



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

**ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ**

**КАТЕДРА „ТОПЛОЕНЕРГЕТИКА И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА”**

**маг. инж. Васил Емилов Раденков**

**ПРИЛАГАНЕ НА ПЪРВИЧНИ МЕТОДИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ  
НА АЗОТНИТЕ ЕМИСИИ В КОТЛИ ИЗГАРЯЩИ  
БЪЛГАРСКИ ЛИГНИТНИ 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. Тотьо Иванов Тотев**

СОФИЯ, 2017 г.

Дисертационният труд е с обем 191 страници. Съдържа десет части – въведение, осем глави и заключение, което включва постигнатите приноси. Дисертацията съдържа 112 фигури и 61 таблици. Цитирани са 142 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 12.06.2017 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.9.2017 г. в конферентната зала на Библиотечно-информационния център към Технически университет – София от 15:00 часа на открито заседание на журито, определено със Заповед № ОЖ-248 от 26.06.2017 г. на Ректора на Технически университет – София.

Научно жури:

1. проф. д-р инж. Бончо Иванов Бонев
2. проф. д-р инж. Тотю Иванов Тотев
3. проф. д-р инж. Александър Иванов Кирий
4. проф. д-р инж. Георги Иванов Вълчев
5. проф. д-р инж. Лилиана Зашкова Стоянова

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Бончо Иванов Бонев
2. проф. д-р инж. Георги Иванов Вълчев

Автор: Васил Емилов Раденков

Заглавие: „Прилагане на първични методи за намаляване на азотните емисии в котли изгарящи български лигнитни въглища“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет - София

## Актуалност на проблема и постановка на задачата

### Актуалност на изследването

Изгарянето на органични горива в енергийните парогенератори е свързано с отделянето на вредни емисии в околната среда. Основните замърсители са: серни оксиди, азотни оксиди, прах (най-често въглищен и пепелен), тежки метали, парникови газове, хлориди и флуориди, амоняк, летливи органични компоненти, твърди органични вещества, радиоактивни субстанции и др. Доброто познаване на количествените и качествените характеристики на замърсяванията, на взаимовръзките им с технологичните, конструктивните и режимни параметри на инсталациите, както и на токсичността на замърсителите, включително влиянието им върху човешкото здраве, са от изключително значение.

Екологичните изисквания, които се прилагат към енергийните блокове, изгарящи лигнитни въглища от басейна „Марица Изток“, са посочени много ясно и категорично в следните нормативни документи:

- 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 IV;
- НАРЕДБА за норми за допустими емисии на серен диоксид, азотни оксиди и прах, изпускани в атмосферния въздух от големи горивни инсталации, Приета с ПМС № 354 от 28.12.2012 г., обн., ДВ, бр. 2 от 8.01.2013 г., в сила от 8.01.2013 г., доп., бр. 76 от 30.08.2013 г., в сила от 30.08.2013 г.
- Комплексно разрешително на ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД, с. Ковачево, № 50/2005г (актуализирано с Решение №50-Н0-И0-А1/2010 г. и актуализирано с Решение №50-Н0-И0-А3/2014 г.).

Конкретните нива на праховите и газовите замърсители във всички по-горе посочени документи се лимитират на следните стойности:

- За енергийни котли № 11 и № 12 в ТЕЦ „Марица Изток 2“

| Параметър       | Норми за допустими емисии (mg/Nm <sup>3</sup> ) 6% кислород |                 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| прах            | 50                                                          |                 |
| SO <sub>2</sub> | До 31.12.2015г.                                             | От 01.01.2016г. |
|                 | 92 % десулфур.                                              | 96 % десулфур.  |
| NO <sub>x</sub> | До 31.12.2015г.                                             | От 01.01.2016г. |
|                 | 500                                                         | 200             |
| CO              | 250                                                         |                 |

- За енергийни котли от № 1 до № в ТЕЦ "Марица Изток 2"

| Параметър       | Норми за допустими емисии (mg/Nm <sup>3</sup> ) 6% кислород |                 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| прах            | 50                                                          |                 |
| SO <sub>2</sub> | До 31.12.2015г.                                             | От 01.01.2016г. |
|                 | 94 % десулфур.                                              | 96 % десулфур.  |
| NO <sub>x</sub> | До 31.12.2015г.                                             | От 01.01.2016г. |
|                 | 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 (преди да бъдат извършени мероприятия за тяхното намаление). Получени са следните данни за концентрация на азотни оксиди (NO<sub>x</sub>) и въглероден диоксид (CO) в отпадните газове:

Табл. 1.1. Обобщени данни за концентрации на NO<sub>x</sub> и CO в отпадните газове на парогенератори тип ПК38-4 и П62 на територията на „ТЕЦ Марица изток 2“ ЕАД

| Параметър                                                  | Котел ст. № |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                            | 1           | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 10  | 11  |
| NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> =6 %) | 374         | 353 | 408 | 422 | 371 | 468 | 400 | 418 | 232 | 310 |
| CO, mg/Nm <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> =6 %)               | 76          | 54  | 85  | 107 | 87  | 24  | 55  | 66  | 53  | 33  |

**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.**

### Видове азотни оксиди

При високи температури, характерни за пещните камери, оксидите на азота се подреждат в зависимост от своята термодинамична устойчивост в следния ред: NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Основно значение за разглежданите от нас условия (от изброените азотни оксиди) имат NO и NO<sub>2</sub>.

По експериментален път е установено, че около 95 % от напускащите парогенератора азотни оксиди (NO<sub>x</sub>) представляват азотен оксид(NO) и само 5 % са азотен диоксид (NO<sub>2</sub>). В последствие, попадайки заедно с димните газове в атмосферата, азотният оксид в резултат на химични превръщания се окислява до по-устойчивия в тези условия азотен диоксид. Според някои изследователи на разстояние от 3 до 6 километра от комина в атмосферата повече от 60 % от съдържащите се в газовете азотни оксиди се превръщат в азотен диоксид.

Образуването на NO<sub>x</sub> в горивния процес често се обяснява чрез наличието на азот, който е постъпил в горивната камера по различен път. Азотът може да произхожда от атмосферния въздух – в който случай продуктът се нарича "топлинни NO<sub>x</sub>". Азотът може да бъде органично свързан азот, който се намира във всички въглища и във всички течни горива, в този случай продуктът от него се нарича "горивни NO<sub>x</sub>".

## Цел, постановка и структура на дисертационния труд.

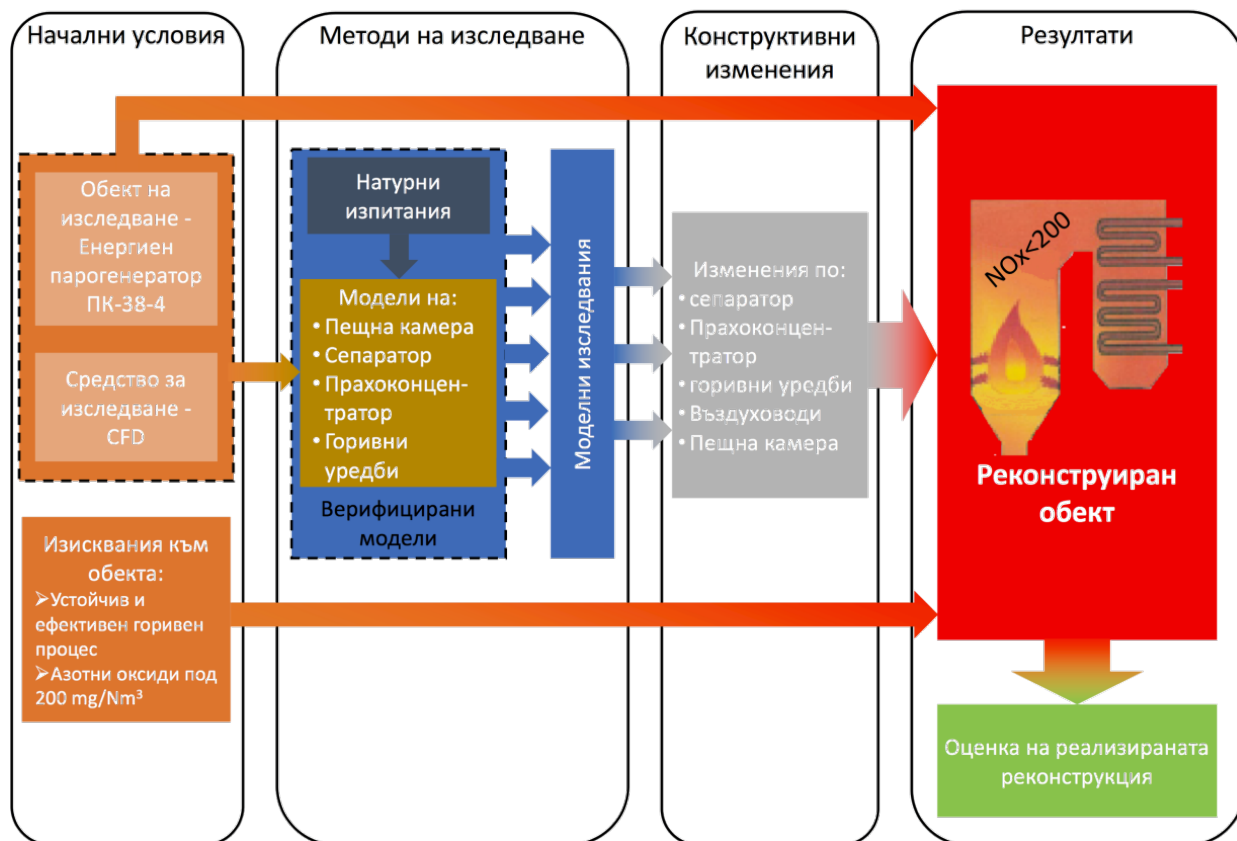
Целта, която се поставя пред настоящия дисертационен труд е проучване, изследване, анализ и внедряване на технологични решения използващи първични методи за ограничаване формирането на азотни оксиди над  $200 \text{ mg/Nm}^3$  ( $\text{O}_2=6\%$ ), при изгарянето на български лигнитни въглища (от басейна Марица Изток) в котли тип ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“.

Постановката на изследванията в дисертацията е подчинена на следните пет главни момента:

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 за оценка възможностите за ограничаване формирането на азотни оксиди;
3. Средства чрез които се осъществяват изследванията: комбинирането на натурни изпитвания и моделни изследвания;
4. Внедряване на подходящи мерки за ограничаване формирането на азотни оксиди;
5. Анализ на технико-икономическите показатели на парогенератори тип ПК-38-4, след направената реконструкция.

Постигането на така дефинираната обща цел може да бъде детайлизирана по начин представен на Фиг. 1.1.

**Блок схема за проведено изследване и реализация на технология за намаляване на NOx**



Фиг. 1.1. Постановка на изследванията в дисертационния труд

---

## **Особености на енергийни парогенератори тип ПК-38-4, намиращи се в експлоатация в ТЕЦ "Марица Изток 2"**

---

ТЕЦ "Марица изток 2" ЕАД е най-голямата реновирана топлоелектрическа централа в България. Предметът на дейност е производство на електрическа енергия. Тя е една от четирите електроцентрали в комплекс „Марица изток“, който е разположен в югоизточната част на страната. Работи с местни лигнитни въглища, добивани в рудниците на „Мини Марица-изток“ ЕАД.

ТЕЦ "Марица изток 2" ЕАД има осем енергийни блока с изградени сероочистващи инсталации (СОИ) с ефективност над 94%. Инсталираната обща мощност достига 1620 MW. След извършени модернизации е удължен животът на съоръженията с около 25 години.

В новоизградената част на централата „Част 900 MW“ технологичната схема е тип „моно блок“ – един котел – една турбина, а „Част 700 MW“ е по схемата "дубъл блок" - два котела – една турбина.

Реализирането на проекта за рехабилитация на енергийните блокове от 1 до 4 обхваща подмяната на турбините на блокове 1, 3, 4 и на генераторите на блокове от 1 до 4 с нови, произведени от японската фирма „Тошиба“. Това доведе до повишаване мощността на блоковете и увеличи живота на оборудването. След подмяната на турбините и генераторите на блокове 1, 3 и 4, от 150 MW, мощностите достигнаха 177 MW. Въведен бе в експлоатация нов генератор на блок 2 с номинална мощност 165 MW. Турбините към тези блокове са съответно TCDF–36" и K–165–130. Те са едновални, трицилиндрови, с едно междинно прегряване на парата след цилиндър високо налягане и с двупоточна част ниско налягане, като втората (руската) е еднопоточна в част ниско налягане. По този начин ръководството на дружеството повиши ресурса на централата, производствената мощност и разполагаемостта на ТЕЦ "Марица изток 2" ЕАД за енергийната система.

Котлите тип ПК-38-4 са специално реконструирани за изгарянето на въглищата от маришкия минен басейн, без предварително подсушаване. Същите са правотокови, с полуоткрита П-образна компоновка с еднокорпусна газоплътна пещна камера и принудително отвеждане на димните газове. Очистването на последните от пепелта се осъществява от монтирания в опашната част на котела електрофилтър. Високата ефективност при работа на същите – КПД-99,5 % , позволява достигането на нормите на очистването от пепел на димните газове. Изхвърлянето на последните в атмосферата от всичките 12 бр. котли става посредством сероочистващи инсталации (СОИ). Изградените СОИ са по т.нар. „мокър варовиков метод“, като основен реагент за процеса се използва варовик. Степента на очистване на SO<sub>2</sub> от димните газове е минимум 94 % . Крайният продукт гипс се депонира заедно със сгуропепелината от котлите в сгуроотвала на централата.

---

## Цифровото симулационно моделиране като средство за изследване 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 прахоприготвящи 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 за формирането на NO<sub>x</sub> в пещната камера на енергийни парогенератори ПК-38-4**

Изследване на пещните процеси за котел тип ПК 38-4 за установяване на причините за шлакообразуване вече е провеждано. Разработеният в CFD модел не включва генериране на NO<sub>x</sub>. За да може да се проследи формирането на NO<sub>x</sub> в пещната камера е необходимо да се зложат и химичните реакции, водещи до образуване на азотни оксиди. 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<sub>x</sub> 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“, 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“.

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

$$k_1 = (1,8 \cdot 10^{11}) \exp\left(-\frac{38730}{T}\right), \quad (3.4)$$

$$k_2 = (6,4 \cdot 10^9) \exp\left(-\frac{3162}{T}\right), \quad (3.5)$$

$$k_3 = 3,0 \cdot 10^{13}, \quad (3.6)$$

#### **Модел за формиране на „бърз“ NO**

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



Пълният механизъм е много сложен. Въпреки това Дьо Сот (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.

$$S_{NO,prompt} = W_{NO} k_{prompt} [O_2]^{1/2} [N_2] [Fuel] \left(\frac{W}{\rho}\right)^{3/2}, \quad (3.9)$$

$$k_{prompt} = A_{prompt} \exp(-T_{A,prompt}/T) \quad (3.10)$$

$W_{NO}$  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) [120]. 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:

$$R_1 = 3,5 \cdot 10^{10} [s^{-1}] \cdot [HCN] \cdot (X_{O_2})^\alpha \cdot \exp\left(-\left(67 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right), \quad (3.11)$$

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

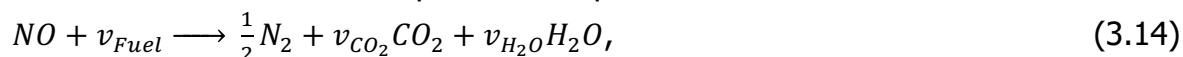
$$R_2 = 3 \cdot 10^{12} [s^{-1}] \cdot \frac{W}{\rho} \cdot [HCN] \cdot [NO] \cdot \exp\left(-\left(60 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right), \quad (3.12)$$

$$R_3 = 8,3 \cdot 10^6 [s^{-1}] \cdot [HCO]^{-0,3} \cdot [O_2]^{1,3} \cdot \exp\left(-\left(30 \frac{kcal}{mol}\right)/(RT)\right), \quad (3.13)$$

където с  $X_{O_2}$  е означена молната 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.

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

$$R_{return} = 2,72 \cdot 10^6 [s^{-1}] \cdot \frac{W}{\rho} \cdot [NO] [Fuel] \cdot \exp\left(\frac{(-9460[K])}{T}\right), \quad (3.15)$$

**Модели на ППС и на пещната камера на котел тип ПК-38-4****Цифров симулационен модел на сепаратор, част от прахоприготвящите системи на котли тип ПК-38-4**

*Табл. 4.1 Сравнение между резултати, получени от натурни изпитания, и резултати от цифров модел на сепаратор на ППС към котли тип ПК-38-4.*

| <b>Величина</b>                                                          | <b>Означение</b>  | <b>Дименсия</b>                    | <b>Натурни изпитания - ПТО</b> | <b>Цифров модел</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Положение на клапа А                                                     | -                 | grad <sup>o</sup>                  | 25                             | 25                  |
| Положение на клапа В                                                     | -                 | grad <sup>o</sup>                  | 15                             | 15                  |
| Положение на клапа С                                                     | -                 | grad <sup>o</sup>                  | 45                             | 45                  |
| Температура на аеросмес след МВ                                          | $t_2$             | °C                                 | 184,2                          | 180                 |
| Вент. производителност - измерена                                        | $V_{MB}$ измерена | m <sup>3</sup> /h,x10 <sup>3</sup> | 176                            | -                   |
| Вент. производителност коригирана по температура и запрашеност на потока | $V_{MB}$ и $t_2$  | m <sup>3</sup> /h,x10 <sup>3</sup> | 160                            | 168                 |
| Производителност на МВ по топлинен баланс                                | $B_{MB}^{топл}$   | t/h                                | 33,87                          | -                   |
| Производителност на МВ по прав баланс                                    | $B_{MB}^{прав}$   | t/h                                | 32,87                          | 33                  |
| Остатък - сито с размер $R_{1000}$                                       | $R_{1000}$        | %                                  | 1,31                           | -                   |
| Остатък -сито с размер $R_{400}$                                         | $R_{400}$         | %                                  | 10,27                          | -                   |
| Остатък -сито с размер $R_{200}$                                         | $R_{200}$         | %                                  | 30,49                          | -                   |
| Остатък -сито с размер $R_{90}$                                          | $R_{90}$          | %                                  | 63,84                          | -                   |
| Ср. диаметър на въглищните частици                                       | -                 | µm                                 | 202                            | 214                 |

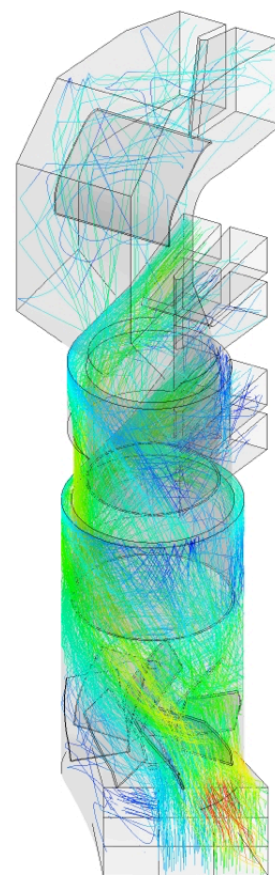
Направеното сравнение между резултатите от натурните изпитания и тези от цифровия модел (Табл. 4.1) показва адекватно представяне на физическата действителност от страна на компютърната симулация.

В заключение, на база получените резултати може да се каже, че изграденият модел е валидиран (мрежово независимо решение, изпълнени критерии за сходимост, сравнение с реални данни), т.е. достатъчно точно описва реалните процеси в обема на инерционния сепаратор и чрез него могат да се провеждат по-нататъшни симулационни изследвания за оценка влиянието на различни въздействия върху средната зърнометрия на „готовия“ въглищен прах. Направеното сравнение показва адекватно представяне на физическата действителност от страна на компютърната симулация - достоверно представя зърнометричното разпределение на въглищните частици на изхода на модела на сепаратора.

## Цифров симулационен модел на прахоконцентратор, част от прахоприготвящите системи на котли тип ПК-38-4

Табл. 4.2. Сравнение на резултати от действителни изпитания и моделни изследвания

| №                                                   | Показател               | Велич.    | Разм. | Стойност Изпитания | Стойност Модел |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-------|--------------------|----------------|
| Разпределение на прахогазовата смес по височина - I |                         |           |       |                    |                |
| 1.                                                  | Долна основна горелка   | $I_{дог}$ | -     | 0,25               | 0,244          |
| 2.                                                  | Горна основна горелка   | $I_{гог}$ | -     | 0,25               | 0,243          |
| 3.                                                  | Общо основна горелка    | $I_{ог}$  | -     | 0,50               | 0,487          |
| 4.                                                  | Бридова горелка         | $I_{бг}$  | -     | 0,50               | 0,513          |
| Разпределение на праха по височина – g              |                         |           |       |                    |                |
| 5.                                                  | Долна основна горелка   | $g_{дог}$ | -     | 0,55               | 0,565          |
| 6.                                                  | Горна основна горелка   | $g_{гог}$ | -     | 0,39               | 0,400          |
| 7.                                                  | Общо основна горелка    | $g_{ог}$  | -     | 0,94               | 0,965          |
| 8.                                                  | Бридова горелка         | $g_{бг}$  | -     | 0,06               | 0,035          |
| 9.                                                  | Разделителна способност | $I/g$     | -     | 0,53               | 0,505          |



фиг. 4.1.Траектории на движение на въглищните частици

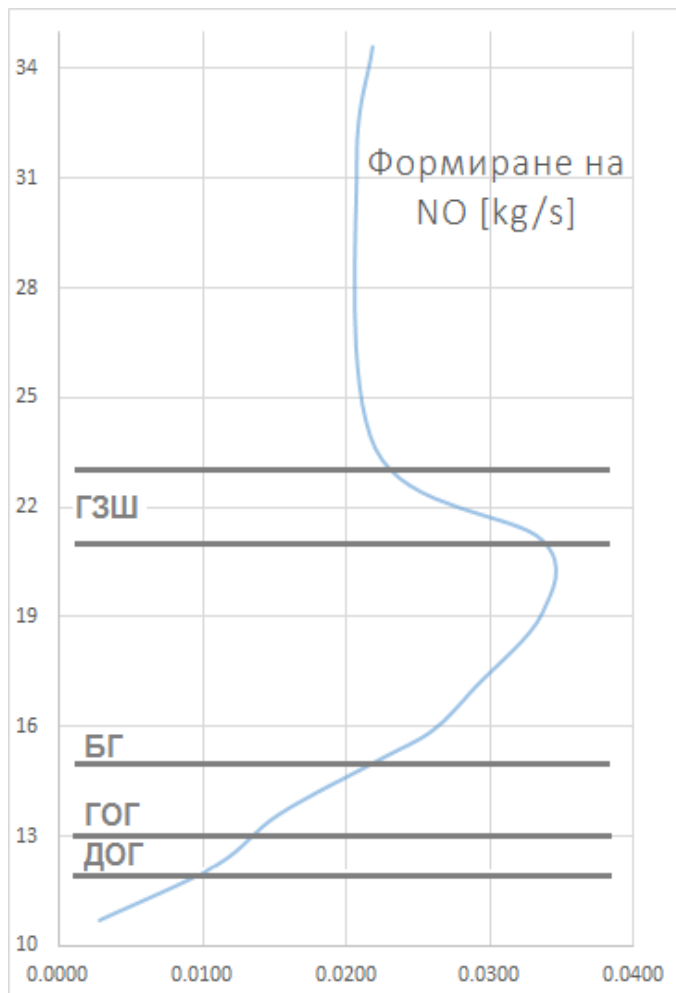
Разпределението на дяловете на горивото и транспортирания го агент, получено от изчислителния модел, е съпоставено с резултатите от натурните изпитания в Табл. 4.2. От стойностите ясно се вижда, че моделът адекватно отразява действителния процес на сепариране на потоците по височина на горелката, който е породен от характеристиките на прахоконцентратора. Съпоставянето на моделни резултати с резултати от реални изпитания на изследвания обект представлява още един критерий за валидиране на изчислителния модел. В конкретния случай се вижда, че моделът удовлетворява и този критерий.

## Цифров симулационен модел за формирането на азотни оксиди в пещната камера на котли тип ПК-38-4

Валидирането на допълнителните модели за формиране и разпадане на  $NO_x$  е направено с резултати от реални измервания от следремонтни изпитания (при чисти екрани). Конкретните стойности за концентрация на азотни оксиди на изхода на котела и при двата случая са показани в Табл. 4.3. Полученото относително отклонение от -2 % показва, че моделът за азотни оксиди достоверно представя физическата действителност и може да бъде използван за допълнителни изследвания.

Табл. 4.3. Резултати за концентрацията на  $\text{NO}_x$  от натурни и моделни изследвания

|                                                     | Следремонтни<br>изпитания | Моделни<br>изследвания | Относително<br>отклонение |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| <b>Концентрация<br/>на <math>\text{NO}_x</math></b> | 252 mg/Nm <sup>3</sup>    | 247 mg/Nm <sup>3</sup> | - 2 %                     |



Фиг.4.2. Изменение на масовия поток  $\text{NO}$  по височина на ПК

От моделните изследвания се вижда, че на височината на основните горелки в непосредствена близост до задния екран от дясната страна (от страната на „Г“ горелка) има област с високи температури и ниски концентрации на кислород. Според теоретичните познания за процесите на шлаковане това са предпоставки за натрупване на шлак по изпарителните нагревни повърхности именно в тази зона. Експлоатационният опит потвърждава, че при котли тип ПК38-4 се натрупва шлак именно в тази област на екраните. За да се избегне този нежелателен процес, трябва да се предотвратят два от основните фактора, отговорни за възникването му – високи температури и ниски концентрации на кислород в близост до стените на пещната камера. Получените стойности за масовия поток на азотен оксид по височина на пещната камера показват

недвусмислено, че именно в основната горивна зона (от долна основна до бридова горелка) се формират  $\text{NO}_x$ . На височината на газозаборни шахти масовият поток на  $\text{NO}$  намалява, т.к. част от димните газове напускат обема на пещната камера, респективно напуска и част от азотните оксиди;

Във височина на пещната камера масовият поток на  $\text{NO}$  почти не се изменя от газозаборни шахти до изхода. Това отново потвърждава факта, че в случая азотните оксиди се формират в основната горивна зона;

За да се ограничи формирането на  $\text{NO}_x$  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.

## **Конструктивни изменения на енергийни парогенератори ПК-38-4 с цел подобряване на горивния процес и гарантиране на емисии на NO<sub>x</sub>, по-ниски от 200 mg/Nm<sup>3</sup>.**

По време на дългогодишната експлоатацията на котли тип ПК 38-4 се наблюдава един основен проблем – натрупване на шлак в пещната камера при работа на високи товари. Този факт и промяната на екологичните норми след 01.01.2016 г. (НДЕ за ГГИ с топлинна мощност по-голяма от 50 MW<sub>th</sub> - NO<sub>x</sub> ≤ 200 mg/m<sup>3</sup>) са двете причини обуславящи необходимостта от адекватни технологични решения, които да обезпечат експлоатацията на този тип парогенератори, съгласно новите нормативни изисквания.

На база на световният опит, за целите на реконструкцията са избрани следните конкретни конструктивни и технологични мерки, делещи се на две групи:

- Конструктивни изменения в следствие на технологичните промени:
  - подмяна на изпарителните нагревни повърхности с газоплътни екрани;
  - промяна на прахоприготвящата система:
    - нов сепаратор;
    - нов прахоконцентратор;
    - промяна на горивните уредби на котела;
  - добавяне на над горивен въздух;
  - добавяне на въздух в хладния конус.
- Технологични промени - промяна работния режим на парогенератора:
  - намаляване на количеството организирано подаван въздух;
  - разпределението на въздуха по височина на пещната камера.

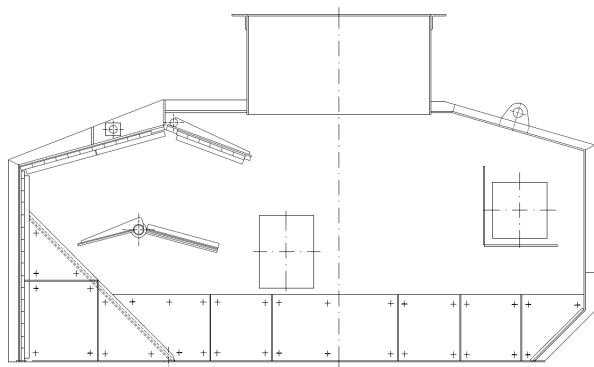
### ***Подмяна на изпарителните нагревни повърхности***

Подмяната на изпарителните нагревни повърхности в основна зона с газоплътни екрани има за цел да намали просмукванията на неорганизиран въздух. Изготвеният проект за подмяна води до изменение на обема на пещната камера, което рефлектира върху организацията на горивния процес. Новата нагревна повърхност за ДРЧ, изпълнена като газоплътна мембрана с обособени блокове, е проектирана от тръби с еднакъв диаметър Ф42х5. Блоковете от нагревната повърхност са изпълнени с увеличение по 150мм на всяка стена на пещната камера до кота +20 000. Между тази кота и кота +20 600 се осъществява прибиране към съществуващите размери на изпарителната система. Във всеки блок са разположени по 23 броя тръби, стъпката между които е 52 mm. Запазена е концепцията за изграждане на ДРЧ, с хоризонтални разположени тръби на блоковете за стени фронт и тил и наклонено разположени под 8°32' за лява и дясна странични стени на пещна камера. Шината за постигане на желаната газоплътност в хоризонталните блокове е 12/6, а в наклонените – 11,6/6. Разширяването на пещната камера до кота +20 000 и прехода до кота +20 600 е довело до:

- увеличаване на обема ѝ с приблизително 8 % ((7,79 %) от 962,2 m<sup>3</sup> до 1043,4 m<sup>3</sup>);
- и нарастване на нагревната повърхност с приблизително 4 % ((4,09 %) от 497,4 m<sup>2</sup> до 518,6 m<sup>2</sup>).

### Подмяна на инерционен сепаратор

Настояща конструкция

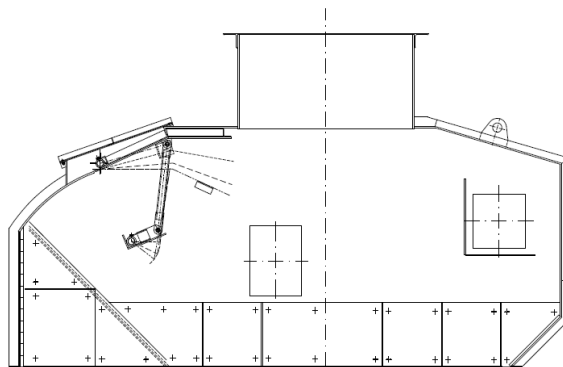


В обема на сепаратора са разположени три клапи, две подвижни (клапа „А“ и клапа „С“) и една неподвижна (клапа „В“). Клапа „В“ е насочена надолу, на 15° спрямо хоризонталата. Положението на клапа „С“ разделя входния поток в сепаратора на две. Една част продължава нагоре покрай стената и в последствие преминава през клапа „А“ и напуска сепаратора. Останалото количество гориво и транспортиращ агент се отклоняват от клапа „С“, преминават през неподвижната клапа „В“ и тогава напускат сепаратора. В зависимост от желаната зърнометрия на изхода на сепаратора се променя наклона на подвижните клапи „А“ и „С“. Зърнометричният състав на праха след сепаратора по проект е в следния (по остатъците върху ситата 1000 и 90 μm):

$$R_{1000} = 1,5 \div 2 \%$$

$$R_{90} = 55 \%$$

Нова конструкция



Изрязани са клапи „В“ и „С“, което цели намаляването на аеродинамичното съпротивление което оказва сепаратора на прахо - газовия поток, постъпващ в него.

Променена геометрия на клапа „А“ – поради по-малките размери на клапа „А“ при старата конструкция на сепаратора, тя оказва ограничено влияние върху прахо – газовия поток,. Аеродинамичното съпротивление което тя оказва на потока е такова, че едрината на въглищния прах който напуска сепаратора се изменя в малки граници.

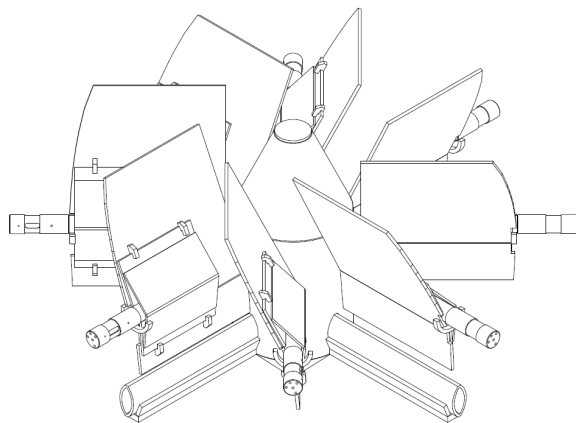
Променен е корпусът на сепаратора - ъгъл срещулежащ на входа на сепаратора е скосен при новата конструкция. Тази промяна цели да се реализира аеродинамична форма на корпуса на сепаратора, с помощта на която прахо-газовия поток да се насочва по-оптимално към регулиращата клапа. Това от своя страна води до по-ефективна ѝ работа.

Всички тези конструктивни изменения на конструкцията на сепаратора водят до това, че след него едрината на въглищния прах се изменя в по-широки граници. Освен

това се постига и по-равномерно разпределение на праха в газохода подаващ прахо-газовата смес към прахоконцентратора. При старата конструкция се наблюдаваше голяма неравномерност на разпределението на праха подаван към прахоконцентратора, което води до неравномерното му натоварване.

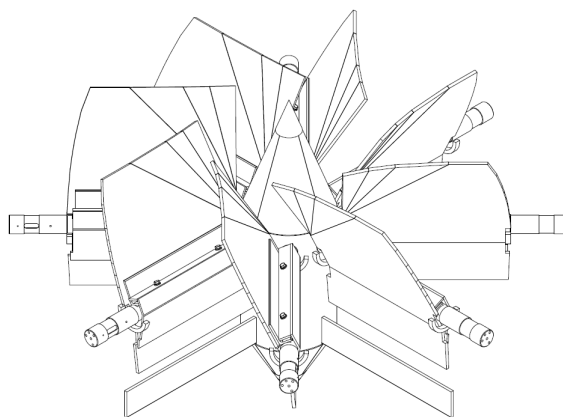
### Подмяна на центробежен прахоконцентратор

Настояща конструкция



Разделянето на прахо-газовия поток се дължи на центробежните сили причинени от завихрянето на потока след преминаването му през лопатките му. В резултат на центробежните сили до стените на прахопровода се концентрират основно въглищни частици, а в центъра му – основно транспортиращ агент. Това дава възможност в зоната на основна горелка да постъпи голямото количество въглищен прах, а инертните газове (които се явяват транспортиращ агент, като димни газове и изпарена влага) да бъдат подадени в бридова горелка. Именно поради специфичните умения на това съоръжения, даващо възможност за регулиране на количеството въглищен прах в различни части на пещната камера го прави изключително важен за осъществяването на горивния процес. По проект разделянето на транспортиращия агент по отделните горелки е следната: в основна (долна и горна) и бридова горелки е по 50 %, докато за въглищния

Нова конструкция



Намален е размерът (диаметъра) на обтекаемото тяло на прахоконцентратора – новото обтекаемо тяло е с 25 % по-малък диаметър спрямо старото. Това намаляване на размера му, води до понижаване на аеродинамичното съпротивление създадено от него при обтичането му от прахо-газовия поток;

Увеличен е размера на лопатките на прахоконцентратора – при старата конструкция на прахоконцентратора отношението диаметъра на обтекаемото тяло (торпедо) отнесена към дължината на лопатката е 0,84, докато на новата конструкция е 0,55. Това увеличение на дължината на лопатката води до увеличаване на зоната в която се завихря прахо-газовия поток, което води до по-добър прахоконцентриращ ефект;

Променена е аеродинамичната форма на лопатките на прахоконцентратора – чрез тази промяна се постигат два ефекта:

прах съотношението е 90 % към основна и 10 % към бридова горелка. Ъгълът на наклона на лопатките на прахоконцентратора може да се изменя между 0° и 45° спрямо оста на симетрия на праховода.

- Намалява се аеродинамичното съпротивление на лопатката;
- Увеличава се ефективността на завихряне на прахо-газовия поток;

Чрез така извършените изменения в конструкцията на прахоконцентратора се постига намаляване на аеродинамичното му съпротивление и увеличаване на прахоконцентриращия ефект.

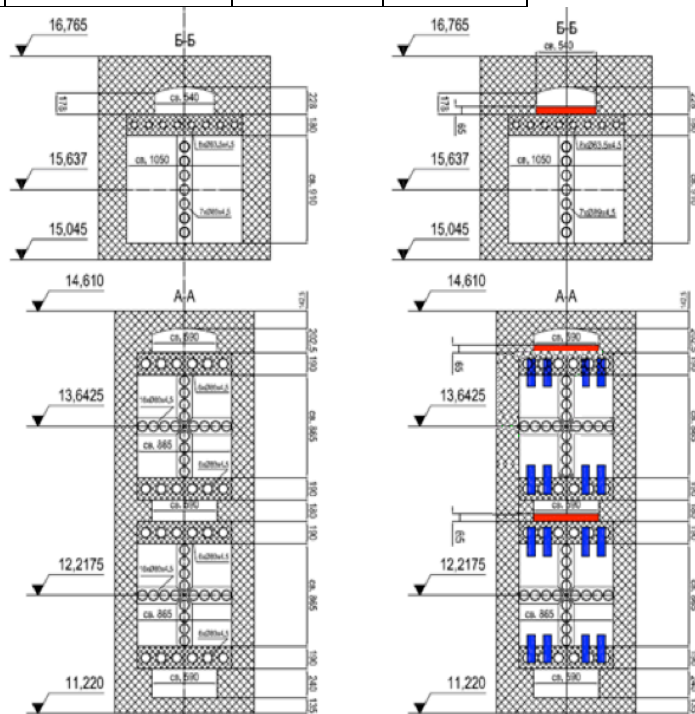
### Промяна на горивните уредби

След прахоконцентратора, прахо-газовата смес постъпва в каскадни праховоди, три на брой, всеки от които завършва с въглищна горелка (долна основна горелка, горна основна горелка и бридова горелка). През тях в печната камера се подава гориво (въглищен прах) и организиран горещ въздух с цел осъществяване на стабилен горивен процес. Общият вид на горивната уредба на котли тип ПК 38-4 е представена на Фигура 5.1. Според проектните изчисления горивните устройства (горелките) трябва да гарантират следните скорости на изтичане в печната камера:

| Скорости          | Размерност | ОГ   | БГ |
|-------------------|------------|------|----|
| Прахо-газова смес | m/s        | 14,1 | 25 |
| Въздух            | m/s        | 55   | 55 |

Посредством редуциране на общото количество организиран въздух, скоростите на изтичане през горелките намаляват при запазване на същото светло сечение (запазване на оригиналната конструкция). Това води до промяна на съотношението между скоростите на потоците окислител и горивна смес, а от там и намаляване интензитета им на смесване. За да се предотврати това нежелателно последствие са

променени светлите въздушни сечения на изходните отвори на горивните уредби. По този начин отношението на скоростта на въздуха към скоростта на горивото се запазва оптимално от гледна точка на тяхното смесване (над 2,1). Вземайки под внимание посочените по-горе факти на Фигура 5.1 е показана реализираната модификация на горивна уредба. Тя обхваща:



преди реконструкция      след реконструкция  
Фиг. 5.1. Вид на горелките преди и след реконструкция

- Намаляване светлото сечение на въздушните канали;
- Частично запушване на част от тръбите за въздух;
- Поставяне на турбулизиращи планки на горивните отвори за интензифициране смесването 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, преди постъпването им в печната камера, което ще доведе до по-ранно възпламеняване на горелката и до по-стабилен горивен процес.

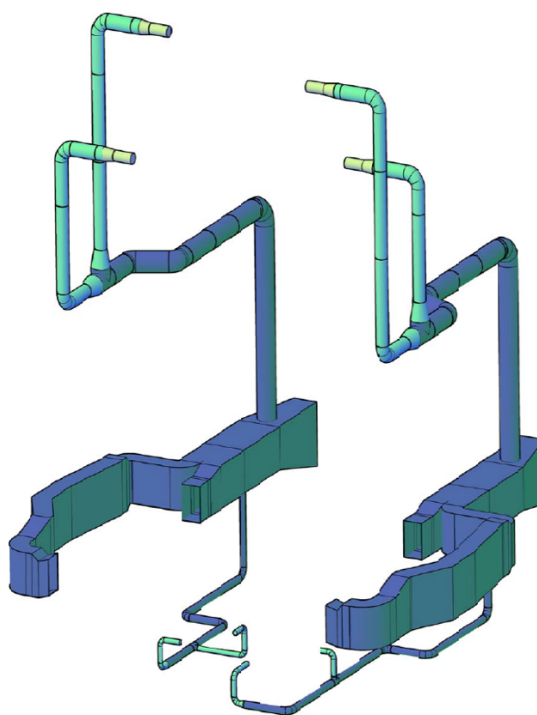
### **Добавяне на надгоривен въздух и въздух към хладен конус**

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 три нива (фиг. 5.2):

- над горивен въздух – преди изхода на печната камера;
- към горивните уредби;
- към хладния конус.

Над горивният въздух се подава посредством четири дюзи, разположени шахматно на две нива, на лявата и дясната стена на печната камера (първо ниво е на кота +27m, а второто - кота +35m). Въздухът към хладния конус се подава отново през четири дюзи, но този път разположени по една на всяка стена на пещта (лявата и дясната дюза са на кота +7,5m, а фронталната и задната – кота +8,5m).

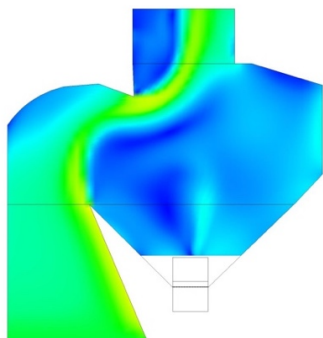
Чрез разпределението на организирано подаваният въздух по височина на печната камера в зоната на високите температури има недостиг на въздух т.е. там коефициентът на излишък на въздух е по-малък от единица ( $\alpha < 1,0$ ), а над тази зона се подава останалия необходим за горенето въздух.



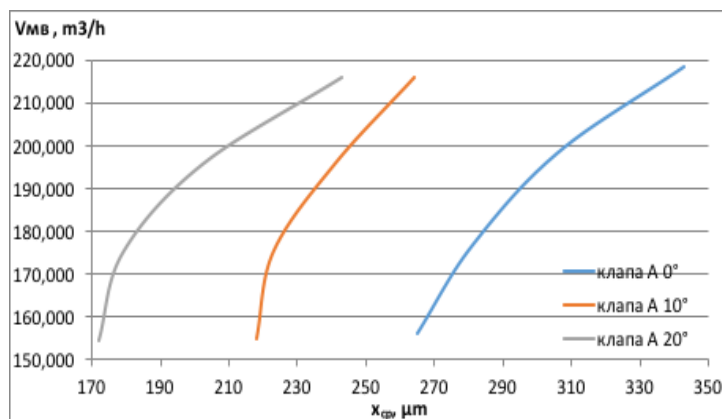
*Фиг.5.2. Стъпално подаване на въздух към печната камера на котли тип ПК-38-4*

## Моделни изследвания на ППС и на пещната камера на котел тип ПК-38-4 след реконструкцията

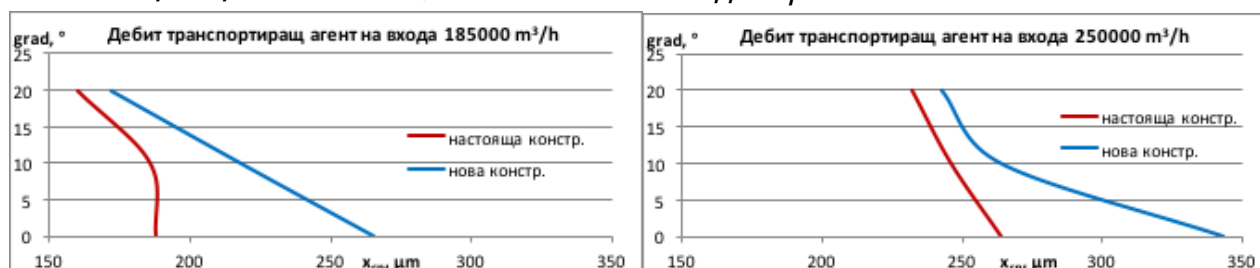
### Моделни изследвания на реализираната новата конструкция на инерционен сепаратор



Фиг. 6.1. Скоростен профил в обема на сепаратора при новата конструкция при положение на клапа А 20° и дебит на вход на сепаратор: 205 000 m<sup>3</sup>/h



Фиг. 6.2. Изменение на количеството "готов" прах при предложената нова конструкция на сепаратора спрямо дебит транспортиращ агент на изхода и различен наклон на клапа А



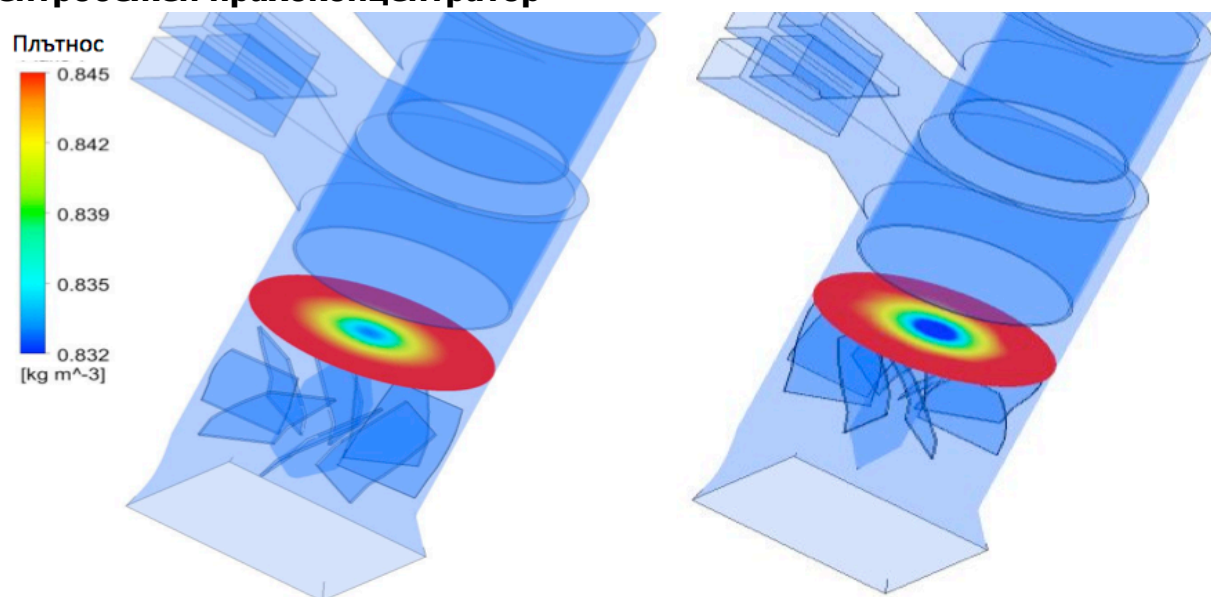
Фиг. 6.3. Изменение на зърнометрията на "готов" прах от сепаратора спрямо ъгъла на наклон на клапа А при дебит транспортиращ агент на входа: 185000 (ляво) и 250 000 m<sup>3</sup>/h (дясно) между настоящата и новата конструкция

### Изводи от реконструкцията на сепаратора

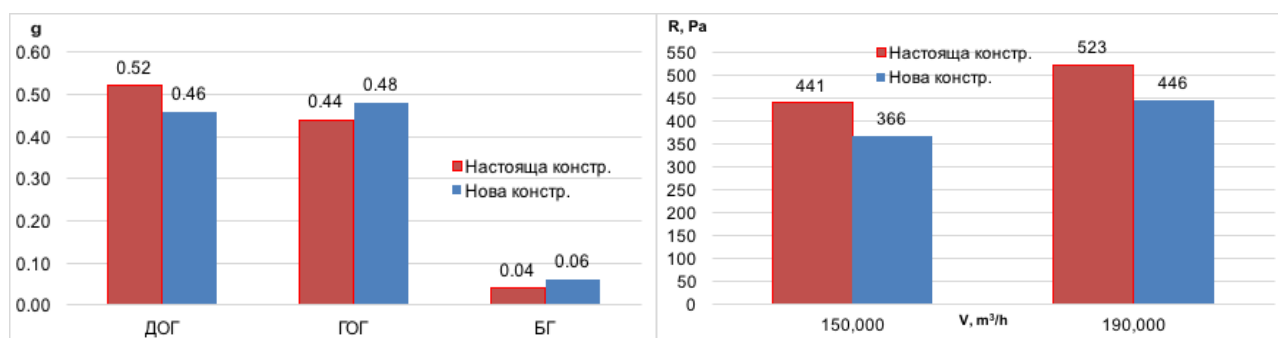
Количеството „готов“ прах на изход от сепаратора в зависимост от наклона на направляващите лопатки и дебита на транспортиращия агент се изменя в най-широк диапазон при предложената нова конструкция. **От 36 до 69 % от постъпващия на вход въглищен прах излиза от сепаратора и се подава към прахоконцентратора от предложената нова конструкция на сепаратора, докато при настоящата конструкция този дял е 35÷45 %;**

От резултатите за зърнометрията на „готов“ прах, напускащ сепаратора, които са показани на Фиг. 6.3, може да се направи заключението, че предложената нова конструкция на сепаратор **предлага по-голям интервал на изменение на зърнометрията на въглищния прах (172÷343 µm) спрямо настоящата конструкция (160÷264 µm). Това е увеличение с 63 % на диапазона на регулиране на едрината на въглищния прах;**

## Моделни изследвания на реализираната новата конструкция на центробежен прахоконцентратор



Фиг. 6.4. Изменение на плътността на потока непосредствено след прахоконцентратора при наклон на лопатките  $35^\circ$  и дебит транспортиращ агент  $190\,000\text{ m}^3/\text{h}$  при настояща (ляво) и реализираната нова конструкция (дясно)



Фиг. 6.5. Разпределение на въглищния прах по височина на ГУ при наклон на лопатките на прахоконцентратора  $35^\circ$  и дебит транспортиращ агент  $190\,000\text{ m}^3/\text{h}$  при различни конструкции

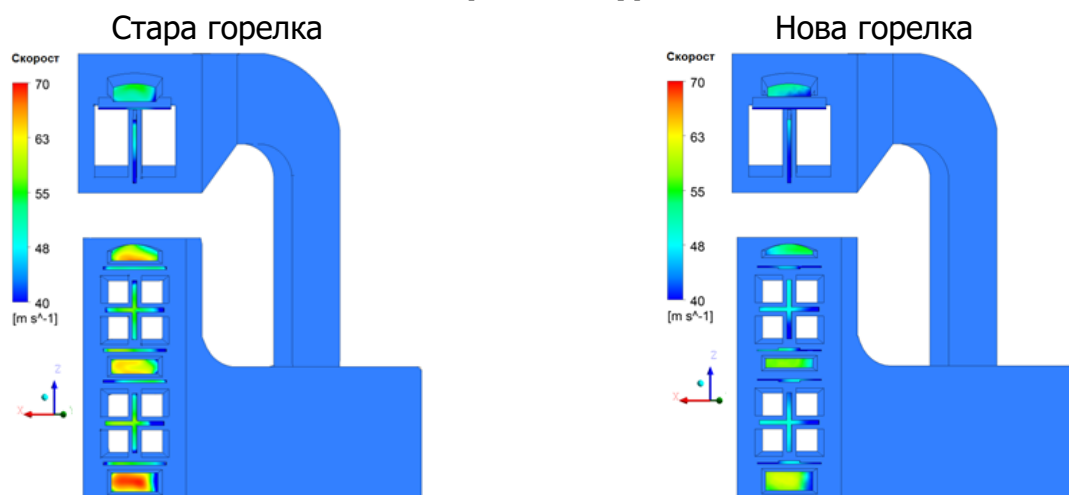
Фиг. 6.6. Аеродинамично съпротивление на прахоконцентратора при различен дебит транспортиращ агент на входа и при настоящата и новата конструкции

### Изводи от реконструкцията на сепаратора

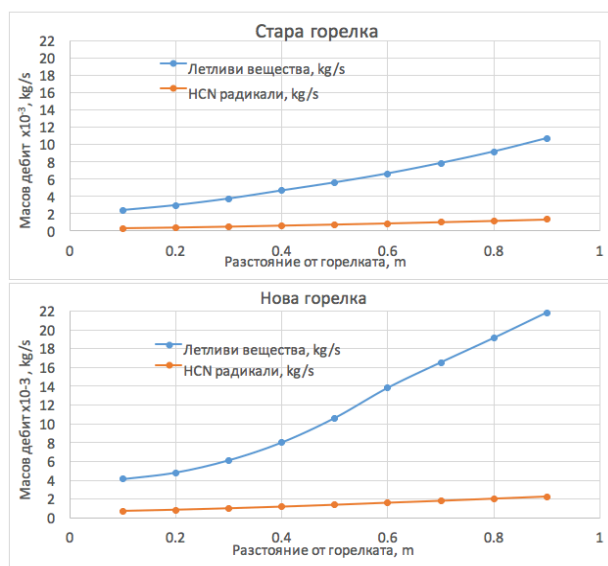
Разпределението на въглищния прах ( $g$ ) по височина на горивната уредба не се влияе от промяната в дебита на транспортиращия агент на вход на прахоконцентратора. **Предложената нова конструкция осигурява по-равномерно разпределение на въглищния прах в основни горелки, както е видно от Фиг. 6.6. - почти изравнени количества в ДОГ (0,46) и ГОГ (0,44);**

**Намаленият размер на „торпедото“ на предложени нов прахоконцентратор води до по-малко аеродинамично съпротивление от около 75 Pa, в сравнение с настоящата конструкция (Фиг. 6.6);**

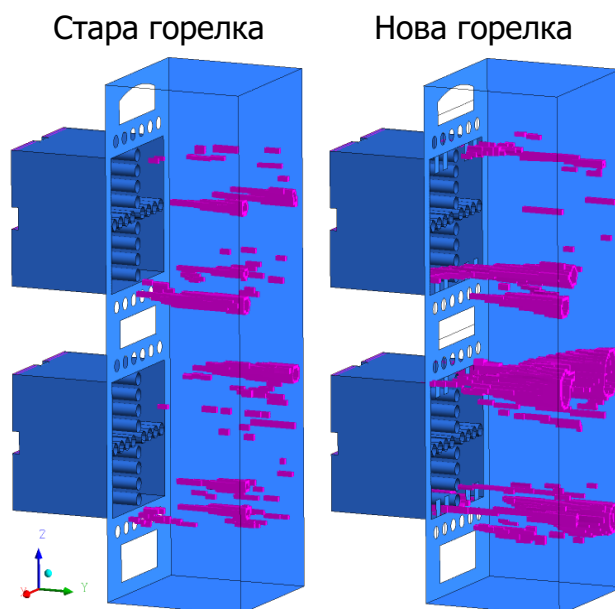
## Моделни изследвания на горивните уредби



Фиг. 6.7. Изменение на скоростите по височина на горивната уредба



Фиг. 6.8. Масов дебит на летливи вещества и азото съдържащи съединения след горивната уредба



Фиг. 6.9. Обем след горивните уредби, съдържащи летливи вещества

## Изводи от модификацията на горивните уредби

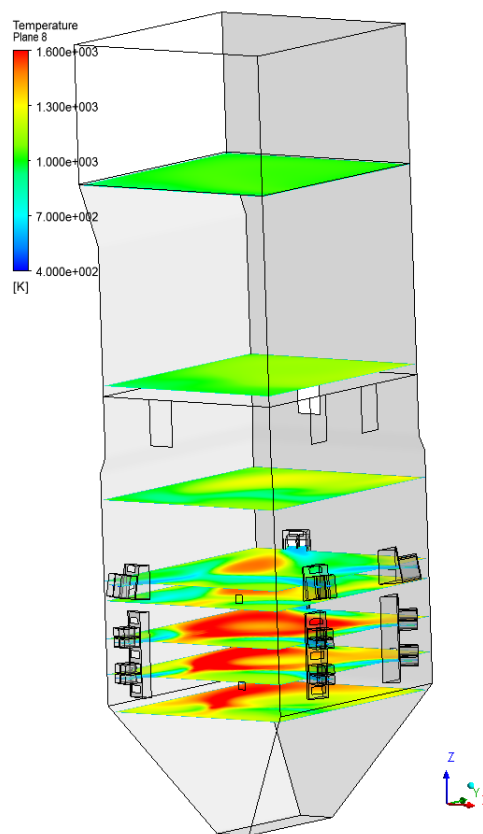
В следствие на получените резултати може да се направят следните заключения:

- ✓ Въпреки по-малкото количество въздух, подаван през новата горивна уредба, скоростите на изтичане ще се запазят, което няма да доведе до влошаване на горивния процес поради запазването на отношението между скоростите на въздуха и прахо-газовата смес.
- ✓ В резултат на поставянето на турбулизиращите планки летливите вещества се отделят по-бързо. Това би довело до по-голяма стабилност на горивния процес в основна зона на печната камера, въпреки значително по-малкото количество въздух, подаван към нея (коефициент на излишък на въздух  $0,8 \div 0,9$ ).

## Моделни изследвания на пещната камера след реконструкцията

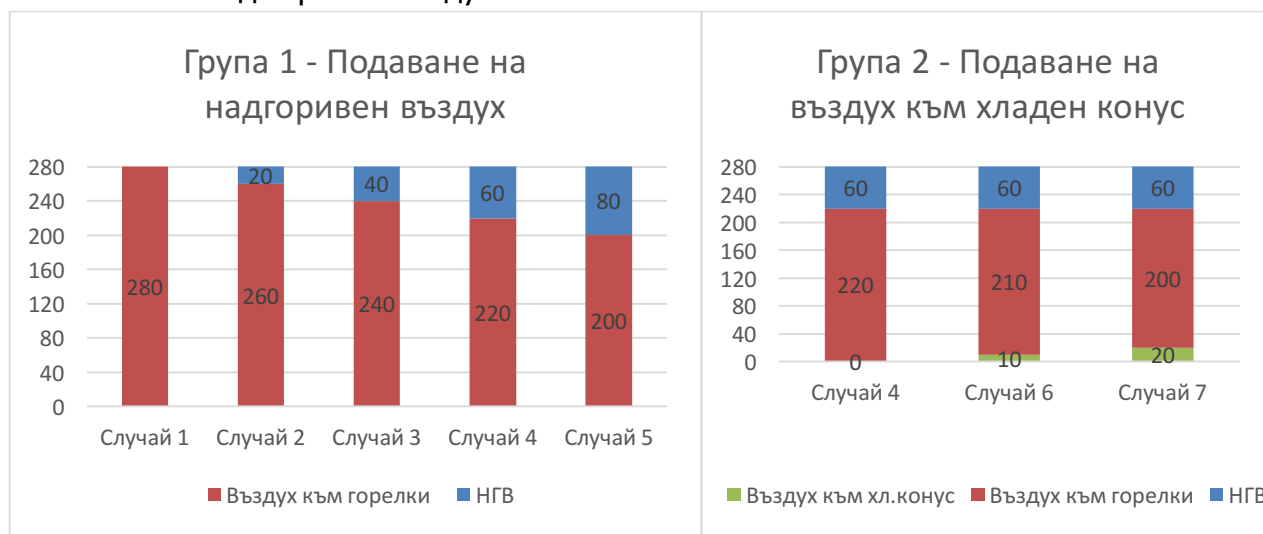
Това изследване има за цел да покаже ефекта от преразпределението на организирано подавания въздух върху формирането на азотни оксиди. За тази цел е проведено едно класическо моделно изследване. Разгледани са 7 случая при едни и същи началните условия като разход и качество на горивото, разпределението на транспортиращия агент и горивото по височина на горивните уредби, вентилация на мелниците и количество организирано подаван въздух.

Разликата в тези случай е в разпределението на този въздух в трите зони. В първия случай цялото количество въздух 280 000 Нм<sup>3</sup>/ч се подава в основна зона през горелките. От втори до пети случай се отнема част въздуха към горивните уредби и се подава като надгоривен. В последните 2 случая се подава фиксирано количество надгоривен въздух и се отнема допълнително количество от горелките, което се подава към хладния конус. Така представените случай могат да се разделят на две групи.



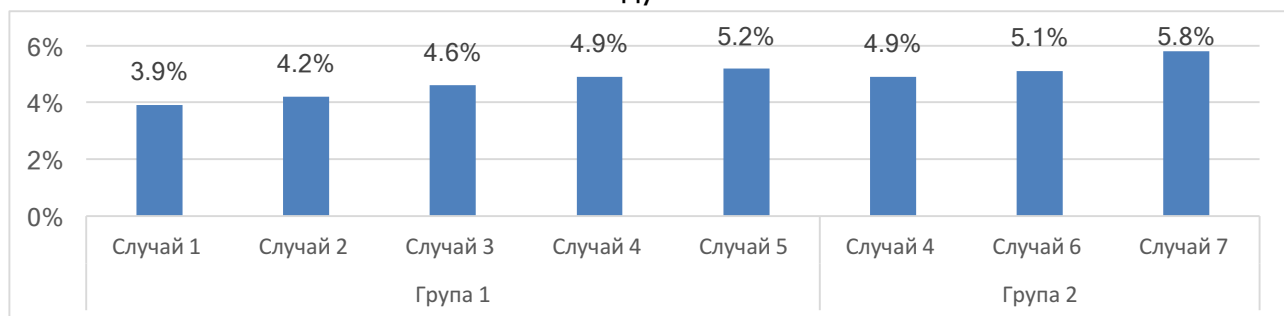
Фиг.6.10. Температурни полета по височина на ПК

Първата има за цел да представи влиянието върху формирането на азотни оксиди, при подаване на различно количество надгоривен въздух при фиксирано общо количество и без подаването на такъв в хладния конус. Втората група трябва да представи влиянието на подавания въздух към хладния конус при фиксирано общо количество и над горивен въздух – Фиг. 6.11.



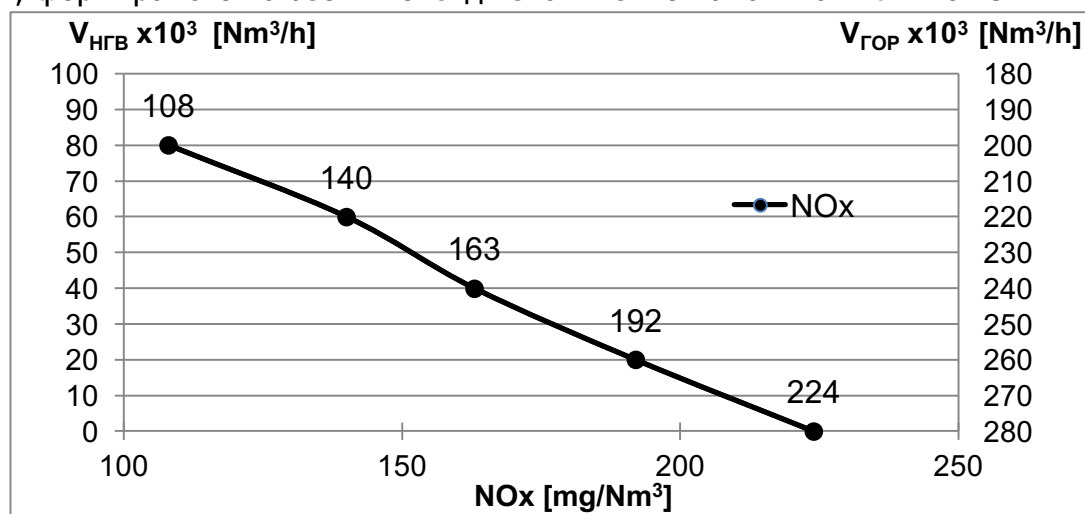
Фиг. 6.11. Разпределение на организирано подавания въздух в разгледаните случаи

Очаквано, загубите от механично недоизгаряне на горивото нарастват, с отнемането на по-голямо количество въздух от основна зона.



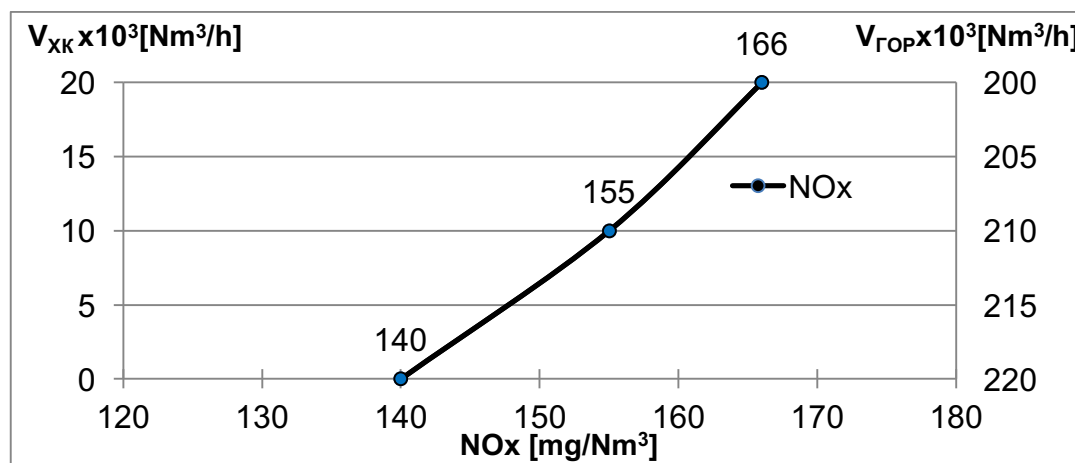
Фиг. 6.12. Загуби от механично недоизгаряне –  $q_4$

В потвърждение на теорията, с увеличаването на разхода за надгоривния въздух, формирането на азотни оксиди значително намалява – Фиг. 6.13.



Фиг. 6.13. Зависимост между количеството надгоривен въздух и формирането на азотни оксиди

Във втората група, подаването на въздух в хладния конус води до незначително увеличаване на азотните оксиди (Фиг. 6.14), но неговата цел е да разхлажда долната част на пещта. Това се прави с цел да се избегне натрупването на шлак в хладния конус, което би довело до аварийно спиране на котела за неговото почистване.



Фиг. 6.14. Зависимост между количеството въздух подаван към хладния конус и формирането на азотни оксиди

## Оценка влиянието на различни фактори върху формирането на азотни оксиди, при изгарянето на местни лигнитни въглища в котли тип ПК-38-4

В настоящата глава е разгледано влиянието на няколко фактора върху образуването на азотни оксиди, свързани с експлоатацията на парогенератори тип ПК-38-4. Това са:

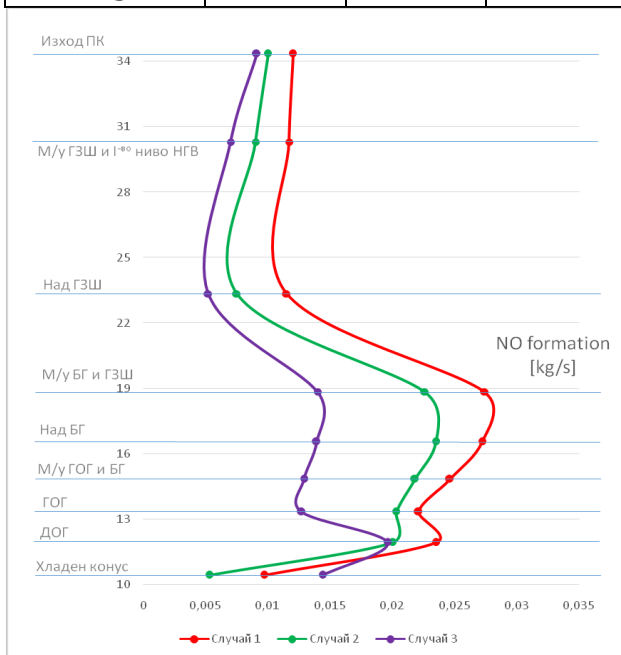
- Промяна на вентилационната производителност на мелниците:
  - ❖ Без подаване на организиран въздух към хладен конус;
  - ❖ При подаване на организиран въздух към хладен конус;
- Промяна едрината на въглищния прах;
- Влияние на клапи аеросмес "бридови горелки";
- Влияние при работа на котела с над номинални товари;
- Преразпределение на организираното количество въздух към горивните уредби.

Всеки един от изброените фактори е изследван поотделно при едни и същи начални условия като разход и качество на горивото, количество на организирано подаван въздух и разпределението му по височина на пещната камера.

### Влияние на вентилационната производителност :

-без подаване на в-х към хладен конус

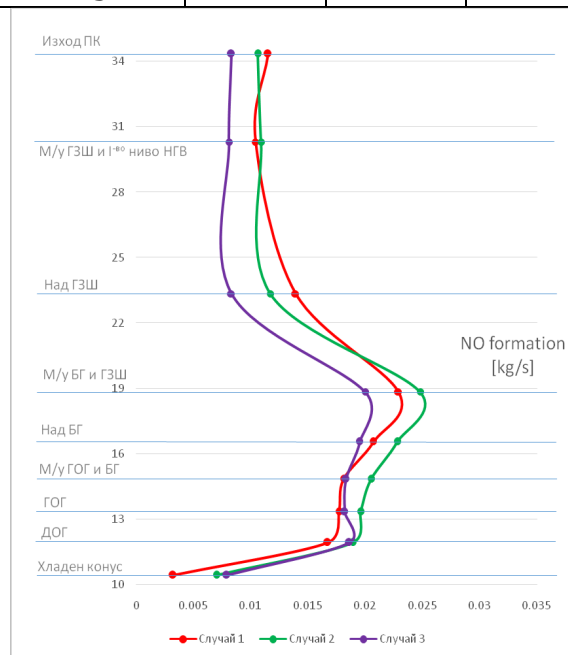
| Случай №        | 1       | 2       | 3       |
|-----------------|---------|---------|---------|
| $V_{MB}, m^3/h$ | 150 000 | 190 000 | 220 000 |
| $NO_x, mg/Nm^3$ | 221     | 140     | 95      |



Фиг. 8.1. Формиране на NO по височина на ПК при промяна на вентилацията без подаване на въздух към хладен конус

-с подаване на в-х към хладен конус

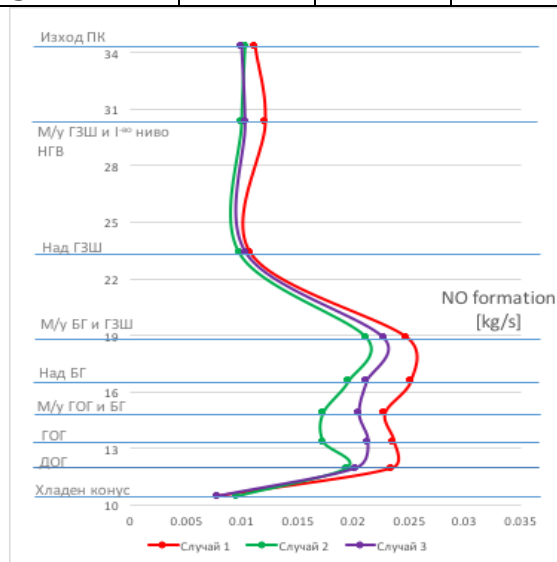
| Случай №        | 1       | 2       | 3       |
|-----------------|---------|---------|---------|
| $V_{MB}, m^3/h$ | 150 000 | 190 000 | 220 000 |
| $NO_x, mg/Nm^3$ | 190     | 166     | 132     |



Фиг. 8.2. Формиране на NO по височина на ПК при промяна на вентилацията с подаване на въздух към хладен конус

### Влияние на едрината на въглищния прах

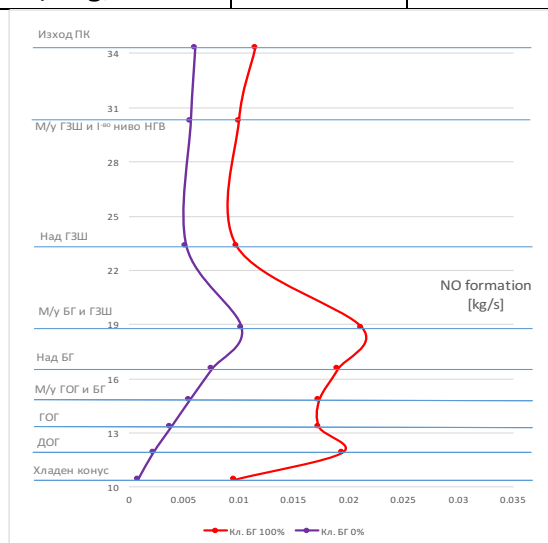
| Случай №        | 1   | 2   | 3   |
|-----------------|-----|-----|-----|
| $D_{CP}, \mu m$ | 192 | 256 | 278 |
| $NO_x, mg/Nm^3$ | 185 | 163 | 156 |



Фиг. 8.3. Формиране на NO по височина на ПК при промяна на зърнометрията на праха

### Влияние на клапи аеросмес "бридови горелки"

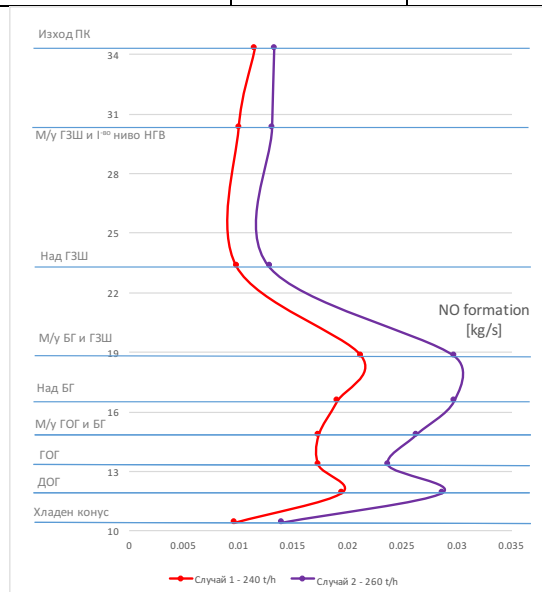
| Случай №             | 1             | 2           |
|----------------------|---------------|-------------|
| Положение на клапата | 100% отворена | 0% отворена |
| $NO_x, mg/Nm^3$      | 163           | 100         |



Фиг. 8.4. Формиране на NO по височина на ПК при използване на клапи аеросмес "бридови горелки"

### Влияние на над номинални товари

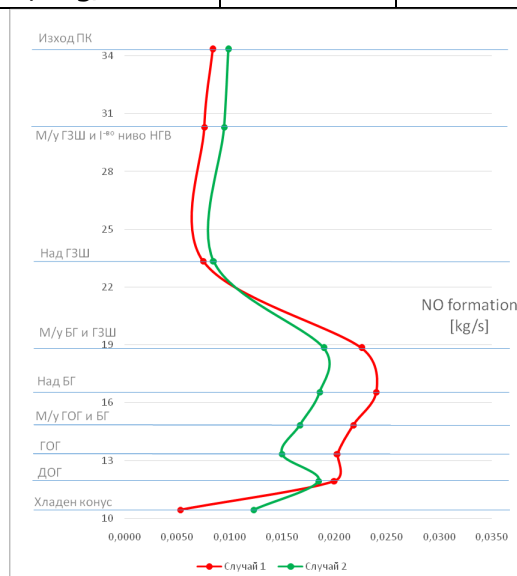
| Случай №              | 1   | 2   |
|-----------------------|-----|-----|
| Разход на гориво, t/h | 150 | 163 |
| $NO_x, mg/Nm^3$       | 163 | 198 |



Фиг. 8.5. Формиране на NO по височина на ПК при над номинални параметри

### Преразпределение на орган. въздуха към горивните уредби

| Случай №                 | 1          | 2            |
|--------------------------|------------|--------------|
| Разпределение на въздуха | Равномерно | Неравномерно |
| $NO_x, mg/Nm^3$          | 140        | 163          |



Фиг. 8.6. Формиране на NO по височина на ПК при преразпределение на организирания въздух към горелките

**Оценка на реализираната реконструкция на котли тип ПК-38-4**

В периода 2013-2016 година бяха реконструирани всички 8 котела тип ПК-28-4, намиращи се в експлоатация в ТЕЦ "Марица Изток 2". За гарантиране на изискванията за подобрен горивен процес и емисии на NOx, по-ниски от 200 mg/Nm<sup>3</sup>, бяха проведени балансови опити /при максимален и минимален товар/ и непрекъснати 120 часови измервания на емисиите на всички котли.

Балансовите опити бяха извършени според стандарт БДС EN 12 952-15 – "Водотръбни котли и спомагателни инсталации. Част 15 – Приемни изпитания". 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 бяха проведени от акредитирана лаборатория чрез поставянето на проверен и калибриран газ анализатор, измерващ концентрацията на кислород, въглероден оксид и азотни оксиди.

**Резултати от проведени балансови изпитания при максимален товар на КА-1 и КА-2**

Табл. 8.1. Балансови изпитания на КА-1 и КА-2 при максимален товар

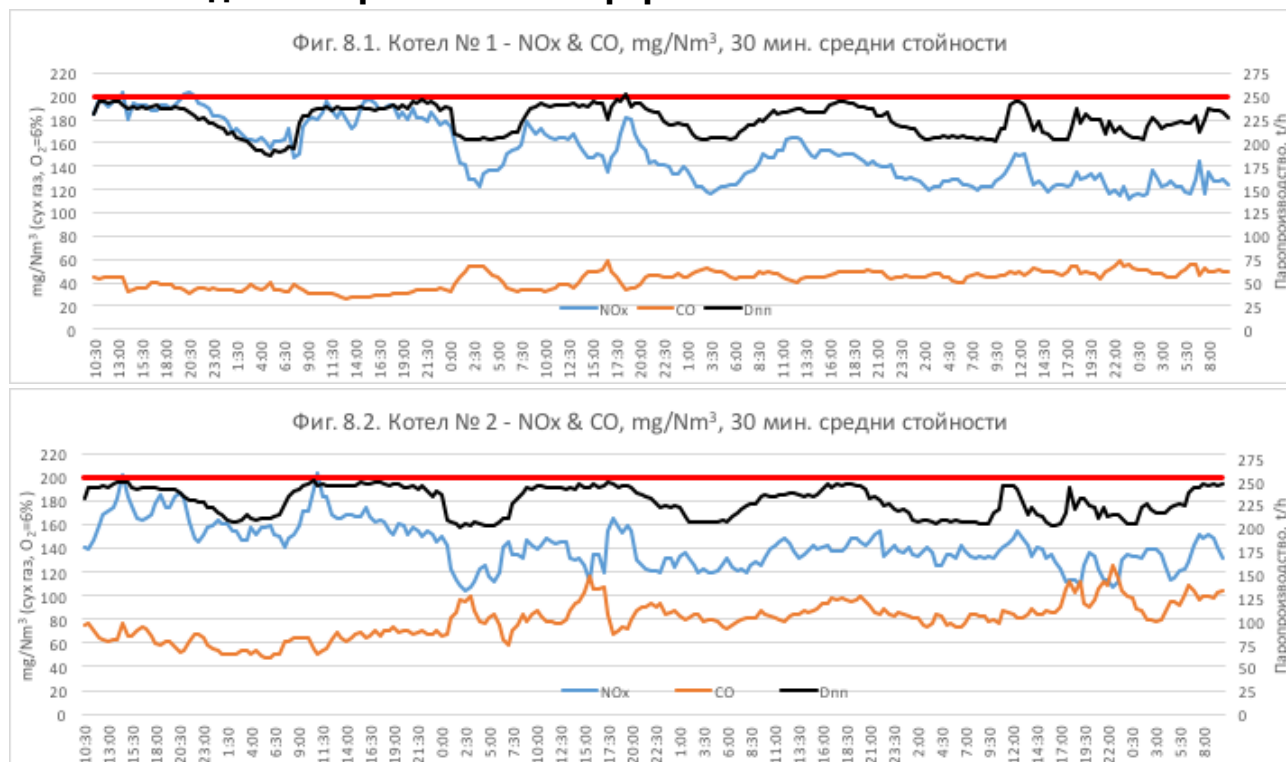
| Величина                                              | Дименсия | Стойност       |
|-------------------------------------------------------|----------|----------------|
| <b>Котел №1, D<sub>пп</sub> = 259 t/h</b>             |          |                |
| Загуба на топлина от изходящи димни газове            | -        | 0,14341        |
| Загуба на топлина от наличието на СО в димните газове | -        | 0,00009        |
| Загуба на топлина от топлобмен с околната среда       | -        | 0,00525        |
| Загуба на топлина от шлак и летяща пепел              | -        | 0,02556        |
| <b>КПД</b>                                            | -        | <b>0,82569</b> |
| Масов разход на гориво                                | kg/s     | 34,4057        |
| Масов разход на шлаката                               | kg/s     | 0,51540        |
| Масов разход на пепелта отнесена с димните газове     | kg/s     | 4,638576       |
| <b>Котел №2, D<sub>пп</sub> = 255 t/h</b>             |          |                |
| Загуба на топлина от изходящи димни газове            | -        | 0,13374        |
| Загуба на топлина от наличието на СО в димните газове | -        | 0,00011        |
| Загуба на топлина от топлобмен с околната среда       | -        | 0,00539        |
| Загуба на топлина от шлак и летяща пепел              | -        | 0,03059        |
| <b>КПД</b>                                            | -        | <b>0,83017</b> |
| Масов разход на гориво                                | kg/s     | 33,8157        |
| Масов разход на шлаката                               | kg/s     | 0,59144        |
| Масов разход на пепелта отнесена с димните газове     | kg/s     | 5,322929       |

## Резултати от проведени балансови изпитания при максимален товар на КА-1 и КА-2

Табл. 8.2. Балансови изпитания на КА-1 и КА-2 при минимален товар

| Величина                                              | Дименсия | Стойност       |
|-------------------------------------------------------|----------|----------------|
| <b>Котел №1, D<sub>пп</sub> = 188 t/h</b>             |          |                |
| Загуба на топлина от изходящи димни газове            | -        | 0,14197        |
| Загуба на топлина от наличието на СО в димните газове | -        | 0,00014        |
| Загуба на топлина от топлобмен с околната среда       | -        | 0,00577        |
| Загуба на топлина от шлак и летяща пепел              | -        | 0,02860        |
| <b>кпд</b>                                            | -        | <b>0,82352</b> |
| Масов разход на гориво                                | kg/s     | 26,4190        |
| Масов разход на шлаката                               | kg/s     | 0,42138        |
| Масов разход на пепелта отнесена с димните газове     | kg/s     | 3,792447       |
| <b>Котел №2, D<sub>пп</sub> = 185 t/h</b>             |          |                |
| Загуба на топлина от изходящи димни газове            | -        | 0,13514        |
| Загуба на топлина от наличието на СО в димните газове | -        | 0,00013        |
| Загуба на топлина от топлобмен с околната среда       | -        | 0,00580        |
| Загуба на топлина от шлак и летяща пепел              | -        | 0,03230        |
| <b>кпд</b>                                            | -        | <b>0,82663</b> |
| Масов разход на гориво                                | kg/s     | 27,2055        |
| Масов разход на шлаката                               | kg/s     | 0,49460        |
| Масов разход на пепелта отнесена с димните газове     | kg/s     | 4,451364       |

## Резултати от проведени непрекъснати измервания на емисиите от азотни оксиди изхвърляни в атмосферата



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

В дисертационния труд е направен задълбочен анализ на работата на котли тип ПК-38-4, в ТЕЦ "Марица Изток 2", на основата на който е реализирана реконструкция имаща за цел и обхват, систематизирани по следния начин:

- 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); повишаване на паровия товар до 260 t/h, без шлаковане на пещната камера; възможност котела да работи устойчиво с 3 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 окиси (в целия диапазон на натоварване му от минимален до максимален такъв (180 t/h до 260 t/h) са под 200 mg/Nm<sup>3</sup> (при 6 % O<sub>2</sub>);
- Техничко-икономическите показатели на реконструираните котли в ТЕЦ "Марица Изток 2" (ст. № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), оценени по коефициента им на полезно действие са се запазили като проектните такива. Собствените нужди на реконструираните котли са намалели (тези данни не са представени в дисертация) 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.

Приносителите 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 цифрово симулационни модели за изследване работата на отделни системи на котли ПК-38-4 (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 ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2". Извършена е валидация на модела с реални натурни изпитания. 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 ПК-38-4.

### **Инженерно-приложни приноси**

1. Реализирана е реконструкция на котли ПК-38-4 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 ПК-38-4 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 със стандартизирана апаратура, покриващи националните и европейски изисквания.

1. Б. Ангелов, Кр. Тодоров, В. Раденков, Моделни изследвания на въглищен инерционен сепаратор, част от прахоприготвящата система на котли в „ТЕЦ Марица Изток 2“, XIX<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 14-17 септември 2014, Том 1, стр. 17-26;
2. Б. Ангелов, Кр. Тодоров, В. Раденков, Моделни изследвания на предложение за нова конструкция на въглищен инерционен сепаратор на котли тип ПК-38-4, XIX<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 14-17 септември 2014, Том 1, стр. 27-34;
3. Кр. Тодоров, Т. Тотев, В. Раденков, Модел на формиране на NO<sub>x</sub> в пешната камера на енергиен парогенератор ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“, XIX<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 14-17 септември 2014, Том 1, стр. 35-41;
4. В. Раденков, Оценка на организирано подавания въздух към котли тип ПК-38-4, XX<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2015, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 13-16 септември 2015, Том 1, стр. 38-44;
5. Т. Тотев, В. Раденков, Д. Кънев, Б. Игнатов, Конструктивни изменения на котли тип ПК-38-4, с цел подобряване на горивния процес и гарантиране на емисии на NO<sub>x</sub>, по-ниски от 200 mg/Nm<sup>3</sup>, XX<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2015, ISSN 1314-5371, гр. Созопол, 13-16 септември 2015, Том 1, стр. 45-51;
6. Т. Тотев, В. Раденков, Моделни изследвания на горивните уредби на котли тип ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“, XXI<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2016, ISSN 1313-5371, Том 1, гр. Созопол, 18-21 септември 2016, стр. 18-24;
7. Т. Тотев, В. Раденков, Д. Кънев, Оценка влиянието на организирано подавания въздух върху формирането на азотни оксиди при изгарянето на въглища в котли тип ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“, XXI<sup>-та</sup> Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2016, ISSN 1313-5371, Том 1, гр. Созопол, 18-21 септември 2016, стр. 25-32;
8. Т. Тотев, Б. Игнатов, В. Раденков, Б. Ангелов, Създаване на изчислителен модел на прахоконцентратор на прахоприготвящите системи на котли тип ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“, Годишник на Технически Университет - София, ISSN 1311-0829, Том 66, книга 3, 2016, стр. 185-194;
9. Т. Тотев, В. Раденков, Б. Ангелов, CFD моделни изследвания на прахоконцентратор на прахоприготвящи системи на котли тип ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“, Годишник на Технически Университет - София, ISSN 1311-0829, 2016, Том 66, книга 3, 2016, стр. 195-204;

## **Summary**

### **Applying of primary methods for nitrogen emissions reduction in boilers firing Bulgarian lignite coals**

**Author: Eng. Vasil Radenkov**

The PhD thesis presents some main relationships between the two approaches – conduction of full-scale tests and mathematical modeling for combustion techniques and technologies through the application of computational fluid mechanics. Examples are given to illustrate how measurements and theoretical development of certain technical issues complement each other. It clarifies how the modeling can be used to study combined physicochemical processes and increases the understanding of the technical systems and processes.

The subject of the investigation is boiler type PK-38-4. Eight such boilers are in operation at "Maritsa East 2" TPP. They are designed to work in a double block - two boilers feeding one condensing turbine.

The aim of the current thesis is the study, research, analysis and implementation of technological solutions using primary methods for nitrogen emissions formation limitation above 200 mg/Nm<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6 vol.%), in boilers type PK-38-4 firing Bulgarian lignite coal (from Maritsa East basin).

Numerical simulation models are prepared for specific boiler systems. Model verification is carried out through on-site measurements and model investigations are conducted. Based on the acquired results, design changes for classifier, swirler, burners, furnace and organized air supply ducts are applied thus leading to a new refurbished object operating in accordance with National and European regulatory.