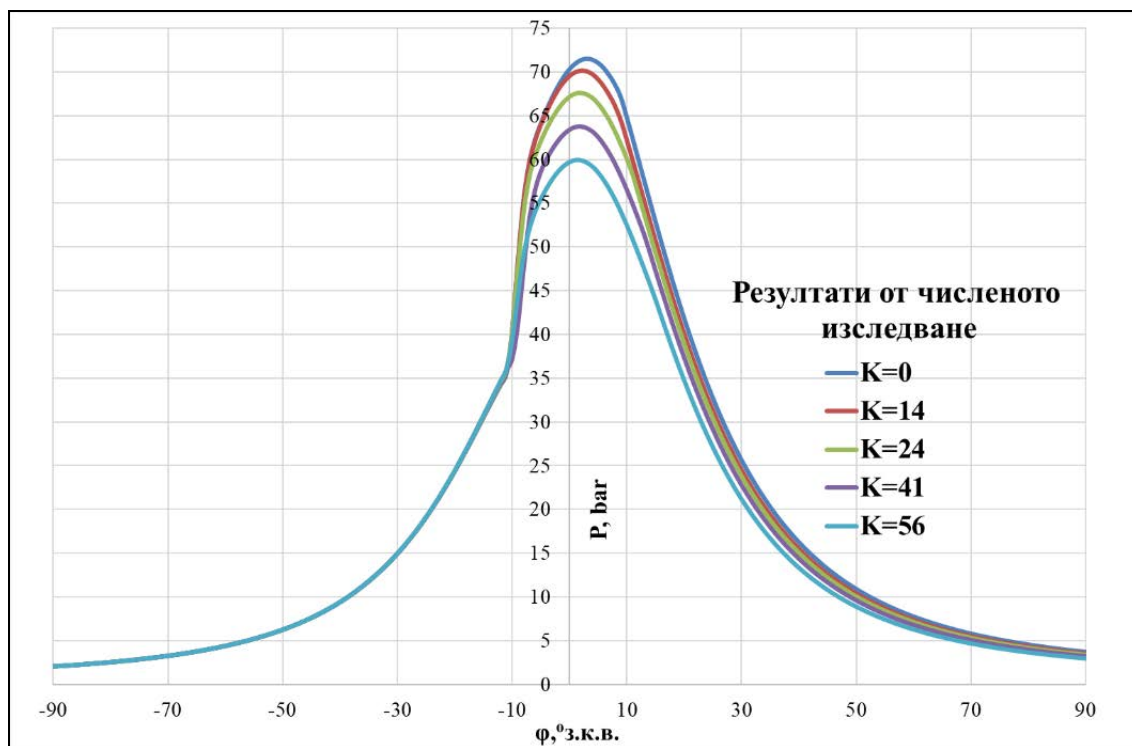
Стойност на коефициента K , %	Стойност на коефициента на активно топлоотделяне за периода на бързо горене - $X_{rcyl_max_wibe}$
14	0.473
28	0.505
41	0.497
56	0.501

6.2. Създаване на симулационен компютърен модел на дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл, посредством софтуерният продукт *Ricardo Wave*

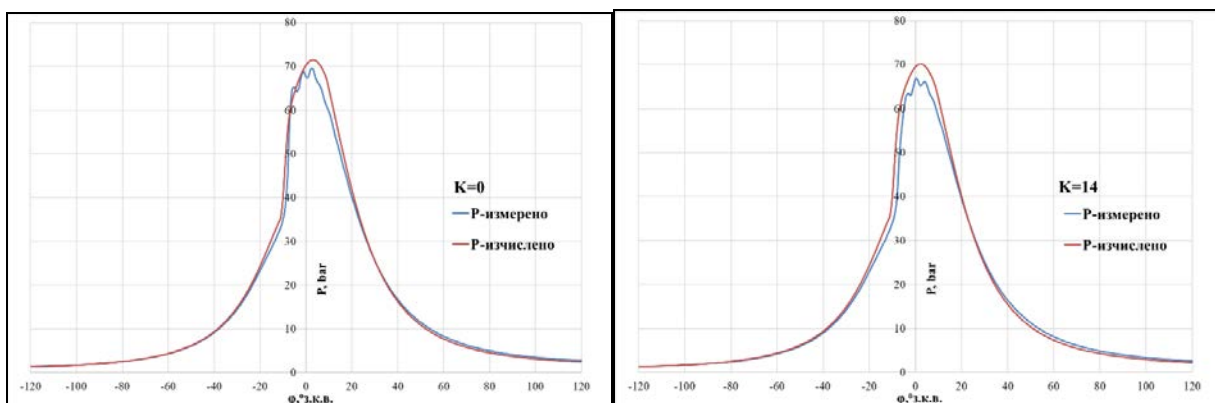
За изпълнението на поставените задачи, в настоящия дисертационен труд е разработен симулационен модел на двигател $D\ 3900$ посредством софтуерният продукт *Ricardo Wave* – фиг.78. За постигане на максимално сходство между експериментално стените резултати и тези от софтуерният продукт, симулационният модел е базиран на експерименталната уредба с двигател $D\ 3900$, описана в глава четвърта.



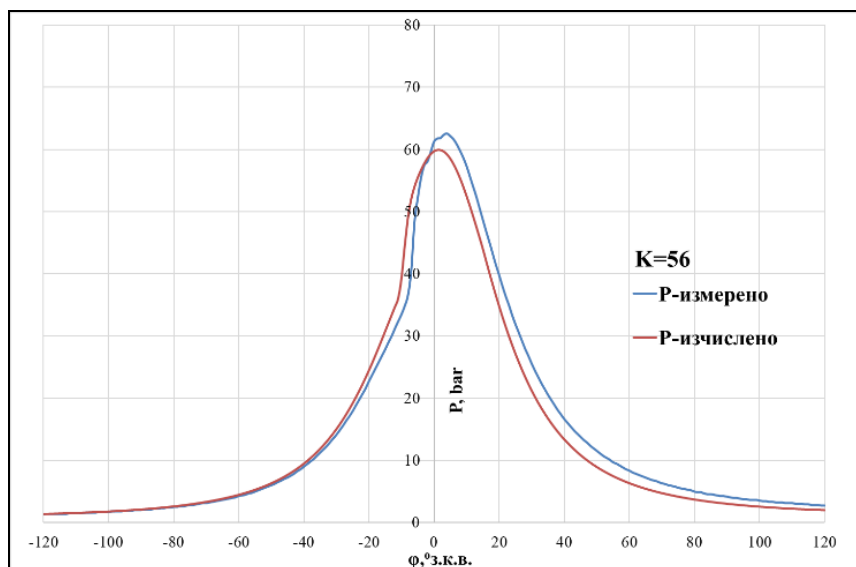
Фиг.78. Общ изглед на изградения модел в *Ricardo Wave* на двигател $D\ 3900$, пригоден за работа с дизелово и газово гориво



Фиг. 84. Индикаторни диаграми, получени от симулационния модел на двигател Д 3900



Фиг. 85. Проверка на адекватността на симулационния модел при $K = 0$ и 14% и $n=1400\text{min}^{-1}$



Фиг. 87. Проверка на адекватността на симулационния модел при $K = 56\%$ и $n=1400\text{min}^{-1}$

Таблица 10

К, %	Измерени стойности		Изчислени стойности		Разлика между измерените и изчислените стойности		
	$P_{\max}$, bar	$\varphi_{P_{\max}}$, °з.к.в.	$P'_{\max}$, bar	$\varphi'_{P_{\max}}$, °з.к.в.	$\Delta P_{\max}$, bar	$\Delta \varphi'_{P_{\max}}$, °з.к.в.	$\Delta P_{\max}$, %
0	69.48	69	71.47	71	1.99	2	3%
14	70.12	70	66.81	66	-3.31	-4	-5%
28	65.60	65	67.61	67	2.01	2	3%
41	65.61	65	63.75	63	-1.86	-2	-3%
56	59.91	59	62.59	62	2.68	3	4%

След като симулационният модел е напълно конфигуриран е проверена неговата степен на достоверност. За тази цел, посредством използването на симулационния модел в *Ricardo Wave*, са получените резултати за налягането в цилиндъра във функция от ъгъла на завъртане на колянния вал - фиг. 85. Получените резултати са съпоставени с експериментално снетите такива – фиг. 86 - 88. От направеният анализ се вижда, че най-голяма разлика между действително измереното максимално налягане в цилиндъра и симулираното такова не превишава 5% (3.3 bar) (таблица 10). В следствие на адекватността на модела може да се приеме, че описанието на горивния процес, потичащ при дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл, може да се извърши посредством вече съществуващи софтуерни продукти, като се направи корекция по отношение на подаваното гориво в двигателя. Доказателство за това е доброто съвпадение между експериментално снетите и изчислените резултати.

Общи изводи

От проведените изследвания на влиянието на различни газови горива върху ефективните показатели и параметрите на горивния процес на дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл, представени в настоящия дисертационен труд, могат да се направят следните изводи:

1. Разработената методика за провеждане на сравнителни стендови изпитвания на двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл, дава възможност за определяне на зависимостта на техните показатели от количеството газово гориво подавано в дизеловият ДВГ.

2. Проведените експериментални изследвания, с помощта на разработената методика, позволяват да се оцени работния процес на дизеловите двигатели *Volkswagen 1,9D* и *Д 3900* по газо-дизелов цикъл.

3. Експерименталните изследвания при работата на нискочестотен дизелов двигател с неразделна горивна камера - *Д 3900* с на добавка сгъстен природен газ (метан) за организиране на газо-дизелов цикъл водят до следните изводи за избраният товарен режим ($n=1400 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,39 \text{ MPa}$):

- Увеличаване на количеството газово гориво, подавано в двигателя, води до намаляване на максималното налягане и максималната скорост на нарастване на налягането в цилиндъра, а периода на задържане на самовъзпламеняването се увеличава при $\theta = \text{const}$;

- Подобряване на икономичните показатели при $K < 30 \%$. При $K > 30 \%$, разликата между икономичните показатели на двигателя, спрямо тези при работата му само с конвенционално дизелово гориво не превишава 2% ;

- При $K < 30 \%$ ефективният к.п.д. на двигател *Д 3900* е по-висок спрямо този при работата му само с дизелово гориво. Увеличаването на количеството газово гориво над тази стойност води до намаляване на ефективния к.п.д.;

- Въздушното отношение и коефициентът на пълнене намаляват при работата на двигателя по газо-дизелов цикъл;

- CO , CH емисиите, температурата на отработилите газове и съдържанието на O_2 в тях се увеличават пропорционално на количеството газово гориво, подавано към двигателя. Тези условия обаче водят до понижаване на димността, CO_2 и NO_x емисиите.

4. Изводите от експерименталните изследвания на работата на високочестотен дизелов двигателя с разделна горивна камера - *Volkswagen 1,9D* с добавка на втечен петролен газ (смес от пропан и бутан) за организиране на газо-дизелов цикъл при избраните товарни режими ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$, p_e от $0,18$ до $0,58 \text{ MPa}$) са:

- Работата на двигателя по газо-дизелов цикъл се характеризира с повишаване на максималното налягане и на скоростта на изменение на налягането в цилиндъра;

- При ниски натоварвания ($p_e = 0,18 \text{ MPa}$) икономичните показатели на двигателя при $\theta = \text{const}$ са по-лоши при работата му по газо-дизелов цикъл (спрямо тези при работата му само с дизелово гориво), като тази разлика значително намалява с увеличаване на натоварването;

- Подобно на изводите от стендовите изпитвания на двигател *Д 3900*, газо-дизеловият цикъл при *Volkswagen 1,9D* води до намаляване на α , η_v , η_e , CO_2 , NO_x , Rb и увеличаване на CO , CH емисиите и съдържанието на O_2 в отработилите газове ($T_{ог}$ е без значителни изменения).

5. Законите на пълно топлоотделяне на дизелов двигател с директно впръскване, работещ по газо-дизелов цикъл могат да бъдат определени с достатъчно висока точност посредством разработеният софтуерен продукт, използващ многокомпонентна функция на Вибе (описан в глава шеста).

6. На база получените експериментални резултати се препоръчва:

- при работа на нискочестотен дизелов двигател с неразделна горивна камера, добавка СПГ за организирането на газо-дизелов работен цикъл и натоварване 45 % масовото съдържание на газовото гориво от общото количество гориво, подавано в двигателя да не превишава 30 %, поради постигането на по-нисък g_e и по-висок η_e при конкретните условия;

- при работата на високочестотен дизелов двигател с разделна горивна камера и добавка ВПГ за организирането на газо-дизелов цикъл подаването на газово гориво е целесъобразно при натоварвания над $p_e = 0,18$ МРа, тъй като при по-ниски натоварвания се наблюдава влошаване на икономичните показатели. Също така при стойности на $K \geq 40$ % се наблюдава значително увеличаване на $((dp/d\varphi)'_{\max})$ което може да доведе до механична повреда на двигателя.

7. Разработеният симулационен компютърен модел на двигател *Д 3900*, работещ по газ-дизелов цикъл, посредством софтуерният продукт *Ricardo Wave* дава възможност за получаване на информация за изменението на налягането в цилиндъра във функция на ъгъла на завъртане на колянния вал при различен масов дял на газовото гориво от общото количество гориво, подавано в двигателя в цялото работно поле на ДВГ.

Заклучение

Настоящият дисертационен труд подпомага изясняването на влиянието на газовите горива – втечен петролен газ (смес от пропан и бутан) и сгъстен природен газ (метан) върху някои от параметрите на горивния процес и показателите (мощности, икономични и токсични) на дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл. Получените резултати могат да намерят приложение както в научната, така и в индустриалната сфера. Изпитвателните стендове, създадени по време на разработването на дисертационния труд, мога да се използват при обучението на студенти и докторанти в съответната област.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно приложни приноси:

1. Разработена е методика за изследване влиянието газообразни горива върху параметрите на горивния процес и показателите на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл. Методиката е приложима за различни смесобарзуващи системи, както и за различни газообразни горива.
2. Допълнен е съществуващ математичен модел, който описва законите на пълното топлоотделяне и скоростта на неговото изменение при дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов цикъл.

Приложни приноси

1. Някой от наличните изпитвателни стендове за ДВГ са окомплектовани с допълнителни системи за подаване на газово гориво, което позволява тяхното използване за следващи изследвания в областта и обучението на студенти.
2. Получени са експериментални резултати и са изведени графичните зависимости на влиянието на газообразни горива – втечен петролен газ (смес от пропан и бутан) и сгъстен природен газ (метан) върху параметрите на горивния процес и мощностните, икономичните и токсичните показатели на дизелов ДВГ. Получените експериментални резултати могат да намерят приложение при експлоатацията на съществуващи дизелови двигатели, конвертирани за работа по газо-дизелов цикъл,
3. Посредством съществуващ програмен продукт е изграден симулационен компютърен модел на дизелов двигател с неразделна горивна камера, позволяващ изследване на влиянието на газообразни горива върху параметрите на горивния процес в цялото му работно поле.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Ат. Ташев, Е. Димитров и Хр. Кочев. Анализ на показателите на дизелови двигатели с вътрешно горене при работа с различни видове горива. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2013, 2013. Сборник с доклади, стр. 26 – 31.
2. Е. Димитров, Хр. Кочев и Ат. Ташев. Стенд за изследване влиянието на газови горива върху показателите на дизелов двигател. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2014, 2014. Сборник с доклади, стр. 155 – 159.
3. Е. Димитров, Ат. Ташев, С. Панчев. методика за експериментално изследване на влиянието на газови горива върху показателите на дизелов двигател, работещ по газодизелов цикъл. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2015, 2015. Сборник с доклади, стр. 103 – 107
4. Ат. Ташев и Е. Димитров. Резултати от предварителни стендови изпитвания на дизелови двигатели, работещи по газо-дизелов работен цикъл. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2016, 2016. Сборник с доклади, стр. 75 – 80.
5. Ат. Ташев. Анализ на влиянието на газови горива върху показателите на дизелови двигатели с вътрешно горене при работа им по газо-дизелов цикъл. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2020, 2020. Сборник с доклади, стр. 88 – 96.

SUMMARY

INFLUENCE OF GAS FUELS ON COMBUSTION PARAMETERS AND PERFORMANCE PARAMETERS OF DIESEL ENGINE

Atanasi Tashev

The dissertation is developed in six chapters including:

A literature review with defined goals and objectives. The literature review illustrates): the main physicochemical properties of gaseous fuels applicable to internal combustion diesel engines; an analysis of the specifics of the combustion process in compression ignition engine, as well as the methods for organizing the gas-diesel cycle; the influence of hydrogen compressed natural gas (methane) and liquefied petroleum gas (mixture of propane and butane) on the combustion parameters and performance of diesel engines running on gas-diesel cycle. Based on the knowledge gap in the literature, the aim of this dissertation is to detailed research on the impact of gaseous fuels on the parameters of the combustion process and the performance of low and high frequency diesel internal combustion engines with separate and non-separate combustion chamber, in order to optimize their application as additional fuel in diesel internal combustion engines.

Methodology for experimental investigation of the influence of gaseous fuels on the performance of the diesel engine operating on gas-diesel cycle. The precisely developed methodology is applicable for low and high frequency compression with separate and non-separate combustion chamber. Remarkably, the proposed methodology does not restrict the usage of various gas fuel.

Technical equipment and calculation procedure to define engine performance parameters. This chapter describes characteristics of the measurement equipment and an appropriate mathematical calculation of the performance parameters of diesel engine operates on gas-diesel cycle.

Development of experimental system to study the impact of gas fuels on performance of diesel internal combustion engine. The chapter contains detailed overview of the made test bench designed for investigation of the effect of specific gas fuel on the effective parameters, and the combustion parameters of diesel engine works on dual-fuel mode.

Experimental results of compression ignition engines operating in dual-fuel mode. This chapter describes the obtained experimental and their analysis.

Development of simulation model of direct injection diesel engine operating on gas-diesel cycle. In this chapter are presented mathematically defined heat release rate by applying Wibe function. The chapter also describes the developed simulation model of direct injection diesel engine works on gas-diesel cycle by usage of *Ricardo Wave* software.