

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Невена Милчева Милева

**ЕФЕКТИВНОСТ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС ПРИ ИЗГАРЯНЕ НА
ПЕЛЕТИ И ОТПАДЪЧНИ СУРОВИНИ В КОТЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна
научна степен „доктор“**

**по докторска програма: „Топлотехника“
към професионално направление направление 5.4. Енергетика**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Пенка Нелиева Златева

Рецензенти:

- 1. проф. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев**
- 2. доц. д-р инж. Калин Симеонов Крумов**

Варна, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден на 15.01.2025г. в катедра “Топлотехника” и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Топлотехника“.

Автор: инж. Невена Милчева Милева

Заглавие: ЕФЕКТИВНОСТ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС ПРИ ИЗГАРЯНЕ НА ПЕЛЕТИ И ОТПАДЪЧНИ СУРОВИНИ

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Невена Милчева Милева

**ЭФЕКТИВНОСТ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС ПРИ
ИЗГАРЯНЕ НА
ПЕЛЕТИ И ОТПАДЪЧНИ СУРОВИНИ В КОТЛИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „ДОКТОР“**

Варна, 2024 г.

Дисертационният труд съдържа 178 страници, включително 84 фигури, 36 таблици и 2 приложение, оформени в 6 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 141 заглавия, от които 36 на кирилица, 97 на латиница и 8 интернет източника.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на __/__/2025 г. от 14 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 във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

В съвременните условия на нарастващи изисквания за енергийна ефективност и устойчиво управление на природните ресурси, горивният процес в инсталациите за отопление, използващи биомаса като пелети и отпадъчни суровини, придобива изключително значение. Традиционните горива като въглища и газ са обвързани с високи емисии на парникови газове и негативни екологични ефекти, което налага внедряването на алтернативни източници на енергия. В този смисъл пелетите и отпадъчните суровини предоставят възможност за намаляване на въглеродния отпечатък и оползотворяване на отпадъци, които са основен замърсител на околната среда.

Въпреки предимствата на биомасата, ефективността на горивния процес при изгарянето ѝ остава предизвикателство поради сложният физико-химичен характер на тези суровини, което влияе върху топлинната ефективност, емисиите и остатъчните продукти от горенето. Необходимостта от повишаване на ефективността на този процес е от ключово значение за оптимизиране на енергийните ресурси, намаляване на разходите и ограничаване на вредните емисии.

Актуалността на проблема се засилва от нарастващия интерес към използване на отпадъчни суровини като горивен материал в котли. Такива суровини включват селскостопански отпадъци, дървесни отпадъци и остатъчни продукти от индустриални процеси. Те не само предоставят възможност за намаляване на количеството отпадъци, но също така допринасят за кръговата икономика и устойчивото развитие. Липсата на иновативни технологии и стандартизирани методи за изгаряне на тези суровини обаче ограничава потенциала им.

Изследването на ефективността на горивния процес при изгаряне на пелети и отпадъчни суровини в котли е от изключителна важност както за научната общност, така и за индустрията. То предоставя решение на сложни задачи, свързани с енергийната трансформация, опазването на околната среда и устойчивото управление на ресурсите. В този контекст дисертацията има за цел да допринесе за развитието на научно обосновани методологии за подобряване на горивния процес и разработване на технологии, които да бъдат икономически изгодни и екологично устойчиви.

ФОРМУЛИРАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Твърдите горива от биомаса, като пелети и отпадъчни суровини, демонстрират висока енергийна ефективност и икономическа привлекателност, особено при използването на локални ресурси. Въпреки това, техните горивни характеристики варират значително в зависимост от физичните и химичните свойства на суровината, което налага необходимостта от стандартизация и оптимизация на процесите за обработка и изгаряне.

Прегледът на съществуващите горивни технологии показва значителен напредък при котлите за биомаса и когенерационните системи, които позволяват висока ефективност и намалени емисии. Все пак, липсват достатъчно данни за влиянието на различните типове суровини върху дългосрочната надеждност и производителността на тези технологии.

Емисиите на замърсители, като CO, NOx и фини прахови частици, остават значително екологично предизвикателство, въпреки използването на съвременни технологии за пречистване на отработените газове. В литературата има оскъдна информация относно дългосрочната ефективност на тези технологии при работа с различни видове биомаса.

Биомасата предлага значителни екологични и икономически ползи чрез оползотворяване на отпадъците и намаляване на парниковите газове. Все пак, липсват достатъчно данни за оптималното управление на веригата за доставка на биомаса, което включва събиране, транспорт и съхранение, за минимизиране на разходите и екологичния отпечатък.

Теоретичният анализ на горивните процеси и термохимичните свойства на биомасата показва необходимост от по-задълбочени експериментални изследвания, насочени към идентифициране на оптималните режими на горене и подходящите параметри за термична обработка на различни суровини.

Внедряването на когенерационните системи в локалните енергийни мрежи представлява значителен потенциал за повишаване на енергийната ефективност и намаляване на загубите. Въпреки това, липсата на данни за тяхната адаптивност към различни мащаби на приложение и видове биомаса ограничава тяхното широко разпространение.

От анализа е ясно, че изгарянето на биомаса е област с висок потенциал за развитие, но изисква значителни научни и технически усилия за оптимизация и преодоляване на настоящите ограничения. Това е ключово за осигуряване на устойчиво и екологично енергийно производство, което да отговаря на съвременните предизвикателства пред енергийния сектор.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Основната цел на дисертацията е подобряване на ефективността на горивния процес при изгаряне на пелети и отпадъчни суровини в котли, като се анализират горивните характеристики на материалите, подобрят параметрите на горивния процес и се разработят технологии за повишаване на енергийната им ефективност и намаляване на екологичния отпечатък.

За постигането на основната цел са поставени следните задачи:

1. Провеждане на **сравнителен анализ на горивните характеристики** на пелети от различни отпадъчни суровини, като се използват класически методи за определяне на влагосъдържание, пепелно съдържание и калоричност, както и методите за термичен анализ (ТГ, ДТА, ДСК) за детайлно изследване на термичните свойства на горивата.
2. **Числено моделиране на битов пелетен котел** с цел симулиране на процеса на изгаряне при различни режими на подаване на въздух и оптимизиране на съотношението между първичен и вторичен въздух. Симулациите ще позволят оценка на ефективността на горенето и емисиите на димните газове при различни условия.
3. **Анализ на ефективността на експериментална когенерационна система с органичен цикъл на Ренкин**, която ще бъде съобразена с особеностите на изгаряните отпадъчни суровини. Системата ще анализира посоката на нейната енергийна ефективност и възможностите за улавяне и преобразуване на отпадъчната топлина в електрическа енергия.

4. **Статистическа обработка** на експерименталните и симулационните данни за оценка на значимостта на основните фактори, които влияят върху ефективността на горивния процес и работата на когенерационната система.

ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследване е поведението на пелети от биомаса при изгарянето им в битов котел и проектиране и изграждане на когенерационна инсталация за оползотворяване на отпадъчни суровини.

Предмет на изследването е както комбиниран водогреен котел за изгаряне на пелети, част от съществуваща битова инсталация, така и анализ на ефективността на експериментална когенерационна инсталация с термичен маслен котел и ORC модул.

ГРАНИЦИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Изследванията, резултатите и анализа на ефективността са извършени на и за инсталации отговарящи на изисквания и законодателства на Европейският съюз (ЕС) и Република България.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За изпълнение на поставената цел и задачи са използвани различни методи.

1. *Изследване на енергийни характеристики на пет вида пелети.*
2. *Изследване на термични характеристики на пет вида пелети.*
3. *Моделиране на изгаряне на пелети в битов водогреен котел.*
4. *Анализ на ефективността на експериментална когенерационна инсталация за оползотворяване на отпадъчни суровини.*

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследванията, представени в дисертацията, са проведени на следните места:

1. Лаборатории на Технически университет – Варна;
2. Лаборатории на Технически университет – София;
3. Лабораторията „Термохимия и топлофизични изпитвания“ на ЦНИЛ при ХТМУ;
4. Изпитвателна лаборатория „Горива и масла“ на Топлофикация Русе АД.

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Получените резултати при изследване на горивния процес с биомаса показват, че това е тема с висока научна стойност и значителен практически принос за развитието на устойчивите енергийни технологии. Като се имат предвид изводите, направени в края на всяка от главите на настоящата работа, могат да се направят следните обобщения:

1. Проучванията подчертават, че калоричността, влагосъдържанието и пепелното съдържание на биомасата са критични параметри, определящи ефективността на горенето. Дървесните пелети показват отлични резултати като гориво, докато селскостопанските отпадъци изискват предварителна обработка за постигнат по-добри горивни характеристики.
2. Методите ТГ, ДТА и ДСК се доказаха като ефективни инструменти за оценка на термичните свойства на различни видове горива. Анализите показаха ключови температурни диапазони, които подпомагат при оптимизацията на горивните процеси и подобряването на ефективността на горивните системи.
3. Чрез прецизно оптимизиране на съотношението между гориво и въздух, както и чрез точен контрол на температурата на горене, значително се намаляват емисиите

на CO и NOx. Това подчертава ролята на биомасата като екологично устойчиво гориво, което редуцира въглеродния отпечатък.

4. Числените модели са доказано надеждни за прогнозиране на ефективността и емисиите на горивните системи. Те подчертават значението на оптималното разпределение на въздуха и прецизното проектиране на горивната камера за постигане на стабилност и висока производителност.

5. Анализирания експериментална когенерационна система с ORC модул, доказва способността си да преобразува отпадъчната топлина в електрическа енергия с висока ефективност. Тази технология е подходяща за интегриране в съвременни енергийни мрежи, като подобрява общата енергийна ефективност.

6. Създадена е цялостна методология за анализ и оптимизация на горивните процеси, която комбинира експериментални данни, термични анализи и симулации. Тази методология е универсална и приложима за широк спектър от горива и горивни технологии, като насърчава устойчиво развитие в енергийния сектор.

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Дисертационният труд е насочен към разработване на предложения за усъвършенстване на практическите аспекти, свързани с управлението на горивните процеси и оптимизацията на термичните режими в горивни системи и камерни пещи. Извършените изследвания върху измерването, управлението и оценката на технологичните параметри, както и анализа на ефективността на горивното пространство, предоставят основание да се счита, че следните предложения биха могли да намерят ефективно приложение в практиката:

1. Внедряването на автоматизирани системи за управление на горивния процес, включително регулиране на подаването на въздух и гориво, е ключов фактор за повишаване на енергийната ефективност. Това би позволило постигането на по-ниски нива на емисии, по-добра стабилност на горенето и минимизиране на загубите.

2. Инвестициите в технологии за предварителна обработка на биомасата, като сушене, раздробяване и гранулиране, биха спомогнали за повишаване на калоричността на горивото. Това не само би подобрило ефективността на горивния процес, но и би намалило емисиите на вредни вещества и риска от образуване на нежелани отлагания в горивните системи.

3. Внедряването на когенерационни технологии, базирани на органичен цикъл на Ренкин, в региони с висока наличност на отпадъчни суровини, би довело до значително повишаване на общата енергийна ефективност. Чрез оползотворяването на отпадъчната топлина тези системи биха допринесли за намаляване на въглеродните емисии и икономическа ефективност.

4. Прилагането на технологии за емисионен контрол, като селективна каталитична редукция и електростатични филтри, би осигурило значително намаляване на емисиите на NOx, CO и PM. Това е от съществено значение за съответствието с екологичните регулации и подобряване на качеството на околната среда.

5. Въвеждането на системи за мониторинг в реално време на ключовите параметри на горивния процес и емисиите би позволило динамично оптимизиране на изгарянето. Това би улеснило осигуряването на съответствие с регулаторните изисквания и би намалило оперативните разходи.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Резултатите от изследването са докладвани на:

- Зключителна конференция на „Месец на науката – Варна 2023 „Науката в служба на обществото“, СУ-Варна, секция „Технически науки“. Тема на доклада: „Изследване на характеристиките на димни газове на пелетен котел“;
- Зключителна конференция на „Месец на науката – Варна 2022 „Науката в служба на обществото“, СУ-Варна, секция „Технически науки“. Тема на доклада: „Анализ на енергийния потенциал на възобновяеми енергийни източници в Североизточен регион на България“;
- Международна конференция: 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), Plovdiv, Bulgaria – 2023, Тема на доклада "Energy Characteristic Analyses of Waste Wood Pellets".

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА ЗА ИЗГЯРЯНЕ НА ПЕЛЕТИ И ОТПАДЪЧНИ СУРОВИНИ В КОТЛИ

Ефективността на горивния процес при изгарянето на биомаса е тясно свързана с физичните и химичните свойства на горивото. Тези свойства не само определят количеството енергия, което може да бъде добито от биомасата, но също така влияят върху емисиите, стабилността на горенето и износването на оборудването. Основните фактори, обуславящи ефективността, включват влагосъдържание, пепелно съдържание и калоричност.

Обработката и подготовката на биомасата играят важна роля за подобряването на горивния процес. Характеристиките на биомасата за употреба като гориво значително се подобряват чрез изпълнение на етапите за обработка и подготовка. Всеки етап от обработката цели да подобри физичните, химичните и енергийните свойства на суровината, като същевременно намали нежеланите ефекти, като високо влагосъдържание, замърсявания и ниска калоричност.

Горивните процеси при биомасата включват три основни етапа: изпаряване на влагата, пиролиза и окисление. Всеки от тези етапи е критичен за ефективното преобразуване на енергията, съдържаща се в биомасата, в полезна топлинна или електрическа енергия. Разбирането на тези етапи е ключово за подобряването на горивните системи и намаляване на емисиите.

Методите за термичен анализ са важен инструмент за изучаване на горивните процеси при биомаса, позволявайки подробно разбиране на нейните термични свойства и поведението ѝ при различни температури. Те предоставят ценна информация, която е от съществено значение за подобряването на горивните системи и намаляването на емисиите. Най-широко използваните методи за термичен анализ на биомаса са термогравиметрията, диференциалният термичен анализ и диференциалната сканиращата калориметрия.

Горенето на пелети и отпадъчни суровини е термохимичен процес, при който енергията, съдържаща се в биомасата, се освобождава чрез окисление в присъствието на въздух или кислород. В хода на този процес горивото, биомаса или производни суровини, се преобразува в химични съединения, известни като продукти на горене, или димни газове. Разгледани са видовете котли за директно изгаряне, газификация и когенерация. Когенерационната система (или комбинирано производство на топлина и електричество) е енергийна технология, която използва едновременно генериране на електрическа и топлинна енергия от един източник на гориво. Основната идея на когенерацията е максималното оползотворяване на топлината,

която обикновено се губи при традиционното производство на електричество. Органичният цикъл на Ренкин е термодинамичен цикъл, който наподобява традиционния цикъл на Ренкин, използван в парните турбини. Основната разлика е в избора на работен флуид: докато в стандартния цикъл на Ренкин се използва вода/пара, в ORC се използва органичен флуид, който има по-висока молекулна маса и е подходящ за по-ниски температури на изпарение. Това прави ORC особено ефективен при използването на нискотемпературни източници на топлина, като биомаса, геотермална енергия, отпадна топлина от промишлени процеси и слънчева енергия.

Изводи от Глава 1

1. Твърдите горива от биомаса, като пелети и отпадъчни суровини, демонстрират висока енергийна ефективност и икономическа привлекателност, особено при използването на локални ресурси. Въпреки това, техните горивни характеристики варират значително в зависимост от физичните и химичните свойства на суровината, което налага необходимостта от стандартизация и оптимизация на процесите за обработка и изгаряне.
2. Прегледът на съществуващите горивни технологии показва значителен напредък при котлите за биомаса и когенерационните системи, които позволяват висока ефективност и намалени емисии. Все пак, липсват достатъчно данни за влиянието на различните типове суровини върху дългосрочната надеждност и производителността на тези технологии.
3. Емисиите на замърсители, като CO, NOx и фини прахови частици, остават значително екологично предизвикателство, въпреки използването на съвременни технологии за пречистване на отработените газове. В литературата има оскъдна информация относно дългосрочната ефективност на тези технологии при работа с различни видове биомаса.
4. Биомасата предлага значителни екологични и икономически ползи чрез оползотворяване на отпадъците и намаляване на парниковите газове. Все пак, липсват достатъчно данни за оптималното управление на веригата за доставка на биомаса, което включва събиране, транспорт и съхранение, за минимизиране на разходите и екологичния отпечатък.
5. Теоретичният анализ на горивните процеси и термохимичните свойства на биомасата показва необходимост от по-задълбочени експериментални изследвания, насочени към идентифициране на оптималните режими на горене и подходящите параметри за термична обработка на различни суровини.
6. Внедряването на когенерационните системи в локалните енергийни мрежи представлява значителен потенциал за повишаване на енергийната ефективност и намаляване на загубите. Въпреки това, липсата на данни за тяхната адаптивност към различни мащаби на приложение и видове биомаса ограничава тяхното широко разпространение.
7. От анализа е ясно, че изгарянето на биомаса е област с висок потенциал за развитие, но изисква значителни научни и технически усилия за оптимизация и преодоляване на настоящите ограничения. Това е ключово за осигуряване на устойчиво и екологично енергийно производство, което да отговаря на съвременните предизвикателства пред енергийния сектор.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ НА НАУЧНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

1. Избор на материали и пробни образи

Обект на изследване са различни видове пелети, произведени от български производители, иглолистна дървесина (ИД), широколистна дървесина (ШД), слънчогледови люспи (СЛ) и смес от иглолистна дървесина и слънчогледови люспи (ИД+СЛ), представени на фиг. 2.1 и табл.2.1.



Фиг. 2.1. Видове изследвани пелети

Таблица 2.1. Видове изследвани пелети

Пелети	P1	P2	P3	P4	P5
вид	Дървесни (Д)		Смесени (Д+С)		Слънчогледови (С)
материал	60% ИД + 40% ШД	70% ИД + 30% ШД	70% ИД + 30% СЛ	100% СЛ	100% СЛ

2. Методики за изследване на основните енергийни характеристики на пелети

За да се определят енергийните характеристики и качеството са направени изследвания на опитни образци от отпадъчни суровини под формата на прах, гранули и пелети с цел определяне на калоричност, пепелно съдържание и влагосъдържание.

2.1. Сертификат ENplus за пелети използвани в горивни инсталации

С въвеждането на единен европейски стандарт за качество на пелетите EN 17225-2, се въвежда и сертификат ENplus за пелети използвани в горивни инсталации за битова употреба, табл.2.2.

Таблица 2.2. Допустими стойности от сертификат ENplus

Параметър	Мерна единица	A1	A2	B
Влагосъдържание	%	≤ 10		
Съдържание на пепел	%	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 3,5$
Калоричност	MJ/kg	$\geq 16,5-19,00$	$\geq 16,3-19,00$	$\geq 16,0-19,00$

2.2. Изследване на калоричност

Топлината на изгаряне (калоричност) е количеството топлина, което се освобождава при пълното изгаряне на един килограм гориво. Съществуват два основни вида топлина на изгаряне в зависимост от условията на измерване: горна и долна топлина на изгаряне. Топлината на изгаряне на горивата се определя в различни състояния, които отразяват тяхното физическо и химично състояние при различни условия. При работното състояние горивото включва естественото съдържание на влага и пепел, характерни за него в момента на подаване в котела. Аналитичното състояние се характеризира със съдържание на влага, което е уравновесено с климатичните условия на лабораторното помещение след продължителен престой. Сухото състояние пък се отнася за гориво, изсушено напълно при температура от 102–105 °C, за да бъде премахната всякаква влага.

Горимата маса е условно състояние на горивото, което се разглежда без влага и пепел, и е важен показател за изчисляване на неговата ефективност.

В табл. 2.3 са представени коефициенти за преобразуване, които улесняват изчисляването на топлинните характеристики за различните състояния на горивото.

Таблица 2.3. Коефициенти за преобразуване състава на горивата

Състояние на горивото	Работна маса	Аналитична маса	Суша маса	Горима маса
Работна маса	l	$\frac{100 - W^r}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - W^r}$	$\frac{100 - W^r}{100 - W^r - A^r}$
Аналитична маса	$\frac{100 - W^r}{100 - W^a}$	l	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100 - W^r}{100 - W^a - A^a}$
Суша маса	$\frac{100 - W^r}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	l	$\frac{100}{100 - A^d}$
Горима маса	$\frac{100 - W^r - A^r}{100}$	$\frac{100 - W^r - A^a}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	l

Ако е известен елементния състав на горивото, топлината на изгаряне на твърди горива може да бъде преместена по формулата на Менделеев:

$$Q_i^r = 339,39 \cdot C^r + 1257 \cdot H^r + 108,94 \cdot (S^r - O^r) - 25(9H^r + W^r), \text{ kJ/kg} \quad (2.1)$$

За връзка между горната и долната топлина на изгаряне на горивото, може да бъде използвана формулата:

$$Q_i^r = Q_s^r - 2500 \left(\frac{9H^r}{100} + \frac{W^r}{100} \right), \text{ kJ/kg} \quad (2.2)$$

където: $r = 2500 \text{ kJ/kg}$ е топлината на кондензация на водната пара при барометрично налягане. Измерването на топлината на изгаряне на пелети е метод, базиран на термодинамичния принцип за топлинния баланс. Този подход осигурява висока точност при определянето на енергийната стойност на горивния материал, което е важно за оценка на неговата ефективност и потенциал за приложение. Измерването се осъществява в специализирана калориметрична уредба – КЛ 10, която позволява количествено определяне на топлината, отделена при пълно изгаряне на пробата.

2.3. Изследване на влагосъдържание

Изследването на общото влагосъдържание на различните видове пелети е ключов етап при оценката на тяхната енергийна стойност. Процедурата е проведена в съответствие с указанията на БДС стандарта, който определя методологията за измерване на влагата в горивни материали. Този процес включва използването на лабораторна апаратура и следване на експерименталните стъпки, за да се осигури прецизност и надеждност на получените резултати.

2.4. Изследване на пепелно съдържание

Определянето на пепелното съдържание на пелетни горива предоставя информация за съдържанието на неорганични остатъци, което е от съществено значение за оценка на тяхната пригодност за използване в отоплителни и енергийни системи. Процедурата е извършена в съответствие с изискванията на БДС стандарта, като включва подготовка, изгаряне и анализ на проби от отпадъчни суровини.

3. Методи за термичен анализ

Методите за термичен анализ са важни за изследване на физичните и химичните свойства на вещества и смеси чрез наблюдение на техните реакции при промени в температурата или времето. Пробата от изследваната система се подлага на контролирано топлинно въздействие, което може да бъде в динамичен режим (с непрекъснато загряване или охлаждане) или в статичен режим (с поддържане на постоянна температура, известен като изотермичен процес). При изследване на горива, като например пелети, най-често използваните методи са термогравиметрия, диференциално сканираща калориметрия и диференциален термичен анализ. Почти

не се извършват самостоятелно, най-често се комбинират ТГ и ДСК или ТГ и ДТА, като най-пълна информация за поведението на пелетите при процеса на изгаряне може да се получи при съвместното извършване и на трите метода.

3.1. Диференциален термичен анализ

Чрез ДТА се измерва разликата в температурата между изследвания образец и инертен референтен материал, когато те се подлагат на еднаква термична програма. В ДТА, топлината се подава едновременно към двете клетки, и се следи температурната разлика между тях. Тази температурна разлика предоставя информация за ендотермични и екзотермични процеси, като фазови преходи, разлагане и химически реакции.

3.2. Диференциална сканираща калориметрия

Чрез ДСК се измерва количеството топлина, необходимо за поддържане на еднаква температура в две калориметрични клетки – една съдържаща изследвания образец и другата съдържаща референтен материал. Този метод позволява директно измерване на топлинния поток, свързан с физически и химически промени в материала, като топене, кристализация, изомеризация и други термични събития. Основното предимство на ДСК пред ДТА е, че при ДСК се измерва директно енергията на процесите, което води до по-точни и количествени резултати.

3.3. Термогравиметрия

Чрез ТГ се измерва промяната в масата на образца като функция от температурата или времето, докато той се нагрява, охлажда или поддържа при постоянна температура в контролирана атмосфера. ТГ предоставя информация за термичната стабилност и състава на материалите.

Съвременното експериментално оборудване за термичен анализ, включващо ДТА, ДСК и ТГ, предоставя важни резултати при изследване на пелетни горива и други материали. Тези методи се допълват взаимно и осигуряват изчерпателна информация за термичните, химическите и физическите свойства на различни материали, което е от критично значение за научни изследвания, разработване на нови материали и контрол на качеството в индустриалното производство.

За нуждите на настоящото изследване е използван апарат тип Linseis STA PT 1600, показан на фиг. 2.7. Изследванията са проведени при две скорости - 5°C/min и 10°C/min и нагряване до 750°C.

4. Методика за измерване на димните газове

Измерването на димните газове е съществено с помощта на преносим газоанализатор "TESTO 340". Газоанализаторът е предназначен за прецизно измерване на параметри като съдържание на кислород и въглероден оксид в изходящите газове. Освен това, устройството отчита температурата на изходящите газове, температурата на въздуха за горене и температурата на околната среда в помещението, където е инсталиран котелът. Газоанализаторът функционира в съответствие с инструкциите, предоставени от производителя.

5. Заключение и бележки и изводи

1. Методиките, представени в тази глава, осигуряват необходимата база за изпълнението на разглежданите задачи, за да бъде постигната основната цел на дисертационния труд.

2. Използваните апарати притежават всички необходими метрологични качества, които гарантират точността и надеждността на проведените изследвания.

3. Изследванията на влагосъдържание, пепелно съдържание и калоричност са извършени в лабораториите на ТУ - Варна и ТУ - София.

4. Поради специфичния характер на някои от изследванията, като ДСК, ТГ и ДТА, те са проведени в Централната научноизследователска лаборатория (ЦНИЛ) на Химикотехнологичен и металургичен университет (ХТМУ), в лабораторията „Термохимия и топлофизични изпитвания“.

5. В изпитвателна лаборатория „Горива и масла“ на Топлофикация Русе АД са извършени изследвания за определяне на влагосъдържанието, пепелното съдържание и калоричната стойност на изследваните пелети, с основна цел да се верифицират и потвърдят точността и надеждността на получените резултати.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГОРИВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПЕЛЕТИ

1. Общи положения

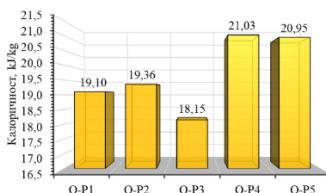
Глава 3 представя резултатите от експерименталните изследвания на разгледаните в глава 2 пелети, произведени от различни видове биомаса. Въз основа на използваните методи за анализ са направени измервания на основните параметри на качеството на пелетите. Извършен е и статистически анализ на проведените изследвания, с цел осигуряване на надеждност и обективност на получените резултати

2. Резултати от измерване на енергийните характеристики на пелети

Резултатите от изследванията на пелетите са систематизирани в таблици, които показват данни за минималните, максималните и средните стойности за влагосъдържание, пепелно съдържание и калоричност. Също така са представени и графично. За всяка група пелети са направени по 15 измервания, които са осреднени.

2.1. Резултати от изследване на калоричност

На фиг. 3.1 е представена графика със средни стойности на калоричността за петте вида пелети.



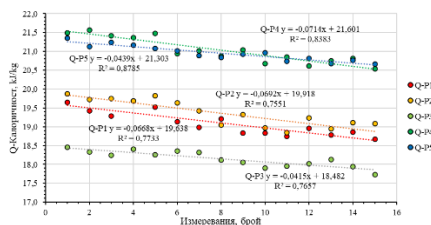
Фиг. 3.1 Средни стойности на калоричността за петте типа пелети

Таблица 3.2 Резултати от статистически обработка данни за калоричност

Параметри	Q-P1	Q-P2	Q-P3	Q-P4	Q-P5
Минимални стойности	18,67	18,85	17,73	20,54	20,67
Максимални стойности	19,68	19,88	18,46	21,57	21,36
Средна стойност	19,10	19,36	18,15	21,03	20,95
Стандартно отклонение	0,328	0,344	0,205	0,337	0,202
Коефициент на вариация	0,0172	0,0178	0,0113	0,0160	0,0097
Медиана	18,99	19,32	18,13	20,94	20,93
Стандартна грешка	0,168	0,183	0,107	0,146	0,076

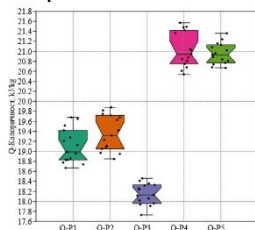
2.2. Резултати от статистическо изследване на калоричност

Уравненията на регресионните линии от фиг. 3.2 показват как калоричността на всеки вид пелети се изменя спрямо броя измервания. Всяка линия има наклон, който показва скоростта на намаляване на калоричността.



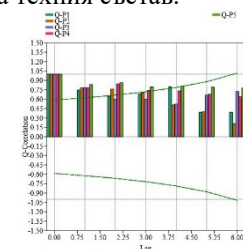
Фиг. 3.2 Регресионните линии на калоричността за петте типа пелети

Статистическа оценка на калоричността в графиката на фиг. 3.3, отразява времеви условия, влияещи върху калоричността на пелетите.



Фиг. 3.3 Сравнителен анализ на групите на калоричността за петте типа пелети

На базата на резултатите от фиг.3.4 от t-теста между различните групи пелети (Q-P1, Q-P2, Q-P3, Q-P4, Q-P5), при статистически значими разлики от р-стойност < 0,05 могат да се направи следната обосновка, че между Q-P1 и Q-P2 има най-малка разлика, но все пак тя е статистически значима р-стойност = 0,004. Това предполага, че тези два типа пелети имат сравнително сходни калорични стойности, макар и с малко различие, което се дължи на техния състав.



Фиг. 3.4 Резултати от t-теста за калоричността на корелацията в различните групи пелети при статистически значими разлики от р-стойност < 0,05

От направените анализи се забелязва висока калорична стойност на пелети Q-P4 и Q-P5 за индустриални цели, за които са най-подходящи. Пелети Q-P1 и Q-P2 са добри за по-икономични приложения. Пелети Q-P3 може да изискват оптимизация на производството или да бъдат подходящи за специфични приложения с по-ниски изисквания.

2.3. Резултати от изследване на влагосъдържание

В табл. 3.4. и на фиг. 3.5 е са представени средни стойности на влагосъдържанието за петте типа пелети.

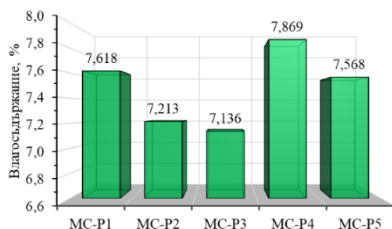
Таблица 3.4. Резултати от статистическа обработка данни за влагосъдържание

Параметри	MC-P1	MC-P2	MC-P3	MC-P4	MC-P5
Минимални стойности	7,41	7,11	6,91	7,71	7,42

Максимални стойности	7,85	7,42	7,35	8,02	7,71
Средна стойност	7,62	7,21	7,14	7,87	7,57
Стандартно отклонение	0,123	0,096	0,119	0,074	0,101
Коефициент на вариация	0,0161	0,0134	0,0166	0,0094	0,0133
Медиана	7,61	7,18	7,11	7,88	7,58
Стандартна грешка	0,072	0,061	0,064	0,041	0,050

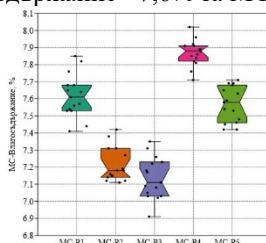
2.4. Резултати от статистическо изследване на влагосъдържание

Средните стойности на влагосъдържанието (фиг.3.5) показват, че MC – P2 и MC- P3 имат близки стойности, съответно 7,213% и 7,136%. При пелети MC – P1 и MC – P5 също се наблюдават сходно влагосъдържание – 7,618% и 7,568%. Най-ниското влагосъдържание е отчетено при пелети MC-P3 (7,136%), а най-високо – при пелети MC – P4 (7,869%).



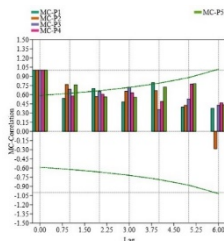
Фиг. 3.5 Средни стойности на влагосъдържание за петте типа пелети

Сравнението между видовете пелети (фиг.3.6) за MC-P1 и MC-P2 показва, че имат сходни стойности за влагосъдържание ~7,6% за MC-P1 и ~7,3% за MC-P2.



Фиг. 3.6 Сравнителен анализ на групите на влагосъдържание за петте типа пелети

Статистическа интерпретация на влагосъдържанието от фиг. 3.7 въз основа на резултатите от t-теста за петте групи пелети MC-P1, MC-P2, MC-P3, MC-P4 и MC-P5, показва, че могат да се направят следните сравнения между: MC-P1 и MC-P2 като



Фиг. 3.7 Резултати от t-теста за влагосъдържание на корелацията в различните групи пелети при статистически значими разлики от p -стойност $< 0,05$

разликата е статистически значима $p = 2,15 \times 10^{-23}$, което показва, че MC-P1 има значително по-високо влагосъдържание в сравнение с MC-P2; MC-P1 и MC-P3 статистически значима разлика за $p = 1,54 \times 10^{-26}$, като MC-P1 отново има по-високо влагосъдържание; MC-P1 и MC-P4 има значително по-високо влагосъдържание в сравнение с MC-P1 с значимост $p = 3,95 \times 10^{-15}$; MC-P1 и MC-P5 разликата е незначителна $p = 0,09$, което показва сходство във влагосъдържанието между тези две групи; MC-P2 и MC-P3 разликата е значима $p = 5.85 \times 10^{-5}$, като MC-P2 има по-високо влагосъдържание.

Разликите във влагосъдържанието могат да бъдат свързани с различия в материала, използван за производството на пелетите например съдържание на влага в суровините или производствения процес. MC-P4 е с най-високо влагосъдържание като могат да бъдат по-подходящи за среди, където се изисква задържане на влага, докато MC-P3 може да бъдат предпочитани за условия, изискващи по-сухи материали.

2.5. Резултати от изследване на пепелно съдържание

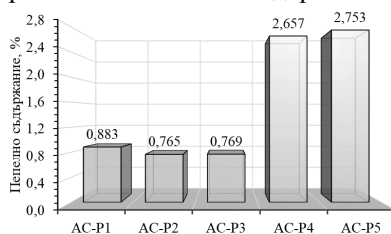
В табл. 3.6. и на фиг. 3.8 е представена графика със средни стойности на пепелно съдържание за петте вида пелети.

Таблица 3.6. Резултати от статистически обработка данни за пепелно съдържание

Параметри	AC-P1	AC-P2	AC-P3	AC-P4	AC-P5
Минимални стойности	0,84	0,71	0,72	2,61	2,67
Максимални стойности	0,93	0,81	0,82	2,72	2,84
Средна стойност	0,88	0,76	0,77	2,66	2,75
Стандартно отклонение	0,025	0,025	0,027	0,027	0,045
Коефициент на вариация	0,0285	0,0327	0,0357	0,0103	0,0165
Медиана	0,88	0,77	0,77	2,65	2,75
Стандартна грешка	0,014	0,016	0,016	0,017	0,027

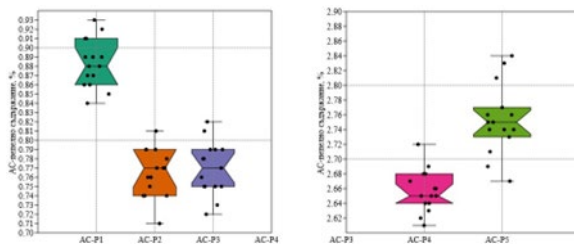
2.6. Резултати от статистическо изследване на пепелно съдържание

Общи статистически показатели на най-ниското пепелно съдържание от фиг. 3.8 е измерено при AC-P3=0,72% и AC-P4=2,61%. AC-P4 и AC-P5 са с по-високо съдържание на пепел над 2,6%. AC-P5 има най-висока средна стойност ~2,76%, което го прави по-малко ефективен от гледна точка на остатъчни материали. AC-P4 показва по-ниска стойност ~2,66% на данните в този диапазон, което може да бъде предимство при прогнозиране на остатъчното съдържание.



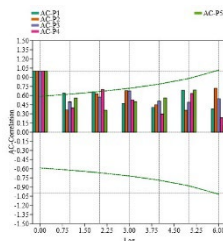
Фиг. 3.8 Средни стойности на пепелното съдържание за петте типа пелети

Разликите между видовете пелети могат да бъдат свързани с състава на суровините и технологията на производство. Резултатите от t-теста за пепелното съдържание между различните групи пелети AC-P1, AC-P2, AC-P3, AC-P4, AC-P5 от фиг.3.10 показва, че те са статистически значими.



Фиг. 3.9 Сравнителен анализ на групите на пепелното съдържание за петте типа пелети

Стабилност на съдържанието на пепел от фиг. 3.9 за видовете от AC-P1 до AC-P4 показва сравнително стабилна корелация във времето, което предполага равномерност в съдържанието на пепел. AC-P5 демонстрира значителни отклонения и отрицателна корелация при някои лагове, което може да отразява различен състав или процес на изгаряне.



Фиг. 3.10 Резултати от t-теста за пепелно съдържание на корелацията в различните групи пелети при статистически значими разлики от p -стойност $< 0,05$

Сравнително близки групи AC-P2 и AC-P3, където разликата между тях е малка и статистически незначима с $r = 0,26$, което показва сходно пепелно съдържание. Високо пепелно съдържание се наблюдава в AC-P4 и AC-P5, които значително се различават от останалите групи, което ги прави по-малко подходящи за приложения, изискващи ниско съдържание на пепел.

Ниско пепелно съдържание имаме в три групи AC-P1, AC-P2 и AC-P3 и сравнително стабилно пепелно съдържание, което ги прави подходящи за екологични или специални приложения. Подобни групи като AC-P2 и AC-P3 са почти идентични по отношение на пепелното съдържание.

2.7. Резултати от изследване на енергийните характеристики на пелети в акредитирана лаборатория

В акредитирана лаборатория са проведени анализи за определяне на влагосъдържанието, пепелното съдържание и калоричността на изследваните пелети, с цел верификация и потвърждаване на точността на получените резултати.

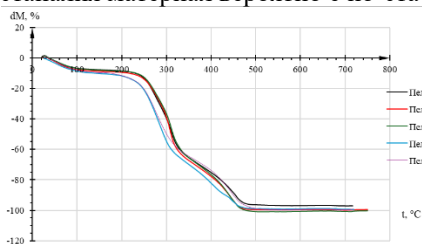
3. Резултати и анализ от изследванията на термичните характеристики

3.1. Резултати от изследване на ТГ, ДСК и ДТА на пелети

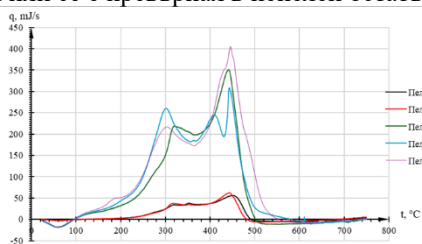
Фигури 3.12, 3.13 и 3.14 представят резултатите от ТГ, ДСК и ДТА на пелети от отпадъчни суровини при скорост на нагряване $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ до достигане на температура 750°C . Фигури 3.15, 3.16 и 3.17 представят резултатите от ТГ, ДСК и ДТА на пелети от отпадъчни суровини при скорост на нагряване $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ до

достигане на температура 750°C. Първоначалната маса в началото на експеримента е приета като референтна (100%), следователно всички проби започват промяната на масата си от 0%. Температурният диапазон на изследването е от стайна температура до 750°C.

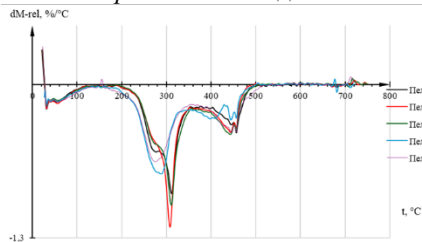
Данните, получени от термогравиметричния анализ разделят изследването на три етапа. Първият етап предоставя резултати от процеса на сушене (изпарение на влага) и отделяне на леки летливи вещества, отчита се малка загуба на маса в тази зона. Вторият разглежда горивният процес и отделяне на основни летливи вещества, наблюдава се значителна загуба на маса. При третия етап, процеса след изгаряне на въглеродният остатък, кривите показват малка или почти никаква загуба на маса. Това предполага, че по – голямата част от разградимия материал е изразходван, а останалия материал вероятно е по-стабилен или се е превърнал в пепелен остатък.



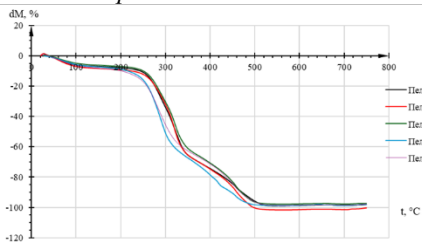
Фиг. 3.12. Резултати от ТГ при скорост 5°C/min до 750°C



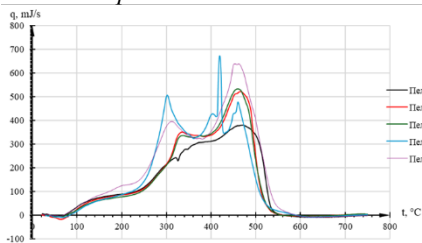
Фиг. 3.13. Резултати от ДСК при скорост 5°C/min до 750°C



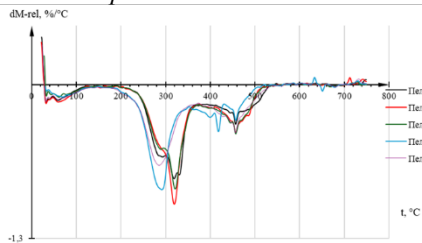
Фиг. 3.14. Резултати от ДТА при скорост 5°C/min до 750°C



Фиг. 3.15. Резултати от ТГ при скорост 10°C/min до 750°C



Фиг. 3.16. Резултати от ДСК при скорост 10°C/min до 750°C



Фиг. 3.17. Резултати от ДТА при скорост 10°C/min до 750°C

Таб. 3.7. представя резултатите за температурните диапазони на пелетите. P1 и P2 показват много сходно поведение по време на целият анализ, което е показателно за сходството на термичната стабилност на дървесните пелети. В сравнение с тях, P3 показват повече загуба на маса във втория етап, което е показател за по-високо

съдържание на летливи или лесно разградими вещества. Р4 и Р5 имат различна ТГ крива, в сравнение с тези на другите видове пелети. Различният модел на кривата на загубата на маса, показва разликата в суровините и наличието на термично устойчиви компоненти.

Таблица 3.7. Температурни граници на основните процеси на термично разлагане, °C

	Сушене	Горене	След изгаряне
P1	20...218*	218...400,5*	400,5...750*
	20...227**	227...406**	406...750**
P2	20...216*	216...407*	407...750*
	20...225**	225...412**	412...750**
P3	20...218*	218...406*	406...750*
	20...230**	230...413**	413...750**
P4	20...215*	215...401*	401...750*
	20...220**	220...414**	414...750**
P5	20...215*	215...407*	407...750*
	20...218**	218...410**	410...750**

* 5°C/min **10°C/min

При ДСК със скорост 5°C/min, се наблюдава сходство между Р1 и Р2, като може да се каже, че са с напълно сходен характер на кривите, Р3 и Р5 имат приблизително сходен характер, което вероятно се дължи на смесването на суровините в Р3. Слънчогледови пелети Р4, за разлика от Р5, които също са от слънчогледова суровина имат уникална крива, показана на фиг.3.13. Това е възможно поради разликата в сортовете слънчоглед и/или начинът на отглеждане на самото растение. При Р1 и Р2 първият екзотермичен пик е слабоизразен и се наблюдава при около 320°C, вторият екзотермичен пик е при 420 °C за Р1 и 455°C за Р2. При другите три вида пелети има по-ясно изразени екзотермични пикове, като за Р3 първият е при 314°C, а вторият при 443°C. При Р4 се отличават три пика, при 307°C, при 406°C и при 441°C, при Р5 са отново два пика – при 305°C и при 445°C.

Пиковите в ДТА кривите (фиг. 3.14.) показват скоростта на загуба на маса при определени температури, като максималната скорост на загуба на маса съответства на етапите на разлагане. Различните етапи показват различни процеси като изпарение, разлагане или окисление. Първоначално се наблюдава минимална загуба на тегло от изследваните вещества, като при достигане на температурата на възпламеняване е достигнат максималният пик на загуба на маса, след това до приключване на опита почти не се наблюдават загуби.

Графиките на термогравиметричен анализ от фиг. 3.15. показват, че при по-бърза скорост на нагриване материалите се разлагат по-късно. По-бързото нагриване води до по-рязко разлагане, което се дължи на интензивността на топлинният поток и бързото достигане на температурите на разлагане. Табл. 3.8. представя максималните скорости на загуба на маса по време на експериментите на пелетите при двете скорости на изпитване.

Таблица 3.8. Максимални скорости на загуба на маса при 5°C/min и 10°C/min

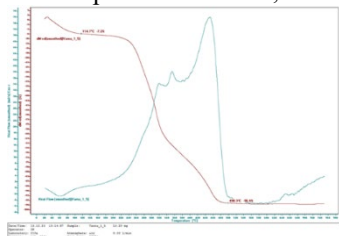
Пелети	5°C/min	10°C/min
P1	0,87 %/°C при 314°C	0,79 %/°C при 319°C
P2	1,19 %/°C при 309°C	1,01 %/°C при 319°C
P3	1,01 %/°C при 312°C	0,86 %/°C при 323°C
P4	0,75 %/°C при 290°C	0,88 %/°C при 284°C

P5	0,65 %/°C при 277°C	0,68 %/°C при 286°C
----	---------------------	---------------------

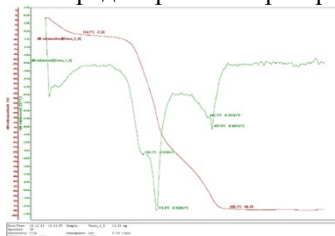
При по-бързата скорост на нагряване от 10°C/min по време на ДСК (фиг.3.16), преходите се изместват към по-високи температури. При тази скорост кривите на P2 и P3 са еднакви, като кривата на P5 се доближава до тях. Значителна разлика във вида на кривите има при P1 и P4. При P1 няма ясно изразен екзотермичен пик. При P2 има два, първият при 338°C, а вторият при 468°C. При P3 и P5 са също два, съответно при 342°C и 457°C, и 307°C и 454°C. При P4 трите стойности на пиковите са съответно – 305 °C, 421°C и 460°C. Това е резултат от недостатъчно време за топлинната енергия да се разпространи равномерно в пробата. Широките пикове показват разсейване на топлината и по-малка точност при фазови преходи. Това е възможно да се дължи на различни термични процеси, протичащи едновременно.

3.2. Резултати от изследване на ТГ, ДСК и ДТА на пелети от акредитирана лаборатория

На фиг. 3.18 и 3.19 са представени резултати от ТГ-ДСК и ТГ-ДТА на P1 при скорост на нагряване 5 °C/min, които са направени в акредитирана лаборатория.



Фигура 3.18. Примерни резултати от изследване на P1 – ТГ-ДСК при скорост на нагряване 5°C/min /Приложение 2/.



Фигура 3.19. Примерни резултати от изследване на P1 – ТГ-ДТА при скорост на нагряване 5°C/min /Приложение 2/.

3.3. Предимства и недостатъци на изследваните пелети

В Табл. 3.9. са обобщени основните предимства и недостатъци на изследваните пелети. В резултат на направените изследвания на горивните характеристики на изследваните пелети може да обобщим, че дървесните пелети са високоефективни, с ниско съдържание на пепел, но са по-скъпи. Слънчогледовите пелети са икономични и достъпни и имат по-високо съдържание на пепел, което ограничава ефективността им. Смесените пелети комбинират предимствата на двете суровини, но се доближават повече до дървесните по калоричност и пепелно съдържание, но са икономически изгодни като слънчогледовите.

4. Заключение и бележки и изводи

1. Пелетите Q-P4 и Q-P5 са с най-висока калоричност, което ги прави идеален избор за промишлени приложения, докато Q-P3, с най-ниската калоричност, са подходящи за използване в битови инсталации.
2. Пелетите МС-P3 са с най-ниско влагосъдържание, което ги прави стабилни и подходящи за приложения, изискващи сух материал. Високото влагосъдържание на МС-P4 ограничава ефективността им и изисква контролирани условия на съхранение.

3. Пелетите АС-Р3 имат най-ниско пепелно съдържание, което ги прави подходящи за екологични приложения с минимални остатъци. АС-Р5, с високо пепелно съдържание, изисква специфични горивни системи с повишена поддръжка.
4. Термичният анализ показва три етапа на разлагане (сушене, горене и следизгаряне). Р1 и Р2 демонстрират сходна термична стабилност, докато Р3 съдържа по-голямо количество летливи вещества. При по-бърза скорост на нагряване разлагането става по-интензивно, което е показател за различията в суровините.
5. Пелетите Q-Р5 и МС-Р3 се отличават с ниска вариация в състава и стабилност на параметрите, което ги прави предвидими и подходящи за надеждни приложения. Статистическите разлики между групите потвърждават значимостта на суровините и производствения процес за качеството на пелетите.
6. Q-Р4 и Q-Р5 са подходящи за промишлени цели, докато Q-Р1 и Q-Р2 могат да се използват за универсални и икономични приложения. Пелетите с ниско влагосъдържание и пепелно съдържание (МС-Р3 и АС-Р3) са оптимални за екологични и високоефективни горивни системи.
7. Резултатите подчертават необходимостта от оптимизация на суровините и производствените процеси за подобряване на енергийните и екологичните характеристики на пелетите. Включването на акредитирани лабораторни анализи гарантира надеждност и конкурентоспособност на пазарните продукти.

ГЛАВА 4. ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ИЗГАРЯНЕТО НА ПЕЛЕТИ В БИТОВ КОТЕЛ

1. Въведение в анализа на горивните процеси в битови котли при изгаряне на пелети

Анализирането на процесите в горивната камера предоставя възможност за подобряване на горивния процес чрез задълбочено разбиране на взаимодействията между турбулентните потоци, преноса на топлина и маса и химичните реакции. Съвременни софтуерни инструменти като Ansys CFX играят ключова роля в този процес, предлагайки детайлно моделиране и симулация на горивните процеси.

2. Експериментална постановка и анализ на димните газове при изгаряне на пелети в комбиниран битов водогреен котел

2.1. Комбиниран водогреен котел

Обект на изследването е комбиниран водогреен котел Bisolid Saver C 45, оборудван с пелетна горелка BiSolid GP 32_V и автоматизиран бункер за подаване на горивото (фиг. 4.1, фиг.4.2). Котелът е интегриран в съществуваща битова отоплителна инсталация и е проектиран да осигурява ефективно, надеждно и



Фиг.4.1 Общ вид на котела



Фиг.4.2 Общ вид на горелката



екологично отопление чрез използване на пелети като основен енергиен източник. Проектиран е с възможност за работа с два вида гориво – отпадъчна дървесина (като клони, вършини, чепеници и други подобни материали) и пелети. В конкретната инсталация той е конфигуриран за изгаряне на пелети.

2.2. Резултати от измерване на димни газове

За осигуряване на точни и надеждни резултати при измерване на димните газове, параметрите са отчетени след стабилизиране на работата на отоплителната инсталация. Допълнителни настройки на мощността на вентилатора са извършени, за да се гарантира оптимално подаване на първичен и вторичен въздух, което е критично за ефективното изгаряне и минимизиране на емисиите. За по-прецизно последващо моделиране на горивния процес, за всеки вид пелети са извършени 15 отделни измервания на димните газове в реални условия на инсталацията. Средните стойности, получени от измерването на димните газове са представени в табл. 4.6.

Таблица.4.6. Средни стойности получени при измерването на димни газове

	Мерна единица	Дървесни пелети	Смесени пелети	Слънчогледови пелети
Темп. изход	°C	72,6	74,1	75,9
Темп. вход	°C	52,9	53,7	55,4
Темп. ДГ	°C	96,2	96,9	98,1
Темп ОС	°C	20,9	21,4	21,7
O ₂	%	9,15	9,34	9,5
CO ₂	%	8,3	8,1	7,9
CO	mg/m ³	90,3	148,7	1095,3
NOx	mg/m ³	194,1	201,8	679,3
η	%	91,4	90,9	90,3
Мощност	kW	12,5	11,8	10,9
Коефициент на излишък на въздух		1,41	1,44	1,57
Разход на гориво	kg/h	7,6	7,3	6,8

Анализът на резултатите от табл. 4.6 показва, че дървесните пелети постигат най-висока ефективност на горивния процес, благодарение на оптималната си калоричност, ниско влагосъдържание и хомогенна структура. За разлика от тях, слънчогледовите пелети се характеризират с по-висока концентрация на въглероден оксид и азотни оксиди, което е резултат от по-високото съдържание на минерали и органични остатъци в суровината.

С цел подобряване на ефективността на горивния процес са извършени изследвания с две различни съотношения на подаване на първичен и вторичен въздух – 40/60% и 60/40%. Резултатите показват, че при съотношение 40/60% се постига по-добро смесване на горивото с въздуха, което води до намаляване на концентрациите на CO и NOx, особено при изгаряне на слънчогледови пелети. Въпреки това, по-високото съотношение на първичен въздух (60/40%) показва предимства при дървесните пелети, осигурявайки стабилен горивен процес и минимални топлинни загуби.

Моделът на горивния процес е разработен въз основа на средните стойности на измерените параметри, които са представени в табл. 4.6. Тези данни предоставят основа за оптимизация на горивната система и изследване на енергийните характеристики на пелетите.

Моделирането и компютърната симулация са удобни и надеждни подходи за анализ на възможни горивни процеси в котлите. За моделиране на горене се използват различни CFD техники като: директна числена симулация (Direct Numerical Simulation - DNS), симулация на големи вихри (Large Eddy Simulation - LES) и Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Директната числена симулация (DNS) изисква много финна пространствена и времева дискретизация (около 1 mm или по-малко). Този подход е удобен за потоци с ниско число на Рейнолдс и прости геометрии, и не е подходящ за широкомащабни симулации на горивен процес. Симулацията на големи вихри (LES) е подходяща за моделиране на „големи вихри“ при сравнително груби пространствени мрежи. CFD техниките, базирани на RANS също позволяват решения на модели на горене чрез метода на крайните обеми. Такива модели за газообразни и течни горива са добре разработени и доказани [137]. За съжаление изчислителните модели за изгаряне на твърдо гориво, все още са в процес на разработване, валидиране и проверка.

Целта на настоящото изследване е да се разработи и тества модел за бързо цифрово симулиране на изгаряне на твърдо гориво, базиран на RANS и модели на горене в газова фаза, налични в ANSYS. Идея за такова моделиране се споменава в [77]. Тук е разработено в детайли численото симулиране на отделен дим и топлина при изгаряне на различни видове пелети в котел за твърдо гориво.

3. Моделиране на изгарянето на пелетите в битов водогреев котел

Създаден е триизмерен геометричен модел на вътрешното газово пространство на котела, чиито граници на потоците са показани на фиг.4.3–фиг.4.7. Входовете за горивото, първичния и вторичен въздух, изходът на димните газове през дымохода са моделирани в зависимост от реалното им разположение в котела и пелетната горелка. През стените и пода на котела са моделирани чрез задаване на техния коефициент на топлопреминаване и на температурата на околната среда. Теплообменниците в котела са моделирани като стени с отрицателен топлинен поток, а вътрешните повърхнини са приети за адиабатни. Може да се симулират различни сценарии на изгаряне с вариране на топлинния товар, количеството на подаваното гориво и на първичен и вторичен въздух.

Вътрешното газово пространство на котела е дискретизирано от мрежа от крайни обеми, за да се реши числено системата от частични диференциални уравнения [11,16,17,20,26,28,35,77,137], включващи:

➤ уравнение на непрекъснатостта;

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial \tau} + \rho_k \operatorname{div} \vec{V}_k - J_{kk}^m = 0 \quad (4.1)$$

➤ уравнения на състоянието на газовете;

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{p}}{\bar{T} R \sum \frac{\bar{Y}_{ik}}{M_{ik}}} \quad (4.2)$$

➤ уравнения на количеството на движение при ненулева гравитация за моделиране на подемната сила;

$$\rho_k \cdot \frac{d\vec{V}_k}{d\tau} - \operatorname{div} P_k - \rho_k \cdot \vec{F}_k + J_{kk}^m \cdot \vec{V}_k - J_{kk} = 0 \quad (4.3)$$

➤ уравнение за съхранение на енергията;

$$\rho_k \cdot \frac{d\left(u_k + \frac{\vec{V}_k^2}{2}\right)}{d\tau} + \operatorname{div}(j_k^{ed} + j_k^{er}) - \operatorname{div}(P_k \cdot \vec{V}_k) - \rho_k \cdot \vec{F}_k \cdot \vec{V}_k + j_{kk}^m \cdot \left(u_k + \frac{\vec{V}_k^2}{2}\right) - j_{kk}^e = 0 \quad (4.4)$$

➤ модел на турбулентност k-ε;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho V_{xk}}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_{yk}}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_{zk}}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \cdot g \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \\ \mu_t \cdot \Phi - \rho \cdot \varepsilon + \frac{C_4 \cdot \beta \cdot \mu_t}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_\varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho V_{x\varepsilon}}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_{y\varepsilon}}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_{z\varepsilon}}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \cdot g \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\ C_1 \mu_t \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \Phi - C_2 \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu \cdot (1 - C_3) \beta \cdot \rho \cdot k}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\text{където } \mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

В различните комерсиални изчислителни среди константите за k-ε модела на турбулентност имат предварително определени стойности:

$\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $C_3 = 1$; $C_4 = 0$; $C_\mu = 0,09$; $\beta = 0$; $\sigma_t = 1$.

➤ модел на горене в газовата среда;

$$\frac{\partial(\rho_k \cdot Y_k)}{\partial \tau} + \nabla \cdot \rho_k \cdot Y_k \cdot u_k = -\nabla \cdot J_k + \dot{w}_k \quad (4.7)$$

➤ радиационен модел

$$\begin{aligned} \frac{dI(r,s)}{ds} &= -(K_{af} + K_{sf}) \cdot I(r,s) + K_{af} \cdot I_b(v,T) + \\ &\frac{K_{sf}}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} dI_f(r,s) \cdot \Phi \cdot (s \cdot s') d\Omega' + J \end{aligned} \quad (4.8)$$

Въздухът, газовата горивна смес и продуктът от реакциите се приемат за идеални газове: тяхната плътност се изчислява чрез съответните уравнения на състоянието. Възможните гранични условия са обобщени в табл. 4.7.

Таблица 4.7. Гранични условия

Граници	Променливи
Площ на горелката без отвори – вход на горивото (inlet)	Масов поток на газова смес, масови фракции на компоненти, температура на газа
Отвори на горелката – вход на първичния въздух за горене (inlets)	Масов поток на въздуха, масови фракции на компоненти, температура на въздуха
Отвор на тръба – вход на вторичния въздух за горене (inlet)	Масов поток на въздуха, масови фракции на компоненти, температура на въздуха
Димоход-изход на димните газове (отворени граници)	Външна температура и налягане
Вертикални и хоризонтални стени на топлообменника	Полезен топлинен поток към инсталацията
Вътрешни стени и прегради в газовото пространство (адиабатни граници)	Нулев топлинен поток
Граници с топлообмен: хоризонтални и вертикални стени на котела, под на котела, контактна зона на горелката с котела	Коефициенти на топлопреминаване от вътрешната повърхност към външната среда: $U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^n R_i}, \text{ W/(m}^2\text{K}^{-1}\text{)}$ степен на чернота на вътрешните стени на котела и температура на околната среда

Променливите R_{se} и R_i в уравнението, показани в табл. 4.7 са термичните съпротивления на външния граничен слой и твърдите слоеве на стената/покрива/подовете на котела, m^2KW^{-1} . Общият коефициент на топлопреминаване U през тези повърхности се използва, за да се моделират топлинните загуби през стените на котела и за да се намали необходимостта от по-големи компютърни ресурси. Последното гранично условие може да се използва с достатъчна точност за инженерни цели.

Масовите дялове на компонентите на газовото гориво и неговият масов поток се изчисляват при общото решение на уравненията 4.9-4.13:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{гр}} \cdot Q_{i,\text{гр}}^r = \dot{V}_{\text{гр}} \cdot Q_{i,\text{гр}}^r, \text{ kW} \quad (4.9)$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \dot{m}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{CO}_2}^{\text{гр}} = \dot{V}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{CO}_2}^{\text{гр}} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (4.10)$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гр}} = \dot{V}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гр}} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (4.11)$$

$$\dot{V}_{\text{SO}_2} = \dot{m}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{SO}_2}^{\text{гр}} = \dot{V}_{\text{гр}} \cdot V_{\text{SO}_2}^{\text{гр}} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (4.12)$$

$$\text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = 100\% \quad (4.13)$$

където: $\dot{Q}$ – топлинен поток, получен при горенето на твърдото и газообразното гориво, kW; $\dot{m}_{\text{гр}}$ – маса на твърдото гориво, изгоряла за единица време, kg s^{-1} ; $Q_{i,\text{гр}}^r$ – долна топлина на изгаряне на твърдото гориво, kJ kg^{-1} ; $\dot{V}_{\text{гр}}$ – обем на разход на газовото гориво при нормални физични условия, m^3s^{-1} ; $Q_{i,\text{гр}}^r$ – долна топлина на изгаряне на газообразното гориво, kJ m^{-3} ; $\dot{V}_{\text{CO}_2}$, $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\dot{V}_{\text{SO}_2}$ – обемни разходи на компонентите на димните газове при нормални физични условия, m^3s^{-1} ; $V_{\text{CO}_2}^{\text{гр}}$, $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гр}}$, $V_{\text{SO}_2}^{\text{гр}}$ – специфични обеми на димните газове при изгаряне на твърдо гориво при нормални физични условия, m^3kg^{-1} ; $V_{\text{CO}_2}^{\text{гр}}$, $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гр}}$, $V_{\text{SO}_2}^{\text{гр}}$ – специфични обеми на димните газове при изгаряне на газообразно гориво при нормални физични условия, m^3m^{-3} .

Таблица 4.8. Долна топлина на изгаряне и компоненти на димните газове [75,77]

Твърдо гориво	Смес на газово гориво
Компоненти (масови проценти): $C, H, O, N, S, A, W, \%$	Компоненти (обемни проценти): $CH_4, CO, H_2S, H_2O, \%$
$Q_{i,gr}^r = 4,187(81C + 246H - 26(O - S) - 6W), \text{kJkg}^{-1}$	$Q_{i,gr}^r = 358,17CH_4 + 126,35CO + 235,52H_2S, \text{kJm}^{-3}$
$V_{CO_2}^{gr} = 0,01855C, \text{m}^3\text{kg}^{-1}$	$V_{CO_2}^{gr} = 0,01(CO + CH_4), \text{m}^3\text{m}^{-3}$
$V_{H_2O}^{gr} = 0,112H + 0,0124W, \text{m}^3\text{kg}^{-1}$	$V_{H_2O}^{gr} = 0,01(2CH_4 + H_2S + H_2O), \text{m}^3\text{m}^{-3}$
$V_{SO_2}^{gr} = 0,000685S, \text{m}^3\text{kg}^{-1}$	$V_{SO_2}^{gr} = 0,01H_2S, \text{m}^3\text{m}^{-3}$

Параметрите на твърдото гориво при изгарянето му в табл. 4.8 са изчислени при известен състав на материала. Неизвестните променливи CH_4 , CO , H_2S , H_2O и $\dot{V}_{gr}$ могат да бъдат получени при използване на изразите за параметрите на изгаряне на газовата смес, представени в табл. 4.2 в уравнения (4.9-4.13).

След това масовият поток на газовото гориво $\dot{m}_{gr}$, kg s^{-1} и масовите фракции g на компонентите могат да бъдат изчислени по уравнения 4.14 и 4.15:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gr} = \dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{H_2S} + \dot{m}_{H_2O} &= \frac{CH_4}{100} \dot{V}_{gr} \cdot \rho_{CH_4} + \frac{CO}{100} \dot{V}_{gr} \cdot \rho_{CO} \\ &+ \frac{H_2S}{100} \dot{V}_{gr} \cdot \rho_{H_2S} + \frac{H_2O}{100} \dot{V}_{gr} \cdot \rho_{H_2O}, \text{kg s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

където: ρ_{CH_4} , ρ_{CO} и ρ_{H_2O} са плътностите на съответните газове при нормални физични

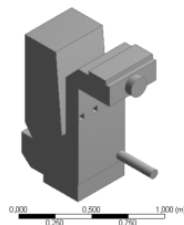
$$g_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{CH_4}}{\dot{m}_{gr}}; g_{CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{gr}}; g_{H_2S} = \frac{\dot{m}_{H_2S}}{\dot{m}_{gr}}; g_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{gr}}; \quad (4.15)$$

условия.

4. Числено симулиране на изгаряне на пелети във водогреен котел

Моделите по-горе са решени числено за симулиране на изгаряне на три различни видове твърдо гориво – дървесни, слънчогледови и смес от дървесни и слънчогледови пелети във водогреен котел BiSolid Saver C 45 и данни за него са дадени в табл. 4.1. Влиянието на ограждащите повърхности е отчетено чрез задаване на подходящи гранични условия, като всички повърхности в печното пространство са приети за адиабатни. Създаден е геометричен 3D модел (фиг.4.8) само на флуидното (газово) пространство на котела, като влиянието на ограждащите повърхнини е отчетено с въвеждането на съответните гранични условия. Вътре в печното пространство отделни повърхности са приети за адиабатни. Пелетите се изгарят в пелетна горелка BiSolid GP 32_B, и данни за нея са дадени в табл. 4.2. За всеки вид пелетно гориво се симулират по два различни сценария на подаване на въздуха при изменение на съотношението първичен/вторичен въздух съответно 40/60 и 60/40. Моделните изследвания са направени след валидиране и верифициране на модела сравняването на получените резултати с измерени такива в работни условия.

Мрежата от крайни обеми, която е генерирана се състои от 602674 елемента и 109329 възли при минимален/максимален размер на елементите 0,0007/0,07 m. Мрежата е по-фина където през отворите се подава първичния въздух и става самото изгаряне на пелетите (фиг.4.9), входа на вторичния въздух (фиг.4.10) и при дымохода



Фиг.4.8 Общ изглед на пещното пространство на котела

(фиг. 4.11). Полезният топлинен товар е зададен като отрицателен топлинен поток на геометричното място, където са разположени топлообменните повърхнини на котела. За съставът на пелетите се приема че има приблизително еднакъв състав. Подробности за процеса на горене са дадени в табл. 4.9-4.11. Изчисленият поток на SO_2 , отделен при горенето, е относително малък и концентрацията му в котела може да бъде пренебрегната. Приема се нулева концентрация на H_2S и оттам обемният поток V_{so_2} се добавя към V_{co_2} при изчисляването на състава на горивния газ. Тази стъпка опростява моделирането на горенето и позволява използването на двуетапен модел на горене Метан Въздух WD2 NO PDF, който е наличен в CFX. Газовата смес на модела съдържа всички възможни компоненти на газовете в котела. Моделът позволява и изчисляване чрез различните механизми на азотни оксиди NO_x , ако има подходящи условия за образуването им.

Стандартният модел k- ϵ се използва за симулиране на ефектите на турбулентност във флуидните потоци. Подемната сила, предизвикана от разликата в температурите на отделните газове, се моделира при разлики в плътността между местната и референтната плътност на околния въздух. Радиационният топлообмен се моделира чрез използване на P1-апроксимация и определяне на радиационните свойства на газовата смес във флуидното пространство на котела. Това се дължи на значителната концентрация и последващата емисионна способност на излъчващите газове (CO_2 , H_2O и CH_4) в пещното пространство.

Таблица 4.9. Състав, калоричност и газови потоци при изгаряне на ДП

Дървесни пелети	Горивна газова смес
Компоненти (масови проценти, горима маса): C=45,6%; H=6,1%; S=0,03%; O=47,87%; N=0,4%; A=0,73%; W=7,47%	Компоненти (обемни проценти, работен състав): $CH_4=34\%$; $CO=36\%$; $H_2S=0\%$; $H_2O=30\%$
$\dot{Q} = 13,676 \text{ kW}$	
$\eta = 0,914$	
$Q_{i,TF}^r = 16770 \text{ kJkg}^{-1}$	$Q_{i,TF}^r = 16726 \text{ kJkg}^{-1}$
$\alpha = 1,41$	$\alpha = 1,05$
$\dot{m}_{TF} = 0,0009 \text{ kgs}^{-1}$	$\dot{V}_{TF} = 0,0008 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{TF} = 0,0018 \text{ kgs}^{-1}$
	$g_{CH_4} = 0,260$; $g_{CO} = 0,482$; $g_{H_2O} = 0,258$
$V_{CO_2}^{TF} = 0,7765 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; $V_{H_2O}^{TF} = 0,7264 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; $V_{SO_2}^{TF} = 0,0002 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	$V_{CO_2}^{TF} = 0,700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; $V_{H_2O}^{TF} = 0,980 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$;

Таблица 4.10. Състав, калоричност и газови потоци при изгаряне на СП

Слънчогледови пелети	Горивна газова смес
Компоненти (масови проценти, горима маса): C=48,2%, H=5,7%, S=0,12%; O=45,28%, N=0,7%, A=2,47%, W=7,42%	Компоненти (обемни проценти, работен състав): $CH_4=38\%$, $CO=36\%$, $H_2S=0\%$, $H_2O=26\%$
$\dot{Q} = 12,071 \text{ kW}$	
$\eta = 0,903$	
$Q_{i,TF}^r = 18200 \text{ kJkg}^{-1}$	$Q_{i,TF}^r = 18159 \text{ kJkg}^{-1}$
$\alpha = 1,57$	$\alpha = 1,05$
$\dot{m}_{TF} = 0,0008 \text{ kgs}^{-1}$	$\dot{V}_{TF} = 0,0007 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{TF} = 0,0015 \text{ kgs}^{-1}$

	$g_{CH_4} = 0,292; g_{CO} = 0,484; g_{H_2O} = 0,225$
$V_{CO_2}^{TF} = 0,8057 \text{ m}^3\text{s}^{-1}; V_{H_2O}^{TF} = 0,6673 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$ $V_{SO_2}^{TF} = 0,0007 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	$V_{CO_2}^{TF} = 0,740 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$ $V_{H_2O}^{TF} = 1,020 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$

Таблица 4.11. Състав, калоричност и газови потоци при изгаряне на Смп

Смесени пелети	Горивна газова смес
Компоненти (масови проценти, горима маса): $C=49,6\%$, $H=5,6\%$, $S=0,06\%$; $O=44,37\%$, $N=0,37\%$, $A=0,69\%$, $W=7,07\%$	Компоненти (обемни проценти, работен състав): $CH_4=34\%$, $CO=36\%$, $H_2S=0\%$, $H_2O=26\%$
$\dot{Q} = 12,981 \text{ kW}$	
$\eta = 0,909$	
$Q_{i,TF}^r = 16710 \text{ kJkg}^{-1}$	$Q_{i,TF}^r = 16726 \text{ kJkg}^{-1}$
$\alpha = 1,44$	$\alpha = 1,05$
$\dot{m}_{TF} = 0,0008 \text{ kgs}^{-1}$	$\dot{V}_{TF} = 0,0008 \text{ m}^3\text{s}^{-1}; \dot{m}_{TF} = 0,0017 \text{ kgs}^{-1}$
	$g_{CH_4} = 0,260; g_{CO} = 0,482; g_{H_2O} = 0,258$
$V_{CO_2}^{TF} = 0,8487 \text{ m}^3\text{s}^{-1}; V_{H_2O}^{TF} = 0,6705 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$ $V_{SO_2}^{TF} = 0,0004 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	$V_{CO_2}^{TF} = 0,700 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$ $V_{H_2O}^{TF} = 0,980 \text{ m}^3\text{s}^{-1};$

Таблица 4.12. Гранични условия за числено симулиране на изгаряне на ДП във водогрееен котел при два начина на подаване на първичен/вторичен въздух за горене 40/60 и 60/40

Граници	Промениливи	
Отношение на първичен/вторичен въздух	40/60	60/40
Площ на горелката без отвори – вход на горивото (inlet)	Скорост $w = 0,111 \text{ m/s}$	
Отвори на горелката – вход на първичния въздух за горене (inlets)	Скорост $w = 1,924 \text{ m/s}$	Скорост $w = 2,885 \text{ m/s}$
Отвор на тръба – вход на вторичния въздух за горене (inlet)	Скорост $w = 0,518 \text{ m/s}$	Скорост $w = 0,365 \text{ m/s}$
Димоход-изход на димните газове (отворени граници)	Температура $t = 96,2^\circ\text{C}$	
Вертикални и хоризонтални стени на топлообменника	Топлинен поток $q = -12500 \text{ W}$	
Вътрешни стени и прегради в газовото пространство	Адиабатни граници	
Граници с топлообмен: хоризонтални и вертикални стени на котела, под на котела, контактна зона на горелката с котела	Коефициенти на топлопреминаване от вътрешната повърхност към външната среда: $U = 0,287, \text{ W/m}^2\text{K}$; степен на чернота на вътрешните стени на котела $\epsilon = 0,90$ и температура на околната среда $t_{oc} = 20,9^\circ\text{C}$	

Таблица 4.13. Гранични условия за числено симулиране на изгаряне на СП във водогрееен котел при два начина на подаване на първичен/вторичен въздух за горене 40/60 и 60/40

Граници	Промениливи	
Отношение на първичен/вторичен въздух	40/60	60/40
Площ на горелката без отвори – вход на горивото (inlet)	Скорост $w = 0,090 \text{ m/s}$	

Отвори на горелката – вход на първичния въздух за горене (inlets)	Скорост $w = 1,709$ m/s	Скорост $w = 2,564$ m/s
Отвор на тръба – вход на вторичния въздух за горене (inlet)	Скорост $w = 0,487$ m/s	Скорост $w = 0,325$ m/s
Димоход-изход на димните газове (отворени граници)	Температура $t = 98,1$ °C	
Вертикални и хоризонтални стени на топлообменника	Топлинен поток $q = -10900$ W	
Вътрешни стени и прегради в газовото пространство	Адиабатни граници	
Граници с топлообмен: хоризонтални и вертикални стени на котела, под на котела, контактна зона на горелката с котела	Коефициенти на топлопреминаване от вътрешната повърхност към външната среда: $U = 0,287$, W/m ² K; степен на чернота на вътрешните стени на котела $\varepsilon = 0,90$ и температура на околната среда $t_{oc} = 21,7$ °C	

Таблица 4.14. Гранични условия за числено симулиране на изгаряне на СМП във водогреев котел при два начина на подаване на първичен/вторичен въздух за горене 40/60 и 60/40

Граници	Промениливи	
Отношение на първичен/вторичен въздух	40/60	60/40
Площ на горелката без отвори – вход на горивото (inlet)	Скорост $w = 0,105$ m/s	
Отвори на горелката – вход на първичния въздух за горене (inlets)	Скорост $w = 1,826$ m/s	Скорост $w = 2,739$ m/s
Отвор на тръба – вход на вторичния въздух за горене (inlet)	Скорост $w = 0,520$ m/s	Скорост $w = 0,347$ m/s
Димоход-изход на димните газове (отворени граници)	Температура $t = 96,9$ °C	
Вертикални и хоризонтални стени на топлообменника	Топлинен поток $q = -11800$ W	
Вътрешни стени и прегради в газовото пространство	Адиабатни граници	
Граници с топлообмен: хоризонтални и вертикални стени на котела, под на котела, контактна зона на горелката с котела	Коефициенти на топлопреминаване от вътрешната повърхност към външната среда: $U = 0,287$, W/m ² K; степен на чернота на вътрешните стени на котела $\varepsilon = 0,90$ и температура на околната среда $t_{oc} = 21,4$ °C	

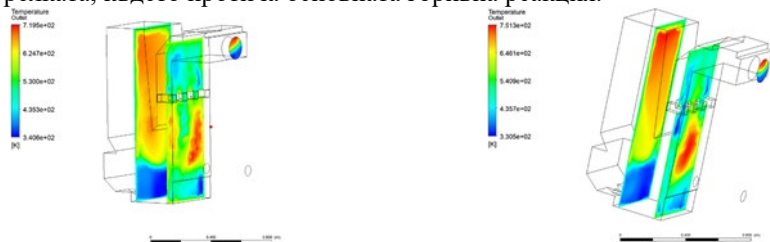
Моделите са решени числено при описаните по-горе условията за различните видове пелети и сценарии и са валидирани чрез масови и енергийни баланси на базата на получените резултати. Разликите между масовите потоци, влизащи и излизащи от пещното пространство са под 5 %. Получените резултати могат да се приемат за достоверни за оценка на процесите при моделираните варианти.

Изчислените температури, масови фракции на газовете в пешното пространство и полетата на флуидния поток са визуализирани на фигурите по-долу. Установената концентрация на CO и CH₄ на изхода в димохода е незначителна при всички моделирани сценарии. Следователно горивните процеси протичат напълно.

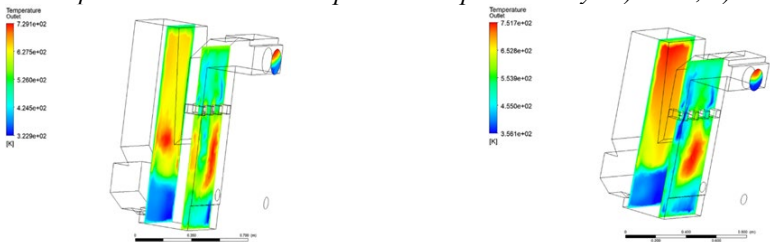
По-високи топлинни натоварвания върху стените на котела са установяват в областта на горелката. В този случай основният въздушен поток изкривява пламъка и смесването на вторичния въздух и димните газове е значително. В горещите зони температурните градиенти са високи, създавайки риск от термични напрежения и потенциални повреди, ако конструкциите не са изработени от огнеустойчиви материали. Температурните полета върху оградящите конструкции и вътрешните стени на котела ясно подчертават необходимостта от оптимизация на топлинната защита за намаляване на натоварванията и подобряване на надеждността.

5. Резултати от моделните изследвания

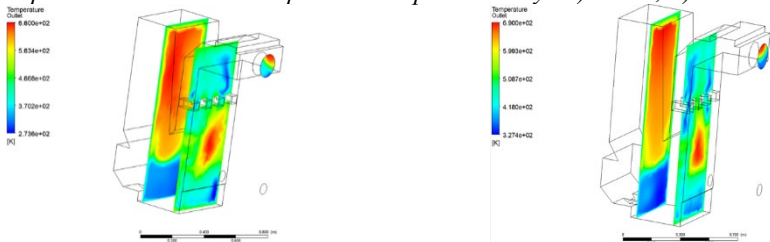
Разпределението на температурите в горивната камера е сред основните показатели за ефективността на горивния процес (фиг. 4.12-4.14). Резултатите от симулационните модели показват, че най-високите температури са съсредоточени около горелката, където протича основната горивна реакция.



Фиг.4.12. Температурно поле в горивната камера при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40



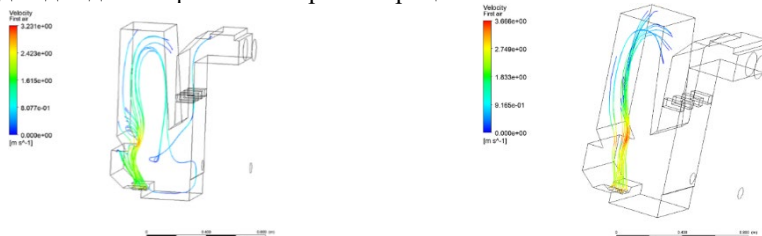
Фиг.4.13. Температурно поле в горивната камера при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40



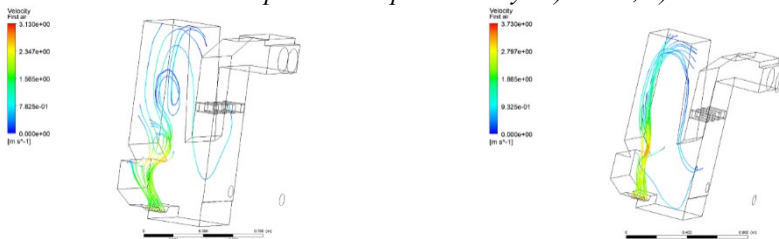
Фиг.4.14. Температурно поле в горивната камера при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Съсредоточаването на топлинния поток осигурява добро смесване на въздуха с продуктите на горене, което води до пълно изгаряне и висока ефективност. При оптимални условия изгарянето на дървесни пелети достига максимална температура, което подобрява топлообмена и повишава ефективността. Постепенното намаляване на температурата при отдалечаване от горелката свидетелства за ефективен пренос на топлина към стените на котела и топлообменниците, което е от решаващо значение за ефективността на отоплителната система. Този процес позволява значителна част от произведената топлина да се прехвърли към водата в котела, минимизирайки загубите от топлинна радиация.

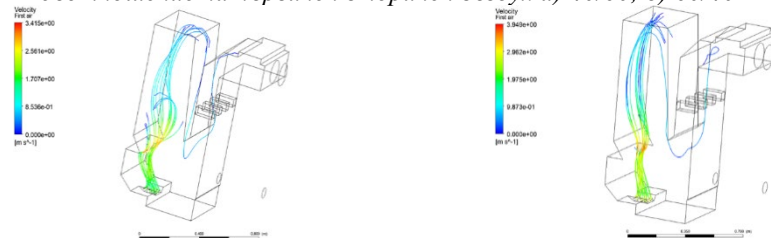
При съотношение 40/60 (фиг. 4.15-4.17), първичният въздух има по-малко влияние върху процеса на горене, докато вторичният въздух играе ключова роля за смесването на димните газове с допълнителния кислород. Това подобрява условията за по-пълно изгаряне на горивото, като намалява количеството на неизгорели остатъци и образуването на пепел. Подобрено смесване и оптимизиран достъп на кислород водят до по-ефективен горивен процес и по-ниски емисии на замърсители.



Фиг.4.15.Токови линии на първичен въздух при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

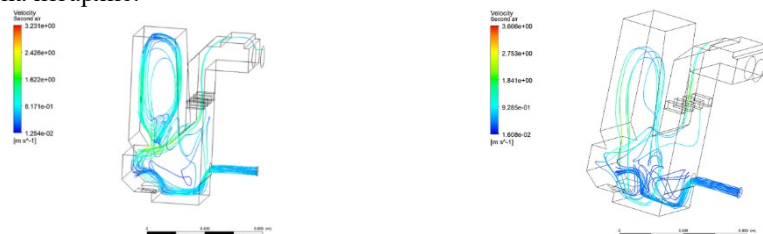


Фиг.4.16.Токови линии на първичен въздух при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

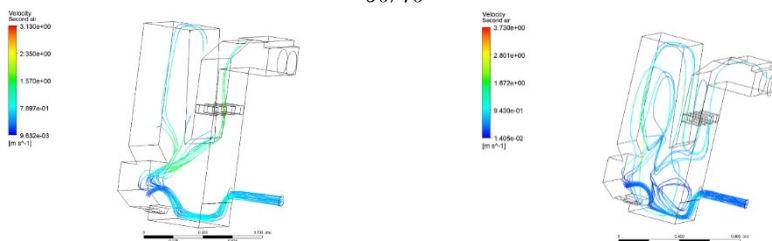


Фиг.4.17.Токови линии на първичен въздух при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

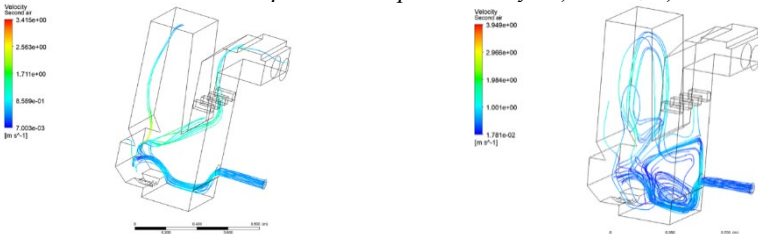
При съотношение 60/40 (фиг.4.18-4.20) количеството първичен въздух е високо, което води до увеличение на скоростта на горене, по-ниското съдържание на вторичен въздух затруднява пълното смесване и разреждане на горивните газове, като това оказва неблагоприятно влияние върху емисиите. Затова подобряването на работа при съотношението на подавания въздух 40/60 създава по-балансиран условия на изгаряне.



Фиг.4.18.Токови линии на вторичен въздух при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

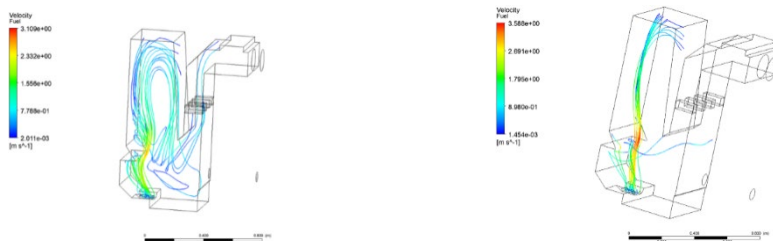


Фиг.4.19.Токови линии на вторичен въздух при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

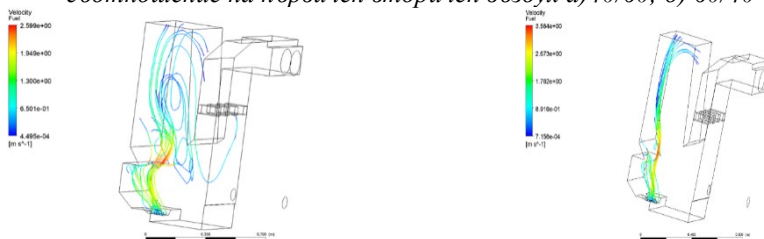


Фиг.4.20.Токови линии на вторичен въздух при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

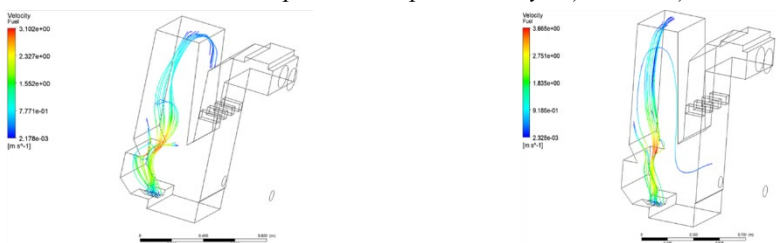
Турбулентността и подъемната сила на димните газове имат основна роля в горивния процес (фиг.4.21-4.23).



Фиг.4.21.Токови линии на димните газове при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40



Фиг.4.22.Токови линии на димните газове при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

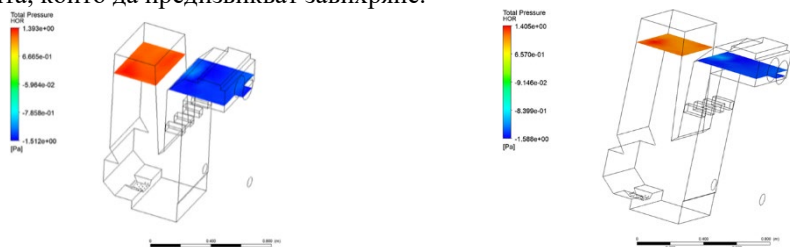


Фиг.4.23.Токови линии на димните газове при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

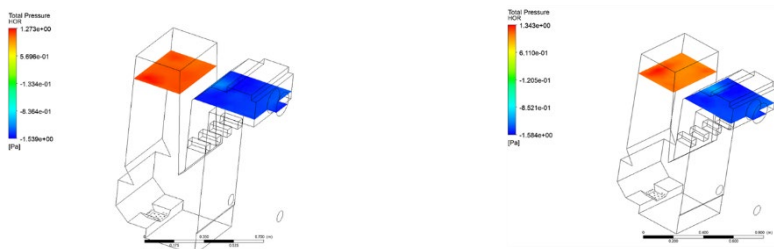
Турбулентният поток улеснява смесването на горивните газове с въздуха за да се поддържа стабилен пламък. Чрез използването на k-ε модел за описание на турбулентността се постига прецизно моделиране на вихровите структури и динамиката на флуидите, което е от решаващо значение за анализа и подобряване на горивните процеси. Подемната сила, генерирана чрез температурните разлики, подпомага движението на димните газове към дымохода и предотвратява възможността от техният застои в горивната камера. По този начин се поддържа постоянен поток от прясно гориво и въздух, което осигурява по-добра ефективност на топлообмена и равномерно изгаряне.

На фиг. 4.24-2.26 са представени симулации на разпределението на общото налягане. Зоните с високо налягане са оцветени в червено, както се очаква те са в зоната на горивната камера. Зоните с ниско налягане, в близост до изхода от котела – са в синьо. Наблюдават се сходни модели на разпределение и при двата начина на подаване на първичен и вторичен въздух. Плавният преход между зоните с високо и

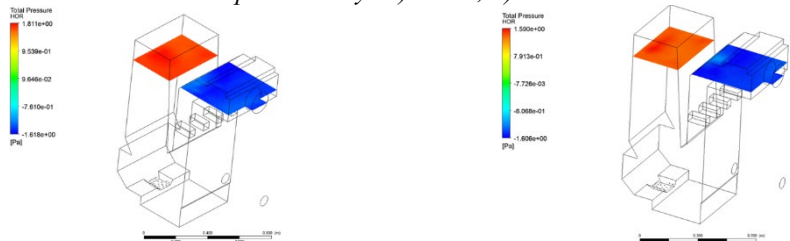
ниско налягане предполага устойчив поток без турбулентност или резки промени в геометрията, които да предизвикват завихряне.



Фиг.4.24.Налягане при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б)60/40



Фиг.4.25.Налягане при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б)60/40



Фиг.4.26.Налягане при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б)60/40

Симулациите демонстрират необходимостта от поддържането на най-благоприятно съотношения на въздушния поток и температурни профили, за да се постигне максимална ефективност и минимално вредно въздействие върху околната среда. Резултатите подчертават значението на прецизното моделиране и управление на горивния процес. Тези данни предоставят основа за бъдещи подобрения в конструкцията на котлите, като подчертават значението на използването на висококачествени материали, ефективно разпределение на въздуха и прилагане на технологии за контрол на турбулентността и подемната сила. Получените резултати от моделите са обобщени в Табл. 4.15.

Данните за съотношението на първичен към вторичен въздух показват, че при съотношение 40/60 по-голямата част от въздуха се подава като вторичен въздух, което осигурява по-добро смесване и по-висока ефективност на горене, особено при

пелети с по-ниско съдържание на летливи компоненти. Съотношението 60/40, при което по-голямата част от въздуха е първичен, е по-подходящо за пелети с бързо изгаряне и по-високо съдържание на летливи компоненти, тъй като позволява по-бързо първоначално изгаряне.

Таблица 4.15 Резултати, получени чрез моделиране на горивния процес

Параметър на изхода на котела	Дървесни пелети		Слънчогледови пелети		Смесени пелети	
Отношение на прър/ втор въздух	40/60	60/40	40/60	60/40	40/60	60/40
Масови фракции						
CH ₄	~0	0	~0	0	~0	0
CO	~0	0	~0	0	~0	0
CO ₂	25,7.10 ⁻²	26,9.10 ⁻²	28,3.10 ⁻²	24,2.10 ⁻²	25,4.10 ⁻²	25,10 ⁻²
H ₂ O	3,28.10 ⁻²	2,3.10 ⁻²	2,8.10 ⁻²	1,9.10 ⁻²	3,1.10 ⁻²	2,2.10 ⁻²
N ₂	66,5.10 ⁻²	64,8.10 ⁻²	62,5.10 ⁻²	68,1.10 ⁻²	66,7.10 ⁻²	67,3.10 ⁻²
NO	4,5.10 ⁻³	3,5.10 ⁻³	6,1.10 ⁻³	3,4.10 ⁻³	4,7.10 ⁻³	3,42.10 ⁻³
O ₂	40,1.10 ⁻³	56,2.10 ⁻³	56,8.10 ⁻³	54,8.10 ⁻³	41,5.10 ⁻³	51,6.10 ⁻³
Плътност на газовете, kg/m ³	77,4.10 ⁻²	77,3.10 ⁻²	85,1.10 ⁻²	80,4.10 ⁻²	77,5.10 ⁻²	76,6.10 ⁻²
Температура на газовете, K	511	523	472	490	514	521
Скорост на газовете, m/s	73,1.10 ⁻²	68,4.10 ⁻²	59,9.10 ⁻²	61,4.10 ⁻²	70,3.10 ⁻²	69,1.10 ⁻²
Масов разход на газовете kg/s	-1,14.10 ⁻⁴	-1,15.10 ⁻⁴	-1,00.10 ⁻⁴	-1,00.10 ⁻⁴	-1,1.10 ⁻⁴	-1,11.10 ⁻⁴

Масовите фракции на различните газове показват какъв е съставът на изходящите газове при различните видове пелети и съотношения на въздуха. Наличието на CH₄ и CO в изходящите газове е показател за непълно горене. От табл. 4.15 се вижда, че нивата на CH₄ и CO са практически нулеви за всички видове пелети и настройки на системата, което предполага, че е постигнато относително пълно изгаряне.

Въглеродният диоксид е индикатор за ефективността на горенето, като отчитането на високи стойности се свързва с добро окисление на въглеродните компоненти в пелетите. Слънчогледовите пелети при 40/60 съотношение на въздуха имат най-висока фракция на CO₂ (28,3.10⁻²), което предполага висока ефективност на горенето. Дървесните и смесените пелети имат сходни стойности на CO₂ фракцията, но малко по-ниски от тези на слънчогледовите, което е възможно да е поради ниска ефективност на окисляване.

Водната пара в изходящите газове представлява влагата в горивото и от самия процес на горене. Дървесните пелети имат най-висока H₂O фракция - 3,28.10⁻², което може да означава по-високо съдържание на влага в тях. Смесените пелети имат средни стойности на H₂O, което предполага, че добавянето на различни компоненти балансира нивата на влага.

Азотът като част от въздуха остава относително постоянен във фракцията си, като няма значителна химична реакция. Малките вариации при различните видове пелети може да се получат от разликите в съотношенията на въздуха.

Азотният оксид е основен замърсител и причина за образуване на азотни окиси. При слънчогледовите пелети се наблюдават най-високи нива - $6,1 \cdot 10^{-3}$, това може да се дължи на по-високото съдържание на азот в горивото. Смесените пелети с 60/40 съотношение на въздуха имат по-ниски нива - $3,42 \cdot 10^{-3}$, което показва, че промяната на съотношението на въздуха е начин за намаляване на образуването на азотни окиси.

Наличието на свободен кислород показва излишък на въздух. Слънчогледовите пелети показват по-високи нива на O_2 - до $56,8 \cdot 10^{-3}$, което предполага по-малко ефективно използване на наличния кислород. Дървесните и смесените пелети имат по-ниски нива на кислород, което се дължи на по-ефективният горивен процес.

Температура на газовете е важен фактор за ефективността на горенето и за образуването на замърсители. Слънчогледовите пелети при съотношение на въздуха 40/60 имат по-ниска температура - 472 K, което може да е знак за непълно горене или по-ниско количество топлина, отделена при горенето. Смесените пелети показват по-високи температури (514–521 K), което е показател за пълно изгаряне. Това може да се дължи на оптималното съотношение на въздуха.

Скоростта на газовете показва динамиката на потока в горивната камера и влияе на времето за престой на газовете, което от своя страна се отразява на степента на пълнота на горенето и образуването на замърсители. Дървесните пелети при съотношение 40/60 имат по-висока скорост - $73,1 \cdot 10^{-2}$ m/s, което предполага по-добро смесване на въздуха и горивото, но това може да е основната причина за намаляване на престоя на газовете в камерата и да намали пълното изгаряне. При смесените пелети скоростта е умерена - $69,1 \cdot 10^{-2}$ m/s при 60/40 съотношение, което осигурява баланс между времето за престой и ефективността на смесване.

Масовият разход на газовете показва количеството на изходящите продукти от горенето. При дървесните пелети със съотношение 60/40 масовият разход е най-висок - $1,15 \cdot 10^{-4}$ kg/s, което показва увеличено количество изходящи газове при оптимизиран горивен процес. По-високият масов разход също показва интензивно горене.

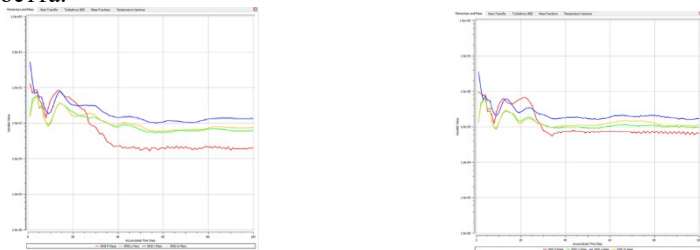
Предложените концепции за моделиране и числени симулации позволяват анализи на различни сценарии във водогрейни котли, промяна на товара, вида на горивото, съотношението на първичен към вторичен въздух за горене.

6. Анализ на ефективността на горивния процес за различните видове пелети и съотношения на въздуха

На фиг. 4.27 е представен анализ на сходимостта на симулациите за изгаряне на дървесни пелети при съотношения на първичен и вторичен въздух 40/60 и 60/40. На оста X са нанесени времеви стъпки, като симулацията достига до стабилно състояние след определен брой итерации. Оста Y представлява вариацията на остатъчните стойности за различните параметри (например маса, температура, турбулентност). Поведението на масата е проследено чрез червената линия, със синьо и зелено турбулентните параметри и чрез жълто – температурата.

При подаване на въздуха 40/60 първоначално, графиката показва спадане на стойностите за всички параметри, което е индикация за бързо адаптиране на модела. След няколко итерации стойностите се стабилизират на нива от порядъка на 10^{-3} до 10^{-4} . Всички параметри остават стабилни до края на симулацията, което е

предпоставка за заключение за добра сходимост и правилно функциониране на модела при съотношение 40/60. Това съотношение осигурява по-добра смес от първичен и вторичен въздух, което осигурява стабилен горивен процес. Динамиката на потока е представена чрез идентична тенденция в кривите на температурата и масата. При подаване на въздуха 60/40, както в първата симулация, остатъчните стойности спадат в началните стъпки. Стабилизирането на модела се наблюдава след 40 итерации, като средното ниво на остатъчните стойности е по-високо от това при симулацията с въздух 40/60. Това е най-силно изразено при параметрите на турбулентността.



Фиг.4.27.Сходимост-1 при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Сходимостта при изследване на енергийния баланс и радиационния пренос при дървесни пелети е представен на фиг.4.28. Резултатите за енергийния баланс са представени с червена крива, а преноса на топлина чрез радиация със зелена, при двата начина на подаване на въздуха.



Фиг.4.28.Сходимост-2 при изследване на енергийния баланс и радиационния пренос на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Кривите на охлаждане и нагряване на дървесните пелети са представени на фиг. 4.29. Двете графики представят поведението на параметрите скоростта на охлаждане и кривата на изгаряне. Както при останалите параметри, сходимостта на скоростта на охлаждане има рязък спад след първите 10 стъпки. По този начин се намаляват грешките при евентуалните изчисления за скоростта на охлаждане. Стабилизирането се получава след 20 стъпки, като малките колебания в кривата показват, че стойностите са в допустими граници.



Фиг.4.29.Сходимост-3 при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

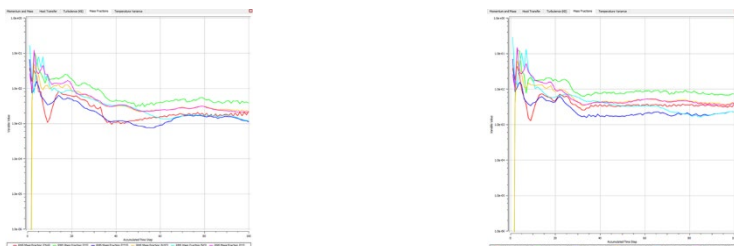
Сходимостта на изгарянето също започва при високи нива, като при първите 20-30 стъпки се отчита по-бавно спадане в сравнение с кривата на охлаждане. Това индикира за сложността на изчисленията на турбулентността. Стабилизирането е при ниски нива, в сравнение с тези при кривата на охлаждане. Линията има почти хоризонтален вид след около 50 стъпки.

Графиките на фиг. 4.30 представят поведението на масовите фракции на различни компоненти на димните газове в процеса на изгаряне - O_2 , CO_2 , CO и H_2O . Остатъчните стойности намаляват рязко след първите 10 стъпки. Моделът адаптира бързо поведението на O_2 по време на изгаряне, като в края на симулацията сходимостта е добра.

Подобно на O_2 , остатъчните стойности на CO_2 също намаляват след първите 10-20 стъпки. Не се наблюдават значителни отклонения. CO_2 достига нива по-ниски от тези на O_2 , което спомага за по-добри изчисления. CO_2 е основният продукт за оценка на ефективността на горене.

CO в началото има сравнително високи стойности, но намалява по-бавно в сравнение с O_2 и CO_2 . Това може да се дължи на сложността на процесите, свързани с непълното изгаряне. Остатъчните стойности на CO се стабилизират при стойности близки до тези на CO_2 .

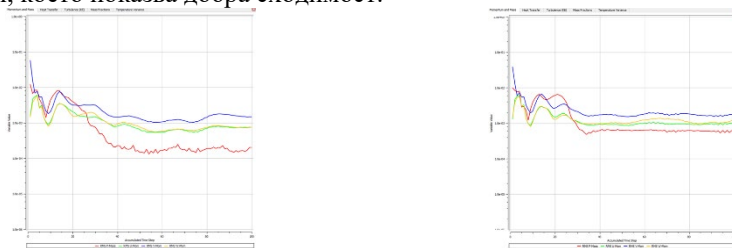
H_2O показва сходно поведение с CO_2 , като остатъчните стойности спадат рязко в началото. Параметърът H_2O е силно зависим от горивния процес и присъствието на O_2 . В края на симулацията H_2O достига остатъчни стойности, които демонстрира добра сходимост.



Фиг.4.30.Сходимост-4 на масовите фракции (O_2 , CO_2 , CO , H_2O) при изгаряне на дървесни пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

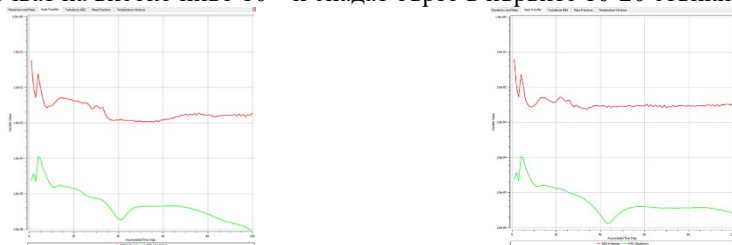
От графиките на фиг. 4.31 се вижда, че сходимостта на параметри, като маса, скорост и турбулентност, в процеса на изгаряне на пелети от смесена суровина. Началните стойности за масата започват на високо ниво 10^{-2} и спадат рязко в първите

10-15 стъпки. В края на симулациите стойностите остават стабилни с минимални колебания, което показва добра сходимост.



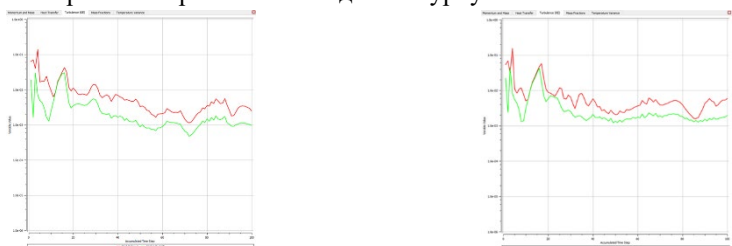
Фиг.4.31.Сходимост -1 при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Поведението на два параметъра в процеса на изгаряне на пелети от смесена суровина е представено на фиг. 4.32. Остатъчните стойности на енергията, представени с червена крива, започват с високи стойности 10^{-2} и спадат значително в първите 10 времеви стъпки. Остатъчните стойности за радиацията (зелената крива) също започват на високо ниво 10^{-2} и спадат бързо в първите 10-20 стъпки.



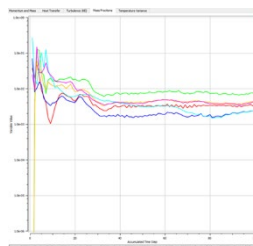
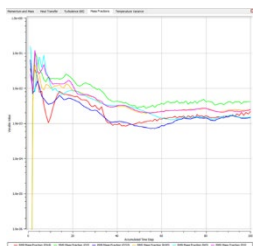
Фиг.4.32.Сходимост - 2 при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Графиките на фиг. 4.33 представят поведението на други два параметъра в процеса на изгаряне - скорост на охлаждане и турбулентност.



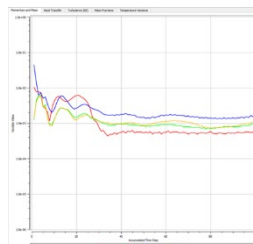
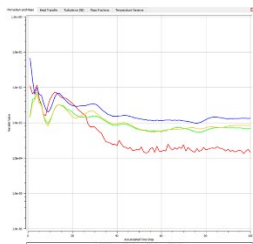
Фиг.4.33.Сходимост - 3 при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Сходимостта при изгаряне на смесени пелети: масови фракции на основните газове (O_2 , CO_2 , CO , H_2O) е представена на фиг.4.34. Графиките представят поведението на масовите фракции на основните газове в процеса на изгаряне на смесени пелети - O_2 , CO_2 , CO и H_2O .



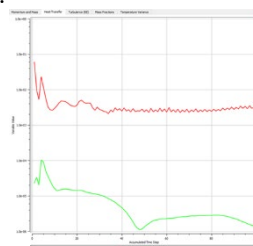
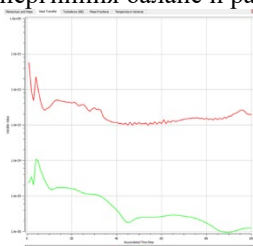
Фиг.4.34.Сходимост - 4 при изгаряне на смесени пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Сходимостта при изгаряне на слънчогледови пелети е представена на фиг.4.35. Графиките представят поведението на основните параметри при изгаряне на слънчогледови пелети, включително маса и скоростите на турбулентност.

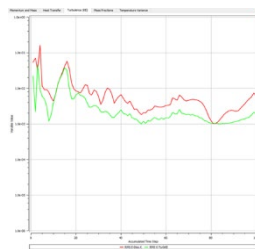
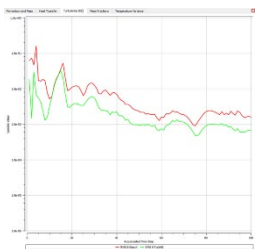


Фиг.4.35.Сходимост - 1 при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

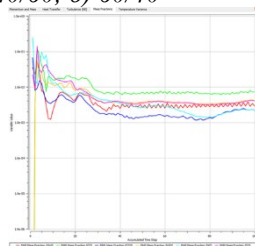
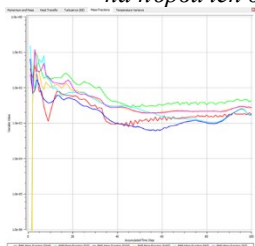
Анализът на сходимостта при изгаряне на слънчогледови пелети, относно енергия и радиация е завършен чрез графиките на фиг. 4.36. Графиките показват поведението на два от основните параметъра в процеса на изгаряне на слънчогледови пелети - енергийния баланс и радиационния пренос.



Фиг.4.36.Сходимост - 2 при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40



Фиг.4.37.Сходимость - 3 при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40



Фиг.4.38.Сходимость - 4 при изгаряне на слънчогледови пелети при съотношение на първичен вторичен въздух а) 40/60; б) 60/40

Анализ на сходимостта при изгаряне на слънчогледови пелети - охлаждане и турбулентност се извършва чрез фиг. 4.37.

Сходимостта на изгарянето на някои масови дялове от димните газове е разгледана чрез фиг. 4.38. Графиките представят поведението на масовите фракции някои от елементите на димните газове в процеса на изгаряне O_2 , CO_2 , CO и H_2O .

7. Заключение бележки и изводи

1. Проведените изследвания върху дървесни, слънчогледови и смесени пелети демонстрират, че дървесните пелети постигат най-висока ефективност, благодарение на ниското влагосъдържание и хомогенния състав. Смесените пелети предоставят балансиран показател между калоричност и екологичност, докато слънчогледовите изискват оптимизация поради по-високите емисии.

2. Изследването на съотношенията 40/60 и 60/40 за първичен и вторичен въздух показва, че 40/60 осигурява по-добро изгаряне и по-ниски емисии за дървесни пелети. При 60/40 смесването е по-ефективно за горива с високо съдържание на летливи вещества, като слънчогледовите пелети, но това води до увеличаване на NO_x емисиите.

3. Регистрирани са минимални стойности на CO и CH_4 в изходящите газове при дървесни и смесени пелети, което свидетелства за пълно изгаряне. Високото съдържание на азот в слънчогледовите пелети допринася за повишени NO_x емисии, което изисква по-добра оптимизация на въздушните потоци.

4. В зоната на горелката са отчетени най-високите температури, достигащи до $1100^\circ C$, което създава условия за ефективно изгаряне. Създадените температурни градиенти в горивната камера изискват високотехнологични материали за защита на горелката и стените на котела.

5. Числените симулации с k-ε турбулентен модел и радиационен трансферен модел предоставят прецизни данни за топлообмена и динамиката на газовите потоци.

Оптимизацията чрез тези методи позволява постигане на по-ниски емисии, намаляване на топлинните загуби и подобряване на енергийната ефективност.

6. Дървесните пелети генерират най-ниски емисии на NO_x и CO, докато слънчогледовите пелети изискват по-строги настройки за контрол на въздушните потоци и температурата. Смесените пелети предоставят балансирано решение с добри екологични и енергийни показатели.

7. Изследването подчертава значението на точния контрол на съотношението въздух-гориво, динамиката на горивния процес и температурата в горивната камера. Този подход позволява адаптиране на горелките към различни видове пелети.

8. Числените модели, използвани в изследването, показват разлика под 5% между предвидените и измерените данни, което гарантира тяхната надеждност за инженерни приложения и последваща оптимизация.

9. Анализите показват, че използването на дървесни и смесени пелети е икономически изгодно и енергийно ефективно при подходящи настройки на горивната камера. Това прави тези горива предпочитан избор за битови котли, съобразени с екологичните стандарти.

10. Разработването на адаптивни горивни системи, които позволяват автоматична настройка спрямо характеристиките на различните пелети, би могло значително да повиши ефективността на горивния процес. Интеграцията на числени модели в проектирането на горелки и котли предлага устойчиво решение за намаляване на емисиите и оптимизиране на ресурсите.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА КОГЕНЕРАЦИОННА СИСТЕМА ЗА ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ НА ОТПАДЪЧНИ СУРОВИНИ

1. Предпоставки и цели на анализа на ефективността на експерименталната когенерационна системи за отпадъчна биомаса

Проектирането на тези системи включва няколко основни стъпки: първо, изборът на подходящи материали и суровини, които могат да осигурят стабилен и ефективен горивен процес. Съставът, влажността и калорийната стойност на биомасата играят важна роля за ефективността на процеса и определят избора на технологиите. Втората стъпка е определянето на оптималната конфигурация на когенерационната система, която ще осигури максимално оползотворяване на енергийния потенциал на суровината. Целите на тези системи също така включват намаляване на загубите на топлинна енергия чрез рециклиране на отпадъчната топлина и нейното интегриране в други производствени процеси. В този контекст когенерационните системи предлагат идеална платформа за повишаване на енергийната ефективност на промишлените предприятия и за подпомагане на местните общности, осигурявайки им надежден достъп до електроенергия и топлина.

2. Анализ на ефективността на експериментална когенерационна инсталация за оползотворяване на отпадъчна биомаса

Експерименталната когенерационна инсталация е разработена въз основа на предложения и инвестиционни планове за изграждане на ефективна система за производство на енергия от биомаса. Основният ресурс за гориво е отпадъчна дървесина, която ще захранва котел. Термичното масло, загрято от котела, ще се използва за отопление на органичен работен флуид, който ще бъде насочен към ОЦР (Органичен цикъл на Ренкин) с модул. Подготвителните дейности включват:

Подготвителни дейности - включват изкопни работи и изравняване на терена, за да се осигури стабилна основа за всички съоръжения;

Доставка и монтаж на котела за биомаса - инсталирането на котела, който ще използва дървесни отпадъци, за да генерира топлина, необходима за ORC процеса;

Инсталация на ORC модул и допълнително оборудване - модулът ще преобразува топлинната енергия в електрическа, като същевременно генерира и топлинна енергия за отопление;

Изграждане на производствено хале, воден резервоар и допълнителни съоръжения - тези съоръжения ще гарантират безпроблемното съхранение на горивото и постоянен достъп до охлаждаща вода;

Изграждане на трансформаторна станция и електрическо свързване - за да се осигури стабилно включване на генерираната електрическа енергия към националната електрическа мрежа.

3. Оценка на въздействието на експерименталната когенерационна система върху енергийния баланс на България

Според предварителното проучване, при инсталирана мощност от 1 156 kW_{el} на генераторните терминали, когенерационната система ще генерира 6 686 MWh/y (като собственото потребление на системата е изключено).

4. Местоположение на експерименталната когенерационната система

Експерименталната когенерационна система е изградена в район с наличие на значителни количества дървени отпадъчни суровини. Вследствие на добро развитие на дърводобивна промишленост, тук се генерират множество дървени остатъци и странични продукти, които могат ефективно да се използват като ресурс за когенерационната инсталация. Този ресурс не е само леснодостъпен, но и устойчив, тъй като идва от производствената дейност на предприятията и работниците, занимаващи се с дървообработване. Използването на дървесни отпадъци като суровина, прави система екологична и подпомага местната икономика чрез оползотворяване на ресурс, който в противен случай би останал неизползван.

5. Описание на избраната екологична технология

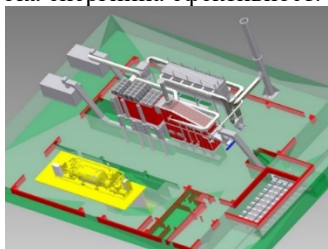
Избраната система се състои от два основни блока: котел на биомаса за производство на термично масло и ORC модул за производство на електроенергия. За изграждането на когенерационната инсталация за биомаса са закупени два парцела. Първият парцел е предназначен за самата инсталация, а вторият - за изграждането на голям склад за отпадъчна биомаса. На фиг. 5.2 е показан общ изглед на завършената централа след приключване на строителството.



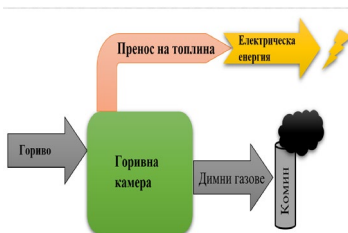
Фиг. 5.2. Общ вид на изградената централа

5.1. Описание на когенерационна инсталация с термален маслен котел и ORC модул

Общият изглед на цялата когенерационна инсталация е представен на фиг. 5.5, която визуализира основните компоненти и разположението на съоръженията. На фиг. 5.6 е представена диаграма, която показва движението на горивото, топлинните потоци, енергийните връзки и маршрута на димните газове, като подчертава връзките между отделните компоненти и начините, по които те взаимодействат за постигане на висока енергийна ефективност.



Фиг. 5.5. Общ преглед на когенерационната система за биомаса



Фиг. 5.6 Основни потоци в системата

Основните елементи на инсталацията включват горивоподаваща система, състояща се от силос с подвижна плоча, конвейър за подаване на горивото, транспортна система до двуверижна захранваща система, шнекове, горивна камера, носеща конструкция, подвижна скара за извличане и управление на пепелта, топлообменник, економайзери; инсталация за потока на димните газове, съставена от пречиствател, димни връзки, смукателен вентилатор и комин; система за пренос на топлина и производство на електроенергия, която включва охладителна линия с термично масло и ORC модул.

5.2. Технически данни на компонентите и принцип на работа

Системата включва нов биомасов котел от тип Global/G 500 OD, който е свързан с ORC модул Turboden 12-HRS Split W.A. за комбинирано производство на електрическа и топлинна енергия. Основното оборудване е представено на фигури 5.12 и 5.13, които представят цялостната архитектура на инсталацията и връзките между основните компоненти. Котелът и ORC модулът са оптимизирани за работа с биомаса, като осигуряват максимално оползотворяване на горивото и висока енергийна ефективност.



Фиг. 5.12. Котел



Фиг. 5.13. ORC модул

5.3. Принцип на работа на котела на отпадъчна дървесна биомаса

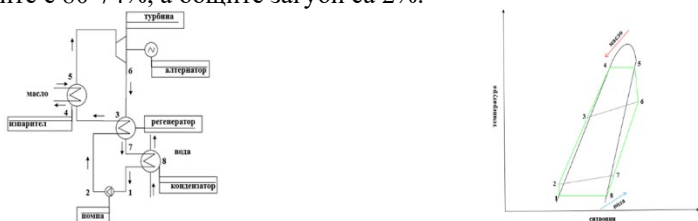
Дървесните отпадъци се подават в горивната камера. В камерата също се подават първичен, вторичен и третичен въздух. Горещите димни газове, продукт на

процеса на горене, се използват за загряване на термично масло. Главният топлообменник плюс Економайзер 1 се използват за подгръване на термично масло, постъпващо от Високотемпературния топлообменник на ORC модул – от 254 °C до 314 °C. Економайзер 2 се използва за подгръване на термично масло, постъпващо от нискотемпературния топлообменник на ORC модул – от 154 °C до 254 °C. Економайзер 3 се използва за подгръване на подавания въздух (първичен, вторичен и третичен). Нагрятото термично масло ($Q=174 \text{ m}^3/\text{h}$, $T=314 \text{ }^\circ\text{C}$) се подава към високотемпературния топлообменник на ORC модула и се използва за нагръване на органичния флуид. След този топлообменник термичното масло се разделя на 2 потока с температура 254 °C: $163 \text{ m}^3/\text{h}$ се връщат към топлообменниците на котела за биомаса и $11 \text{ m}^3/\text{h}$ се подават към нискотемпературния топлообменник на ORC модула. Тези $11 \text{ m}^3/\text{h}$ се охлаждат от 254 °C до 154 °C и се транспортират до економайзер 2 на котела.

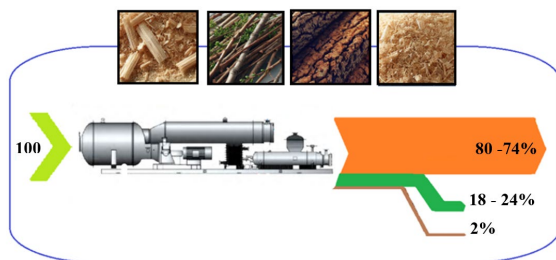
5.4. Органичен цикъл на Ренкин

Термодинамичният цикъл на ORC модула и схемата на свързаните компоненти са показани на фиг. 5.14.

Принципна схема на ORC модул от посочения тип е представена на фиг. 5.15. Топлинната мощност от отпадъчните суровини (термичното масло) е 100%. Предвид това, че този тип модули се използват за утилизирание на отпадна топлина от друг процес и нейното преобразуване в електрическа енергия, то електрическата ефективност на тази турбина е 18-24%. Топлинната мощност, която отива към потребителите е 80-74%, а общите загуби са 2%.



Фиг. 5.14. Термодинамичният цикъл и ORC генератора [135]



Фиг. 5.15. Принципна схема на работа на ORC [135]

Турбогенераторът използва горещото термично масло за предварително загряване и изпаряване на подходящ работен флуид в изпарителя (процес 8→3→4). Парата от органичния флуид задвижва турбината (процес 4→5), която е директно свързана с електрическия генератор посредством гъвкав съединител. Изпуснатата

пара преминава през регенератора (процес 5→9), където загрява органичния флуид (процес 2→8). Парата кондензира в кондензатора (охлажда се от водния канал) (процес 9→6→1). След това органичният флуид се изпомпва (процес 1→2) към регенератора и по-късно към изпарителя, като по този начин завършва последователността на операциите в затворената верига.

5.5. Допълнително оборудване на системата

Построена е специализирана сграда (промишлено хале), предназначена за съхранение на горивото. Дървесните отпадъци се товарят, разтоварват и транспортират с нов челен товарач, а за целта са закупени също ремарке и превозно средство. Контролът върху количеството доставяна биомаса се осъществява чрез допълнително инсталирана промишлена везна, която измерва теглото на пристигащите камиони с ремаркета на входа на обекта. За нуждите на охлаждането е изграден водосъдържател за охлаждаща вода, който отговаря на системните изисквания. Инсталиран е и резервен генератор за електроенергия, който ще осигурява захранване в случай на авария или прекъсвания на електроподаването към обекта. В съответствие със законовите изисквания, физическото оборудване за взаимно свързване с електрическата мрежа трябва да отговаря на индустриалните стандарти. Това оборудване включва управляващи разпределителни блокове, кабели, три токови трансформатора, три напрежение трансформатора и четири електромера. Системата е свързана към електропреносната мрежа чрез нов електропровод с напрежение 20 kV и кабел с дължина 270 метра.

6. Приходи от продажба на енергия, въглеродни кредити и/или търгуеми зелени сертификати

При определяне на резултатите от анализа се изчислява годишното количество произведена електрическа и топлинна енергия. Взима се предвид влиянието на ефективността на биомасовия котел върху процеса на изгаряне на отпадъчната дървесина. Също така се отчита и потреблението на електроенергия за цялата инсталация и спомагателното енергийно оборудване. При определяне на годишните приходи от анализа от продажба на електроенергия се вземат предвид разходите за отпадъчна дървесина, таксата за пренос, увеличените оперативни и поддържащи разходи и електроенергията за функциониране на системата.

Според прогнозните разходи, след изграждането на инсталацията, годишното потребление на отпадъчна дървесина ще бъде 15,000 t/y, което означава, че разходите за биомаса ще възлязат на 268 428 евро. Очакваното годишно потребление на електрическа енергия ще бъде 8 670 MWh/y, а очакваното производство на топлинна енергия ще бъде 27,450 MWh/y. Собствените нужди на системата ще възлязат на 1,983 MWh/y. Очакваните годишни брутни печалби от реализацията на анализа ще бъдат 645 964 евро.

7. Намаляване на парникови емисии срещу базовата линия без проекта

Проектите за намаляване на емисиите над определен размер (променлив в зависимост от типа технология) могат да генерират въглеродни кредити, които могат да бъдат монетизирани, по-специално съгласно механизма за съвместно изпълнение на Протокола от Киото. Определянето на годишните емисии на вредни газове е съгласно Решение на Комисията от 21.01.2004 г. за създаване на насоки за мониторинг и докладване на емисиите на парникови газове съгласно [22]. За оценка на емисиите на вредни газове са използвани разработените от МОСВ емисионни

фактори (Методика за изчисляване на емисиите на вредни вещества (замърсители) в околната среда, изпускани в околната среда на базата на балансови методи). Количественото намаление на емисиите на въглероден диоксид е оценено чрез използване на Прегледа на факторите на емисиите на електроенергия на MWH S.p.A. към ноември 2009 г. Спестяванията на първични енергоносители, в резултат от въвеждането на единична мярка, или пакет от мерки води до намаляване на генерираните въглеродни емисии (CO₂).

Екологичният еквивалент на причинените въглеродни емисии се определя по потребната енергия съгласно Приложение № 1 към „Национална методика за изчисляване на енергийните характеристики на сгради“, според Наредба № РД-02-20-3 от 9 ноември 2022 г. за техническите изисквания към енергийните характеристики на сгради [27].

На табл. 5.8 е дадено намаляване на емисиите на въглероден диоксид за периода 2019-2021г.

Таблица 5.8 Намаляване на емисиите на въглероден диоксид

Емисионни характеристики / година		2019 г	2020 г	2021 г	Общо
Икономия на електроенергия	(MWh/y)	3,900	6,686	6,686	17,273
Фактори на въглеродни емисии за електроенергия	(tCO ₂ /MWh)	0,833	0,833	0,833	
Намаляване на емисиите на CO ₂ от електричество	(tCO ₂ /y)	3,249	5,570	5,570	14,388
Общо намаление на емисиите на CO ₂	(tCO ₂ /y)	3,249	5,570	5,570	14,388

От табл. 5.8 се вижда, че в периода от 2019 до 2021 година, спестяванията на енергия и съответно намаляването на емисиите на CO₂ са се увеличавали всяка година.

8. Съответствие с националните екологични стандарти

Проектът е изграден с акцент върху прилаганите устойчиви технологии, които осигуряват минимално въздействие върху околната среда и същевременно се развиват за намаляване на вредните емисии в атмосферата. Биомасата като енергиен източник е възобновяема и отделяните при изгарянето на емисиите са неутрално насочени към въглеродния баланс, тъй като въглеродът, отделен при процеса, е част от естествения кръговрат. Това прави проекта съвместим с изискванията за намаляване на въглеродния отпечатък. Освен това, проектът не само не е вреди на околната среда, но и за защитата на естествените ресурси, като замества по-замърсяващи източници на енергия. Експлоатацията му е в съответствие с европейските и националните екологични стандарти, което подчертава ангажираността към устойчиво развитие и отговорно използване на ресурсите.

9. Заклучителни бележки и изводи

1. Продължителността на горивния процес при използване на пелетни горива от отпадъчни суровини пряко влияе върху неговата ефективност. За да се постигне икономически изгоден и устойчив резултат, е необходимо да се използват пелети с

висока калоричност и минимално съдържание на пепел, които осигуряват оптимално изгаряне и намаляват загубите.

2. Анализираният експериментална когенерационна система демонстрира значителен потенциал за повишаване на енергийната ефективност чрез използване на отпадъчна дървесина като основен енергиен източник. Системата предлага устойчива алтернатива на традиционните енергийни технологии, като намалява въглеродния отпечатък и оползотворява неизползвани отпадъчни суровини.

3. Когенерационната система за оползотворяване на отпадъчна биомаса осигурява едновременно производство на електрическа и топлинна енергия, като достига енергийна ефективност до 85%. За сравнение, конвенционалните системи постигат едва 30-40% ефективност. Това значително намалява енергийните загуби и повишава икономическата рентабилност, превръщайки системата в устойчиво и ефективно решение.

4. Изпълнението на анализа ще допринесе за намаляване на емисиите на CO₂ с над 14 000 тона за периода 2019–2021 г. Изгарянето на отпадъчна биомаса е въглеродно неутрално, което съответства на екологичните изисквания и целите за намаляване на парниковите емисии.

5. Финансовите анализи показват стабилен нетен паричен поток, с очаквани годишни приходи от над 600 000 евро. Това подчертава икономическата жизнеспособност на анализа и неговата рентабилност като инвестиция..

6. Изграждането на когенерационната система създава нови работни места и използва местни ресурси, което допринася за развитието на региона. Интеграцията на инсталацията в местната икономика засилва кръговия подход в управлението на ресурсите.

7. Въпреки ниската ефективност на модула на Ренкин (между 20 и 25%), това е единствена алтернатива за оползотворяване на остатъчното количество топлинна енергия и преобразуването ѝ в електрическа, което повишава общата ефективност на предложената система.

8. Системата е проектирана да обработва различни видове биомаса, включително отпадъчна дървесина, което осигурява гъвкавост при управлението на суровините и устойчиво снабдяване с гориво.

9. Когенерационната система допринася за децентрализацията на енергийната мрежа и увеличаване на използването на възобновяеми енергийни източници.

10. Внедряването на когенерационната система намалява зависимостта от изкопаеми горива, като същевременно предоставя достъп до стабилен и устойчив източник на енергия.

ГЛАВА 6 ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

1. Основни изводи от извършената работа при разработване на дисертацията

1. Проучванията подчертават, че калоричността, влагосъдържанието и пепелното съдържание на биомасата са критични параметри, определящи ефективността на горенето. Дървесните пелети показват отлични резултати като гориво, докато селскостопанските отпадъци изискват предварителна обработка за постигнат по-добри горивни характеристики

2. Методите ТГ, ДТА и ДСК се доказаха като ефективни инструменти за оценка на термичните свойства на различни видове горива. Анализите показаха

ключови температурни диапазони, които подпомагат при оптимизацията на горивните процеси и подобряването на ефективността на горивните системи.

3. Чрез прецизно оптимизиране на съотношението между гориво и въздух, както и чрез точен контрол на температурата на горене, значително се намаляват емисиите на CO и NOx. Това подчертава ролята на биомасата като екологично устойчиво гориво, което редуцира въглеродния отпечатък.

4. Анализиранията когенерационна система с ORC доказва способността си да преобразува отпадъчната топлина в електрическа енергия с висока ефективност. Тази технология е подходяща за интегриране в съвременни енергийни мрежи, като подобрява общата енергийна ефективност.

5. Числените модели са доказано надеждни за прогнозиране на ефективността и емисиите на горивните системи. Те подчертават значението на оптималното разпределение на въздуха и прецизното проектиране на горивната камера за постигане на стабилност и висока производителност.

6. Създадена е цялостна методология за анализ и оптимизация на горивните процеси, която комбинира експериментални данни, термични анализи и симулации. Тази методология е универсална и приложима за широк спектър от горива и горивни технологии, като насърчава устойчиво развитие в енергийния сектор.

7. Внедряването на автоматизирани системи за управление на горивния процес, включително регулиране на подаването на въздух и гориво, е ключов фактор за повишаване на енергийната ефективност. Това би позволило постигането на по-ниски нива на емисии, по-добра стабилност на горенето и минимизиране на загубите.

8. Инвестициите в технологии за предварителна обработка на биомасата, като сушене, раздробяване и гранулиране, биха спомогнали за повишаване на калоричността на горивото. Това не само би подобрило ефективността на горивния процес, но и би намалило емисиите на вредни вещества и риска от образуване на нежелани отлагания в горивните системи.

9. Внедряването на когенерационни технологии, базирани на органичен цикъл на Ренкин, в региони с висока наличност на отпадъчни суровини, би довело до значително повишаване на общата енергийна ефективност. Чрез оползотворяването на отпадъчната топлина тези системи биха допринесли за намаляване на въглеродните емисии и икономическа ефективност.

10. Прилагането на технологии за емисионен контрол, като селективна каталитична редукция и електростатични филтри, би осигурило значително намаляване на емисиите на NOx, CO и фини прахови частици. Това е от съществено значение за съответствието с екологичните регулации и подобряване на качеството на околната среда.

11. Въвеждането на системи за мониторинг в реално време на ключовите параметри на горивния процес и емисиите би позволило динамично оптимизиране на изгарянето. Това би улеснило осигуряването на съответствие с регулаторните изисквания и би намалило оперативните разходи.

2. Предложения за практиката

Извършените изследвания върху измерването, резултатите и анализа на основните параметри на твърдите горива, както и анализа на ефективността на горивното пространство, предоставят основание да се счита, че следните предложения биха могли да намерят ефективно приложение в практиката:

1. Внедряването на автоматизирани системи за управление на горивния процес, включително регулиране на подаването на въздух и гориво, е ключов фактор за повишаване на енергийната ефективност. Това би позволило постигането на по-ниски нива на емисии, по-добра стабилност на горенето и минимизиране на загубите.

2. Инвестициите в технологии за предварителна обработка на биомасата, като сушене, раздробяване и гранулиране, биха спомогнали за повишаване на калоричността на горивото. Това не само би подобрило ефективността на горивния процес, но и би намалило емисиите на вредни вещества и риска от образуване на нежелани отлагания в горивните системи.

3. Внедряването на когенерационни технологии, базирани на органичен цикъл на Ренкин (ORC), в региони с висока наличност на отпадъчни суровини, би довело до значително повишаване на общата енергийна ефективност. Чрез оползотворяването на отпадъчната топлина тези системи биха допринесли за намаляване на въглеродните емисии и икономическа ефективност.

4. Прилагането на технологии за емисионен контрол, като селективна каталитична редукция (SCR) и електростатични филтри, би осигурило значително намаляване на емисиите на NOx, CO и фини прахови частици. Това е от съществено значение за съответствието с екологичните регулации и подобряване на качеството на околната среда.

5. Въвеждането на системи за мониторинг в реално време на ключовите параметри на горивния процес и емисиите би позволило динамично оптимизиране на изгарянето. Това би улеснило осигуряването на съответствие с регулаторните изисквания и би намалило оперативните разходи.

3. Приноси на дисертационната работа

Научно - приложни приноси

1. Извършено е детайлно изследване на ключови свойства на биомасата, като калоричност, влагосъдържание и съдържание на пепел, които оказват критично влияние върху ефективността на горивните процеси. Резултатите предоставят основа за класификация и оптимизация на горивата.

2. Въведени са термични методи (ТГ, ДТА, ДСК) за идентифициране на температурни режими, подходящи за ефективно изгаряне. Тези анализи допринасят за разработването на горивни системи с висока енергийна ефективност.

3. Създадени са симулационни модели за прогнозиране на поведението на горивните системи, които доказват значителен принос за оптимизацията на разпределението на въздуха и геометрията на горивните камери, осигурявайки стабилност и ефективност на процесите.

4. Изследвано е влиянието на съотношението въздух-гориво върху емисиите на замърсители (CO и NOx). Резултатите насочват към устойчиво управление на горивните процеси с минимизиране на въглеродния отпечатък.

5. Анализирана е когенерационна система с органичен цикъл на Ренкин, която е с ефективност над 85% и осигурява ефективно оползотворяване на отпадъчната топлина за производство на електроенергия.

Приложни приноси

1. Установено е, че дървесните пелети имат висока калоричност и ниско съдържание на пепел, което ги прави подходящи за битови приложения. За

селскостопанските пелети е идентифицирана необходимостта от предварителна обработка за постигане на сходни характеристики.

2. Разработен е модел за автоматизация на подаването на гориво и въздух, който значително повишава ефективността и намалява оперативните разходи на горивните системи.

3. Внедряването на когенерационни технологии е икономически и екологично устойчиво решение, което предлага намаляване на енергийните разходи, продажба на зелени сертификати и ефективно управление на отпадъчни суровини.

Методически приноси

1. Създадена е универсална методология, която съчетава експериментални изследвания, термични анализи и числени симулации. Тази методология осигурява адаптивност към различни видове горива и горивни системи.

2. Разработените симулации за мониторинг и прогнозиране на ефективността и емисиите от горивните процеси подпомагат осигуряването на съответствие с екологичните изисквания и подобряването на технологичните параметри.

ПУБЛИКАЦИИ

1. **Милева Н.**, Изследване на характеристиките на димни газове на пелетен котел, Известия на съюза на учените - Варна, Серия „Технически науки“ №1, 2023 г., Варна, ISSN 1310-5833, 14-17.

2. **Милева Н.**, Анализ на енергийния потенциал на възобновяеми енергийни източници в североизточен регион на България, Известия на съюза на учените - Варна, Серия „Технически науки“ №1, 2022 г., Варна, ISSN 1310-5833, 38-43.

3. P. Zlateva, M. Ivanov and **N. Mileva**, "Energy Characteristic Analyses of Waste Wood Pellets," 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), Plovdiv, Bulgaria, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/CIEES58940.2023.10378753.

РЕЗЮМЕ

Дисертационният труд изследва биомасата като устойчив енергиен източник, акцентирайки върху подобряването на горивните процеси и внедряването на когенерационни системи. Биомасата е представена като въглеродно неутрален ресурс с потенциал за значително намаляване на парниковите емисии и осигуряване на устойчива енергия. Анализираните твърди биогорива, като дървесни и селскостопански пелети, демонстрират висока калоричност и стабилност, което ги прави подходящи за битови и промишлени приложения. Горивните свойства, като калоричност, влагосъдържание и пепелно съдържание, са определящи за ефективността на процеса. Когенерационните системи, базирани на органичен цикъл на Ренкин, доказват ефективността си за оползотворяване на отпадъчна топлина, с обща енергийна ефективност над 85%. Подобреното управление на емисиите и автоматизацията на горивните системи допринасят за намаляване на замърсяванията и риска от отлагания. Емисионният анализ и численото моделиране потвърждават, че оптималното съотношение между гориво и въздух значително намалява емисиите на СО и NO_x, а подходящата геометрия на горивната камера подобрява ефективността на изгаряне. Дисертацията демонстрира, че съчетаването на експериментални изследвания, термичен анализ и моделиране може съществено да повиши устойчивостта и ефективността на горивните процеси. Разработените технологии предлагат иновативни и перспективни решения за устойчиво управление на

отпадъчни суровини, като същевременно допринасят за екологосъобразно и ефективно енергийно производство.

ABSTRACT

The dissertation investigates biomass as a sustainable energy source, focusing on the optimization of combustion processes and the implementation of cogeneration systems. Biomass is presented as a carbon-neutral resource with significant potential to reduce greenhouse gas emissions and ensure sustainable energy production. The study analyzes solid biofuels, such as wood and agricultural pellets, which exhibit high calorific value and stability, making them suitable for both residential and industrial applications. Key combustion characteristics, including calorific value, moisture content, and ash content, are identified as critical determinants of process efficiency. Cogeneration systems based on the Organic Rankine Cycle are shown to be highly effective in utilizing waste heat, achieving overall energy efficiencies exceeding 85%. Enhanced emission management and automation of combustion systems contribute to lower pollutant emissions and mitigate the risks of residue accumulation. Emission analyses and numerical modeling confirm that optimizing the fuel-to-air ratio significantly reduces emissions of CO and NO_x, while the adoption of appropriate combustion chamber geometries improves combustion efficiency. The dissertation demonstrates that the integration of experimental research, thermal analysis, and numerical modeling can substantially enhance the sustainability and performance of combustion processes. The developed technologies propose innovative and viable solutions for the sustainable management of waste materials, while simultaneously contributing to environmentally friendly and efficient energy generation.

БЛАГОДАРНОСТИ

Бих искала да изразя своята благодарност към доц. д-р инж. Пенка Нелиева Златева за доверието, усилията и подкрепата при разработването на тази дисертация. Изказвам благодарности и на екипа на катедра „Топлотехника“.