



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ТОПЛОЕНЕРГЕТИКА И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА“

маг. инж. Борислав Любенов Ангелов

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА РАЗЛИЧНИ ФАКТОРИ
ВЪРХУ ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС В ЕНЕРГИЙНИ
ПАРОГЕНЕРАТОРИ, ИЗГАРЯЩИ ВЪГЛИЩА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. Енергетика

Докторска програма: „Енергопреобразуващи технологии и системи“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Тотю Иванов Тотев

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е с обем 206 страници. Съдържа девет части – осем глави и заключение, което включва постигнатите приноси. Дисертацията съдържа 104 фигури и 56 таблици. Цитирани са 158 литературни източника.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за вътрешна защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“ на Енергомашиностроителен факултет на Технически университет – София, проведен на 01.03.2021 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 25.05.2021 г. в конферентната зала на Библиотечно-информационния център към Технически Университет – София от 13:00 часа на открито заседание на журито, определено със Заповед № ОЖ-5.4-05 от 19.03.2021 г. на Ректора на Технически университет – София в състав:

Научно жури:

1. проф. д-р инж. Димитър Ангелов Попов
2. проф. д-р инж. Тотю Иванов Тотев
3. проф. д-р инж. Георги Иванов Вълчев
4. проф. д-р инж. Лилиана Зашкова Стоянова
5. доц. д-р инж. Пенка Нелиева Златева

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Димитър Ангелов Попов
2. проф. д-р инж. Лилиана Зашкова Стоянова

Автор: Борислав Любенов Ангелов

Заглавие: „Изследване на влиянието на различни фактори върху горивния процес в енергийни парогенератори, изгарящи въглища“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет - София

Актуалност на проблема и постановка на задачата

Актуалност на проблема

Значение на органичните горива за генерирането на електрическа енергия

Съвременният начин на живот и бъдещото развитие на човечеството са неразривно свързани с производството и консумацията на електрическа енергия. Според оценките на Администрацията за енергийна информация на САЩ (EIA) общото производство на електроенергия в световен план през следващото десетилетие ще се увеличи с над 12 % спрямо 2020 година, като съответно електроенергията, която се получава от изгаряне на въглища ще запази дела си. [47]. Днес близо 40 % от електроенергията в света се произвежда от въглища.

България е енергийно силно зависима, защото общо около 65 на сто от първичните енергийни ресурси се дължат на внос или са възобновяеми енергийни източници (ВЕИ). Вносните горива предимно са петрол, природен газ, висококачествени въглища и ядрено гориво. За производството на електричество от ВЕИ се използва основно енергията на водата, слънцето, вятъра, биомаса, като това производство е зависимо от капризите на природата.

Тази структура на енергийния баланс буди тревога от гледна точка на сигурността на енергоснабдяването. Основния собствен енергиен ресурс на Република България са местните нискокачествени лигнитни въглища с високо съдържание на сяра, които са сравнително евтини за добив и имат силна позиция като източник за производство на електрическа енергия.

От друга страна изгарянето на органични горива в енергийните парогенератори [18] е свързано с отделянето на вредни емисии в околната среда [16].

Екологични аспекти при използването на лигнитни въглища за производство на ел. енергия в България

Основните замърсители са: серни оксиди, азотни оксиди, въглероден оксид, прах (най-често въглищен и пепелен), тежки метали (живак и др.), парникови газове, хлориди и флуориди, амоняк, летливи органични компоненти, твърди органични вещества, радиоактивни субстанции и др [141].

От 01.01.2016 година в съответствие изпълнение на Директива 2010/75/ЕС на ЕВРОПЕЙСКИЯ ПАРЛАМЕНТ И НА СЪВЕТА от 24 Ноември 2010 по ограничаването на емисии на определени замърсители във въздуха от големи горивни инсталации – Приложение V се установяват нови екологични изисквания.

Табл. 1.2. Норми за допустими емисии на енергийни котли № 11 и № 12 в ТЕЦ "Марица Изток 2"

Параметър	Норми за допустими емисии (mg/Nm ³), приведени към 6 vol.% кислород	
прах	50	
SO ₂	До 31.12.2015 г.	От 01.01.2016 г.
	92 % десулфуризация	96 % десулфуризация
NO _x	До 31.12.2015 г.	От 01.01.2016 г.
	500	200
CO	250	

За да се установят концентрациите на азотните емисии, изпускани в атмосферата от котлите, които са в експлоатация, е проведено измерване на изходящите димни газове след тях [79] (преди да бъдат извършени мероприятия за тяхното редуциране). В Табл. 1.3 са представени получените данни за концентрация на азотни оксиди (NO_x) и въглероден диоксид (CO) в отпадните газове.

Табл. 1.3. Обобщени данни за концентрации на NO_x и CO в отпадните газове на парогенератори тип ПК 38-4 (Котли ст. № 1 ÷ 8) и П-62 (Котли ст. № 9 ÷ 12) в „ТЕЦ Марица изток 2“ ЕАД

Параметър	Котел ст. №											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NO_x , mg/Nm ³ ($O_2=6$ vol.%)	374	353	408	422	371	468	400	418	343	232	310	346
CO , mg/Nm ³ ($O_2=6$ vol.%)	76	54	85	107	87	24	55	66	37	53	33	38

От получените резултати е видно, че за да се спазят изискванията на Нормативната уредба е било наложително да бъдат въведени нови технологични решения, които да редуцират азотните емисии в димните газове [34].

В допълнение на гореизложеното, с Решението за изпълнение 2017/1442 от 31 юли 2017 година (публикувано на 17.08.2017), съгласно Директива 2010/75/ЕС на Европейския парламент, Европейската комисия приема формулираните заключения за най-добрите налични техники (НДНТ), относно големите горивни инсталации (ГГИ) [27].

Табл. 1.4. Норми за допустими емисии съгласно, заключенията от НДНТ

Замърсител	Стойност	
	Средногодишна	Среднодневна
Азотни оксиди - NO_x	175 mg/Nm ³	220 mg/Nm ³
Серни оксиди - SO_x	≥ 97% степен на почистване, но не повече от 320 mg/Nm ³	няма
Въглероден оксид - CO	100 mg/Nm ³	100 mg/Nm ³
Прах	8 mg/Nm ³	14 mg/Nm ³
Живак – Hg	7 µg/Nm ³	няма

Съгласно НДНТ мерките, които се прилагат за превенция и/или редуциране на формирането на азотни оксиди се делят на първични и вторични. Първичните техники позволяват да се контролират процесите на образуване и/или редуциране на NO_x в пещните камери, докато вторичните такива – да се редуцират азотните емисии, след като вече са се формирали.

В зависимост от спецификата на техническите решения, правилния подбор на внедряването на различни комбинации от посочените мерки и качеството на изпълнението им, е установено, че емисиите от азотни оксиди изхвърляни в атмосферния въздух, генерирани от големи горивни инсталации, изгарящи лигнитни въглища, могат да бъдат редуцирани максимално с 40 ÷ 50 %, посредством само и единствено внедряването на „първични мерки“.

Влияние на различни фактори върху горивния процес и образуването на азотни оксиди в енергийни парогенератори изгарящи въглища

Според механизма на образуване на азотни оксиди, NO_x емисиите се влияят от процеса на изгаряне на въглища. Що се отнася до енергийните котли в електроцентралите, работещи на въглища, конфигурацията на пещта, типа на горелката и типа въглища имат голямо въздействие върху горивния процес; следователно тези фактори влияят силно на генерираните емисии на NO_x [102], [104], [152].

Обикновено котлите, които изгарят въглища с по-високо съдържание на летливи вещества (каквито са и лигнитните въглища), произвеждат по-малко азотни оксиди [77], [100] в сравнение с котли изгарящи други типове въглища.

Котлите тип П-62, които се експлоатират в комплекса „Марица Изток“ и изгарят местни лигнитни въглища, са снабдени с горивни уредби с тангенциално разположение на горелките, където пламъкът се стабилизира в централен факел, вместо в самостоятелна вихрова горелка.

Горивните системи за осъществяване на горене с ниско съдържание на NO_x в димните газове също могат да бъдат изпълнени като тангенциални. Тангенциално разположените горелки вкарват горивните и въздушни потоци от ъглите на пещната камера, карайки ги да

тангират в една въображаема окръжност намираща се в центъра на котела. Взаимодействието между потоците на съседни горелки води до образуването на един общ вихров пламък, който спомага за тяхното смесване в обема на печната камера и пълното изгаряне на подаваното гориво. Дългите дифузионни пламъци произтичащи от всеки ъгъл, плюс голямото количество от вътрешна газова рецикулация, генерирана от факела, намалява смесването на горивото с въздуха, от където произтичат и основните свойства на ниско азотните горивни уредби. [69]

Горивните уредби, които са проектирани за ограничаване формирането на NO_x , контролират преобразуването на азота като насочват основната фракция от горивните азотни съединения в зона богата на горивна смес. При тези условия (недостиг на кислород) се достига до максимална степен на разпадане на образувалите се междинни азотни съединения до N_2 . На следващ етап се подава останалото количество необходим въздух за горене. [138]

Допълнителна техника за намаляване образуването на NO_x при правотокови горелки с тангенциална конфигурация е управлението на количеството горивен въздух по височина на горивната уредба [147]. По този начин се контролира стехиометрията на горивния процес, за да се намали до минимум генерирането на азотни оксиди. [155]

В горелката над най-горната въглищна дюза се добавя въздух. Този така наречен надгоривен въздух (НГВ) отклонява приблизително 20 % от общия необходим за горенето въздух над праховата горелка. Като резултат, факела на нивото на основните горелки се развива при стехиометрични условия или близки до тях. По този начин, в зоната на основния пламък, се достига до максимална степен на разпадане на образувалите се междинни азотни съединения до N_2 . А непосредствено след това се подава останалото количество необходим въздух за горене през дюзите за надгоривен въздух, с цел да се запази ефективността на горивния процес. [64]

По-малкото количество организирано подаван въздух, обусловено от по-малката стойност на излишък на въздух допринася за по-богата на гориво смес в обема на печта, която се явява редукиционна среда за азотните оксиди [66]. Използването на този подход – намаляване коефициента на излишък на въздух, има и негативни последствия. Ограничаването на количеството организирано подаван въздух води след себе си до увеличаване на неизгорялото гориво. Поради това трябва да се подхожда внимателно при ограничаването на образувалите се NO_x , чрез намаляване коефициента на излишък на въздух.

НГВ като постановката, която задава горене в стехиометрични условия, е използвана повече от 30 години [146]. Усилена изследователска работа е довела до по-нататъшно развитие на оригиналната концепция за "близко свързани" отвори на НГВ (свързани с горелката) до следващата логична стъпка: вертикално разположение на НГВ с един или повече разделени нива (разделени от горелката) с цел увеличаване времето на работа при подстехиометрични или близки до стехиометричните условия

Локалното разделяне на нива спомага за намаляване на NO_x посредством бързо възпламеняване и изчерпване на кислорода в близост до горелката. Това е наложително, за да се постигне максимално преобразуване на летливите азотни съединения до HCN и NH_3 , последвано от преминаването им в N_2 в среда богата на гориво. Свързаните посредством общ факел горивни отвори и богатите/бедни горивни потоци са двете концепции за локално разделяне на нива, използвани към настоящия момент.

Цел, постановка и структура на дисертационния труд

Целта, която се поставя пред настоящия дисертационен труд е изследване на влиянието на различни фактори върху горивния процес в енергийни парогенератори при изгарянето на въглища. Това е постигнато като е изследвано влиянието на различни конструкции печни камери, горивни уредби и прахоприготвящи системи върху горивния процес в енергийни парогенератори тип ЕП 670/140 (П-62) при изгарянето на български лигнитни въглища от басейна Марица Изток. Извършени са проучване, изследване, анализ и внедряване на технологични решения водещи до подобряване на горивния процес и гарантиране на нискоемисионно азотно горене.

Постановката на изследванията в дисертацията е подчинена на следните обстоятелства:

1. Причини и необходимост от направеното изследване, които се обосновават от:

повишените екологични изисквания за работа на котлите и не добрата организация на горивния процес;

2. Ясно конкретизирана цел: Изследване на горивния процес и влияещите му фактори с оглед, оценка възможностите за ограничаване формирането на азотни оксиди;
3. Средства чрез, които се осъществяват изследванията: комбинирането на натурни изпитания и моделни изследвания;
4. Внедряване на подходящи мерки за ограничаване формирането на азотни оксиди чрез извършването на конструктивни изменения на котли тип П-62;
5. Анализ на технико-икономическите показатели на парогенератори тип П-62, след реализираната реконструкция.

Постигането на така дефинираната обща цел може да бъде детайлизирана по начин представен на *Фиг. 1.5*.



Фиг. 1.5. Постановка на изследванията в дисертационния труд

ВТОРА ГЛАВА

Особености на енергийни парогенератори ЕП 670/140 (П-62) намиращи се в експлоатация в комплекса "Марица Изток "

Общи характеристики на енергиен парогенератор ЕП-670/140 (П-62)

В комплекса „Марица Изток“ в експлоатация са 8 броя барабанни котли тип Еп 670/140 (П-62) производство на Подолския котлостроителен завод. Четири броя са инсталирани на територията на „ТЕЦ Марица Изток 2“ и четири в „ТЕЦ Марица Изток 3“.

Въвеждането в редовна експлоатация на котлите е извършено съответно за „ТЕЦ Марица Изток 3“ през периода от 1977 г. до 1980 г., а за „ТЕЦ Марица Изток 2“ през периода от април 1985 г. (котел № 9) до декември 1995 г. (котел № 12).

Котел Еп 670/140 (чиято принципна технологична схема е представена на *Фиг. 2.1*) е предназначен за работа в моноблок с турбина тип К 210-130 [24]. П-62 изгаря лигнитни въглища от Източномаришкия басейн. Котелът е с естествена циркулация, има 2 барабана, а пароводния тракт е съставен от 2 независими един от друг потока. Освен това П-62 е с Т-образна компоновка, при която газовете се отвеждат през два конвективни газохода.

Проектна горивна уредба на котли тип П-62 в комплекса „Марица Изток“

Проектните прахоприготвящи системи гарантират следните параметри на прахогазовата смес на входа на печната камера за въглища с проектно качество:

- Коефициент на просмуквания на студен въздух в прахоприготвящите системи – $K_{np} = 0,3 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$;
- Коефициент на просмукване на студен въздух в печната камера – $\Delta\alpha_n = 0,05$;
- Разчетно натоварване по въглища на една прахосистема при номинален товар на блока, долна топлина на изгаряне на горивото $Q_f \approx 6\,000 \text{ kJ/kg}$ при седем прахосистеми в работа всяка с разход $B_m = 54,13 \text{ t/h}$;
- Номинална вентилационна производителност на мелниците – $V_m = 170\,000 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Номинално количество вторичен въздух през една горелка при максимален товар и температура на горещия въздух $\approx 270^\circ\text{C}$ – $V_{в/х} = 175\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ през една горелка;
- Разделителна способност на прахоконцентратора: $g_{ог} = 0,85$; $l_{ог} = 0,3$.

Анализ на развитието на горивните уредби на котли тип П-62 в комплекса „Марица Изток“

През последните години на котлите тип П-62, които са в експлоатация в топлоелектрическите централи изгарящи лигнитни въглища от басейна „Марица Изток“ бяха извършени реконструкции на горивните уредби.

Въпреки че, горивните уредби на котли тип П-62, са претърпели различни по брой и по вид изменения спрямо проектната си конструкция, извършени от различни организации, има някои мероприятия, които ги свързват, а именно:

- Обособяването на три етажа по височина на горивната уредба;
- Намаляване на разстоянието между основни горелки и бридова горелка;
- Промяна на ъгъла на наклон на бридова горелка спрямо хоризонталата;
- Промяна на сеченията на горивните и въздушни отвори, в търсене на оптималното съотношение на скоростите на изтичане.

Описаните реконструкции на горивните уредби на котли тип П-62 са реализирани поради експлоатационни проблеми свързани с бързото зашлаковане на печната камера. Процесът на зашлаковане, най-интензивно се наблюдава в зоната на основните и бридовите горелки.

Последните реконструкции на котли тип П-62 имат за цел да намалят образуването на азотни оксиди (NO_x) чрез прилагане на първични методи за редуциране. За целта са добавени нови системи за над горивен въздух и за въздух в близост до стените, нови клапи на бридова горелка и са монтирани нови ниско азотни горивни уредби.

Освен това след извършените реконструкции, ъглово-тангенциалната организация на горивния процес се запазва, но разположението на горелките по периметъра на пещта се променя, като осите им, които тангират към въображаема централна окръжност с диаметър 1330 mm се изместват към ъглите на пещта, с цел ъглите между две съседни струи да бъдат приблизително еднакви.

В заключение може да се обобщи, че новите горелки монтирани след последните реконструкции са процежни, триетажни, с постепенно намаляване на концентрацията на прах и увеличаване на изходящите скорости на прахогазовата смес и на наклона на струите по височина.

ТРЕТА ГЛАВА

Теоретични предпоставки за цифрово симулационно моделиране на горивни процеси

Развитието на изчислителните възможности на съвременните софтуерни и хардуерни продукти превърна използването на цифрови симулационни модели в необходим етап от

процеса на решаване на изследователски задачи. Позитивите от използване на този съвременен инструментариум са известни:

- Увеличен обем и многообразие на планираните експерименти, възможност за създаване на ситуации (гранични условия), които при натурни изпитвания са невъзможни.
- Многократно по-голяма информация (като обем, вид и брой на регистрираните параметри и др.), получена в резултат на тези експерименти.
- По-големи възможности за избор на начина на представяне на информацията (таблично, графично, цветово и др.) и за допълнителни обработки на тази първична информация.
- Заместване на скъпоструващи натурни експерименти с участието на голям брой специалисти и работа в нездравословна среда.

Тези предимства са още по-ярки, когато изследваните обекти са прахопригответящи системи и пещни камери на котли, изгарящи нискокачествени български въглища.

Описание на програмен продукт ANSYS

Специализираният софтуер ANSYS е програмен продукт, работещ под WINDOWS, и е създаден за симулационно моделиране на ламинарни и турбулентни потоци, топлообмен, както и в съчетание с допълнителни модели като например такива за многофазови потоци, горивни процеси и др.

Комплексът ANSYS включва два основни модула:

- Модул за създаване на геометрични структури и изчислителни решетки, наречен ICEM.
- Модул за прилагане на изчислителна механика на флуидите (CFD), наречен CFX, съдържащ три подмодула:
 - Pre-processor (предварителен процесор);
 - Solver Module (блок за решение);
 - Post-processing (модул за представяне на резултатите).

След създаването на геометричната структура и изчислителната мрежа в ICEM се преминава към предварителния процесор. В тази част освен дефинирането на граничните условия (входове, изходи, стени и гр.) се дефинират и началните условия - основните характеристики на входните/изходните потоци (скоростни, концентрационни и температурни особености и др); характеристики на изгаряното гориво; химични реакции, условия за сходимост на резултатите и др.

След въвеждане на граничните и началните условия се преминава към модула за изчисление – Solver module. При достигане на условията за сходимост на решението модулет прекратява сметките и генерира резултативен файл. Представянето на получените резултати е в текстови и в графичен вид. Данните от текстовия файл дават подробна информация за резултатите от пресмятанията на всяка итерационна стъпка, както и обобщени данни за цялостното пресмятане .

Моделиране формирането на NO_x в пещната камера на енергийни парогенератори ЕП 670/140 (П-62)

Изследване на пещните процеси за котел тип П-62 за установяване на причините за шлакообразуване вече е провеждано [37]. Разработеният в [37] CFD модел не включва генериране на NO_x. За да може да се проследи формирането на NO_x [113] в пещната камера е необходимо да се зложат и химичните реакции, водещи до образуване на азотни оксиди [94], [115]. При настоящото изследване са използвани стандартни зависимости за формиране и разпадане на азотните оксиди, а именно:

Модел за формиране на „термичен“ NO

Механизмът за образуване на „термичен“ NO се явява преобладаващият източник за NO_x в газовите пламъци при температура над 1800 K. NO се формира от комбинацията на свободни радикални разновидности на O и N, които се намират в изобилие при високи температури. Двустепенният механизъм, отнасящ се към „механизма на Зелдович“ [157], преобладава в тези процеси:



В зависимост от това дали условията са под или около стехиометричните важно значение може да има и трета реакция:



Когато тази стъпка е включена към първите две реакции, тогава става въпрос за разширен „механизъм на Зелдович“ [128].

Коефициентът на скоростта на всяка от тези три реакции се изразява чрез:

$$k_1 = (1,8 \cdot 10^{11}) \exp\left(-\frac{38730}{T}\right) \quad (3.45)$$

$$k_2 = (6,4 \cdot 10^9) \exp\left(-\frac{3162}{T}\right) \quad (3.46)$$

$$k_3 = 3,0 \cdot 10^{13} \quad (3.47)$$

Модел за формиране на „бърз“ NO

При температури по-ниски от 1800 K във въгледородните пламъци [127] има концентрация на NO, която е твърде висока, за да бъде обяснена с механизмите на Зелдович. Въгледородните радикали могат да реагират с молекула азот, като образуват HCN, който може да бъде окислен до NO в условия на беден на окислител пламък [130].



Пълният механизъм е много сложен. Въпреки това Де Суе (De Soete) предлага единична реакция, за да опише NO източника чрез механизма на Фенимор (Fenimore), $S_{NO,prompt}$. Така образуваният NO се нарича „бърз“ NO.

$$S_{NO,prompt} = W_{NO} k_{prompt} [O_2]^{1/2} [N_2] [Fuel] \left(\frac{W}{\rho}\right)^{3/2} \quad (3.50)$$

$$k_{prompt} = A_{prompt} \exp(-T_{A,prompt}/T) \quad (3.51)$$

W_{NO} и W представят моларната маса на NO и съответно средната моларна маса на сместа.

Модел за формиране на „горивен“ NO

Моделът за образуване на азотни оксиди в следствие окисляването на азота от горивото допуска, че същият се представя посредством HCN (водороден цианид) [129]. HCN се приема, за да може да формира или разпада NO в зависимост от местните условия в сместа. Водородният цианид заедно с HCO (водороден карбонат) изпълняват ролята на преходни видове. Механизмът се състои от три реакции:

- Формиране на NO, чрез HCN: $HCN + O_2 \rightarrow HCO + NO$
- Разпадане на NO, чрез HCN: $HCN + NO \rightarrow HCO + N_2$
- Окисление на HCO: $HCO + 3/4 O_2 \rightarrow CO_2 + 1/2 H_2O$

Скоростта на реакциите в [mol/s] са съответно:

$$R_1 = 3,5 \cdot 10^{10} [s^{-1}] \cdot [HCN] \cdot (X_{O_2})^\alpha \cdot \exp\left(-\left(67 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right) \quad , \quad (3.52)$$

$$\text{където: } \alpha = \frac{1}{1 + (X_{O_2}/0.007)}$$

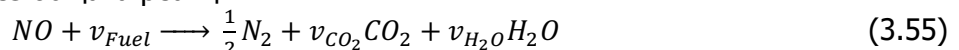
$$R_2 = 3 \cdot 10^{12} [s^{-1}] \cdot \frac{W}{\rho} \cdot [HCN] \cdot [NO] \cdot \exp\left(-\left(60 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right) \quad (3.53)$$

$$R_3 = 8,3 \cdot 10^6 [s^{-1}] \cdot [HCO]^{-0,3} \cdot [O_2]^{1,3} \cdot \exp\left(-\left(30 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right), \quad (3.54)$$

където с X_{O_2} е означена моларната фракция на O_2 , а с W е означена осреднената моларна маса на сместа.

Модел за доизгаряне (разпадане) на NO

При обогатена горивна смес, където количеството кислород не е достатъчно за изгарянето на цялото гориво, недоокисленото гориво води до редуциране на NO. Този процес може да бъде описан чрез общата реакция:



Трябва да се има предвид, че това е само общо представяне. Всъщност физическият

процес, който настъпва, е много по-сложен. Истинският процес включва много преходни съединения, които се появяват по време на горивния процес като например CH_x (въглеводороди), които редуцират NO. [105]

Скоростта на реакцията ще зависи от съответното гориво. При летливите, получени от въглища, скоростта на реакцията се изразява чрез:

$$R_{\text{return}} = 2,72 \cdot 10^6 [s^{-1}] \cdot \frac{W}{\rho} \cdot [NO][Fuel] \cdot \exp\left(\frac{(-9460[K])}{T}\right) \quad (3.56)$$

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

Моделни изследвания на ППС на котел тип П-62

Моделни изследвания на инерционен сепаратор, част от ППС на котли П-62 в „ТЕЦ Марица Изток 2“

Табл. 4.3. Сравнение между резултати, получени от натурни изпитания и резултати от цифров модел на сепаратор на ППС към котли П-62 в ТЕЦ „Марица Изток 2“

Величина	Означение	Дименсия	Натурни изпитания	Цифров модел
Положение на подвижната клапа	-	grad°	0	0
Температура на аеросмес след МВ	t_2	°C	183,7	180
Вентил. производителност след сепаратора - измерена	$V_{\text{МВ}}$	$\text{m}^3/\text{h}, \times 10^3$	221,4	221
Вентил. производителност коригирана по температура и запрашеност на потока	$V_{\text{МВ}} \mu t_2$	$\text{m}^3/\text{h}, \times 10^3$	215,2	-
Преизчислено количество сурово гориво на изход на сепаратора - топлинен баланс	$V_{\text{МВ}}^{\text{топл}}$	t/h	51,65	52
Преизчислено количество сурово гориво на изход на сепаратора - прав баланс	$V_{\text{МВ}}^{\text{прав}}$	t/h	54,38	-
Среден диаметър на въглищните частици	-	μm	226	222

Направеното сравнение показва адекватно представяне на физическата действителност от страна на компютърната симулация - достоверно представя разпределението на зърнометрията на изхода на модела на сепаратора.

След валидирането на изградения симулационен модел на инерционен сепаратор използван при Котел № 11 и Котел № 12, бяха проведени моделни изследвания.

За да може да се сравняват отделните случаи при едни и същи условия, са подбрани следните критерии:

- Количество транспортиращ агент на изхода на сепаратора;
- Аеродинамично съпротивление в обема на сепаратора;
- Количество гориво на изхода на сепаратора (постъпващо към горивните уредби);
- Зърнометрични характеристики на въглищния прах след сепаратора.

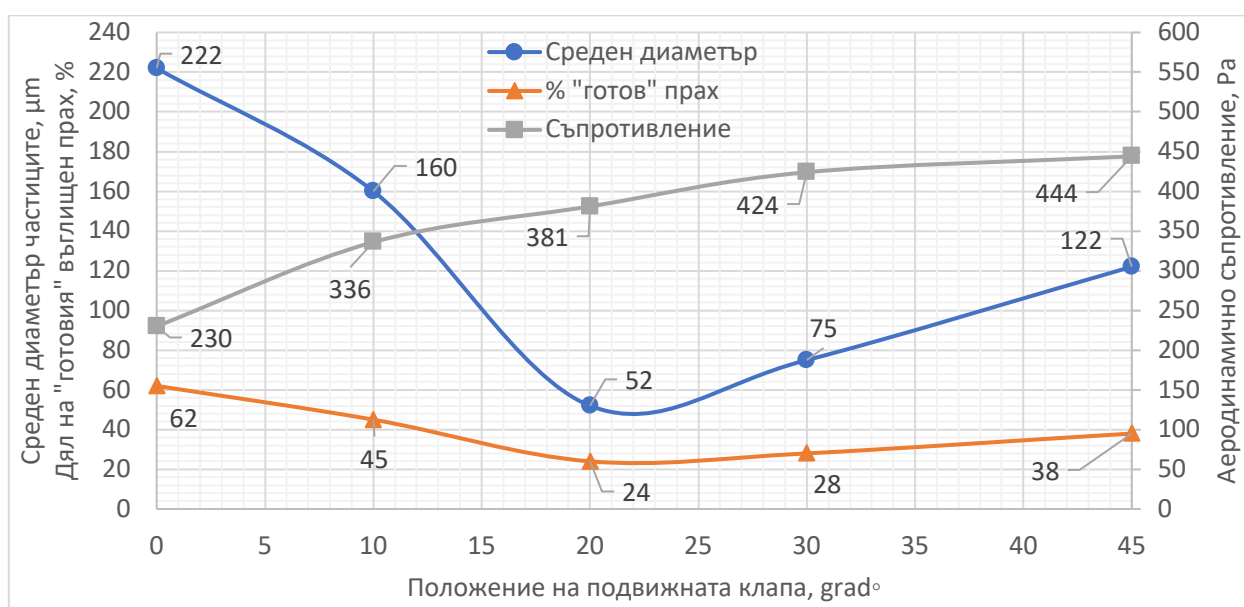
Проведени са пет моделни изследвания на работата на сепаратора. Те обхващат промяната на ъгъла на подвижната клапа "А" в положенията посочени по-горе. Входните въздействия за всеки от моделираните случаи са обобщени в табличен вид и са представени в Табл. 4.4.

С увеличаване на наклона на регулируемата клапа от 0° до 20° се наблюдава зафиняване на "готовия" въглищен прах, респективно намаляване на неговото количество т.е. увеличаване на степента на рецикулация. По-нататъшната промяна на клапата, до 45°, води до загрубаване на праха на изхода от сепаратора и съответно до повишаване на неговото

количество. Тези резултати потвърждават твърдението на ПТО, че работния диапазон на клапата е от 0° до 20°. Очаквано, аеродинамичното съпротивление нараства при по-голям ъгъл на подвижната клапа.

Табл. 4.4. Начални условия при провеждането на моделни изследвания на сепаратор на ППС към котел тип П-62.

Условия	1	2	3	4	5
Положение на клапа "А", °	0	10	20	30	45
Масов дебит на транспортирания агент на вход на сепаратора, kg/s	53,7				
Обемен дебит на транспортирания агент на вход на сепаратора, m³/h	248 000				
Количество суров въглищен прах на вход на сепаратора, kg/s (t/h)	20 (72)				
Среден диаметър на въглищния прах на вход на сепаратора, µm	350				
Температура аеросмес на вход на сепаратора, °C	180				



Фиг. 4.10. Резултати от моделното изследване на настоящата конструкция на сепаратора на ППС към Котел № 11 и Котел № 12

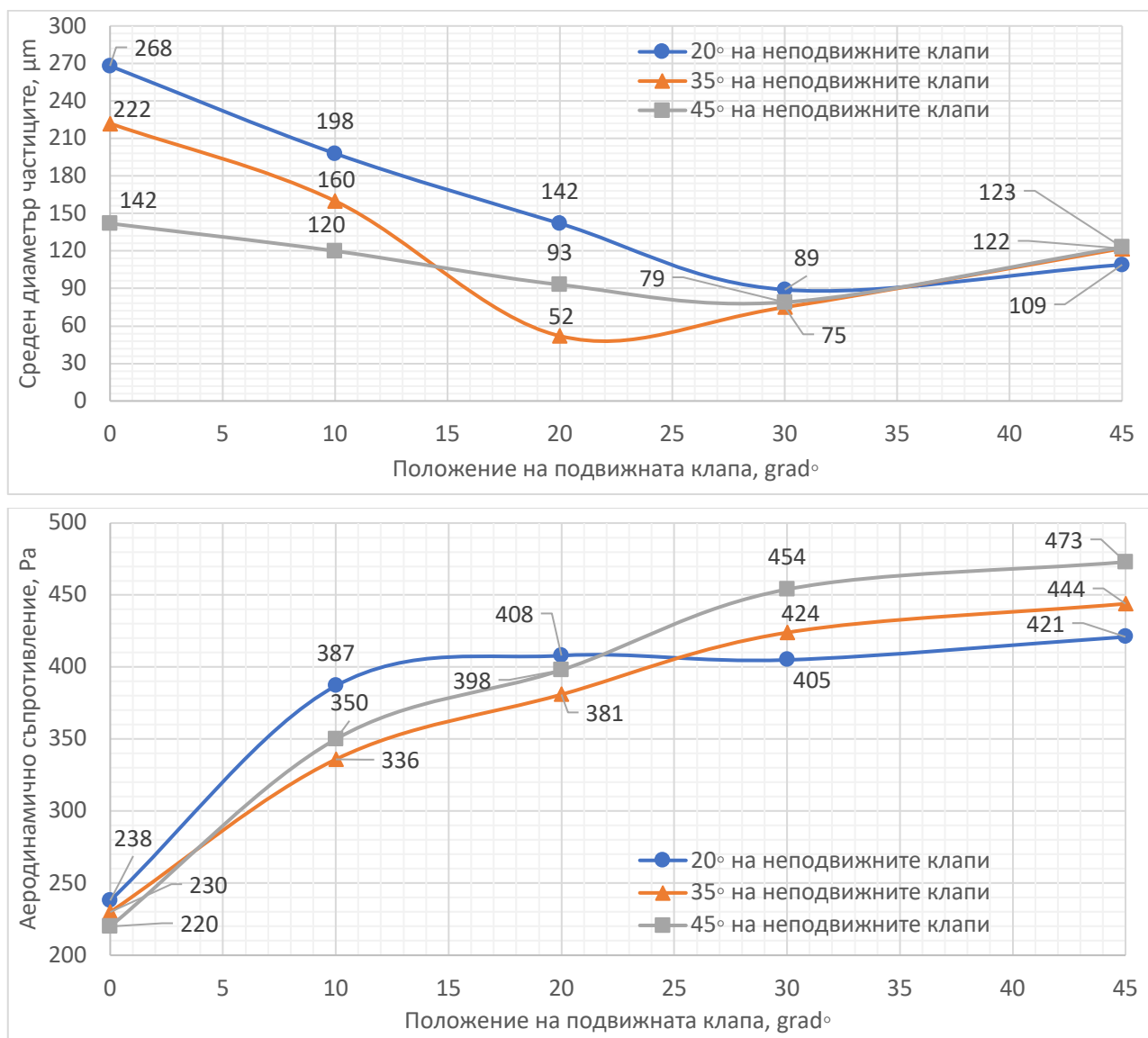
За оценка на възможността за увеличаване на работния диапазон на сепаратора бяха проведени множество моделни изследвания. Те бяха свързани с конструктивни изменения по корпуса и формата на регулируемата лопатка, но не доведоха до желания резултат.

Изследването, което доведе до интересни резултати е свързано с промяна на ъгъла на наклона на неподвижните клапи от 35° на 20° и 45°.

Конкретните стойности за средния зърнометричен състав и аеродинамичното съпротивление при разгледаните случаи са представени графично чрез Фиг. 4.12.

На основата на получените резултати от моделните изследвания на сепаратора на ППС към Котел № 11 и Котел № 12, могат да бъдат направени следните изводи:

- Регулируемият диапазон за едрината на въглищния прах при настоящата конструкция се изменя в интервала от 0° до 20° на подвижната клапа. Интервалът на изменение на зърнометрията е 170 µm - от 52 до 222 µm (фиг. 4.10);
- Промяната на ъгъла на наклон на неподвижните клапи от 35° на 20° ще доведе до увеличаване на интервала на изменение на зърнометрията (179 µm), но при по-груба фракция от 89 до 268 µm. Това изменение се осъществява по-плавно (по-еднозначно) от 0° до 30° на подвижната клапа (фиг. 4.12);



Фиг. 4.12. Средна зърнометрия на "готовия" въздушен прах и аеродинамично съпротивление, в зависимост от положението на клапите на

- Поставянето на неподвижните клапи под ъгъл 45°, намалява интервала на изменение на зърнометричния състав ($63 \mu\text{m}$) – от 79 до 142 μm (фиг. 4.12);
- При поставянето на неподвижните клапи под ъгъл от 20° се наблюдава повишаване на аеродинамичното съпротивление на сепаратора. Това повишаване е за работния диапазон на изменение на подвижната клапа от 0° до 20° (фиг. 4.12).

Моделни изследвания на инерционен сепаратор, част от ППС на котли тип П-62 в ТЕЦ „КонтурГлобал Марица Изток 3“

За оценка на достоверността на модела на сепаратора, резултатите получени от него са сравнени, с резултати от натурни изпитания (Табл. 4.7).

Направеното сравнение между резултатите от натурните изпитания и тези от цифровия модел (Табл. 4.7) показва адекватно представяне на физическата действителност от страна на компютърната симулация.

Проведени са три моделни изследвания на работата на сепаратора. Те обхващат промяната на положението на подвижната клапа "А", както е посочено по-горе. Входните въздействия за всеки от моделираните случаи са обобщени в табличен вид и са представени в Табл. 4.8.

За по-голяма прегледност, резултатите за средния диаметър на въздушните частици напускащи сепаратора, аеродинамичното съпротивление и процентния дял на "готовия" за

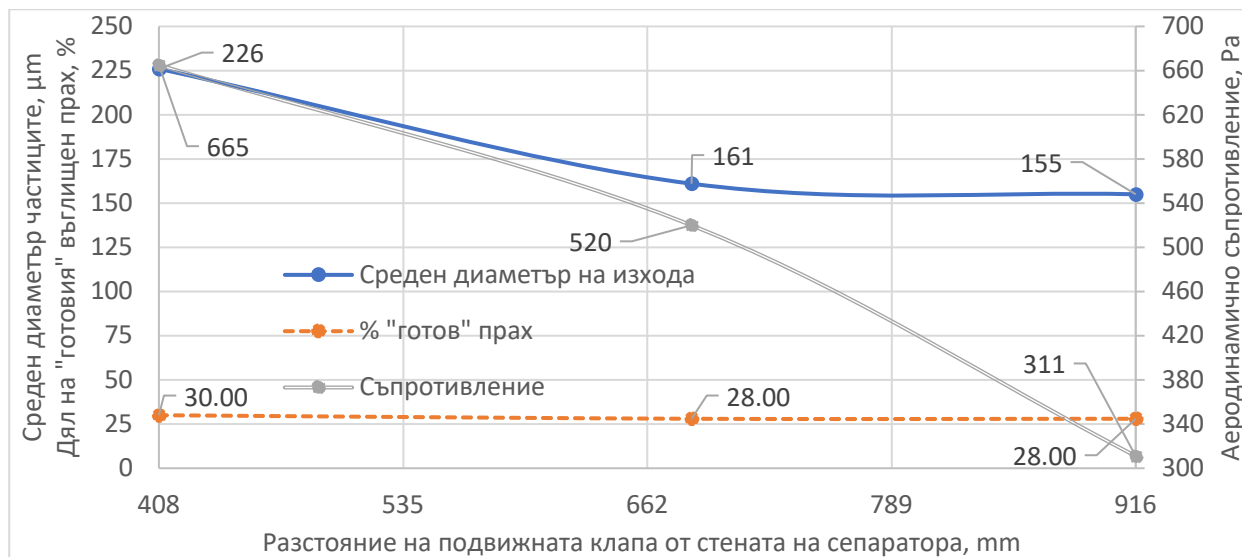
изгаряне въглищен прах са представени графично на Фиг. 4.19.

Табл. 4.7. Сравнение между резултати, получени от натурни изпитания и резултати от цифров модел на сепаратор на ППС към котли П-62

Величина	Означение	Дименсия	Натурни изпитания	Цифров модел
Разстояние между подвижната клапа и стената	-	mm	408	408
Температура на аеросмес след МВ	t_2	°C	195	195
Вентил. производителност след сепаратора - измерена	V_{MB}	$m^3/h, \times 10^3$	277,7	-
Вентил. производителност коригирана по температура и запрашеност на потока	$V_{MB} \mu t_2$	$m^3/h, \times 10^3$	264	261,3
Среден диаметър на въглищните частици	-	μm	229	226

Табл. 4.8. Начални условия при провеждането на моделни изследвания на сепаратор на ППС към котел тип П-62.

Условия	Случай №		
	1	2	3
Разстояние между подвижната клапа и стената, mm	408	685	916
Обемен дебит на транспортирания агент на вход на сепаратора, m^3/h	319 000		
Количество суров въглищен прах на вход на сепаратора, kg/s (t/h)	20 (72)		
Среден диаметър на въглищния прах на вход на сепаратора, μm	350		
Температура аеросмес на вход на сепаратора, °C	195		



Фиг. 4.19. Резултати от моделното изследване на настоящата конструкция на сепаратора на ППС към котли тип П-62 в ТЕЦ "КонтурГлобал Марица Изток 3"

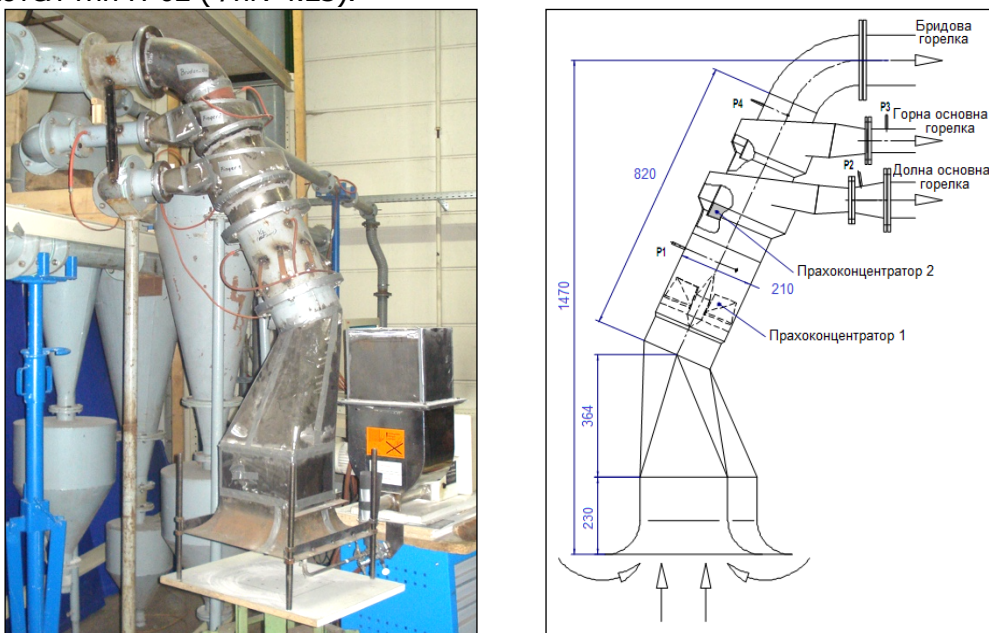
На основата на получените резултати от моделните изследвания на сепаратора на ППС към котли тип П-62 в ТЕЦ "КонтурГлобал Марица Изток 3", могат да бъдат направени следните изводи:

- С увеличаване на наклона на регулируемата клапа, респективно разстоянието между клапата и стената на сепаратора, се наблюдава зафиняване на "готовия" въглищен прах, без това да води до съществена промяна в степента на рецикулация, т.е. до промяна на количеството "готов" прах за изгаряне. Интересното при тази конструкция е аеродинамичното съпротивление, което намалява при подаването на по-фин прах;

- Аеродинамичното съпротивление на сепаратора намалява, в целия диапазон, на увеличаване на разстоянието от клапата до стената;
- Интервалът на регулируемия диапазон за едрината на въглищния прах е твърде тесен (сравнен с подобни други конструкции) $71 \mu\text{m}$ - от 155 до $226 \mu\text{m}$ (Фиг. 4.19);
- Зафиняването на въглищния прах на изхода от сепаратора се наблюдава само до стойност на разстоянието от клапата до стената – 685 mm. По-нататъшното увеличаване на разстоянието между клапата и стената не води до получаването на по-фин прах.

Изследване влиянието на различни фактори върху разпределението на количеството въглища постъпващи в горелките на котел тип П-62 чрез физически модел

Изграден е физически модел на прахопровод с прахоконцентратори, който е част от ППС на котел тип П-62 (Фиг. 4.23).



Фиг.4.23. Физически модел на прахопровод с прахоконцентратори, част от ППС на котли тип П-62

Моделиран е участъкът между въглищния сепаратор и горелките в мащаб 1:10 спрямо реалните размери, като са спазени изискванията на Теорията на Подобие на физични явления. В сравнение с реалния обект, освен обичайния прахоконцентратор с 8 броя лопатки (означен условно на Фиг. 4.23 като Прахоконцентратор 1 и показан на Фиг. 4.24), във физическия модел е монтиран и допълнителен прахоконцентратор (Прахоконцентратор 2 на Фиг. 4.23 и показан на Фиг. 4.25) с 12 броя лопатки. Той е разположен непосредствено преди входа на централната тръба на бридовия прахопровод и преди прахопровода на долна основна горелка.

Целта на допълнително монтирания прахоконцентратор е да изравни натоварването по въглищен прах в долна основна горелка (ДОГ) и горна основна горелка (ГОГ) и по-конкретно да се получи следното разпределение по горелки - ДОГ=45 %; ГОГ=45 % и БГ=10 %.

В основата на модела, през дюза с помощта на компресор за въздух се подават PVC частички, симулирайки подаването на частички въглищен прах. Под входното сечение на модела е разположена дъска разграфена с 15 равномерно разпределени точки, в които чрез преместване на дюзата има възможност да се подават частичките. С помощта на въздушен вентилатор се създават условия за транспортиране на частичките през прахопровода, пресъздавайки вентилационната производителност на мелещия вентилатор. Скоростта на движение на потока от частички и транспортиращ агент на физическия модел е съобразена с тази при реалния обект и отчитайки принципите на подобие, които са приложени в случая.

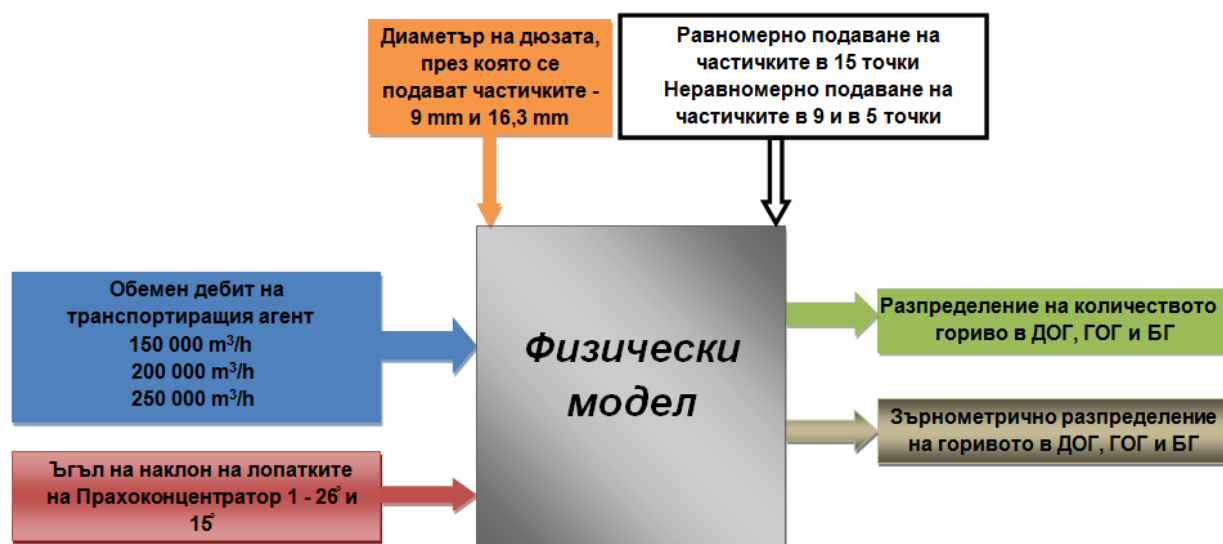


Фиг.4.24. Прахоконцентратор с 8 броя лопатки



Фиг.4.25. Прахоконцентратор с 12 броя лопатки

След преминаването си през прахоконцентраторите, частичките и транспортиращият агент се разпределят по различните етажи на горивната уредба. Вместо, обаче да "изтичат" в пещната камера, както е в реалността, потока от всеки един етаж, преминава през отделен циклон, в който се задържат всичките частички. Следователно количеството задържани частички от определения циклон отговаря на количеството частички преминало през съответната горелка.



Фиг. 4.27. Схема на проведените въздействия върху физически модел на прахопровод с прахоконцентратори, част от ППС на котли тип П-62.

Табл. 4.9. Въздействия проведени върху физически модел на прахопровод с прахоконцентратори, част от ППС на котли тип П-62

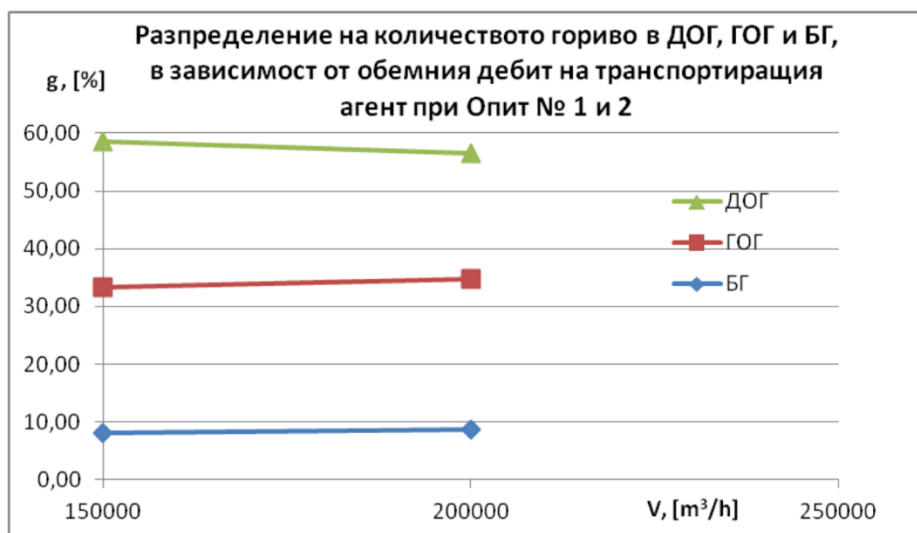
Опит №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметър на дюзата, mm	9	9	9	9	9	9	9	16,3	16,3	16,3
Подаване на частичките	15*	15*	15*	15*	15*	9**	9**	5**	5**	5**
Обемен дебит на транспортиращия агент, 10 ³ m ³ /h	200	150	150	200	250	250	200	150	200	250
Ъгъл на ПрК 1, grad°	26	26	15	15	15	15	15	15	15	15
Ъгъл на ПрК 2, grad°	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

*равномерно подаване в 15 точки

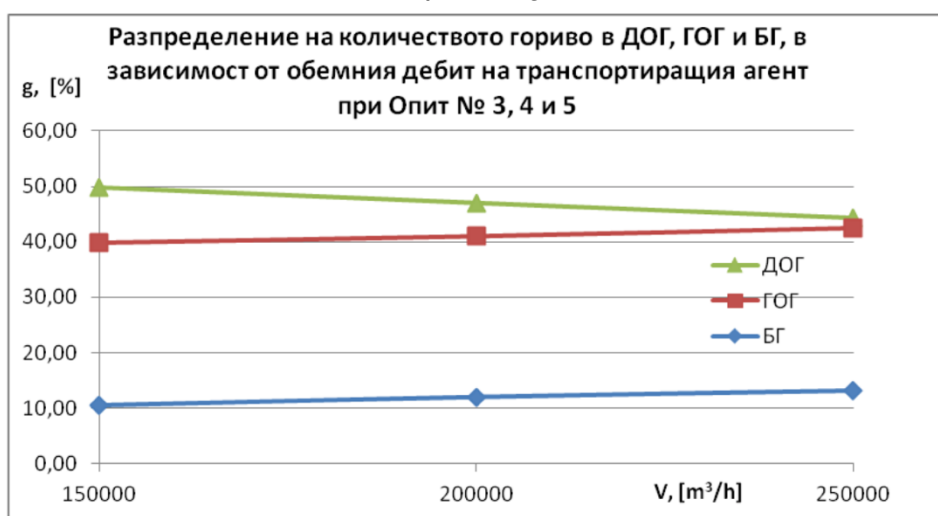
**неравномерно подаване в 9 и в 5 точки

За всеки експеримент беше извършван ситов анализ за определяне на зърнометричното разпределение на частиците в ДОГ, ГОГ и БГ.

Въздействията, които са приложени върху физическия модел по време на извършване на десетте опита са показани на Фиг. 4.27 и Табл. 4.9.



Фиг. 4.28



Фиг. 4.29

Анализ на получените резултати от втората група моделни изследвания:

- Когато обемния дебит на транспортиращия агент се увеличи от 150 000 m³/h до 250 000 m³/h, се наблюдават следните промени в разпределението на горивото:
 - о ДОГ - количеството гориво намалява от 49,72 % до 44,35 %;
 - о ГОГ - количеството гориво се увеличава от 39,80 % до 42,51 %;
 - о БГ - количеството гориво се увеличава от 10,48 % до 13,14 %.

Това е в случаите, когато подаването на частички е равномерно и концентрацията на въглищен прах в транспортиращия агент е ниска (Фиг. 4.29);

- Когато ъгълът на наклон на лопатките на Прахоконцентратор 1 е променен от 26° (Фиг. 4.28) на 15° (Фиг. 4.29), разпределението на горивото по горелки е близко до желаните стойности (ДОГ=45 %; ГОГ=45 % и БГ=10 %);
- Резултатите от проведените експерименти не доведоха до заключение относно зърнометричното разпределение на частичките в различните горелки.

Цифрово симулационно моделиране на центробежен прахоконцентратор, част от ППС на котли П-62 в „ТЕЦ Марица Изток 2“

Разпределението на дяловете на горивото и транспортиращия го агент, получено от изчислителния модел, е съпоставено с проектните параметри в Табл. 4.13. От стойностите ясно се вижда, че моделът адекватно отразява действителния процес на сепариране на потоците по височина на горелката, който е породен от характеристиките на прахоконцентратора. Съпоставянето на моделни резултати с проектните параметри на

изследвания обект представлява още един критерий за валидиране на изчислителния модел. В конкретния случай се вижда, че моделът удовлетворява и този критерий.

Табл. 4.13. Сравнение между резултатите, за разпределение на гориво по височина на горивната уредба получени от цифровия модел на прахоконцентратор към ППС на Котел № 12 и проектните параметри.

Величина	Озн.	Дименсия	Проект	Цифров модел
Наклон на лопатките на прахоконцентратора, grad°	-	$^\circ$	45	45
Разход на транспортиращ агент на вход	$V_{\text{мв}}$	$\text{x}10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	170	170
Аеродинамично съпротивление на прахоконцентратора, P_a	P_a	-	-	488
Разпределение на газовете в БГ	$I_{\text{БГ}}$	-	0,70	0,71
Разпределение на газовете в ОГ	$I_{\text{ОГ}}$	-	0,30	0,29
Разпределение на въглищния прах в БГ	$g_{\text{БГ}}$	-	0,15	0,13
Разпределение на въглищния прах в ОГ	$g_{\text{ОГ}}$	-	0,85	0,87

Получените резултати от моделните изследвания дават основание да бъдат направени следните изводи:

- Резултатите от цифровия модел, потвърждават технологичните характеристики на центробежните прахоконцентратори, описани в множество литературни източници.
- Създаденият в CFD среда изчислителен модел отразява коректно всички конструктивни размери, входни потоци и гранични условия, както и характеристиките на средата в работния обем на изследвания обект.
- Резултатите от изчислителния модел повтарят разпределението на потоците гориво и транспортиращ агент, заложи в проекта на прахоприготвящите системи.
- Извършено е валидиране на изчислителния модел по три критерия:
 - мрежово независимо решение;
 - сходимост на решението;
 - сравнение с проектните параметри на обекта.

Създаденият изчислителен модел вярно пресъздава реалните условия на работа на прахоконцентратора на котли тип П-62 (Котел № 11 и Котел № 12) в ТЕЦ „Марица Изток 2“, което се потвърждава от получените резултати и направеното валидиране. Така изграденият модел може да послужи за последващи моделни изследвания при други работни условия на съоръжението - наклон на лопатките, вентилационна производителност, количество на горивото, качество на горивото и др.

ПЕТА ГЛАВА

Моделни изследвания на пещната камера на котел тип П-62

Опитът натрупан по време на дългогодишната експлоатация на котел ст. № 12 в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД, както и проведените редица натурни изпитания от производствено-технологичния отдел (ПТО) на централата, дават възможност да се конкретизират следните нежелани проявления:

- Постепенно повишаване на температурите в пещната камера, в процеса на тяхната експлоатация;
- Като резултат от повишените температури се увеличава вероятността от образуване на минерални отложения по екранната система на пещната камера;
- Търсенето на различни въздействия с цел решаването на част от по-горе посочените проблеми, е довело до подаването на допълнително количество въздух. На определен етап, използването на това средство е давало известни резултати, независимо, че е водело до проблеми с понижаването на КПД; повишаване на натоварването на

въздушните и димните вентилатори и др.;

- С въвеждането на новите изисквания за нормите за допустими емисии от азотни оксиди до 200 mg/Nm^3 ($\text{O}_2 = 6 \text{ vol } \%$) от 01.01.2016 г., използването на средството „допълнителен въздух“, става неприложимо, т.е. налага се необходимостта от търсене на по драстични мерки за изпълнение на изискванията към котела.

За да се провери дали е възможно решаването на така натрупалите се проблеми могат да се използват средствата на цифровото моделиране.

Изграждане на цифров модел на печната камера при проектно състояние на горивната уредба на Котел № 12 в "ТЕЦ Марица Изток 2"

Изследването на печните процеси за всеки тип котел, изисква познаване на конструктивните особености на печната камера, горивната уредба – горивни и въздушни канали, както и на въздуховодите разпределящи окислителя по височина на горелките. За нуждите на моделните изследвания, печната камера [78] на П-62 е изградена от изпарителни нагревни повърхности и паропрегревателни такива. Горивната уредба (въздушните и горивни канали) е изчертана съгласно проектната техническа документация.

За да бъде извършено валидирането на изчислителния модел, е направен сравнителен анализ между стойности характеризиращи работата на печната камера получени по два различни начина – резултати от проектните топлинни пресмятания на печта и резултати от модела.

Направеното сравнение между резултатите от проектните изчисления и тези от цифровия модел (Табл. 5.4) показва адекватно представяне на физическата действителност от страна на компютърната симулация [84], [139] относно поведението на печната камера на котли тип П-62.

Табл. 5.4. Сравнение между проектни изчисления и резултати от моделни изследвания на процесите в печната камера на Котел ст. № 12 в "ТЕЦ Марица Изток 2"

№	Величина	Дименсия	Проект	Модел
1	Количество топлина възприета от екранните стени на ПК	MW	151,6	145,5
2	Средна температура на димните газове на изхода от ПК	°C	854	864
3	Средна концентрация на O_2 в димните газове на изхода от ПК	%	3,5	3,8
4	Средна стойност на количеството димен газ засмукан през ГЗШ на работещите ППС	kg/s	24,06	26,02

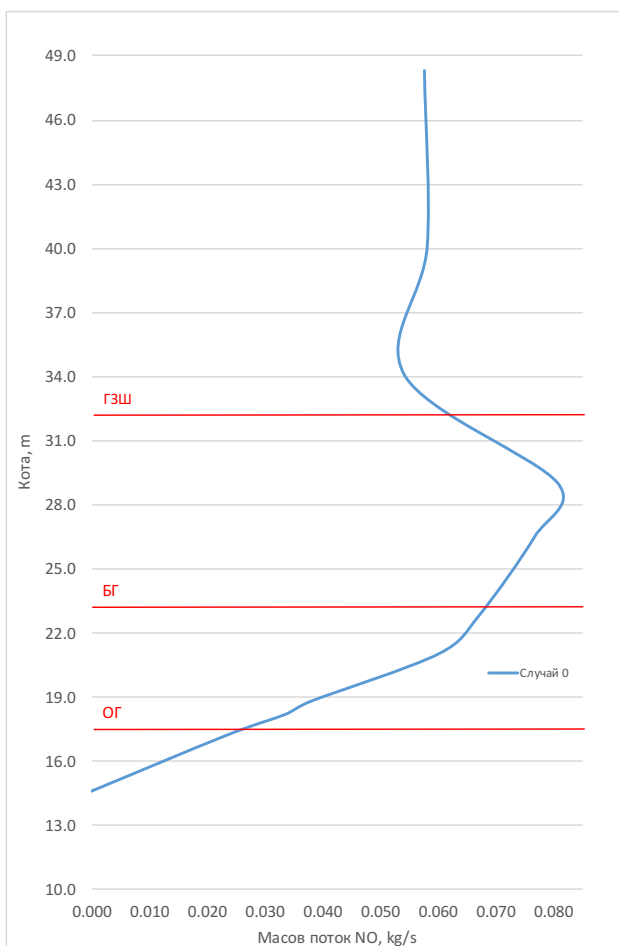
Концентрацията на азотни оксиди (NO_x) получена от цифровия модел на изход от печната камера на Котел ст. № 12 е 287 mg/Nm^3 , при референтна стойност на кислород от 6 %. Тази стойност е валидна за експлоатационни условия само при чисти (незашлаковани) нагревни повърхности.

Загубите от механично недоизгаряне q_4 , получени от изградения модел са 2,8 %.

Получените стойности за масовия поток на азотен оксид по височина на печната камера представени на графиката във Фиг. 5.8, показват недвусмислено, че именно в основната горивна зона (от основни до бридови горелки) се формират NO_x . От графиката се вижда още, че на височината на газозаборни шахти масовия поток на NO намалява. Това е така, защото част от димните газове напускат обема на печната камера през газозаборните шахти, респективно част от азотните оксиди също.

Във височина на печната камера (след газозаборните шахти), масовият поток на NO се изменя в много тесни граници. Това отново потвърждава факта, че в случая азотните оксиди се формират в основната горивна зона.

За да се ограничи формирането на NO_x е необходимо да се намалят температурите и количеството окислител в основна зона. Това би довело до генериране на по-малко количество азотни оксиди и/или постигане на среда благоприятна за тяхното разпадане.



Фиг.5.8. Изменение на масовия поток NO по височина на ПК

Моделни изследвания на процесите в печната камера на Котел ст. № 12 в ТЕЦ "Марица Изток 2" с цел редуциране на азотните оксиди NO_x

Съществена особеност при експлоатацията на котли тип П-62, изгарящи лигнитни въглища от басейна "Марица Изток" е разходът на организирано подавания въздух към печната камера. Въпреки, че проектният разход на въздух (при номинален товар) е 735 000 Nm³/h, то много често експлоатацията на тези котли се осъществява с по-висок такъв. Необходимостта за подаването на по-голямо количество организиран въздух е продиктувана от стремежа за намаляване на вероятността от шлаковане на изпарителните нагревни повърхности. По-голямото количество организиран въздух води до намаляване на температурите в печната камера и на димните газове на входа на газозаборните шахти (ГЗШ). Освен това, осигурената окислителна среда в печната камера, води до повишаване топлината температура на пепелта, получена при изгарянето на въглищата.

Запазвайки еднакви всички начални условия, с изключение на общия разход на организирано подавания въздух, са

изследвани получените резултати от 2 моделни решения:

- При общ разход на организиран подаван въздух - 735000 Nm³/h – Случай 0;
- При общ разход на организиран подаван въздух - 800000 Nm³/h – Случай 1.

Резултатите потвърждават наблюденията от практиката, че температурите в зоната на основни горелки се намаляват с около 68 °C, а средната температура на димните газове постъпващи в ГЗШ намалява с около 45 °C. Наблюдава се и още един положителен резултат – количеството неизгорял кокс [145] (който е показател за загубите на топлина от механично неизгоряло) също намалява [80].

Наред с така посочените положителни резултати, на лице са и някои негативни последствия от подаването на по-голямо (от проектното) количество организиран въздух към котела:

- Повишаване на топлинните загуби на котела (загубите на топлина с изходящите газове) [156];
- Повишаване на собствените нужди от ел. енергия (повишаване на потреблението на ел. енергия за въздушни и димни вентилатори);
- Повишаване на концентрацията от азотните оксиди на изхода от печната камера.
- В случая с проектен разход на въздух концентрацията на азотни оксиди на изхода от печна камера е 287 mg/Nm³, а за Случай 1 (при разход на въздух от 800 000 Nm³/h) NO_x = 306 mg/Nm³. Този резултат е очакван, предвид, че основното количество азотни оксиди, които се формират при изгарянето на лигнитните въглища са така наречените "горивни азотни оксиди".

Предложения за промяна в организацията на подавания въздух и конструктивни изменения в проектните горивни уредби на Котел ст. № 12 в ТЕЦ "Марица Изток 2"

С цел редуциране на генерираните азотни оксиди в печната камера, са направени някои промени по конструкцията на горивните уредби, както и по режима на експлоатацията на този котел, а именно:

- Осигуряване на редукционна среда в зоната на основни горелки т.е. коефициент на излишък на въздух в основната горивна зона по-нисък от единица ($\alpha < 1$). Реализирането на това условие изисква извършването на промени по горивните уредби – най-вече намаляване на сечението на въздушните отвори в горелката;
- Неподаденият организиран въздух в основна зона се преразпределя по височина на печната камера. За тази цел бяха определени местата на подаването на т.нар. "надгоривен въздух".

Изборът на места за отвори за надгоривен въздух е направен съобразно конструктивните особености на котли тип П-62 – разположение на носещи и укрепващи греди, паропроводи, колектори и т.н. Поставени са общо 6 дюзи – по една на лявата и дясната стена на долна радиационна част (ДРЧ), над газозаборна шахта (ГЗШ) и по две на предната и задната стена на горна радиационна част (ГРЧ), непосредствено след изхода на печната камера (преди ширмовия паропрегревател).

Предложените промени в конструкцията на горивните уредби могат да бъдат разделени в две групи:

1. Намаляване на светлото сечение на въздушните канали

При новата горелка е намалено общото сечение на въздушните канали, спрямо проектната с цел запазване на скоростите на изтичане на въздуха при по-ниските дебити на организирано подаван въздух. Това е постигнато чрез частично запушване на част от каналите за въздух в основни и бридови горелки. След запушването общото сечение за въздух на една горивна уредба е $0,8185 \text{ m}^2$ спрямо $1,0596 \text{ m}^2$ по проект или намаление с приблизително 23 %.

2. Поставяне на турбулизиращи планки на горивните отвори.

Тези планки имат за цел да интензифицират смесването на горивото и въздуха, като турбулизират прахо-газовия поток. По този начин се цели да се получи по-стабилен горивен процес.

Моделни изследвания на процесите в печната камера на Котел № 12 с новите предложения – преразпределение на организирано подавания въздух и променени горивни уредби

Проведени са четири моделни изследвания с новите технологични предложения – преразпределение на организирано подавания въздух и променени горивни уредби. Тези изследвания имат за цел да проучат поведението на горивният процес при различно разпределение на организирано подавания въздух по височина на печната камера на Котел ст. № 12.

Спрямо двата проектни случая (Случай 0 и Случай 1), количеството на организирано подаван въздух при тези моделни изследвания е намалено съответно с $50\,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ и $115\,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, т.е. това количество е $685\,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Разликата между отделните случаи е в разпределението на количеството надгоривен въздух за сметка на въздуха през горивните уредби.

Входните данни касаещи разпределение на организирано подавания въздух за отделните случаи са представени в Табл. 5.5.

Табл. 5.5. Разпределение на организирано подавания въздух за отделните случаи

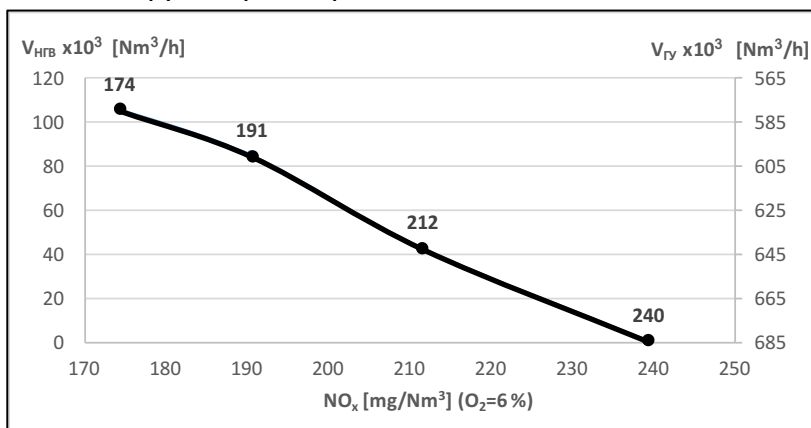
Вид въздух	Случай 2	Случай 3	Случай 4	Случай 5
Общо количество организирано подаван въздух, Nm^3/h	685 000	685 000	685 000	685 000
Въздух през горивните уредби, Nm^3/h	685 000	643 000	601 000	580 000
Надгоривен въздух, Nm^3/h	0	42 000	84 000	105 000

На Фиг. 5.14 е представена графика за изменението на концентрацията на NO_x ,

[mg/Nm³] при O₂ = 6 %, на изхода от печната камера за изследваните 4 случая. От тази графика също се вижда, че отнемането на определено количество организирано подаван въздух от горивните уредби и прашането му като надгоривен въздух [72] води до понижаване на концентрацията на азотни оксиди на изхода от печната камера.

Както бе отбелязано по-горе, разгледани са два случая при моделните изследвания на работата на печната камера при проектно състояние на горивната уредба. При Случай 0 количеството организирано подаван въздух през горивните уредби е 735 000 Nm³/h, а при Случай 1 е 800 000 Nm³/h.

От друга страна при моделните изследвания на печната камера на Котел ст. № 12 с



Фиг. 5.14. Концентрация на NO_x на изхода от печната камера в зависимост от преразпределението на организирано подавания въздух

промяна в организацията на подавания въздух и конструктивни промени в проектите горивни уредби са разгледани 4 случая. Разликата в тези случаи е преразпределеното количество въздух през горивните уредби и като надгоривен. Максималното количество въздух, което предложените конструктивни промени позволяват да се подаде като надгоривен е 84 000 Nm³/h (Случай 4). Освен това при този случай

концентрацията на NO_x [32] на изхода от котела е 191 mg/Nm³ (O₂ = 6 %), т.е. под нормативното ограничение от 200 mg/Nm³.

Огромната база данни, която се получава като резултат от моделните изследвания, дава възможност за визуализацията на различни характеристики, които носят информация за вземането на мерки за предотвратяване на шлакообразуването по екраните и ограничаване формирането на азотни оксиди.

Концентрациите на NO_x на изхода от печната камера и загубите от механично недоизгаряне за сравняваните случаи са представени в Табл. 5.6, заедно с резултатите от всички разгледани случаи.

Табл. 5.6. Резултати от моделните изследвания на работата на печната камера на Котел ст. № 12

№	Величина	Случай 0	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4	Случай 5
1	Въздух през горивните уредби, Nm ³ /h	735000	800000	685000	643000	601000	580000
2	Надгоривен въздух, Nm ³ /h	-	-	0	42 000	84 000	105 000
3	Концентрация на азотни оксиди (NO _x) на изход от печната камера*, mg/Nm ³ (O ₂ =6 %)	287	306	240	212	191	174
4	Загуби от механично недоизгаряне - q ₄ , %	2,8	2,4	2,9	3,1	3,7	4,0

* Тази стойност е валидна за експлоатационни условия само при чисти (незашлаковани) нагревни повърхности и без постъпването на неорганизиран въздух в печната камера.

Анализ на получените резултати от извършените моделни изследвания на печната камера на котел тип П-62

На основата на информацията описана по-горе и на получените резултати от

моделните изследвания могат да бъдат направени следните обобщения:

1. Създаден е цифров симулационен модел на процесите протичащи в печната камера на Котел ст. № 12. За тази цел са използвани конструктивни и експлоатационни данни от неговата работа до настоящия момент. Основната задача на този модел се състоеше в това да бъде валидиран азотния модел, който се използва в софтуера. Получените резултати от модела покриват с достатъчна точност, както основните параметри, характеризиращи работата на печната камера, така и получените данни от реализирани изследвания за концентрацията на азотни оксиди на изхода от котела.

2. Изграден е модел на печната камера с предложения за изменения по горивните уредби и по разпределението на организирано подавания на въздух, чрез добавяне на 6 бр. дюзи за надгоривен въздух. Целите на така предложените изменения са две: редукция на количеството образувани се азотни оксиди на изхода от печната камера (отчетено като концентрация на NO_x под 200 mg/Nm^3 при $\text{O}_2 = 6 \%$) и намаление на вероятността за зашлаковане на основна зона. За изчисляване на количеството генерирани азотни оксиди е използван валидирания „азотен модел“.

3. Извършени са изследвания с така изградения модел, които използват различни начални условия. Тези различни начални условия се свеждат до намаляване и преразпределение на подаваното количество организиран въздух. Получените стойности за концентрацията на NO_x на изхода от печната камера при всички разгледани случаи, както и степента на загубите от механично недоизгаряне са представени в *Табл. 5.6*.

4. Въпреки, че моделните изследвания по принцип дават определени тенденции, то в някои случаи може да се използват и за количествена оценка. От *Табл. 5.6* се вижда, че се получава редукция на азотните оксиди между $33 \div 38 \%$ ($96 \div 115 \text{ mg/Nm}^3$) като се сравни Случай 4 спрямо двата „проектни“ случая (Случай 0 и Случай 1).

5. Намаляването на организирано подавания въздух в основна зона води до влошаване на горивния процес, което се вижда от увеличаването на загубите от механично недоизгаряне (q_4) с около $1,3 \div 1,5 \%$.

ШЕСТА ГЛАВА

Конструктивни изменения на котли тип П-62 с цел подобряване на горивния процес и гарантиране на нискоемисионно азотно горене

Като са взети под внимание резултатите получени от проведени моделни изследвания, спецификите в конструкцията на разглежданите котли тип П-62 и не на последно място световния опит, за целите на реконструкцията са избрани следните конкретни конструктивни и технологични мерки, делящи се на две основни групи:

- Конструктивни изменения вследствие на технологичните промени [25]:
 - о промяна на прахоприготвящата система:
 - промени по сепаратора;
 - нов прахоконцентратор;
 - промяна на горивните уредби на котела;
 - о добавяне на над горивен въздух;
- Технологични промени - промяна работния режим на парогенератора:
 - о намаляване на количеството организирано подаван въздух [17];
 - о разпределението на въздуха по височина на печната камера (коефициент на излишък на въздух в основна зона по-малък от единица) [17].

Промяна на инерционен сепаратор

На базата на направените изводи от получените резултати от проведените цифрови симулационни изследвания на настоящата конструкция на инерционен сепаратор на ППС към котел тип П-62 (котли № 11 и № 12), се предлага да се промени наклонът на двете неподвижни клапи разположени в обема на сепаратора – от 35° на 20° (*Фиг. 6.16*). Това би

довело до увеличение на регулируемия диапазон за едрината на подавания въглищен прах (от 89 до 268 μm), което влияе пряко върху горивния процес. Промяната в ъгъла на неподвижните клапи ще намали аеродинамично съпротивление за работния диапазон на изменение на зърнометрията при промяна на наклона на подвижната клапа от 0° до 30°.

Подмяна на центробежен прахоконцентратор

Опирайки се на резултатите от проведени изследвания с физически модел на реконструирана горивна уредба с прахоконцентратор (т. 4.2.1) на котли тип П-62 и на опита от вече извършена реконструкция на котли тип ПК 38-4 [41], [42] са поставени следните изисквания към промяна в конструкцията на прахоконцентратора, част от ППС към котли № 11 и № 12 в ТЕЦ „Марица Изток 2“:

- Количеството прах към основни горелки да бъде около 80 % от общия прах след мелещия вентилатор ($g_o=0,8$);
- Количеството прах към „долна“ и „горна“ основна горелка да бъде приблизително еднакво;
- Количеството транспортиращ агент към основни горелки да бъде около 30 ÷ 40 % от общото количество (т.е. $l_o=0,3 \div 0,4$);
- Количеството транспортиращ агент за „долна“ и горна“ основни горелки да бъде приблизително еднакво;
- Аеродинамичното съпротивление, което ще оказва новия прахоконцентратор да бъде по-ниско от това, което създава сега съществуващия.

В изпълнение на така поставените изисквания са реализирани следните промени в конструкцията на прахоконцентратора (Фиг. 6.2б):

- Броят на лопатките на прахоконцентратора е намален от 12 на 8, което води до намаляване на аеродинамичното съпротивление, което конструкцията оказва върху потока транспортиращ агент – въглищен прах. Поради тази причина е променен и профилът на лопатките;
- Осигурена е възможност за промяна ъгъла на наклон на лопатките в диапазона 20° ÷ 45°. Това позволява да се регулира разпределението на въглищния прах по височина на горивната уредба, което влияе пряко върху горивния процес

Допълнително горивната уредба ще се модифицира от два на три „етажа“, като основна горелка ще се раздели на долна основна горелка (ДОГ) и горна основна горелка (ГОГ).

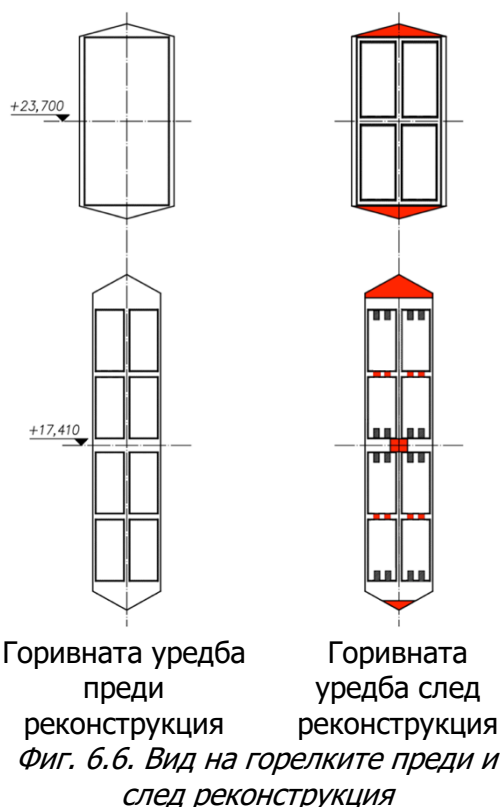
Промяна на горивните уредби

При настоящата експлоатация на котли ст. № 11 и ст. № 12 в ТЕЦ „Марица изток 2“, цялото количество организиран въздух се подава през горелките с коефициент на излишък на въздух от 1,25. В резултат на тази надстехиометрична експлоатация се получава формиране на високи горивни NO_x . Първичните методи за ограничаване формирането на NO_x имат за цел най-общо да понижат парциалното налягане на кислорода (O_2) в зоната на горивните уредби. Това се постига чрез стъпаловидно подаване на организирания въздух по височина на пещната камера (Фиг. 6.3).

Освен степенуване по височина на пещта, въздуха се степенува и по височина на горелката. Това степенуване, на ниво горивна уредба, в зависимост от разпределението на въглищния прах осигурява оптимално количество кислород, за да се преобразуват почти напълно горимите елементи и да се избегне формирането на NO . Останалото количество въздух, необходимо за изгарянето на непълно реагиралите продукти (например CO), се инжектира като надгоривен въздух над горелките.

Постигането на изискваните нива за емисиите от NO_x е възможно чрез поставяне/монтиране на нови ниско емисионни горивни уредби. Основна горелка ще бъде разделена на две – **долна основна и горна основна**. Това се прави с цел постигане на оптимално разпределение на въглищния прах по-височина на горелката. Предварително условие за постигането на стабилно горене е интензивно смесване между въздуха и потока газ-въглищен прах. За целта ще бъдат проектирани нови прахопроводи за захранването на горелките с въглищен прах.

Освен това ще бъдат монтирани и нови клапи на прахопровода към бридова горелка



на потоците гориво и окислител.

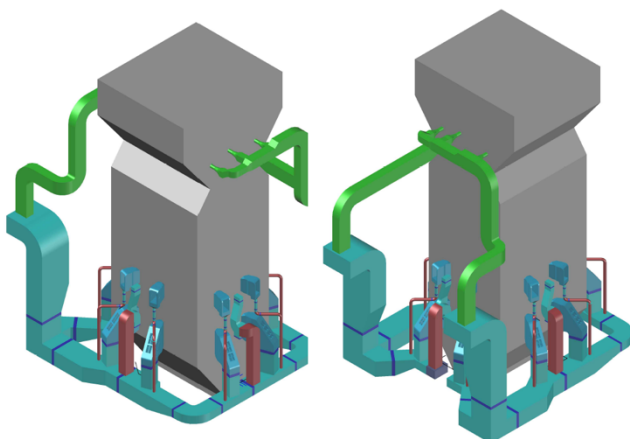
Поставянето на турбулизиращите планки има за цел завихря потока още в праховите канали. Това завихряне има за цел да освободи по-голямо количество летливи вещества от въглищният прах [43], преди постъпването им в пещната камера, което ще доведе до по-ранно възпламеняване на горелката и до по-стабилен горивен процес.

За постигането на по-добра газоплътност, с цел намаляване на просмукванията на неорганизиран въздух, между горивните уредби и пещната камера са разработени нови „разводки“ на изпарителните нагревни повърхности в зоната на основни горелки. [44]

Промяна в системата за подаване на организиран въздух и добавяне на надгоривен въздух

Освен намаляването на общото количество, организирано подаван въздух за ограничаване формирането на азотни оксиди и шлакообразуването по екраните, е предвидено и зонирано подаване на въздуха за горене на две нива (Фиг. 6.8):

- над горивен въздух – преди изхода на пещната камера;
- към горивните уредби.



Фиг. 6.8. Аксонометричен изглед на въздуховодите за организиран подаван въздух

за да може да се регулира и разпределението на инертните газове по височина на горелката, което ще доведе до увеличаване на регулируемия диапазон на прахоприготвящата система.

Бридовите горелки също са подменени с нови. За постигане на по-добро смесване между постъпващото гориво през нея и окислителя, при новата бридова горелка, въздухът се подава като „кръстен“ (централен въздух), а не отстрани както при настоящата конструкция.

Вземайки под внимание посочените по-горе факти, на Фиг. 6.6 е показана реализираната модификация на горивна уредба.

Тя обхваща:

- Разделяне на основна горелка на долна основна и горна основна горелки;
- Нова организация на подаване на въздух към бридова горелка;
- Намаляване светлото сечение на въздушните канали;
- Поставяне на турбулизиращи планки на горивните отвори за интензифициране смесването

При предлаганата нова организация на въздушния режим на котли ст. № 11 и ст. № 12, се предвижда да отпадне т.нар. „горен кораб“. Т.е. всички горивни устройства ще се захранват с въздух от т.нар. „долен кораб“. Освен това се предвижда изграждането на нова система за надгоривен въздух (НГВ). Тази система е предназначена да инжектира достатъчно количество въздух, на предната и задната стена, необходим за окисление на недоизгорелите продукти от зоната на горелките. Силният импулс на въздушната струя осигурява добро проникване и смесване на въздуха с димните газове и

доставя достатъчно кислород за доокислението на въглеродния оксид (CO).

Надгоривният въздух се захранва от двата общи въздуховода на изхода от въздухоподгревателя, зад котела и се подава в печната камера посредством шест броя дюзи. На предната и задната стена на котела са монтирани по 3 броя дюзи за НГВ. Четири от дюзите (два броя на предната и два броя на задната стена) са инсталирани на кота +43 600 mm, а два броя (по един брой на предната и задната стена) са на кота +44 385 mm.

Чрез разпределението на организирано подавания въздух по височина на печната камера в зоната на високите температури има недостиг на въздух, т.е. там коефициентът на излишък на въздух е по-малък от единица ($\alpha < 1,0$), а над тази зона се подава останалия необходим за горенето въздух.

Реализирането на оптимален горивен процес изисква информация за разхода на организирано подавания въздух към печната камера и неговото разпределение по горивните уредби [33]. От друга страна, първичните мерки за ограничаване на формирането на вредни емисии от азотни оксиди силно се влияят от това къде и колко въздух за горене се подава, което допълнително засилва нуждата от оценка на разпределението на въздуха подаван за горене.

СЕДМА ГЛАВА

Моделни изследвания на ППС и на печната камера на котел тип П-62 след извършени конструктивни изменения

Моделни изследвания по прахоприготвящата система

Моделни изследвания на сепаратор

Проведени са моделни изследвания на настоящата конструкция въглищни сепаратори на котли № 11 и № 12 в „ТЕЦ Марица Изток 2“ (т. 4.1.2). Тези изследвания са част от реконструкцията на прахоприготвящите системи и печната камера на споменатите котли, които са тип П-62. На база на получените резултати от симулационното моделиране е достигнато до решението за конструктивна и технологична промяна на настоящата конструкция на въглищен сепаратор.

Промяната се състои в модифициране на ъгъла на наклон на неподвижните клапи от 35° на 20°, което води до увеличаване на интервала на изменение на зърнометрията от 89 до 268 μm (разлика 179 μm) и намаляване на аеродинамичното съпротивление, което конструкцията на сепаратора оказва върху прахогазовия поток (167 Pa). Тези изменения се осъществяват по-плавно (по-еднозначно) от 0° до 30° на подвижната клапа.

Моделни изследвания на прахоконцентратор

Табл. 7.1. Начални условия при провеждането на моделни изследвания на прахоконцентратор на ППС към котел П-62

Условия	Настояща конструкция	Нова конструкция				
Случай №	0	1	2	3	4	5
Наклон на лопатките на прахоконцентратора, grad°	45	20	25	30	35	40
Разход на транспортиращ агент на вход, $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	220					
Количество въглищен прах на вход, kg/s (t/h)	12 (43,2)					

От получените от моделните изследвания за двете конструкции на прахоконцентратор резултати могат да се направят следните изводи:

- От Фиг. 7.6 се вижда, че **80 % ($g_0=0,8$) от общото количество прах се подава към основни горелки** в случай, че ъгъла на наклон на лопатките на новата конструкция прахоконцентратор е 20°. **Освен това количеството прах към долна**

и горна основна горелка при новата конструкция на прахоконцентратор е приблизително еднакво при ъгъла на наклон на лопатките от 20° (Фиг. 7.6);

Табл. 7.2. Резултати от проведените моделни изследвания на прахоконцентратор на ППС към котел П-62

Условия	Настояща конструкция	Нова конструкция				
Случай №	0	1	2	3	4	5
Наклон на лопатките на прахоконцентратора, grad°	45	20	25	30	35	40
Разход на транспортиращ агент на вход, $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	220					
Аеродинамично съпротивление, Pa	488	317	319	347	377	458
Аеродинамично съпротивление на новата конструкция на прахоконцентратора спрямо настоящата, %	-	65	65	71	77	94
Разпределение на транспортиращ агент (I) по височина на ГУ						
БГ	0,71	0,63	0,62	0,61	0,59	0,56
ГОГ	-	0,18	0,18	0,19	0,20	0,22
ДОГ	0,29	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22
Разпределение на въглищния прах (g) по височина на ГУ						
БГ	0,13	0,19	0,10	0,06	0,04	0,03
ГОГ	-	0,39	0,38	0,28	0,15	0,09
ДОГ	0,87	0,42	0,52	0,66	0,81	0,88



Фиг. 7.4. Аеродинамично съпротивление на новата конструкция на прахоконцентратора спрямо настоящата при различен наклон на лопатките.



Фиг. 7.5. Разпределение на транспортиращия агент по височина на горивната уредба при настоящата конструкция на прахоконцентратор и при различен наклон на лопатките на новата конструкция.

➤ От показаните на Фиг. 7.5 резултати за разпределение на транспортиращия агент (I) по височина на горивната уредба при новата конструкция на прахоконцентратор се вижда, че **количеството транспортиращ агент към основни горелки е около 40 % от общото количество** (т.е. $I = 0,4$). Освен това **количеството транспортиращ агент за "долна" и горна основни горелки е приблизително**



Фиг. 7.6. Разпределение на въглищния прах по височина на горивната уредба при настоящата конструкция на прахоконцентратор и при различен наклон на лопатките на новата конструкция.

еднакво. Тези резултати са валидни за целия диапазон на изменение на наклона на лопатките на прахоконцентратора;

- **Намаления брой на лопатките на прахоконцентратора от 12 на 8, води до по-малко аеродинамично съпротивление** след прахоконцентратора, като то е между 65 % и 94 % от аеродинамичното съпротивление на настоящата конструкция (Фиг. 7.4); При предложената нова конструкция с увеличаване на ъгъла на наклон на лопатките на прахоконцентратора от $20^\circ \div 45^\circ$ се наблюдава намаляване на количеството въглищен прах постъпващ в бридова горелка и в горна основна горелка за сметка на увеличаване на количеството прах постъпващ в долна основна горелка (Фиг. 7.6);

Моделни изследвания на печната камера

Изследването е проведено за максимален паров товар на котела при разход на гориво от 350 t/h с калоричност 1567 kcal/kg. Нискоазотното изгаряне на въглища изисква коефициент на излишък на въздух, в края на печна камера, близък до единица. Поради тази причина е използван коефициент на излишък на въздух 1,07. Количеството въздух подаван към котела е 750 000 Nm³/h, като 80 000 Nm³/h се подават като просмукан през ППС, а 670 000 Nm³/h като организирано подаван.

Организирано подавания въздух (670 000 Nm³/h) се разпределя в две зони:

- 550 000 Nm³/h към основна горивна зона т.е. към горивните уредби (470 000 Nm³/h към основни горелки и 80 000 Nm³/h към бридови)
- 120 000 Nm³/h към така наречената надгоривна зона т.е. към дюзите за надгоривен въздух.

Разпределението на горивото и транспортиращите го димни газове постъпващи през горелките по височина на печната камера е показано в Табл. 7.6. Зърнометричният състав на използваното разпрасено гориво е представен в Табл. 7.7 (данните са от изпитания проведени от ПТО на „ТЕЦ Марица изток 2“).

В Табл. 7.8 са представени стойностите за обема на факела, преди и след реконструкцията, при различни температурни интервали, а на Фиг. 7.12 са изобразени графично. След реконструкцията се наблюдава намаляване на обема на факела при високите температури (в интервала 1150 °C ÷ 1300 °C) за сметка на по-ниските (в интервала 1000 °C ÷ 1150 °C). Това би довело до намаляване на вероятността за зашлаковане на печната камера в областта на горивните уредби. [23] [61]

Табл. 7.6. Разпределение на горивото и транспортиращия агент по височина на горивната уредба

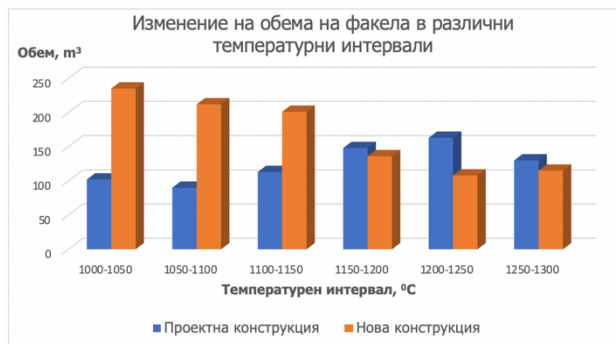
Входни потоци	Поток гориво (суха маса) [kg/s]	g	Газов поток [kg/s]	l
Бридова горелка	0,681	0,10	27,9	0,60
Горна основна горелка	3,063	0,45	9,3	0,20
Долна основна горелка	3,063	0,45	9,3	0,20

Табл. 7.8. Обем на факела при различни температурни интервали

Температурен интервал	Обем на факела, m ³		Промяна спрямо проекта
	Проектна конструкция	Нова конструкция	
1000-1050 °C	102	235	130 %
1050-1100 °C	90	212	136 %
1100-1150 °C	113	201	78 %
1150-1200 °C	148	136	-8 %
1200-1250 °C	163	108	-34 %
1250-1300 °C	130	115	-12 %

Концентрацията на азотни оксиди (NO_x) получена от цифровия модел на изход от печната камера на Котел ст. № 11 и № 12, след реконструкцията е 183 mg/Nm^3 , при референтна стойност на кислород от 6 %. Тази стойност е валидна за експлоатационни условия само при чисти (незашлаковани) нагревни повърхности. Спрямо стойността получена за проектната конструкция на печната камера от 295 mg/Nm^3 се реализират 38 % редукия. Загубите от механично недоизгаряне q_4 , очаквано нарастват от 2,4 % до 4,3 %.

Получените резултати от моделните изследвания могат да бъдат резюмирани по следния начин:



Фиг. 7.12. Изменение на обема на факела в различни температурни интервали.

баланса на горивния процес. Гаранция за устойчив горивен процес и емисии под 200 mg/Nm^3 е условието за минимални просмуквания на неорганизиран въздух и спазването на технологичната дисциплина за недопускане на студен въздух към ППС;

- След реконструкцията се наблюдава намаляване на обема на факела при високите температури (в интервала $1150 \text{ °C} \div 1300 \text{ °C}$) за сметка на по-ниските (в интервала $1000 \text{ °C} \div 1150 \text{ °C}$). Това би довело до намаляване на вероятността за зашлаковане на печната камера в областта на горивните уредби (Табл. 7.8; Фиг. 7.12);
- От направените моделни изследвания е видно, че извършените конструктивни и технологични промени на котел П-62 водят до намаляване на формираните азотни оксиди (183 mg/Nm^3), в изпълнение на изискването техните стойности да не превишават 200 mg/Nm^3 , при референтна стойност на кислород от 6 vol. % (Фиг. 7.15; Табл. 7.9).

Табл. 7.9. Концентрация на азотни оксиди (NO_x) на изхода от печната камера и загуби от механично недоизгаряне (q_4).

	$\text{NO}_x, \text{ mg/Nm}^3 (\text{O}_2=6\%)$	$q_4, \%$
Случай 1 - сега съществуваща конструкция	295	2,40%
Случай 2 - нова конструкция	183	4,30%

ОСМА ГЛАВА

Оценка на реализираната реконструкция на котли тип П-62

В периода 2016-2020 година беше реконструиран котел ст. № 12, който е тип П-62, намиращ се в експлоатация в "ТЕЦ Марица Изток 2". С цел доказване ефективността на извършената реконструкция и гарантиране на изискванията за подобрен горивен процес и емисии на NO_x , по-ниски от 200 mg/Nm^3 , бяха проведени балансови опити (при минимален, максимален и среден товар) и непрекъснати 120 часови измервания на емисиите изпускани от котела.

Балансовите опити бяха извършени според изискванията заложи в стандарт БДС EN 12952-15 – "Водотръбни котли и спомагателни инсталации. Част 15 – Приемни изпитания" [4].

Тестовите са проведени при постоянен брой на работещите мелници и постоянен товар, като преди опита блокът работи на определения товар и условия (налягане и температура на свежата и вторичната пара) поне 1 час предварително.

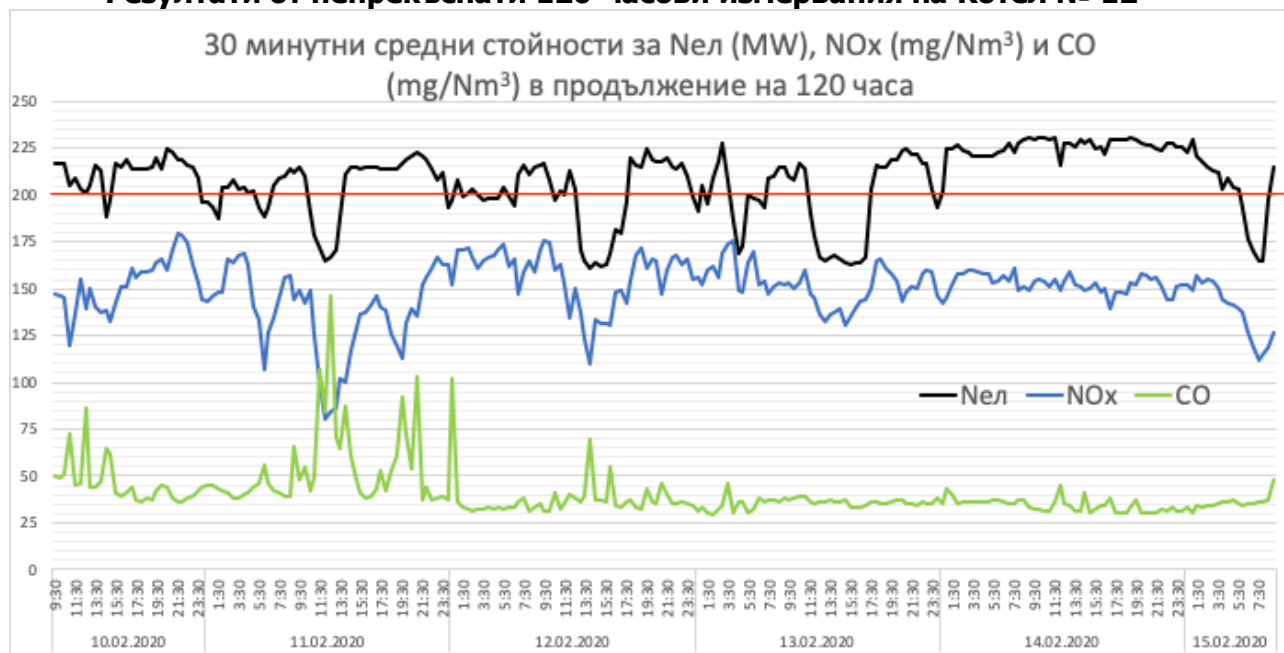
Непрекъснатите 120-часови изпитания [6] бяха проведени от акредитирана лаборатория чрез поставянето на проверен и калибриран газ анализатор, измерващ концентрацията на кислород, въглероден оксид и азотни оксиди.

Сравнение на получените резултати от проведените балансови опити на Котел № 12

Табл. 8.21. Топлинен баланс съгласно стандарт BDS EN 12952-15 по време на изпитанията при различни режими на Котел № 12.

Величина	Озн.	Дим.	$D_{nn} = 502$ [t/h]	$D_{nn} = 539$ [t/h]	$D_{nn} = 624$ [t/h]
Загуба на топлина от изходящи димни газове	$I_G (q_2)$	%	11,457	11,821	11,740
Загуба на топлина от наличието на СО в димните газове	$I_{CO} (q_3)$	%	0,005	0,005	0,005
Загуба на топлина от топлообмен с околната среда, чрез радиация и конвекция	$I_{RS} (q_5)$	%	0,441	0,431	0,415
Загуба на топлина от шлак и летяща пепел	$I_{SF} (q_4 + q_6)$	%	3,335	2,749	2,756
КПД	η	%	84,762	84,994	85,084

Резултати от непрекъснати 120-часови измервания на Котел № 12



Фиг. 8.5. Изменение на електрическия товар (N_{el} , MW) и концентрацията на NO_x и CO (mg/Nm^3 , сух газ, $O_2 = 6\%$) по време на 120 часовите изпитания на Котел ст. № 12

Оценка на реализираната реконструкция на котли тип П-62

Получените от балансовите опити при три товара, стойности за коефициента на полезно действие на котела, съответно 84,762 % при минимален, 84,994 % при среден и 85,084 % при максимален товар (Табл. 8.21), са съизмерими с проектната стойност за котли тип П-62 от около 85 %.

Всички измерени стойности за концентрацията на NO_x и CO по време на 120 часовите изпитания на котел ст. № 12, покриват гаранционните изисквания след извършената реконструкция, както и изискванията за норми за допустими емисии поставени от РИООСВ.

Резултатите от направените изследвания в настоящата работа могат да бъдат обобщени по следния начин.

В дисертационния труд е изследвано влиянието на различни конструкции пещни камери, горивни уредби и прахоприготвящи системи върху горивния процес в енергийни парогенератори тип ЕП 670/140 (П-62) при изгарянето на български лигнитни въглища от басейна Марица Изток. Извършени са проучване, изследване, анализ и внедряване на технологични решения водещи до подобряване на горивния процес и гарантиране на нискоемисионно азотно горене. Извършените мероприятия могат да бъдат систематизирани по следния начин:

- Направен е анализ на развитието през годините, на горивните уредби на котли тип П-62 в комплекса „Марица Изток“;
- Използвана е комбинацията от натурни изпитвания и моделни изследвания с цел изследване поведението на горивния процес при различни входни въздействия;
- На основата на получения богат експериментален материал, за този тип котли, са предложени и реализирани конкретни конструктивни изменения по прахоприготвящите системи (сепаратори и прахоконцентратори), по горивните уредби и по организацията на горивния процес (изменения по въздушните потоци постъпващи в котела);
- Резултатите от тези изменения доведоха до подобряване организацията на горивния процес, изразяващо се в постигането на по-устойчив горивен процес (без пулсации); без шлаковане на пещната камера; възможност котела да работи устойчиво с $5 \div 7$ броя прахоприготвящи системи (този режим разширява регулируемия диапазон на котела);
- Предложен е и е въведен в експлоатация, режим на работа на котела, за който емисиите от азотни оксиди в целия диапазон на натоварване му от минимален до максимален такъв (паропроизводство от 420 t/h до 675 t/h) са под 200 mg/Nm³ (при 6 vol.% O₂);
- Техничко-икономическите показатели на реконструирания котел в ТЕЦ „Марица Изток 2“ (ст. № 12), оценени по коефициента на полезно действие са се запазили като проектните такива. Собствените нужди на реконструирания котел са намалели (тези данни не са представени в дисертацията) вследствие на намалението на разхода на ел. енергия консумирана от въздушните и димните вентилатори;

В дисертационния труд са представени резултати от изпълнението на изследователски договори през последните години. Авторът е бил активен участник в тези договори. Всички задачи са завършили с висока оценка от страна на възложителя, като са намерили успешно приложение при експлоатацията на котела, а представения теоретичен материал е добра основа за по-нататъшно задълбочаване на прилагания подход при осъществяването на подобни изследвания.

Части от труда са станали достояние на научната общественост чрез редица публикации представени в научни сборници и конференции.

Приносите в работата съответстват на формулираните в т. 1.2. Цел, постановка и структура на дисертационния труд. Условно те могат да бъдат класифицирани като научно-приложни и инженерно-приложни.

Научно-приложни приноси

1. Формулиран и обоснован е научен подход за изследване и анализ на процесите /в частност формирането на азотни оксиди/ в пещните камери на енергийни котли, оползотворяващи български лигнитни въглища в условията на факелно изгаряне. Този подход се основава на комбинацията от натурни и моделни изследвания;
2. Създадени са симулационни модели за изследване работата на отделни системи на котли П-62 (прахоприготвящите системи; горивните уредби; пещната камера), а резултатите от моделните изследвания са основа за извършване на конструктивни изменения;

3. Разработен е цифров симулационен модел за изследване формирането на азотни оксиди при изгаряне на български лигнитни въглища от басейна "Марица Изток" в пещната камера на котли П-62 в ТЕЦ „Марица Изток 2“. На основата му са извършени моделни изследвания и е оценено влиянието на различни фактори.
4. Направени са научно обосновани предложения за редуциране на формиращите се азотни оксиди в пещната камера на котел тип П-62.

Инженерно-приложни приноси

1. Реализирана е реконструкция на котли П-62 покриваща изискването за подобряване на горивния процес и покриване на новите екологични изисквания за изхвърляните в атмосферата азотни оксиди;
2. Проведени са множество изпитания свързани с:
 - обстойно обследване на техническото състояние на прахоприготвящата система и пещната камера преди реконструкцията на котли П-62 чрез натурни изпитания;
 - проведени натурни изпитания за определяне на технико-икономическите показатели на котлите след реконструкцията, изпълнявайки изискванията на стандарт БДС EN 12 952-15 – "Водотръбни котли и спомагателни инсталации. Част 15 - Приемни изпитания";
 - доказан е екологичния ефект от направената реконструкция за изхвърляните в околната среда азотни оксиди, чрез 120 часови непрекъснати измервания, проведени по стандартизирани методи, чрез калибрирана апаратура, покриващи изискването на РИООСВ.

Публикации свързани с дисертационния труд

1. Ангелов Б., Т. Тотев, Б. Игнатов, Изследване влиянието на различни фактори върху разпределението на количеството въглища постъпващи в горелките на котел тип П-62, Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, Том 63, книга 4, стр. 109-118, 2013 г.;
2. Ангелов Б., К. Тодоров, В. Раденков, Моделни изследвания на въглищен инерционен сепаратор, част от прахоприготвящата система на котли в ТЕЦ „Марица Изток 2“, XIX-та Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 14-17 септември 2014, Том 1, стр. 17-26;
3. Ангелов Б., Развитие на горивните уредби към котли тип Еп 670/140 (П-62) в комплекса „Марица Изток“, XX-та Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2015, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 28-37, (13 – 16) септември 2015, Созопол;
4. Тотев Т., В. Раденков, Б. Ангелов, Моделни изследвания на въглищен инерционен сепаратор, част от прахоприготвящите системи на КА11 и КА12 в „ТЕЦ Марица Изток 2“, XXII Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2017, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 39-45, (17 – 20) септември 2017, Созопол;
5. Ангелов Б., Изграждане и валидиране на цифров модел на поведението на пещната камера на котел ст. № 12 в "ТЕЦ Марица Изток 2", XXII Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2017, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 46-53, (17 – 20) септември 2017, Созопол;
6. Тотев Т., Б. Ангелов, В. Раденков, Б. Игнатов, Моделни изследвания на процесите в пещната камера на Котел ст. № 12 в ТЕЦ "Марица Изток 2", XXII Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2017, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 54-60, (17 – 20) септември 2017, Созопол.

Summary

Investigation of the influence of various factors on the combustion process in power steam generators burning coal

Author: Eng. Borislav Angelov

The aim of this PhD thesis is to investigate the influence of various factors on the combustion process in power steam generators during burning coal. This was achieved by investigating the influence of these factors in different constructions of combustion chambers, combustion systems and coal preparation systems on the combustion process in power steam generators type EP 670/140 (P-62) burning Bulgarian lignite from the Maritza East basin. The requirements to the object of investigation are the achievement of a sustainable and efficient combustion process, as well as low-emission combustion.

The object was investigated through in-situ tests, physical model and numerical models.

Based on the results of these investigations, specific measures have been identified, which consist in implemented changes in constructions of the coal separator, dust concentrator, combustion systems, air ducts for organized air supply and the combustion chamber of the boiler.

The constructive changes realized in this way lead to the fact that the object meets the pre-set requirements.

This was confirmed by assessing the implemented refurbishment by determining the technical and economic indicators of the boiler and proving the environmental effect by continuously measuring the emissions emitted into the atmosphere.