

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Стоян Неделчев Стоянов

**„ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ГАЗОВИ ИНЖЕКТОРИ ЗА
ДВИГАТЕЛИ“**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

по докторска програма „Двигатели с вътрешно горене“
към професионално направление 5.1 „Машинно инженерство“

Научен ръководител:

1. проф. д-р инж. Здравко Динчев Иванов
2. доц. д-р инж. Сергей Георгиев Белчев

Рецензенти:

1.
2.

Варна
2025г.

Дисертационният труд е обсъден на 01.10.2025г. в катедра „Транспортна Техника и Технологии“ и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Транспортна Техника и Технологии“.

Автор: инж. Стоян Неделчев Стоянов

Заглавие: „Характеристики на газови инжектори за двигатели“

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Стоян Неделчев Стоянов

**„ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ГАЗОВИ ИНЖЕКТОРИ ЗА
ДВИГАТЕЛИ“**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Варна
2025г.

Дисертационният труд съдържа 167 страници, включително 106 фигури, 17 таблици, 45 формули, оформени в 4 глави, общи изводи, заключение, научно-приложни и приложни приноси, както и списък на използваната литература от 117 заглавия, от които 18 на кирилица и 99 на латиница.

Означенията на фигурите и формулите в автореферата не съвпадат с тези от дисертацията.

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

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

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Актуалност на проблема

Отклонението на параметрите на горивото от необходимото за конкретния експлоатационен режим на работа на двигателя е решаващ фактор при генерирането на токсични компоненти в отработените газове. Това поставя високи изисквания към управлението на горивоподаването и работата на елементите на горивната апаратура. Основен елемент в този процес е газовият инжектор, чиято работа се влияе от широк кръг фактори, свързани както с режимите на работа на двигателя, така и с температурните условия на работната среда. Изследванията на параметрите на газовите инжектори и хидродинамичните процеси, протичащи в тях и влияещи върху формирането на цикловата порция гориво, са актуални и са насочени към подобряване на екологичното поведение на двигателя при различни експлоатационни режими.

2. Цел и задачи на дисертацията

Основна цел на настоящия дисертационен труд е да се определят действителните дебитни характеристики на газов инжектор и да се изследват основните фактори, влияещи върху характеристиките на горивоподаване.

Задачите за постигане на поставената цел са:

1. Да се проектира и изработи специализиран стенд осигуряващ изследване на инжектора в среда с параметри равни на експлоатационните условия;
2. Да се разработят методики за измерване
3. Да се моделира работата на газов инжектор и да се определят теоретичните дебитни характеристики;
4. Да се изследва преместването на котвата на инжектора и факторите влияещи върху горивоподаването;
5. Да се определят действителните дебитни характеристики и цикловите порции гориво при имитиране експлоатационните условия на работа на газовия инжектор.

3. Обект и предмет на изследване

Обект на изследване в настоящия дисертационен труд са газови инжектори с цилиндрична котва и радиално непосредствено подаване на гориво към клапана.

Предмет на изследване са процесите, определящи работата на газов инжектор и дебитните характеристики при условия, съответстващи на реалната експлоатация.

4. Методи на изследване

В изследването са използвани специализирани измервателни уреди за регистриране и запис на бързо променящи се величини. Разработена е експериментална установка, осигуряваща условия на работа на инжектора, съответстващи на реалната експлоатация. При обработката и анализа на получените експериментални резултати са приложени математически и експериментални методики, включващи специализирани компютърни програми за пресмятане, визуализация и обработка на данните.

5. Място на изследване

Теоретичните и експериментални изследвания необходими при разработването на дисертацията са проведени в катедра „Транспортна техника и технологии“ и лаборатория 712^Б в ТУ-Варна.

6. Научна новост на изследването

Разработените методики за определяне на дебитните характеристики на газов инжектор представляват нов подход при изследване на параметрите на горивоподаване на елементите от газовата горивна уредба на автомобила. Проектираният и изработен стенд за изпитания дава възможност за извършване на симулации за работата на инжектора в реална среда. Резултатите от изследванията допринасят за създаването на база от експериментални данни, които са полезни при конструирането и разработването на нови конструкции газови инжектори.

7. Практическа ценност на изследването

Получените експериментални данни дефинират по ясен начин въздействието на различни фактори върху величината на цикловата порция гориво. Установените нови гранични условия за периода на отваряне на инжектора предоставят практическа информация за диагностика и отстраняване на неизправности в работата на двигателя, причинени от горивната система при работа с газово гориво, по отношение на екологичните характеристики на отработените газове.

8. Аprobация на изследването

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

- XI Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии БулТранс-2019, 10-12 Септември 2019, Созопол, Р. България – 1 публикация (реферирана в база данни Scopus);
- Международна научна конференция "Техника, технологии и образование" (ICTTE 2020), 4-6 Ноември 2020, Ямбол – 1 публикация (реферирана в база данни Scopus);
- Годишник на Технически университет Варна, Том 5 номер 2, Декември 2021 - 1 публикация;
- ХХІХ Научно-техническа конференция с международно участие ЕКО Варна, 2023 - 1 публикация.

9. Публикации по дисертационния труд

Написани са общо четири доклада, публикувани в четири научни сборника от научно-технически конференции с международно участие. Един доклад е самостоятелен, а останалите са в съавторство.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ВЪВЕДЕНИЕ

Основните изисквания, на които трябва да отговарят съвременните автомобили, са по отношение на тяхната пътна и екологична безопасност. Независимо от схемата и вида на задвижване, превозните средства трябва да покриват показателите, залегнали в международни и регионални регламенти. Екологичната оценка на дадена транспортна технология или транспортно средство изисква да бъде обследван целият процес, включително създаването на транспортното средство, добива и логистиката на използваното гориво, оценката на токсичните и въглеродни емисии по време на неговата експлоатация, както и екологичния отпечатък при рециклиране след изтичане на експлоатационния срок.

Анализът на екологичните оценки на транспортните технологии показва, че основната част от лимитираните емисии се излъчва по време на експлоатацията на автомобила. За намаляване на тези емисии са разработени редица методи и системи. Те са насочени към редуциране на емисиите, генерирани от двигателя на автомобила. В резултат от тяхното приложение се постига редуциране до около 90% на излъчените лимитирани компоненти в отработените газове.

Елементите от системите за каталитична неутрализация работят на подчертано селективен принцип. За тяхната ефективна работа се прилага специфично управление на горивоподаването при двигателите. С цел осигуряване на условия за ефективна работа на каталитичната система, в някои случаи това управление коригира цикловата порция гориво извън границите на експлоатационно необходимото за двигателя. Независимо от високата си ефективност, тези системи имат понижена ефективност при работа на двигателя преди достигане на работна температура и при неустановени режими, когато условията не позволяват пълноценна неутрализация. Този недостатък е особено осезаем при движение на автомобилите в урбанизирана среда, където влиянието на екологичния отпечатък върху хората е най-силно.

Ефективна технология за намаляване на екологичното въздействие е усъвършенстването на работния процес на двигателите с вътрешно горене и използването на горива, биогорива (Biodiesel, Bioethanol) и горивни смеси с подобрени екологични характеристики. Лидер по отношение на излъчваните въглеродни емисии и лимитирани компоненти като гориво за двигателите са водородът и амонакът. Използването на такива горива, поради съществените различия в характеристиките им спрямо традиционните горива, изисква значителен ресурс за промяна в конструкцията и системите на двигателите с вътрешно горене, както и използване на усложнени системи за сигурност и безопасност.

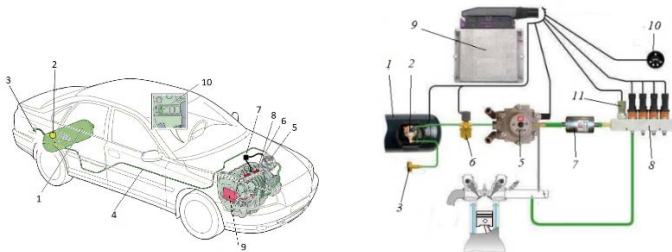
Сгъстеният природен газ (CNG) и втечнените нефтени газове (LPG) са горива с подобрени екологични характеристики. При използването им като гориво, двигателите показват по-ниски въглеродни емисии и по-малко количество лимитирани компоненти в отработените газове. Сгъстеният природен газ намира все по-голямо приложение при стационарни и двигатели с голяма мощност, докато втечненият нефтен газ е доминиращ в автомобилния транспорт. Независимо от фазовото си състояние при логистиката и съхранението, цикловата порция гориво за двигателите се определя при условия, в които горивото е в газообразно състояние.

Отклонението на параметрите на горивото от необходимото за конкретния експлоатационен режим на работа на двигателя е решаващ фактор при генерирането на токсични компоненти в отработените газове. Това поставя високи изисквания към управлението на горивоподаването и работата на елементите на горивната апаратура. Основен елемент в този процес е газовият инжектор, чиято работа се влияе от широк кръг фактори, свързани както с режимите на работа на двигателя, така и с температурните условия на работната среда. Изследванията на параметрите на газовите инжектори и хидродинамичните процеси, протичащи в тях и влияещи върху формирането на цикловата порция гориво, са актуални и са насочени към подобряване на екологичното поведение на двигателя при различни експлоатационни режими.

ГЛАВА I. Съвременни системи за горивоподаване на втечен нефтен газ при двигатели с вътрешно горене

Принцип на работа на горивна уредба за втечен нефтен газ

Газовите уредби с електронно управление са проектирани така, че да бъдат съвместими с широк спектър от съществуващи двигатели. Принципа на действието им се базира на съвместната работа с оригиналната горивна уредба на двигателя, която формира необходимата циклова порция гориво чрез обработването на сигнали от различни сензори. Обработката се извършва от електронен блок, който управлява бензиновите инжектори с електрически импулс с определена продължителност.



Фиг.1.1 Газова уредба за ВНГ

1 – бутилка за съхранение на втечен нефтен газ, 2 – комбинирана нивомерна система 3 – зарядно устройство, 4 – тръбопровод, 5 – редуктор-изпарител, 6 – електромагнитен вентил, 7 – филтър, 8 – газови инжектори, 9 – електронен блок, 10 – ключ за избор на гориво, 11 – сензори за налягане и температура

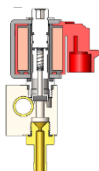
Различните характеристики на използваните горива, като необходима циклова порция гориво и различните закони при изтичане на течности и газове, налага газовата уредба да бъде управлявана от отделен електронен блок, и да използва различни по конструкция електромагнитни вентили. Тези вентили - газови инжектори - са с по-големи проходни отвори и с по-ниско електрическо съпротивление от бензиновите и се използва различна стратегия за управлението им.

Газови инжектори

Газовите инжектори са основният изпълнителен механизъм в газовите горивни уредби на двигателите с вътрешно горене. По същество представляват бързодействащи електромагнитни вентили, предназначени за дозиране на газообразни горива. Въпреки че структурно са сходни с бензиновите инжектори, газовите инжектори имат специфични конструктивни и функционални особености, обусловени от физико-химичните свойства на газообразните горива. Газовите

инжектори могат да се класифицират по няколко критерия според конструктивните си особености:

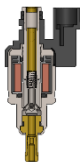
- газови инжектори с цилиндрична котва и радиално захранване с гориво, фиг.1.2;
- газови инжектори с плоска котва и радиално захранване с гориво, фиг. 1.3;
- газови инжектори с цилиндрична котва и осово, горно захранване с гориво, фиг. 1.4;
- други конструкции газови инжектори, фиг. 1.5.



Фиг. 1.2



Фиг. 1.3



Фиг. 1.4



Фиг. 1.5

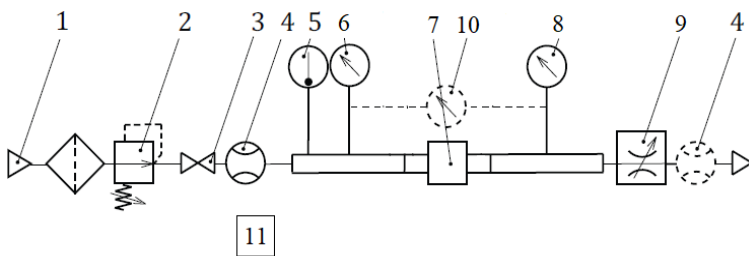
Конструкции газови инжектори

От решаващо значение за ефективността на работа на газовата система са характеристиките на използваните инжектори, от които зависи прецизността на дозирането на горивото.

Анализ на методите за определяне на характеристиките на газови инжектори

- Определяне на характеристиките по стандарт ISO 6358.

ISO 6358 е разработен за определяне на характеристиките на дебита на пневматични елементи, базиран на модел на стесняваща се дюза, като за изпитвания елемент е използвана инсталацията, показана на фиг. 1.6.



Фиг.1.6 Стенд за определяне на дебитните характеристики в съответствие със стандарт ISO 6358

1 – източник на въздух под налягане и филтриращ елемент, 2 – регулатор на налягане, 3 – спирателен кран, 4 – дебитомер, 5 – термометър, 6 – манометър или възприемател за налягане на входа, 7 – тестван елемент, 8 – манометър или възприемател за налягане на изхода, 9 – вентил за регулиране на дебита, 10 – диференциален манометър, 11 – уред за измерване налягането на околната среда.

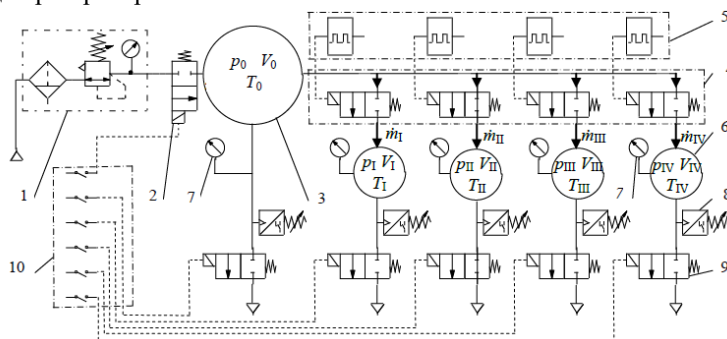
Тестваният компонент се монтира и работи в изпитвателната верига, в съответствие с инструкциите за експлоатация на производителя. Според методичните указания, като работен флуид се използва въздух с налягане не по-ниско от 500 kPa.

Метод, базиран на стандарт ISO 6358 и използващ масов дебитомер е приложен в различни изследвания на характеристиките на газовите инжектори.

- Косвен метод за определяне на дебитните характеристики на газови инжектори.

Методът се базира на анализ на динамичната реакция на система от свързани резервоари с известен обем при импулсно подаване на газ, като чрез математически модел се изчисляват дебитните характеристики на изследваните инжектори [Szpica D., 2016]. В този метод не се измерва директно дебитът на газ, а се оценяват промените в налягането, което позволява да се определи дебитът по косвен път. Като работен флуид се използва съгъстен въздух.

Измерванията се извършват на стенд, при който газът преминава от предварително зареден захранващ резервоар през изследваните инжектори към изходни резервоари, фиг. 1.7. Началната стойност на абсолютното налягане в захранващия резервоар е 200 kPa.

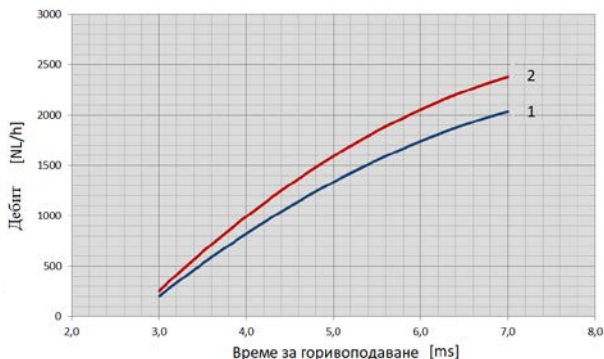


Фиг. 1.7 Стенд за определяне на дебитните характеристики на газови инжектори по косвен метод

Освен посочените, съществуват и други методи за определяне на дебитните характеристики на газови инжектори, разработени в съответствие със стандартите ISO 6358 и JIS B 8390.

За функционалната оценка на газовите инжектори са създадени различни инвазивни и неинвазивни подходи, основани на използването на високоскоростни камери, оптични системи и сензори за регистриране на виброускорение.

Фигура 1.8 показва характеристиката на газов инжектор с цилиндрична котва и радиално захранване с гориво.



Фиг. 1.8 Характеристика на газов инжектор с цилиндрична котва и радиално захранване с гориво

Според източника [<https://valtek.it>], Графика 1 представя характеристиката на стандартен газов инжектор, а Графика 2 – на такъв с увеличен дебит. Посочено е също, че налягането на входа на инжектора е 200 kPa и като работен флуид е използван въздух. Представените резултати отразяват дебита през инжектора в нормални литри за час в диапазона от 3 до 7 милисекунди времетраене на управляващия електрически сигнал. В информационния лист не са посочени данни за диаметъра на отвора на използваната дюза, съпротивлението на намотката на електромагнита, както и методологията, по която са получени резултатите.

Изводи и заключение:

- За определяне на характеристиките на пневматични елементи стандартът ISO 6358 използва дебитомер. Характерно за дебитомерите е че имат определено технологично време за реакция при измерването. Това може да окаже влияние върху точността на резултатите, особено при динамични процеси като тези в газовите инжектори;

- Изискваният от стандартите диапазон на налягания надхвърля работния обхват на газовите инжектори;

- В повечето проучвания като работен флуид се използва въздух, който има различни характеристики от втечените нефтени газове;

- Съществена разлика между стандартизираните тестове на пневматични електромагнитни клапани и изследванията на газови инжектори е не само съотношението на налягането и използвания работен флуид, но и цикличността на работа. Пневматичните компоненти основно регулират потока чрез пълно отваряне, докато газовите инжектори работят в непрекъснат цикъл на отваряне и затваряне.

- Резултатите от измерването се представят като обемен дебит и тъй като става въпрос за газообразни флуиди е необходимо да се приравняват към нормални условия.

При изследователските дейности е необходимо да се знае количеството на горивото, което постъпва в двигателя. По време на експериментите е важно да се определят параметрите на горивоподаващата апаратура за правилно задаване на входните условия. От решаващо значение за правилната работа на двигателите с газова горивна уредба с електронно управление е газовият инжектор. Неговите характеристики определят прецизността на дозиране на горивото.

Съществуващите методи за измерване на дебита през пневматични елементи имат редица ограничения. Това важи особено при приложение към газови инжектори. Различията в работния флуид, налягането и динамиката на работа изискват допълнителни корекции на методиката, за да се постигнат точни и надеждни резултати.

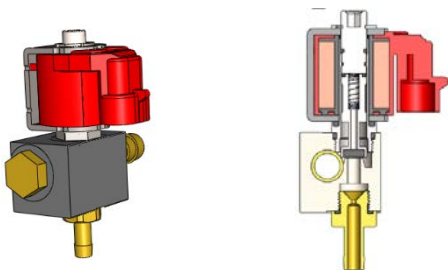
Данните от производителите за дебитните характеристики на газовите инжектори са базирани на методики с използване на въздух като работен флуид при различни условия. Тези условия се различават от реалните експлоатационни условия на газовите инжектори както по вида на използвания флуид, така и по работното налягане. Това налага математическа обработка на данните за изчисляване на действителните характеристики на инжекторите в съответствие с тяхната реална експлоатация.

ГЛАВА II. Числено моделиране на газродинамичните процеси в газови инжектори

За числено определяне характеристиките на газов инжектор е използван програмен продукт „SolidWorks FlowSimulation”, разработен от Френската софтуерна компания “Dassault Systèmes SE”. Програмата използва метода на крайните обеми, уравнението на непрекъснатостта и уравненията на Навие-Стокс. Уравненията на Навие-Стокс са система от частни диференциални уравнения, описващи движението на вискозен свиваем Нютонов флуид. Тези уравнения изразяват от математическа гледна точка основните закони за съхранение в механиката на непрекъснатите среди - закона за запазване на масата и на количеството на движение.

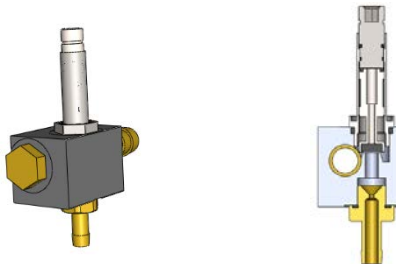
Газо-динамичен модел на газов инжектор

В рамките на численото изследване е създаден 3D модел на газовия инжектор, обект на изследване в настоящата дисертация. Геометричният модел е изготвен с помощта на CAD средата на SolidWorks, като са използвани данни от измервания, извършени върху реален образец. Моделът възпроизвежда основните конструктивни особености на инжектора, включително форма, размери и разположение на елементите, участващи в протичането на флуида, фиг. 2.1.



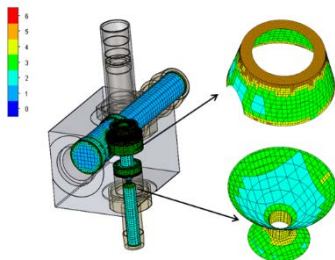
Фиг.2.1 3D модел на инжектор

С цел намаляване на времето за изчисления, първоначалният модел е опростен. Премахнати са външни елементи, които не участват в потока на работния флуид, както и геометрични детайли, чиято сложност няма влияние върху резултатите от симулацията. Извършените опростявания не променят физическия смисъл на изследването и не оказват влияние върху поведението на флуида, като единственият ефект от тях е съкращаване на времето за числено изчисление, фиг. 2.2.



Фиг.2.2 Опростен модел на инжектор

Програмата предоставя също възможност за създаване на мрежа с променлива гъстота и задаване на минимален специфичен размер на елементите в определени зони от геометрията. По този начин се постига локално стъстяване на мрежата в области, където се очакват изменения на физичните параметри, което позволява ограничаване на общия брой крайни обеми и намаляване на изчислителното време, фиг. 2.3.



Фиг. 2.3 Мрежа от крайни елементи с променлива гъстота

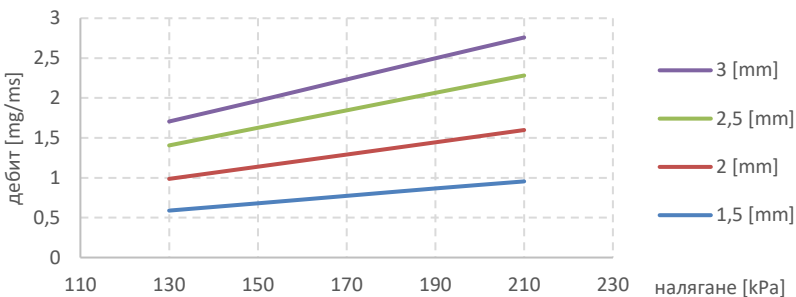
Дефинирането на граничните условия включва задаване на налягането и температурата на газа на входа на инжектора, както и налягането на изхода. Допълнително се задават температурите на конструктивните елементи, намиращи се в контакт с потока. Въведени са също данни за състава и вида на газа, както и стойности за хода на котвата и диаметъра на дроселиращия отвор.

Исходните данни от симулациите са представени графично под формата на зони на изменение на изследваните величини в избрано сечение от конструкцията. Визуализацията се извършва за различни наблюдавани параметри, като изменението на налягането, температурата и други.

Резултати от изследването на модела

Влияние на налягането на входа на газовия инжектор върху масовия дебит

Изследвано е как промяната на входното налягане влияе върху масовия дебит на газа през инжектора. Избраните стойности на налягане от 130 до 210 kPa отразяват типичните условия в автомобилна газова уредба при поддържано диференциално налягане от 100 kPa.

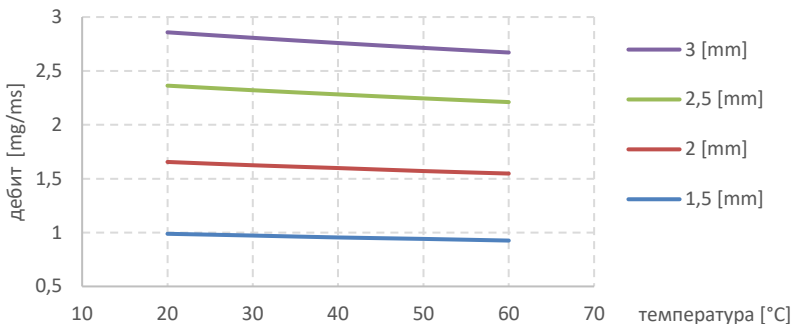


Фиг.2.4 Масов дебит при различно налягане на входа на инжектора

Резултатите показват ясно изразена линейна зависимост между дебита и налягането, което съответства на теоретичния модел при критично изтичане, описан от уравненията на Сен-Венан и Ванцел.

Влияние на температурата на горивото върху масовия дебит

На фигура 2.5 е показана зависимостта между температурата и масовия дебит [mg/ms] за четирите размера на дроселиращия отвор. Графиките показват намаляване на дебита с повишаване на температурата, което е в съответствие с теоретичната зависимост при критично изтичане.



Фиг.2.5 Масов дебит при различна температура на горивото на входа на инжектора

От графиките е видно, че с нарастването на диаметъра на дроселиращия отвор през равни интервали, изменението на дебита не се променя пропорционално. Това показва, че влиянието на диаметъра върху дебита не е линейно и се дължи на допълнителни фактори.

Влияние на диаметъра на изходния дроселиращ отвор върху масовия дебит и характеристиките на потока

Резултатите от симулациите представят масовия дебит на газа през инжектора, изразен в [mg/ms]. На базата на тези резултати и потвърденото съответствие с теоретичните зависимости е изчислена масовата проводимост на инжектора.

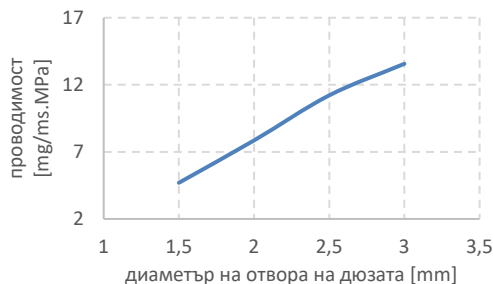
Терминът масова проводимост е дефиниран в стандарта ISO 6358 и описва способността на инжектора да пропуска газов поток при зададени гранични условия. За нейното изчисляване е използвана следната зависимост:

$$C_m = \frac{\dot{m}}{P_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad [\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{Pa})] \quad (2.1)$$

където: C_m – масова проводимост, $\dot{m}$ – масов дебит [kg/s], P_1 – налягане на газа на входа на инжектора, T_1 – температура на газа на входа на инжектора, T_0 – стандартна референтна температура дефинирана в стандарт ISO 8778 = 20 °C.

В контекста на настоящото изследване, тъй като получените числени стойности от симулациите са в [mg/ms], проводимостта е представена в [mg/ms.MPa]. Използването на проводимостта позволява пряко сравнение между различните диаметри на отвора на дюзата, като същевременно се елиминира влиянието на входните параметри като температура и налягане.

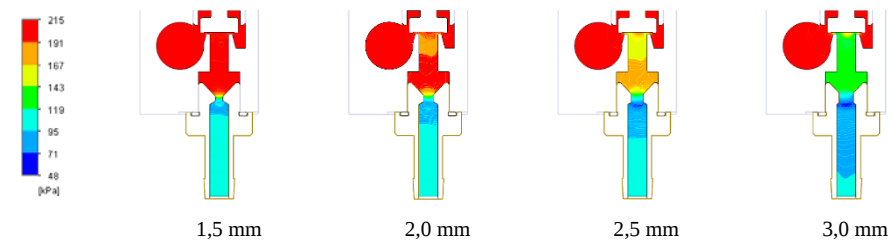
На Фигура 2.6 е показана графика, илюстрираща изменението на масовата проводимост при различните диаметри на отвора на изходната дюза.



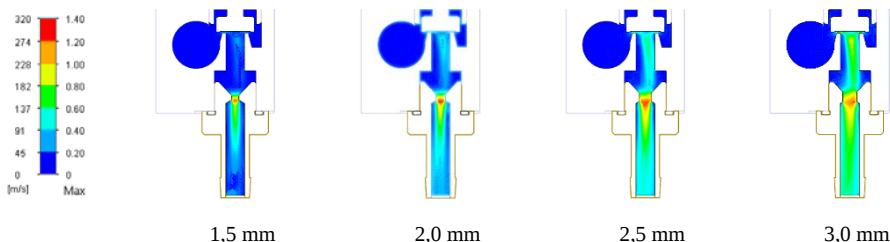
Фиг.2.6 Проводимост в зависимост от диаметъра на отвора на дюзата

Графиката показва ясно изразена нарастваща тенденция, което съответства на физическите очаквания: с увеличаването на диаметъра на дроселиращия отвор се намалява хидродинамичното съпротивление и се повишава пропускателната способност на инжектора. Тази зависимост има нелинеен характер, като увеличението на проводимостта е по-изразено при прехода от по-малки към средни диаметри, докато при по-големи диаметри нарастването се забавя. Това поведение може да се обясни с наличието на допълнителни съпротивления в конструкцията на газовия инжектор.

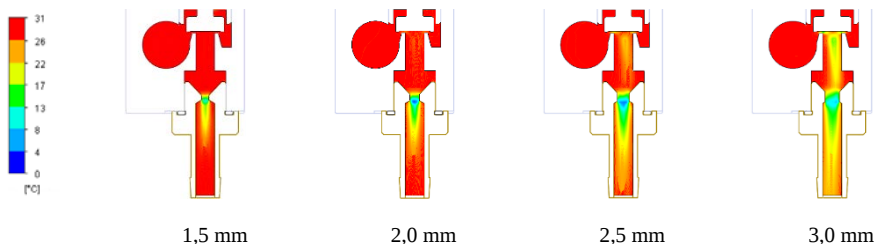
На фиг. 2.7 ÷ 2.10 са представени резултати от числените симулации, визуализирани в напречно сечение на конструкцията, преминаващо през оста на вентила и изходния дроселиращ отвор. Целта е да се илюстрира пространственото разпределение на основни характеристики на газовия поток – налягане, температура, скорост и число на Мах, както и интензивността на турбулентните потоци, при различен диаметър на отвора на дюзата.



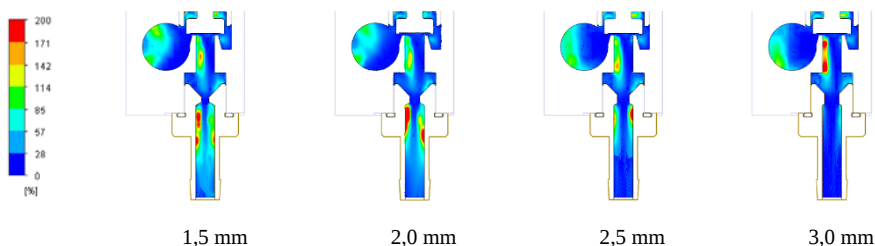
Фиг. 2.7 Разпределение на налягането в избрано сечение на инжектора



Фиг. 2.8 Число на Мах и скорост



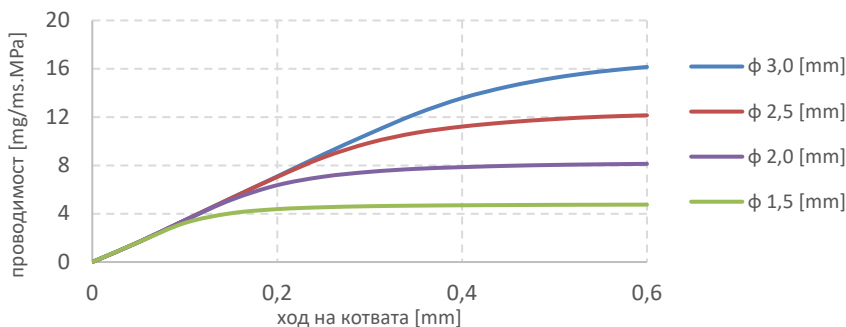
Фиг. 2.9 Изменение на температурата



Фиг. 2.10 Интензивност на турбулентните потоци

Влияние на хода на котвата върху характеристиките на потока

На фигура 2.11 е показана зависимостта между хода на котвата и масовата проводимост на инжектора.

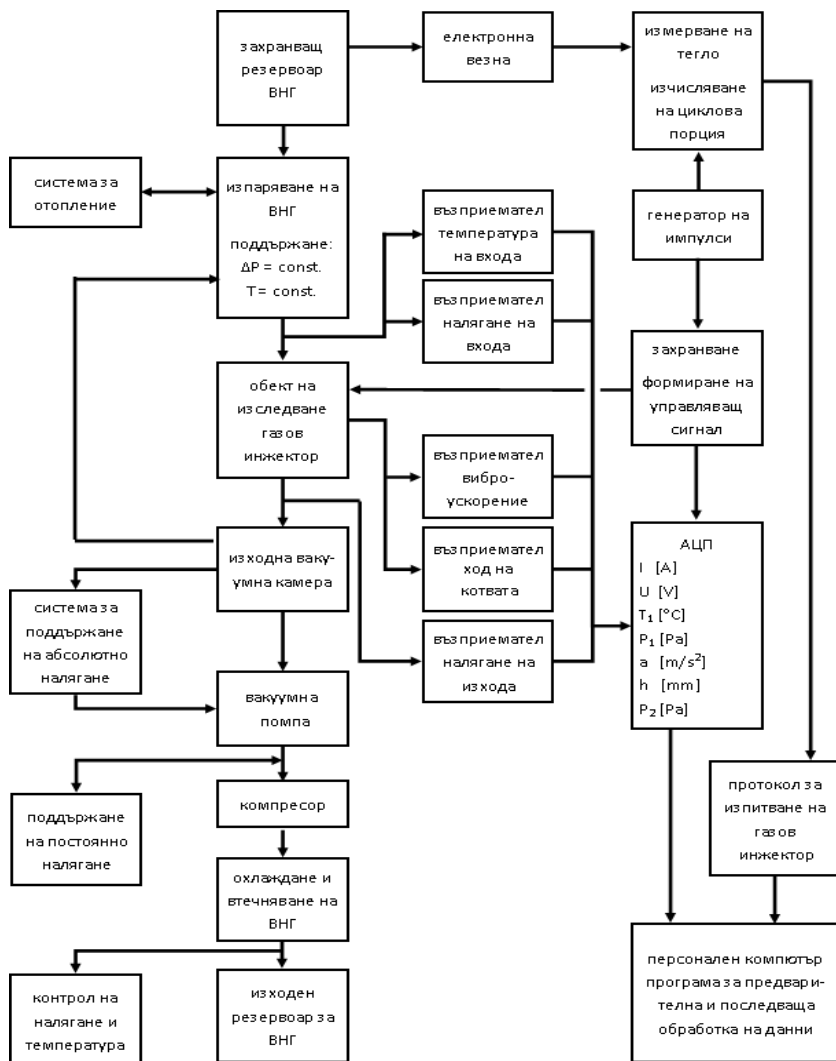


Фиг. 2.11 Проводимост на инжектора при различен ход на котвата

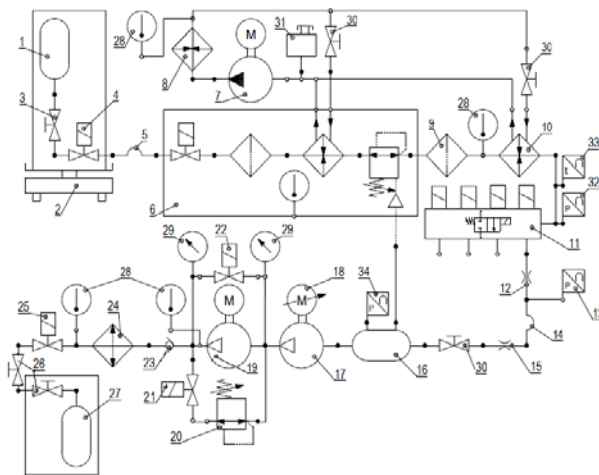
При малки стойности на хода, съответстващи на началната фаза на отваряне на клапана, кривите за различните диаметри имат сходно поведение, което показва, че потокът е ограничен предимно от вентила, а не от самата дюза. В този диапазон малко увеличаване на хода води до рязко повишаване на проводимостта. След определен ход на котвата, кривите започват да се разделят, което показва преминаване от доминиращо влияние на вентила към нарастваща роля на геометрията на дюзата.

ГЛАВА III. Стенд за изследване на характеристики на газови инжектори и методика за обработка на експерименталните данни

За постигане на основната цел на дисертационния труд, и определянето на характеристиките на газови инжектори, е проектирана и изградена специализирана лабораторна инсталация, позволяваща управление и контрол на основни параметри, влияещи върху работата на инжекторите. Разработена е методика за провеждане на безмоторни експериментални изследвания при условия, симулиращи реалните експлоатационни условия на работа на газови инжектори.



Фиг. 3.1 Блок схема на лабораторната система



Фиг.3.2 Принципна схема на експерименталната система

На фигура 3.2 е представена принципната схема на стенда. За съхранение на газовото гориво са използвани две стандартни газови бутилки с обем 12 L (1, 27). Всяка бутилка е оборудвана с предпазен клапан за свръхналягане и ръчен спирателен кран (3, 26). Първоначално захранващият резервоар е зареден с 2 kg ВНГ, докато от изходният резервоар и останалите елементи предварително е отстранен въздуха. Захранващият резервоар е разположен върху електронна везна (2) с изход, ориентиран надолу, което осигурява подаване на ВНГ в течно агрегатно състояние.

Непосредствено след изхода на резервоара, освен ръчния кран, е монтиран електромагнитен клапан (4) за аварийно спиране на газоподаването в случай на изтичане или други аварийни ситуации. ВНГ постъпва в редуктор-изпарителя (6) през термо пластична тръба (5). Използван е стандартен редуктор-изпарител, предназначен за двигатели с максимална мощност до 100 kW. Този редуктор разполага с електромагнитен клапан на входа и с филтър за грубо пречистване на горивото от твърди частици. Изпареното гориво преминава последователно през филтър за фино пречистване (9) и допълнителен водно-газов отоплител (10), след което постъпва в изследвания газов инжектор (11).

Преходът от течно към газообразно състояние на горивото е ендотермичен процес, поради което необходимото количество топлина се осигурява от отоплителна система, съставена от електрически водонагревател (8), водна помпа (7) и електронна система за регулиране на температурата.

В зависимост от програмата за провеждане на експеримента, към изхода на изпитвания инжектор се монтират изходни дюзи с дроселиращи отвори с различни диаметри (12). Изходната дюза е свързана посредством гумен тръбопровод (14) със стандартен щуцер (15) за монтаж към пълнителния колектор на двигател с вътрешно горене. Щуцерът е свързан към изходната камера (16) през ръчен спирателен кран.

За поддържане на налягането в средата на изтичане на газовото гориво, така че да бъде равно на налягането в пълнителния колектор на ДВГ, е използвана система, състояща се от изходна камера с обем 20 литра и вакуум помпа (17), задвижвана от асинхронен електродвигател (18) чрез ремъчна предавка. Поддържането на зададеното налягане се осъществява чрез промяна на честотата на въртене на ротора

на електродвигателя. За осигуряване на постоянна разлика в налягането на газа преди и след инжектора, управляващата камера на редуктора е свързана към изходната камера.

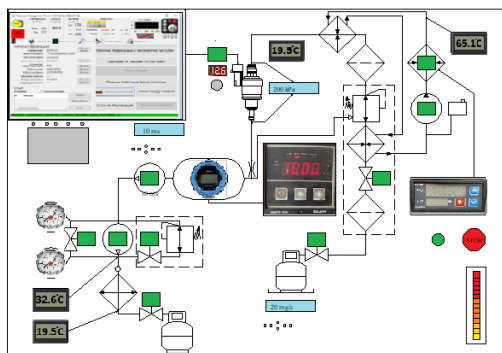
Степента на сгъстяване на използваната вакуум помпа не е достатъчна за достигане до налягането на наситените пари на ВНГ, особено при ниски стойности на поддържаното абсолютно налягане. Поради това към изхода на помпата е свързан еднобутален компресор (19) с обем 9 см³ и постоянна честота на въртене.

По време на експерименталните изпитвания дебитът на газовия поток през системата се изменя в зависимост от зададените работни условия. Поради факта, че компресорът функционира с постоянна честота на въртене, при определени експериментални режими е възможно входното налягане към компресора да спадне по-ниско от налягането на входа на вакуумната помпа. С цел предотвратяване на подобна ситуация към системата е интегриран регулатор (20), конфигуриран така, че при понижение на налягането под стойност от 350 kPa, в участъка между вакуумната помпа и компресора, да осъществи връзка между входа и изхода на компресора. Това позволява, при специфични режими на работа, компресорът да премине в режим на празен ход, докато налягането се повиши над регулираната стойност. При необходимост регулаторът може да бъде изолиран посредством електромагнитен клапан (21).

Независимо от наличието на система за поддържане на налягането на входа на компресора, чрез допълнителен електромагнитен клапан (22) се осигурява директна хидравлична връзка между входа и изхода му. Този клапан се активира ръчно преди стартиране на компресора, поради ниския пусков въртящ момент на задвижващия електродвигател. С цел предотвратяване на обратен поток на сгъстен газ от изходния резервоар към входа на компресора, в системата е интегриран еднопосочен клапан (23).

След сгъстяване до налягане на наситените пари, газът преминава през кондензатор (24), където се охлажда до температурата на околната среда, и постъпва в изходния резервоар в течно агрегатно състояние.

При изразходване на захранващият резервоар, при стриктно спазване на приетите мерки за безопасност, двата резервоара се разменят. Използват се два напълно еднакви резервоара, което предотвратява опасността от препълване на изходния резервоар над допустимите 80% от обема.



Фиг.3.3 Контролно табло на стенда

Управляващите електрически ключове и екраните за визуализация на измерваните параметри са монтирани на контролно табло, върху което е изобразена мнемонична диаграма. Тази диаграма показва връзките между отделните елементи на системата.

Мерки за безопасност при работа със стенда

Втечненият нефтен газ, съставен основно от пропан и бутан, представлява запалима смес, която при определени условия може да предизвика възпламеняване или експлозия. За възникване на горене е необходимо наличието на три елемента: гориво в подходяща концентрация, кислород и източник на запалване.

За всеки етап от експлоатацията на стенда и провеждането на експерименталните изследвания са разработени процедури, обхващащи въвеждането в експлоатация, стартирането и прекратяването на работа за деня, както и безопасната размяна на газовите бутилки. Критичен от гледна точка на безопасността момент е размяната на бутилките.

Газовата система на стенда е изградена от стандартни компоненти на автомобилна газова уредба, сертифицирани съгласно Правило № 67 на ИКЕ на ООН за оборудване, използвано с ВНГ. Допълнителните елементи – вакуумпомпа, компресор и кондензатор – са проектирани за работа с бутан, което гарантира тяхната съвместимост.

Преди първоначалното въвеждане в експлоатация газовата секция на стенда е вакуумирана с цел отстраняване на кислорода. По този начин се създава среда, в която концентрацията на горивото е над горната граница на запалимост, което прави възпламеняването невъзможно при отсъствие на кислород.

За ранно откриване на изтичане на газ е инсталирана система за детекция, включваща три сензора – два MQ-6 и един MQ-2 – разположени на стратегически места в газовата секция на стенда. Сензорите са настроени на максимална чувствителност и са свързани със светлинна и звукова сигнализация на контролния панел. Допълнително се използва ръчен преносим газ детектор.

При регистриране на изтичане аварийният изключвател на контролното табло се активира, като електромагнитните клапани на бутилките се затварят автоматично.

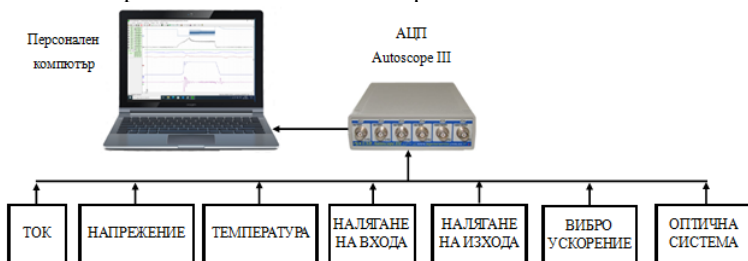
Методика за запис на получените експериментални данни

При всеки отделен експеримент, за определяне на характеристиките на изследвания газов инжектор, се записват текущи данни в два формата. В предварително подготвен протокол за измерване, съдържащ информация относно зададените гранични условия, се вписват получените стойности за измерената циклова порция гориво, температурата на газовия инжектор, както и имената на файловете, записани чрез системата за регистрация на бързо променящи се величини, фиг. 3.4.

инжектор тип	30	Протокол за определяне на разходни характеристики. 2./дата...06.11.2024.....										вер.5_3	☐	
ход на котвата [mm]	0,4											табл.		
диаметър на дюзата	1,5											весна	начало	9674 гр.
T на отопление [°C]	45												край	8714 гр.
T на ок.среда [°C]	17,1													
ΔP [kPa]	100	бележки: Тест влияние на честотата на KV												
напряжение [V]	13,6													
време [мс]	множител	честота [об/мин]	брой цикли	налягане P2 [mbar]				тегло на изп. газ [гр.]	циклова порция [мл/ц]	T на инж. старт	T на инж. Среда	T на инж. Край	запис №	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
15	1	3500	8000	1000			111,04	13,88	42,3	46,6	49,1	1,2,3,		
15	1	3000	8000	1000			109,52	13,69	49,1	50,1	50,9	4,5,6,		
15	1	2500	8000	1000			109,12	13,64	50,4	49,9	49,8	7,8,9,		
15	1	2000	8000	1000			110,72	13,84	48,8	47,1	46,5	10,11,12,		
15	1	1500	8000	1000			109,68	13,71	45,4	42,8	41,9	13,14,15,		
15	1	1000	8000	1000			113,2	14,15	40,4	37,1	35,6	16,17,18,		

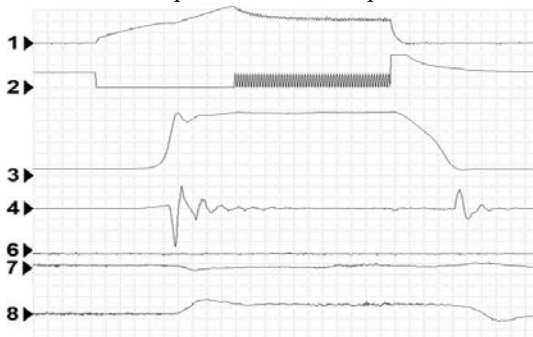
Фиг. 3.4 Протокол от измерването

За регистрация на бързо променящите се величини е използвана система, съставена от високоскоростен аналогово-цифров преобразувател (АЦП) – цифров осцилоскоп Autoscope III. Честотата на сканиране е 250 kHz за всеки канал, фиг. 3.5.



Фиг. 3.5 Система за запис на бързо променящи се данни

След дискретизация на аналоговите сигнали, АЦП предава данните към персонален компютър чрез високоскоростна USB връзка. Фигура 3.6 илюстрира формата на записаните сигнали в рамките на един работен цикъл на инжектора.



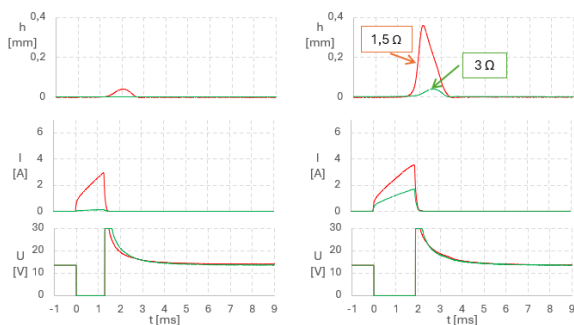
Фиг. 3.6 Форма на сигналите към АЦП

1 – ток през намотката, 2 – изменение на напрежението, 3 – движение на котвата, 4 – виброускорение, 5 – не се използва, 6 – температура на газа, 7 – налягане на входа на инжектора, 8 – налягане на изхода на инжектора

Глава IV. Резултати от експерименталните изследвания

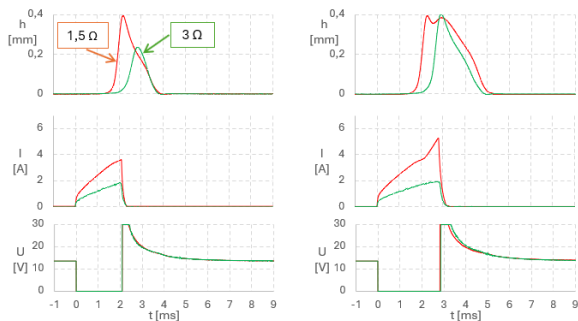
Динамика на котвата в зависимост от продължителността на управляващия импулс

Фигура 4.1 илюстрира началния момент на задвижване на котвата при намотки със съпротивление $1,5\ \Omega$ и $3\ \Omega$.



Фиг.4.1 Начало преместване на котвата при намотки $1,5\ \Omega$ и $3\ \Omega$

Необходимото време за нарастване на тока до стойност, при която електромагнитната сила предизвиква начално задвижване на котвата, е $1,31\text{ ms}$ при намотка със съпротивление $1,5\ \Omega$ и $1,90\text{ ms}$ при $3\ \Omega$. В интервала от $0,59\text{ ms}$ между двата момента котвата при намотка с по-ниско съпротивление изминава $0,36\text{ mm}$ от пълния си ход. Разликата в поведението се дължи на по-високата скорост на нарастване на тока при намотката с по-ниско съпротивление.

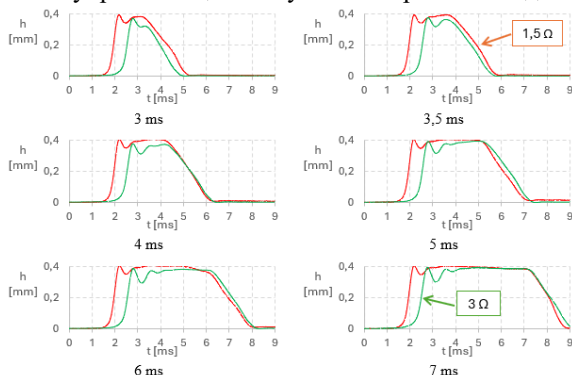


Фиг.4.2 Време за достигане на пълния ход на котвата при намотки с електрическо съпротивление $1,5\ \Omega$ и $3\ \Omega$.

Фигура 4.2 илюстрира момента, в който котвата достига положение, съответстващо на пълно отваряне на клапана. Общото време от началото на електрическия импулс е $2,12\text{ ms}$ при намотка с $1,5\ \Omega$ и $2,87\text{ ms}$ при $3\ \Omega$, което представлява разлика от $0,75\text{ ms}$. Спрямо разликата във времето на началното

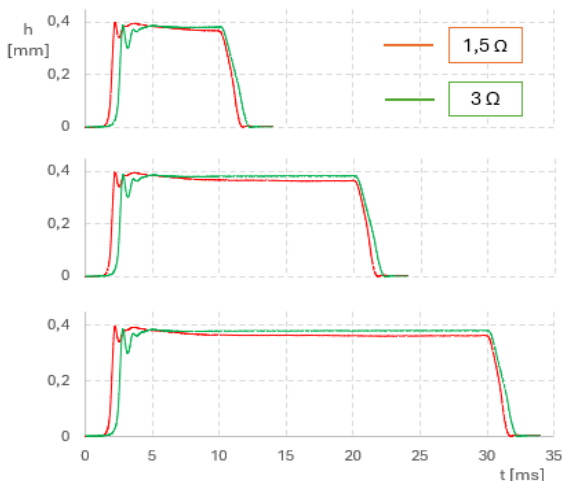
задвигване, разликата при пълното отваряне е с $0,16\text{ ms}$ по-голяма, което се дължи на различната скорост на движение, определена от електромагнитната сила, създавана от двете намотки.

Фигура 4.3 показва зависимостта между движението на котвата и продължителността на управляващия импулс в интервала от 3 до 7 ms .



Фиг.4.3 Зависимост между преместването на котвата и продължителността на управляващия импулс в интервала от 3 до 7 ms .

За целия разглеждан интервал времеовото изместване между двете намотки се запазва практически постоянно. При импулс с продължителност $3,5\text{ ms}$ моментът, в който започва движението на котвата в посока към затваряне на клапана, съвпада и за двете намотки. При импулси с продължителност над 4 ms се наблюдават както по-ранно отваряне, така и по-ранно затваряне на клапана при намотка със съпротивление $1,5\text{ }\Omega$.

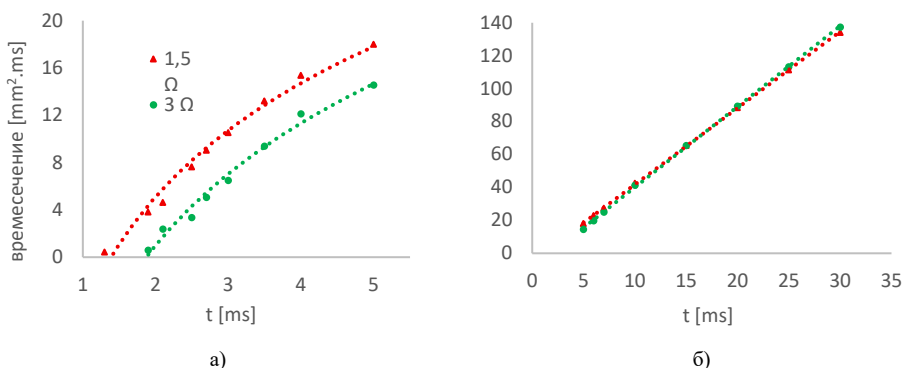


Фиг.4.4 Преместване на котвата при импулси с продължителност 10, 20 и 30 ms

Фигура 4.4 представя движението на котвата при импулси с продължителност 10, 20 и 30 ms.

След задействане на фазата на токоограничение поведението на котвата се определя основно от продължителността и характеристиките на управляващия импулс. Графиките показват, че при намотка със съпротивление $1,5\ \Omega$ след края на началния пусков етап котвата се придвижва в посока към затваряне на клапана в по-голяма степен в сравнение с $3\ \Omega$.

За количествена оценка на ефективната площ на пропускане на клапана е използвана величината време-сечение, представляваща интегрална мярка за отвореното състояние на клапана в рамките на електрическия импулс. Тя отчита едновременно хода на котвата и продължителността на импулса, като отразява интегралния принос на механичното отваряне към количеството газ, което може да премине през инжектора в рамките на импулса. Време-сечението е изчислено за всички използвани продължителности на управляващия сигнал и използвано за съпоставка между поведението на инжектора при двете стойности на електрическото съпротивление на намотките.

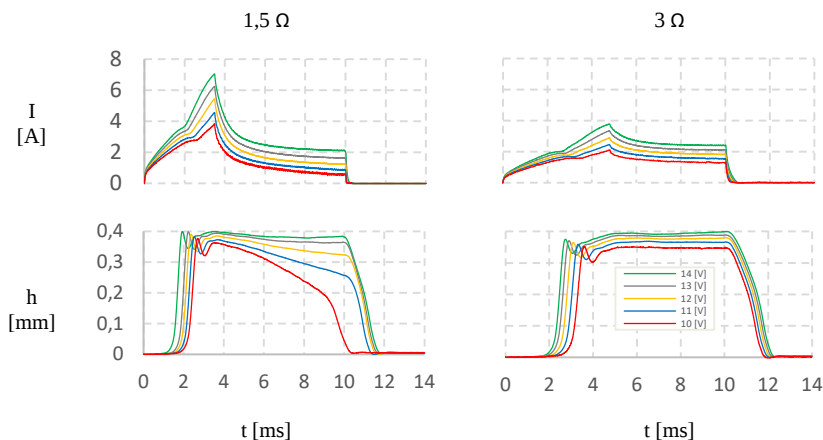


Фиг.4.5 Зависимост на време-сечението от продължителността на управляващия импулс: а) интервал до 5 ms; б) интервал от 5 до 30 ms.

Фигура 4.5 илюстрира изменението на време-сечението в зависимост от продължителността на управляващия импулс. В началния интервал зависимостта е ясно изразено нелинейна, фиг. 4.5а. При импулси над 5 ms се установява линейно нарастване, но с различен наклон, фиг. 4.5б. В резултат на това зависимостите се пресичат при продължителност 15 ms, което води до по-големи стойности на време-сечението при намотката с по-високо съпротивление. Това поведение се дължи на различията в електрическия сигнал по време на фазата на токоограничение, при който се прилагат различни стойности на коефициента на запълване на ШИМ.

Динамика на котвата при промяна на захранващото напрежение

На фигура 4.6 е показано движението на котвата и изменението на тока през намотката при различни стойности на захранващото напрежение за двете съпротивления.



Фиг.4.6 Движение на котвата и изменение на тока през намотката при промяна на захранващото напрежение

Графиките показват, че при напрежения по-ниски от 12 V за съпротивление на намотката $1,5 \Omega$, се наблюдава движение на котвата в посока на затваряне на клапана преди края на импулса. Това поведение се дължи на характеристиката на управляващия сигнал във фазата на токоограничаване. При коефициент на запълване на ШИМ от 20%, ефективната стойност на тока не позволява създаване на необходимата електромагнитна сила за задържане на котвата в привлечено положение.

Влияние на температурата на инжектора върху преместването на котвата

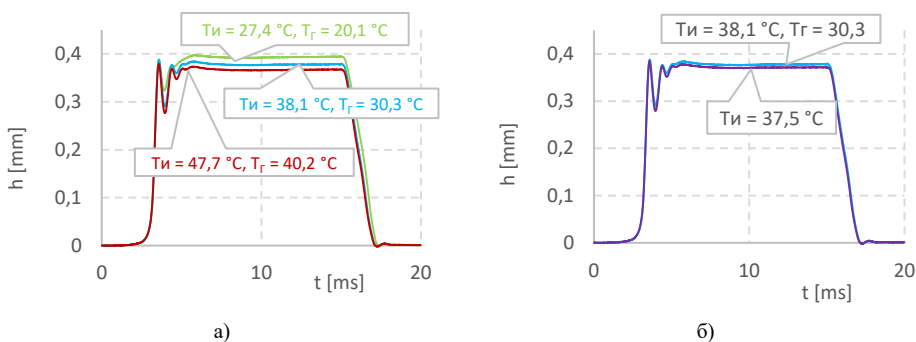
Температурата на газовия инжектор се влияе както от неговите конструктивни характеристики, така и от редица външни фактори, сред които: температурата на работната среда в зоната около двигателя, температурата на газовата фаза на горивото и параметрите на управляващия електрически импулс.

Изследванията показват, че при продължителна работа при установени режими, температурата на инжектора се стабилизира след определен период от време. Комбинираното въздействие на всички фактори определя точката на равновесно температурно състояние.

Фигура 4.7а представя изменението на хода на котвата при различни температури на газовото гориво, при които са достигнати съответните температури на инжектора. Резултатите показват, че с повишаване на температурата ходът на котвата намалява пропорционално.

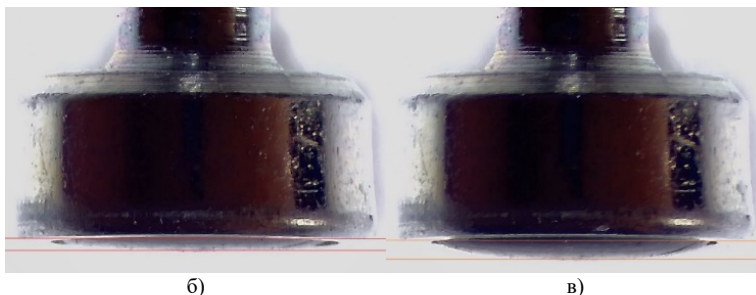
Фигура 4.7б илюстрира сравнение между поведението на инжектора при работа без подаване на гориво при температура на инжектора $37,5^{\circ}\text{C}$ и при подаване на гориво, когато температурата на инжектора достига $38,1^{\circ}\text{C}$. При отсъствие на

горивоподаване се наблюдава по-голямо намаление на хода на котвата в сравнение с режима с подаване на гориво, при който температурата на газовата фаза е 30,3 °C. Това показва, че температурата на котвата се определя основно от температурата на горивото и индиректно от температурата на намотката.



Фиг. 4.7. Влияние на температурата върху хода на котвата: (а) при работа на инжектора с горивоподаване при температура на горивото 20,1 °C, 30,3 °C и 40,2 °C; (б) сравнително поведение при работа без и с горивоподаване, T_i – температура на инжектора, T_f – температура на газа.

На фигура 4.8 (б, в) е представено изменението на формата на уплътняващия елемент при промяна на температурата. При повишаване на температурата на газовия инжектор се наблюдава ясно изразена деформация на повърхността на елемента, в резултат от температурното разширение.



Фиг. 4.8. Промяна на формата на контактната повърхност на клапана при различни температури на инжектора: (б) 20 °C; (в) 80 °C.

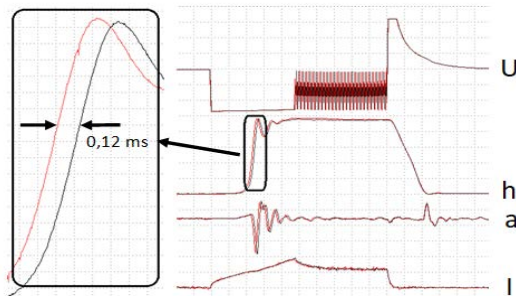
Динамика на котвата при промяна в стойността на диференциалното налягане

За да се осъществи задвижване на котвата в посока отваряне на клапана, е необходимо електромагнитната сила да превиши сумарната сила, която го задържа в затворено положение. В това състояние върху клапана действат две основни сили:

- силата на възвратната пружина;
- силата, породена от диференциалното налягане между входната и изходната страна на клапана.

Диференциалното работно налягане в газовата уредба се поддържа в границите от 80 до 120 kPa посредством редуктор-изпарителя.

На фиг. 4.9 е представено сравнително изследване на движението на котвата и виброускорението при граничните стойности на диференциалното налягане. Графиките са синхронизирани по началото на електрическия импулс и показват, че диференциалното налягане влияе единствено върху началното движение на котвата. Затварянето на клапана след прекъсване на напрежението е идентично и при двата режима.



Фиг. 4.9 Промяна в момента на тръгване на котвата при различно диференциално налягане

Анализ на влиянието на честотата на управляващия сигнал върху динамиката на котвата

Общото времетраене на работния цикъл на инжектора обхваща периода от началото на електрическия импулс до пълното затваряне на клапана. Освен това, при присядане на клапана към седлото възникват колебателни процеси, в резултат от еластичните свойства на елементите. Затварянето на клапана предизвиква вибрации в конструкцията на инжектора, които в комбинация с трептенията на котвата могат да доведат до резонансни явления.

Допълнително, в процеса на отваряне и затваряне на клапана настъпват промени в налягането на газа както на входа, така и на изхода на инжектора. Тези промени са с вълнов характер и при определени условия влияят върху стойността на диференциалното налягане в момента на отваряне на клапана.

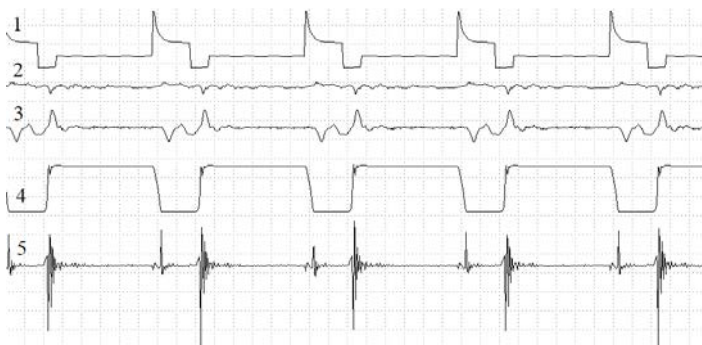
На фигура 4.10 са показани измененията в налягането и виброускорението за два последователни цикъла при честота на сигнала, еквивалентна на 1000 min^{-1} , с продължителност на управляващия сигнал 30 ms. Графиките показват, че с най-голяма продължителност са колебанията в налягането на изхода на инжектора. До началото на следващия цикъл всички колебателни процеси са напълно приключили.

На фигура 4.11 е представено изменението в налягането и движението на котвата при същата продължителност на импулса, при честота, еквивалентна на 3000 min^{-1} .

Графиката на налягането на изхода показва, че колебанието в стойността не успява да затихне до началото на следващия импулс.



Фиг. 4.10 Последователни работни цикли при еквивалентна честота на въртене на колянния вал на двигателя 1000 min⁻¹



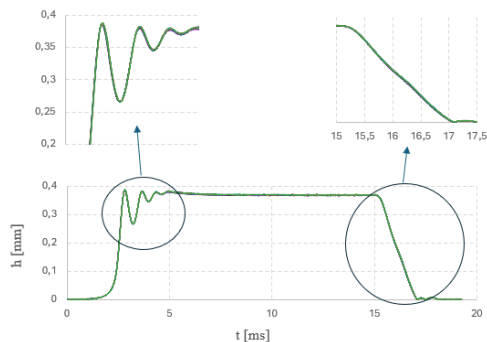
Фиг. 4.11 Последователни работни цикли при честота 3000 min⁻¹

1 – напрежение, 2 – налягане на входа на инжектора, 3 – налягане на изхода на инжектора, 4 – движение на котвата, 5 – виброускорение на корпуса на инжектора

От представените данни може да се заключи, че при честоти на сигнала под определена граница, когато интервалите между отделните цикли са достатъчни за затихване на колебанията, не се наблюдава промяна в поведението на котвата. След тази граница забавянето при отваряне на клапана се оценява на до 60 μ s.

Оценка на неравномерността в движението на котвата между отделните цикли

Фигура 4.12 представя сравнителен анализ на поведението на котвата при работа на инжектора при постоянни гранични условия. Резултатите са получени при управляващ импулс с продължителност 15 ms и обща продължителност на експеримента от 4 минути, след достигане на равновесна температура на инжектора. В хода на изпитването температурата на намотката се изменя от 39,3 °C в началото до 40,1 °C в края на експеримента.



Фиг. 4.12 Неравномерност на хода на котвата при времетраене на импулса 15 ms

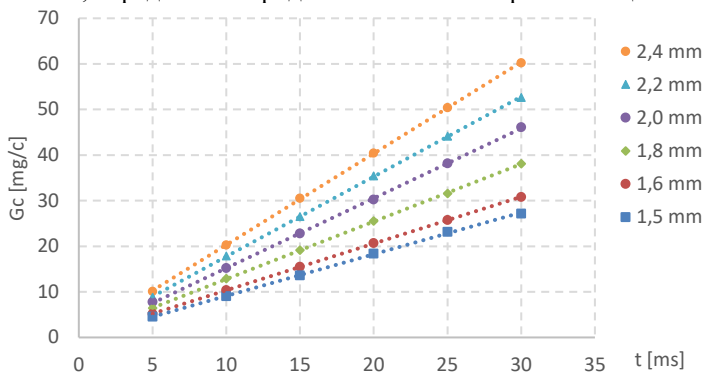
За целите на анализа са използвани 15 произволно избрани цикъла от общо 6 500, разпределени по пет в началото, средата и края на измерването. Всички цикли са синхронизирани спрямо началото на електрическия импулс. Данните за преместването на котвата са насложени с цел визуализация и оценка на отклоненията между отделните цикли. Резултатите показват устойчиво поведение на котвата през цялото времетраене на опита, като не се наблюдава изменение в хода ѝ.

Характеристики на цикловата порция при различни диаметри на дроселиращия отвор

Фигура 4.13 показва получените резултати за изменението на цикловата порция гориво в зависимост от продължителността на управляващия електрически импулс. Изследванията са проведени за различни диаметри на дроселиращия отвор.

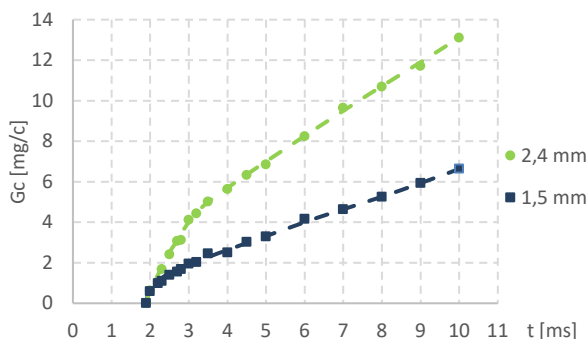
Минималната продължителност на управляващия импулс се определя от конструктивните характеристики на инжектора, и по-специално – от времето за отваряне и затваряне на клапана.

Максималната продължителност се ограничава от цикличния характер на горивоподаването, определен от продължителността на работния цикъл на двигателя.



Фиг.4.13 Циклова порция в зависимост от продължителността на управляващия импулс за различни диаметри на дроселиращия отвор. Налягане на газа 200 kPa, температура на газа 30 °C

Изменение на цикловата порция при кратки времена на електрическия импулс



Фиг.4.14 Изменение на цикловата порция в интервала до 10 ms

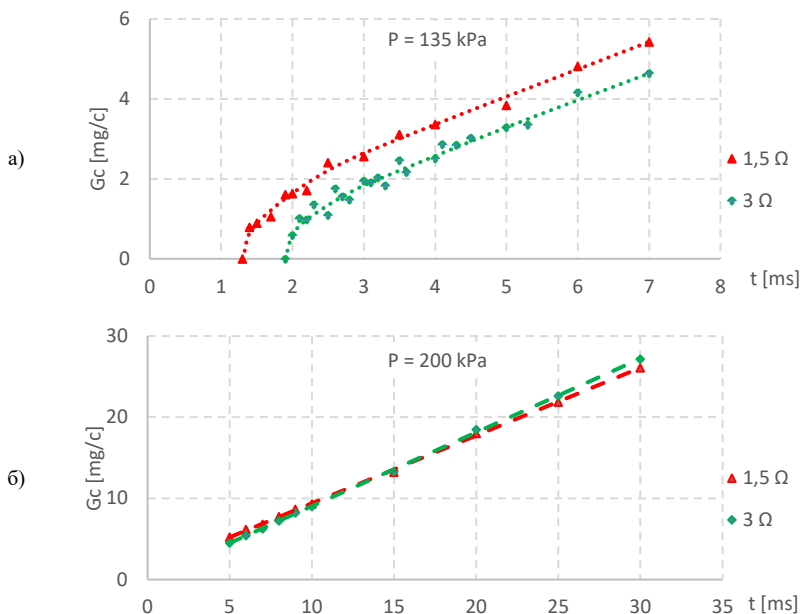
Фигура 4.14 представя резултатите от експериментално изследване на изменението на цикловата порция гориво в зависимост от продължителността на управляващия електрически импулс в диапазона от 2 до 10 ms. Графиките показват ясно изразена нелинейна зависимост между продължителността на управляващия импулс и цикловата порция гориво в началната част на изследвания диапазон. При продължителност на импулса до приблизително 3 ms, нарастването на порцията не е пропорционално на времето, като това поведение се наблюдава при двата разглеждани диаметъра на дроселиращия отвор.

Влияние на съпротивлението на намотката върху цикловата порция

Фигура 4.15 представя изменението на цикловата порция в зависимост от продължителността на управляващия импулс за инжектори със съпротивление на намотката 1,5 Ω и 3 Ω .

Графиките на фигурите показват ясно изразени различия в поведението на инжектора при различно съпротивление на намотката. При кратки времена инжекторът с намотка 1,5 Ω осигурява по-голяма стойност на цикловата порция, което се дължи на по-ранното отваряне на клапана. С нарастване на продължителността на импулса, този ефект отслабва и при продължителност на импулса около 15 ms двете зависимости се пресичат.

След тази точка инжекторът с намотка 3 Ω осигурява по-голяма циклова порция. Това се обяснява с ограниченията, наложени от режима на токово ограничаване при ШИМ управление, при който инжекторът с по-ниско съпротивление по-бързо достига тока на насищане. В резултат, средната сила на задържане върху котвата намалява и тя не остава в напълно привлечено положение за целия импулс. Получава се своеобразен „вътрешен дроселиращ ефект“ в рамките на самия управляващ цикъл, водещ до редукция на дебита при продължителни импулси.

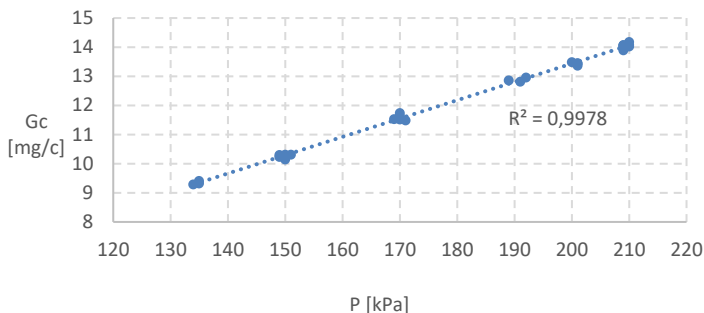


Фиг. 4.15 Циклова порция при различно съпротивление на намотката

Циклова порция в зависимост от налягането на горивото на входа на инжектора

Налягането на газа, постъпващ към инжектора оказва пряко влияние върху условията за дозиране на горивото. При фиксирана продължителност на управляващия импулс и постоянна геометрия на инжектора, входното налягане определя масовия дебит и величината на подаваната циклова порция.

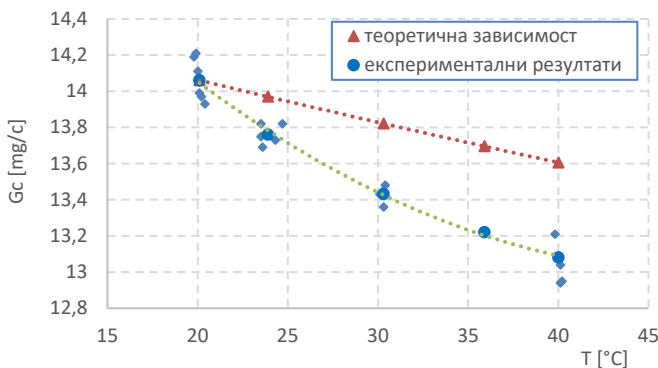
На фигура 4.16 е представена експериментално установената зависимост между налягането на входа на инжектора и съответната циклова порция гориво.



Фиг.4.16 Изменение на цикловата порция при изменение на налягането на газа

Циклова порция в зависимост от температурата на газа

Температурата на газовата фаза на горивото, постъпващо в инжектора, наред с налягането, е сред основните термодинамични параметри определящи цикловата порция гориво. При флуиди в газообразно състояние температурните изменения водят до промени в плътността, което пряко влияе върху количеството гориво, дозирано от инжектора за единица време.



Фиг. 4.17 Изменение на цикловата порция при повишаване на температурата на газа

На фигура 4.17 е представена зависимостта между температурата на газа в диапазона 20–40 °C и измерената циклова порция гориво. С цел оценка на експерименталните резултати в графиката е представена също и теоретичната зависимост, изведена от уравнението за критично изтичане при стационарен режим.

При сравнение с теоретичната зависимост се наблюдава систематично отклонение, при което експерименталните стойности са по-ниски от изчислените. Най-голямата разлика е отчетена при 40 °C, където измерената циклова порция е с около 3,9 % под теоретичната стойност. Това е в съответствие с наблюдавания експериментален резултат за намаляване на хода на котвата при повишена температура на инжектора – в резултат от термичното разширение на елемент от клапаниния механизъм, водещо до частично стесняване на проходното сечение.

Коефициент на изтичане

Коефициентът на изтичане представлява безразмерна величина, която характеризира влиянието на конструктивните особености на газовия инжектор върху способността му да пропуска газов поток. Той се дефинира като отношението между експериментално определения и теоретично изчисления дебит на газ през инжектора.

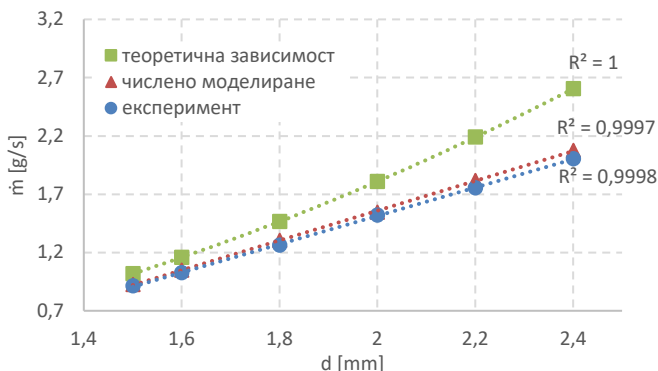
$$Cd = \frac{\dot{m}_{\text{действително}}}{\dot{m}_{\text{теоретично}}} \quad (4.1)$$

където: $\dot{m}_{\text{действително}}$ – стойности получени при експерименталното изследване,
 $\dot{m}_{\text{теоретично}}$ – теоретично определени стойности.

Теоретично изчисления масов дебит е определен по уравнението на Сен-Венан и Вансел за условия на критично изтичане:

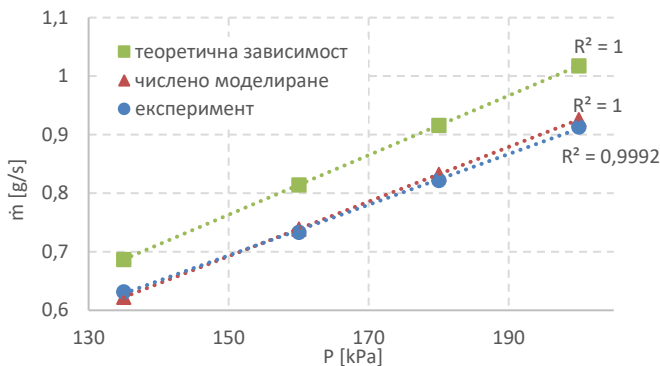
$$\dot{m} = S \sqrt{k \rho_1 P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (4.2)$$

където: S – напречно сечение на отвора на дюзата, P_1 – налягане на газа на входа на инжектора, ρ_1 – плътност на газа, k – адиабатен показател.



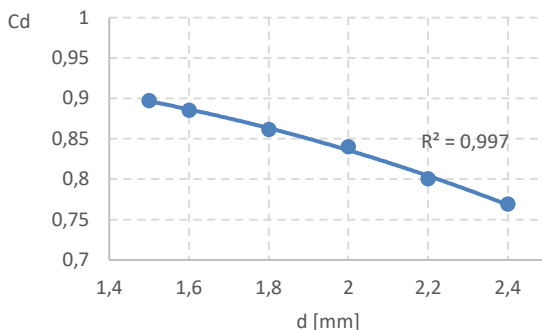
Фиг. 4.18 Дебит при различни диаметри на дроселиращия отвор

На фигура 4.18 са представени експерименталните резултати за получения стационарен дебит при използваните диаметри на дроселиращия отвор. За сравнение са показани съответните стойности получени при численото моделиране и изчислените стойности според теоретичната зависимост при критично изтичане.



Фиг. 4.19 Дебит в зависимост от входното налягане

На фигура 4.19 са представени получените резултати за стационарния дебит при промяна на налягането на газа от 130 kPa до 200 kPa за диаметър на дроселиращия отвор 1,5 mm.



Фиг. 4.20 Коефициент на изтичане

На фиг.4.20 са показани получените стойности на коефициента на изтичане на изследвания инжектор при различни стойности на диаметъра на дроселиращия отвор. Графиката показва че с повишаване на този диаметър стойността на коефициента на изтичане намалява по нелинейна зависимост. Тенденцията за намаляване стойностите на коефициента на изтичане с нарастване на диаметъра се дължи основно в променящото се съотношение между съпротивлението на конструкцията на инжектора и диаметъра на дроселиращия отвор.

Основни изводи и заключение

1. Определени са време-сеченията за работните продължителности на управляващия сигнал, отразяващи интегралния принос на механичното отваряне към количеството газ, преминаващо през инжектора.

2. Изследвана е реакцията на газови инжектори с различна стойност на съпротивлението на намотката в зависимост от захранващото напрежение в електрическата система на автомобила.

3. Изследвано е влиянието на температурата на инжектора и температурата на горивото върху хода на котвата и дебитните характеристики. Установено е, че съществува период на темпериране, през който при еднакви стойности на управляващия импулс дебитът на гориво намалява до достигане на установена стойност в края на периода.

4. Промяната в стойностите на диференциалното налягане оказва незначително влияние върху момента на начало на преместване на котвата. Увеличение на диференциалното налягане с 40 kPa води до отместване на момента на отваряне с около 0,12 ms, което представлява приблизително 6,3 % от времето на задържане при отварянето на клапана.

5. Изменението на налягането на газа на изхода от газовия инжектор има характеристики на затихваща вълна, чиито колебания затихват до началото на следващия импулс. При честоти на въртене на колянвия вал над 3000 min⁻¹ и продължителност на електрическия импулс над 20 ms колебанията не са приключили до началото на следващия импулс, което води до зависимост на момента на отваряне

от моментното диференциално налягане. Установено е, че при незатихващи колебания отместването може да достигне до около 60 μs .

6. При установени режими на работа на двигателя газовият инжектор достига равновесна температура, при която ходът на котвата показва повторемост, а в рамките на изследваните 6500 цикъла цикловата порция гориво остава практически непроменена.

7. Определени са дебитните характеристики на газовите инжектори при различни диаметри на дроселиращия отвор на изхода.

8. Изследвани са дебитните характеристики във времевата област при отваряне на инжектора. Установено е, че независимо от по-малкото време за пълно отваряне, дебитните характеристики започват да показват устойчиви резултати след около 2 ms от началото на отварянето. Разликите при еднакви експлоатационни условия се дължат на регистрираните колебателни процеси на котвата в горно положение при малка продължителност на управляващия импулс.

9. Величината на електрическото съпротивление на намотката влияе върху дебитната характеристика на инжектора. Регистрирано е повишаване на дебита при кратки импулси и понижаване при дълги импулси при инжектори с 1,5 Ω спрямо тези с 3 Ω . Съществени различия се наблюдават по отношение на началото на отваряне – инжектори с по-ниско съпротивление на намотката започват да дават устойчиви резултати на дебита с около 0,6 ms по-рано.

10. Налягането на горивото на входа на газовия инжектор е основен термодинамичен фактор, определящ дебитната характеристика. При еднаква продължителност на управляващия импулс е установена линейна зависимост на нарастване на цикловата порция с увеличаване на налягането.

11. Експерименталните изследвания показват, че при теоретично моделиране на дебитните характеристики е необходимо в уравнението за адиабатно изтичане на газове да се отчитат температурните зависимости на основните фактори. Липсата на такива зависимости води до отклонения от действителните резултати с около 4 %.

12. Определени са стойностите на коефициента на изтичане на изследваните инжектори за диаметри на дроселиращия отвор от 1,5 до 2,4 mm при работна температура на газа 30 °C. Посочените размери обхващат напълно мощностния диапазон на съвременните двигатели с вътрешно горене.

При използване на втечен нефтен газ при двигателите с вътрешно горене формирането на цикловата порция се осъществява, когато горивото е в газообразно състояние. Поради ниската си плътност проходните сечения на елементите от газовите инжектори са значително по-големи от тези на инжекторите за гориво в течно състояние. По-големите размери на проходните сечения определят и по-голямата маса на иглата на инжектора, която в този случай се явява и котва на електромагнита. Преместването на комутиращия елемент е свързано с появата на по-големи магнитни и инерционни сили, за чието формиране се използва физическо време, определено като време на задържане. Наличието на такова време внася отклонение между стойностите на продължителността на управляващия електрически импулс и действителното време за изтичане на горивото. Периодите за отваряне и затваряне на инжектора, както и минималната продължителност на управляващия импулс, са основни характеристики за конкретния инжектор.

Дебитната характеристика определя мощностния диапазон на двигателя, за който конкретният инжектор е приложим. В практиката на горивните системи за втечнен нефтен газ се използват два вида инжектори – с горно подаване на горивото и с долно подаване на горивото. Газовите инжектори с горно подаване на горивото намират приложение предимно при малолитражни автомобилни двигатели с вътрешно горене. Инжекторите с долно подаване на горивото покриват широк мощностен диапазон на двигателите, поради което са намерили широко приложение.

Направеното литературно проучване посочва, че съвременните изследвания на дебитните характеристики от производители и изследователи се извършват при използване на различни негорими газове и липсват данни за такива характеристики на инжекторите с горива. Стойностите при такива изследвания се посочват в обемни нормализирани единици. Характеристиките са определени при условия, които съществено се различават от експлоатационните условия на работа на инжектора.

Извършеното числено моделиране на процесите в газовия инжектор в средата на SolidWorks Flow Simulation показват, че създаденият тримерен геометричен модел на газовия инжектор и избраните конфигурационни параметри на програмната среда позволяват да се получат оценки за пропускателната способност и динамиката на газовия поток при промяна на граничните условия. Числените резултати позволяват изчисляване на коефициента на изтичане, който характеризира конструктивното съпротивление на инжектора спрямо идеализирания теоретичен модел.

Получените резултати се отнасят до стационарни режими, при които не са отчетени фактори като променливата стойност на температурата на инжектора, динамиката на преместването на котвата, както и цикличността в работата на газовия инжектор. Визуализацията на параметрите на потока – като скорост, налягане, температура и интензивност на турбулентните потоци – разкрива характерните зони на ускорение, пад на налягане и преход между ламинарно и турбулентно протичане при различни фази от работния цикъл на инжектора.

Извършените експериментални изследвания проследяват поведението на инжектора в различни експлоатационни условия. Анализът на експерименталните данни посочва, че тези условия оказват съществено влияние върху дебитната му характеристика. В резултат от извършените изследвания е установено, че стойностите за цикловата порция гориво придобиват повторемост след определен период от време, необходим за темпериране на инжектора. Анализът на формата и размерите на елементите на инжектора показва, че разликите при последователните измервания се дължат на температурни деформации. Това налага дебитните характеристики да бъдат определяни след достигане на равновесна температура.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Създаден е хидродинамичен модел на газов инжектор, показващ нелинейното влияние на диаметъра на дюзата върху пропускателната способност, като при по-големи диаметри се наблюдава преразпределение на падовете на налягане между зоната на клапана и отвора на дюзата;
2. Определени са стойностите на коефициента на изтичане за различни диаметри на дроселиращия отвор, като се установява тенденция за намаляване с увеличаване на диаметъра поради променящото се съотношение между конструктивното съпротивление и отвора;
3. Изведени са зависимости за време-сеченията при различна продължителност на управляващия импулс, като е доказано линейното им нарастване над 5 ms и връзката със съпротивлението на намотката;
4. Изследвано е влиянието на различни фактори като температура на инжектора, различна стойност на съпротивлението на намотката, диференциално налягане и диаметър на дроселиращия отвор. Установено е, че устойчиви резултати за дебитните характеристики се получават след темпериране на инжектора и минимална продължителност на електрическия импулс, надвишаваща времето за отваряне на инжектора;
5. Определено е влиянието на колебателните процеси в стойностите на налягането в зоната на изтичане на горивото и е установено, че при по-голяма продължителност на управляващия импулс и честоти на въртене на колянвия вал на двигателя, отварянето на инжектора се извършва в условия на незатихващи колебания на налягането.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:

1. Проектиран и изграден е специализиран стенд за изследване на дебитните характеристики и динамиката на газови инжектори, придружен от методики за експлоатация и инструкции за безопасност;
2. Разработената методология и стендът са приложими за калибриране и оптимизация на системи за горивоподаване в двигатели с алтернативни горива;
3. Получените резултати имат потенциал за екологични приложения чрез по-прецизен контрол на цикловата порция гориво и намаляване на токсичните емисии;
4. Стендът и разработените методики могат да се използват за обучение и квалификация на специалисти в областта на газовите инжекционни системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Ivanov, Z., Stoyanov, S., Mihaylov, V., Santos, H., „Flow characteristics of gas injectors“, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, DOI: 10.1088/1757-899X/664/1/012021, 2019
2. Mihaylov, V., Ivanov, Z., Mersinkov, H., Stoyanov, S., Wróbel, R., „Influence of the control signal on parameters of low impedance injectors for SI engines“, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012018, 2021
3. Stoyanov, S., Mihaylov, V., Ivanov, Z., & Radev, R., System for studying the parameters of gas solenoid valves. ANNUAL JOURNAL OF TECHNICAL UNIVERSITY OF VARNA, BULGARIA, 5(2), p.112-121. <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol5.iss2.259>, 2021
4. Стоянов, С., Методика за определяне на параметрите на горивоподаване на газов контролер, XXIX Научно - техническа конференция с международно участие ЕКО Варна, СБОРНИК ДОКЛАДИ, стр. 102-109, 2023

Summary:

The dissertation focuses on the study of gas injectors for internal combustion engines operating on liquefied petroleum gas (LPG), aiming to determine their actual flow characteristics and analyze the factors influencing their performance.

The first part reviews modern LPG fuel systems and the role of gas injectors as a key component for precise fuel dosing. Various design solutions and methods for determining injector characteristics are presented, including standardized approaches, indirect methods, and functional evaluations.

The second part is dedicated to numerical modeling of gas-dynamic processes in injectors using SolidWorks FlowSimulation. The third part describes an experimental setup for non-engine tests, including systems for gas storage, heating, and control, as well as safety measures. A key novelty of the setup is the ability to reproduce conditions that simulate the real operating environment of the injector, ensuring more accurate and representative results. Data acquisition is carried out using high-speed equipment and protocols.

The fourth part presents experimental results on the dynamics of the armature, which depend on the duration of the control pulse, coil resistance, and voltage. A “time-area” indicator is introduced to evaluate the effective valve opening. Flow characteristics were also determined under various operating conditions, revealing the influence of factors such as fuel pressure, coil resistance, and control pulse duration. It was found that stable and repeatable results were achieved only after thermal stabilization of the injector, and that oscillatory processes during opening affected the initial phase of flow. The findings also confirm a linear relationship between fuel pressure and the delivered fuel mass for a given pulse duration, while deviations occur if temperature effects are neglected in theoretical models.

Благодарности

Извазвам благодарности на своите научни ръководители проф. д-р инж. Здравко Иванов и доц. д-р инж. Сергей Белчев, за техните съвети, напътствия и компетентно ръководство, както и на всички колеги, с чиято помощ бяха извършени експерименталните изследвания. Благодаря на всички колеги, които ме подкрепиха и ми помогнаха със своя опит и съвети да реализирам този дисертационен труд.