

## ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2022

### МОДЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГОРИВНИЯ ПРОЦЕС СЛЕД ГАЗОВАТА ГОРЕЛКА, ИНСТАЛИРАНА НА КОТЛИ ПК-38-4

Никола Байкалов, Васил Раденков

### MODEL STUDY OF THE COMBUSTION OF NATURAL GAS AND COMBUSTION AIR OF THE OUTPUT OF THE GAS BURNER INSTALLED ON BOILERS PK-38-4

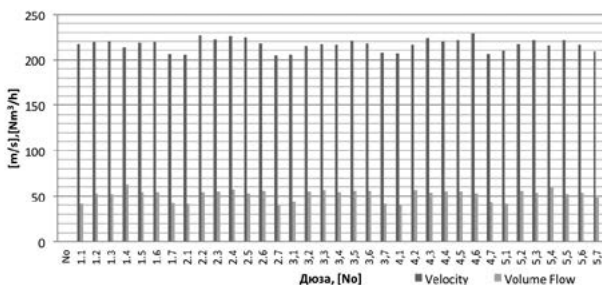
Nikola Baykalov, Vasil Radenkov

*Abstract: This report draws attention to the aerodynamic and combustion model of gas burners. The ratio of air and fuel is studied to obtain the optimum gas-air mixture in order to achieve the maximum efficiency of the gas burner during the start-up of boilers at TPP "Maritsa East 2" EAD. Last but not least, attention is paid to the low content of nitrogen oxides in the products of combustion.*

*Keywords: steam generator, boiler starting modes, gas burner, CFX modeling*

#### Въведение

С влизането в сила на новите екологични норми, „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД започна поетапно преминаване от разпалващо гориво мазут към природен газ. Осъществяването на този проект е реализирано с модернизация и реконструкция на старите мазутни горелки в нови, комбинирани газо-мазутни горелки. Използва се същата въздушна кутия за доставяне на въздуха за горене, а за газовата част на тази комбинирана горелка е монтиран газов колектор от който излизат 5 броя тръби (нар. „пушки“), преминаващи през въздушната кутия до предната част на горелката. Всяка „пушка“ завършва със седем отвора (дюзи), разположени напречно на дължината на тръбата. Това всъщност са дюзите, които впръскват газта под ъгъл  $90^\circ$  спрямо въздуха за горене постъпващ от въздушната кутия.



Фигура.1. Скорост и обемен разход на природен газ през дюзите на ГТ

Направено е обследване на двата потока на газовата горелка [2] чрез софтуер за моделно изследване (ANSYS CFX). В заключение е установено равномерно разпределение на природния газ през дюзите на газовите пушки (фиг.1.). Разпределението на въздуха във въздушната кутия на газовата горелка е разгледано в два случая. Единият случай е с 40% повече въздух от стехиометрично необходимия за пълното изгаряне на постъпващия газ в горелката ( $\alpha = 1,4$ ). Този случай е избран, защото най-много се доближава до реалните експлоатационни условия. Вторият случай е при излишък на въздух от 20% ( $\alpha = 1,2$ ). Резултатите от това изследване са показани в табл.1.

Таблица.1.

Вход: 21 606 Nm³/h, $t_{AIR} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ( $\alpha=1,2$ ); Изход: Отворен (статично налягане = 0 Pa)			
	Вход	Първичен въздух	Вторичен въздух
Площ, m²	0,42	0,054	0,12
Масов дебит, kg/s	<b>7,76</b>	1,366	6,394
Скорост, m/s	15,6	28,9	48,2
Обемен дебит,	21 606	3803	17 802
Вход: 25 336 Nm³/h, $t_{AIR} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Изход: Отворен (статично налягане = 0 Pa)			
	Вход	Първичен въздух	Вторичен въздух
Площ, m²	0,42	0,054	0,12
Масов дебит, kg/s	9,1	1,6	7,5
Скорост, m/s	18,28	33,9	56,3
Обемен дебит, Nm³/h	25 336	4463	20 873

### Моделно изследване на горивния процес на газовата горелка при 1800Nm<sup>3</sup>/h природен газ, и въздух 21 600 Nm<sup>3</sup>/h ( $\alpha = 1,2$ ) и 25 300 Nm<sup>3</sup>/h ( $\alpha = 1,4$ )

В настоящия доклад е разгледано смесването на въздуха за горене и природния газ на изхода от газовата горелка и осъществен горивен процес. Този вид горене, с разделно подаване на горимия газ и въздуха за горене е съпроводено с интензивен масообмен. По начина на подаване на двата флуида и тяхното смесване е видимо, че тук се осъществява турбулентно дифузно горене.

За целта на настоящата числена симулация, не е необходимо да се разглежда цялата пещна камера заедно с газовата горелка, а само част от нея, достатъчна да онагледя процеса на горене по дължина на факела. Така се оптимизира модела за по-бързо и лесно пресмятане. След газовата горелка е добавен обем с правоъгълна форма с размери:

- Дължина – 4м.
- Широчина – 2м.
- Височина – 2м.

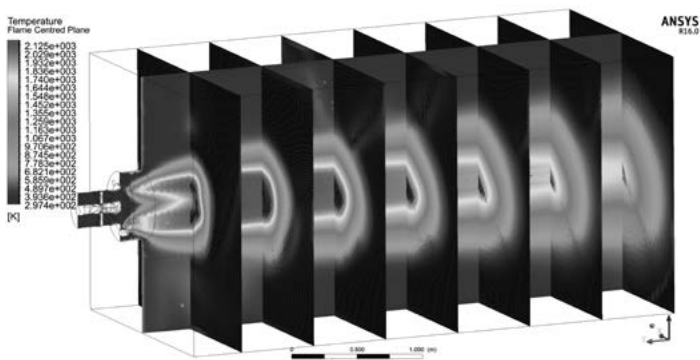
Изградена е тетрагонална изчислителна мрежа (tetrahedral mesh) с 1 349 374 елемента. Като продължение на обследването на разпределението на въздуха през въздушната кутия на горелката са направени два модела на горивния процес на газовата горелка, първия е с коефициент на излишък на въздуха  $\alpha = 1,2$  (21 600 Nm<sup>3</sup>/h), а втория с  $\alpha = 1,4$  (25 300 Nm<sup>3</sup>/h). В следващата таблица (Табл.2.) е показан материалния баланс на двете симулации.

Таблица. 2.

Коефициент на излишък на въздуха	Входове потоци, kg/s	Изходящи потоци, kg/s	(In-Out)/in x100, %
$\alpha = 1,2$	<b>23,637</b>	<b>-23,63</b>	<b>0,03%</b>
$\alpha = 1,4$	<b>29,817</b>	<b>-29,82</b>	<b>-0,01%</b>

Както се вижда от данните в таблицата, стойностите на материалния баланс на входа на модела и на изхода са равни, следователно моделите отговарят на критериите за сходимост.

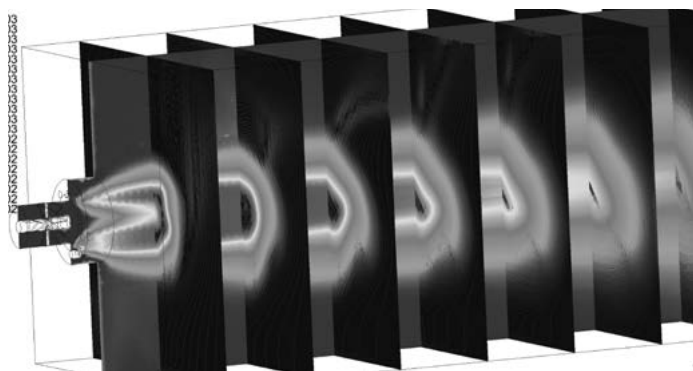
Първо е обследван горивния процес на модела с по-нисък излишък на въздух. За целта е разгледана температурата на факела по неговата дължина. На фиг.2. е показано температурното поле на горивния процес от извършената симулация на газовата горелка. За да се визуализира това поле и за да се извлекат данни са изградени една надлъжна равнина през центъра на горелката, лежаща в равнина XY, и 20 напречни на факела равнини, лежащи в равнина XZ.



Фигура.2. Температурно поле на факела на ГГ при  $\alpha = 1,2$

На фигурата, за по-добра визуализация, не са представени всички напречни равнини, а само част от тях – 2, 5, 8, 11, 14, 17 и 20. Първото поле започва на 0,2 метра от горелката, като всички полета са равно отдалечени едно от друго (0,2 метра). Максималните температури на факела са над  $1900^{\circ}\text{C}$  в самото му ядро на около 0,8 метра от амбразурата на горелката, а в най-отдалечения край на разглеждания обем (4 m от горелката) - около  $1430^{\circ}\text{C}$ .

Аналогично на по-горе представения случай е симулирана работата на горелката с по-голямото количество въздух (при  $\alpha = 1,4$ ). На фиг.3. е показано температурното поле със същия брой и разположение на напречните и надлъжната равнини.



Фигура.3. Температурно поле на факела на ГГ при  $\alpha = 1,4$

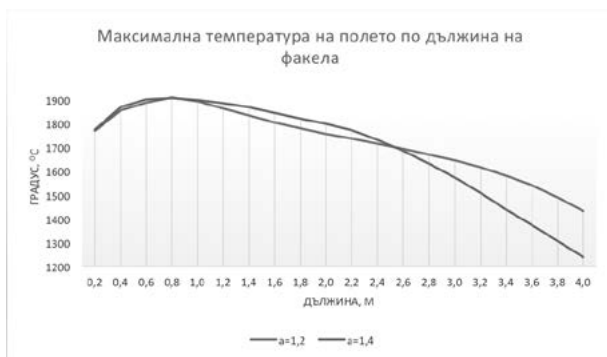
Максималните температури на факела са над  $1900^{\circ}\text{C}$  в самото му ядро на около 1 метър от амбразура на горелката, а в най-отдалечения край на разглеждания обем - около  $1240^{\circ}\text{C}$ .

Извлечени са данни за температурите от всички полета и са изградени графики с средните и максималните температури за всяко напречно поле по дължината на факела, показани на Фиг.4. и Фиг.5.



Фигура.4. Графика на средната температура на полето по дължина на факела

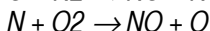
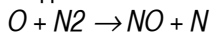
За средната температура от всяко поле трябва да се има в предвид, че тук влизат и ниските стойности извън факела, в непосредствена близост до границите на разглеждания обем на горивната камера. Забелязва се, че стойностите на средната температура се увеличават с отдалечаване от горелката. Започват от около  $230^{\circ}\text{C}$  и достигат  $360^{\circ}\text{C}$  в края на факела за случая с по-малкото въздух, а в другия случай започват от  $215^{\circ}\text{C}$  и се достига до средна температура  $325^{\circ}\text{C}$ . Това се дължи на увеличаването на размера на факела спрямо общата площ на полето, пълното изгаряне на горивото в неговия край и освобождаване на максималното количество топлина. От друга страна вторичния въздух, не участвал в горенето поглъща част от освободената топлина и заедно със загубите от топлообмена в пещна камера сформират по-ниските максимални стойности в последните полета. Това е показано на Фиг.4., където са изведени максималните стойности на температурата за всяко поле и е построена диаграма.



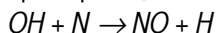
Фигура.5. Графика на максималната температура на полето по дължина на факела

Максималните температури в близост до горелката започват от приблизително еднакви температури около 1770°C и нарастват, като на разстояние около 0,8 и 1 м от горелката се постигат най-високите температури от 1908°C и 1904°C, съответно при  $\alpha = 1,2$  и  $\alpha = 1,4$ . В случая с по-малко въздух се постигат по-високи максимални температури на по-близко разстояние от горелката и последващо по-бързо намаляване до средата на факела, а при постъпване на повече въздух към горелката, максималните температури се понижават по-бавно до средата на факела. След 2,5 м от амбразура на горелката, двете линии се пресичат и си разменят местата – случая с повече въздух поддържа по-ниски максимални температури до края на факела. В последното поле имаме максимални температури от 1432 °C и 1238°C, съответно при  $\alpha = 1,2$  и  $\alpha = 1,4$ .

След като разгледахме температурните полета на факела, преминаваме към формирането на NOx емисии. В зависимост от метода им на образуване, те се разделят на три вида: термични, бързи и горивни азотни оксиди. Поради наличието на високи температури във факела (над 1800°K) и за двата разглеждани горивни модела, най-голям принос към формирането на азотните оксиди ще имат термичните. NO се формира от комбинацията на свободни радикални разновидности на O и N, които се намират в изобилие при високи температури. Механизмът за тяхното генериране е известен като „механизъм на Зелдович“ и включва следните две реакции:



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



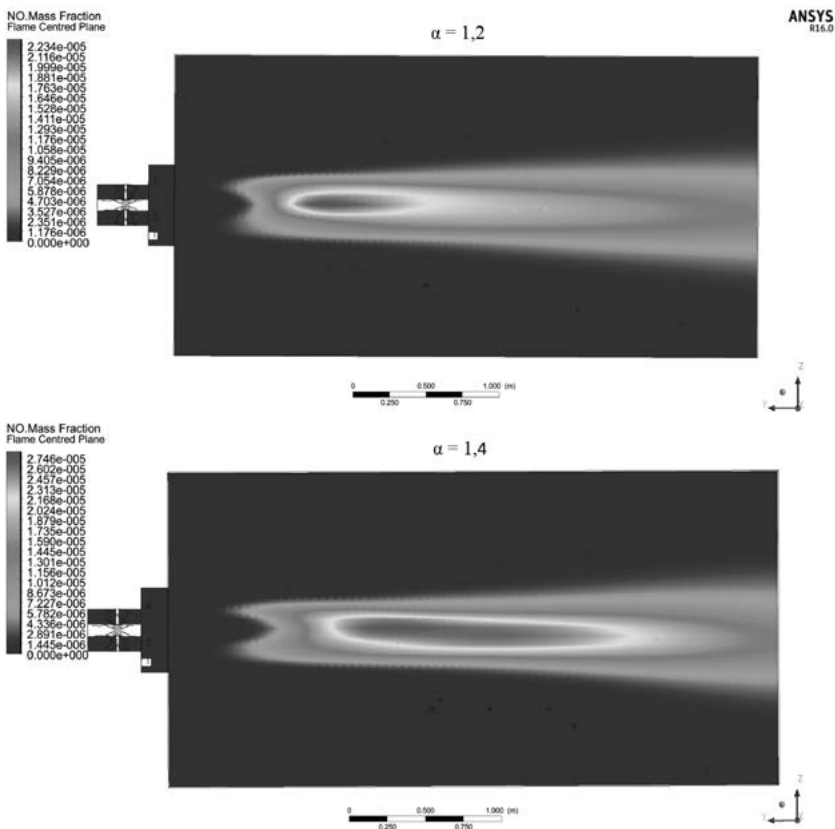
Когато механизма се състои от трите реакции (както използвания модел на формиране на NO в разглежданите случаи), тогава става въпрос за разширен „механизъм на Зелдович“.

Обема от горивната камера, в двата разглеждани случая, с наличие на температури над 1800°K е затворен между:

0,2 m и 3,6 m след горелка, за първия модел при  $\alpha = 1,2$ ;

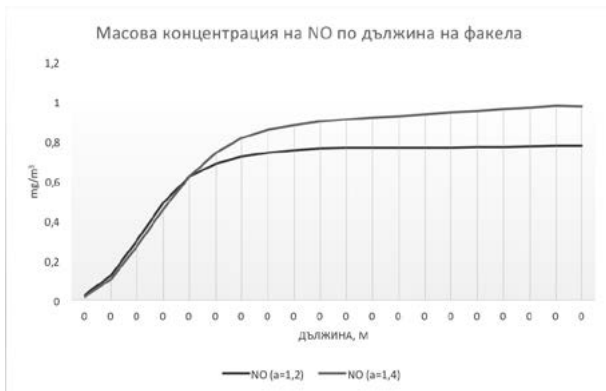
0,2 m и 3,2 m след горелка, за втория модел при  $\alpha = 1,4$ ;

В тези обеми следва да се формира основното количество азотен оксид. На фиг.6. са показани зоните с най-висока концентрация на NO по дължина на факела за двата разглеждани случая – съответно при  $\alpha = 1,2$  и при  $\alpha = 1,4$ .



Фигура.6. Концентрация на NO по дължина на факела

Зоните с червено са с най-висока концентрация на NO. Очевидна е разликата между двата разглеждани случая – с подаването на повече въздух се увеличава концентрацията на азотни оксиди. Изведени са данните за средната концентрацията на NO за всяко напречно поле и е изградена графика, показана на Фиг.7. Тези стойности на NO са осреднени за цялата площ на всяко напречно поле на факела, включително и зоната извън факела в близост до стените на печната камера.



Фигура.7. Масова концентрация на NO по дължина на факела

Графиката напълно препокрива показаното на фиг.6., като концентрацията на NO е най-голяма при най-високите температури на факела и се запазват високи до края на изследвания обем от печна камера. Първоначално образуването на азотни оксиди е по-бързо при модела с по-малко въздух.

След това при  $\alpha=1,2$  се наблюдава леко понижаване и запазване на стойностите, докато при  $\alpha=1,4$  нарастват до края на изследваната част от факела. Другото, което прави впечатление е голямата разлика в количеството на азотните емисии - над 16% повече NO емисии при работа на ГГ с коефициент на излишък на въздуха  $\alpha=1,4$ .

Тъй като горивния процес се извършва в среда с надстехиометрично количество въздух ( $\alpha=1,2$  на изхода от горелката) и факта, че в печна камера постъпва допълнително количество въздух през не добре уплътнените клапи за горещ въздух към праховите горелки и отворени люкове на хладен конус (по инструкция), е заложено в модела пълно изгаряне на метана. Затова и няма да бъде разгледана количеството на CO.



## Заклучение

При работа с  $\alpha=1,2$  се достигат малко по-високи максимални температури в ядрото на факела, но за кратко. В края на факела максималните температури са по-високи от тези при работа на ГГ с  $\alpha=1,4$ .

Средните температури по протежението на факела се запазват по-ниски при  $\alpha=1,4$  в следствие на охлаждане от допълнителното количество въздух.

Масовата концентрация на NOx емисии е над 16% повече при работа на газовата горелка с  $\alpha=1,4$  в следствие на постъпилото по-голямо количество въздух.

## Литература

- [1] Байкалов Н., Бонев Б., Промяна на пусковия алгоритъм на котлите след замяната на мазута (леко котелно гориво) с природен газ като разпалващо гориво в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД, НК „Енергиен Форум 2020“, Варна 2020
- [2] Байкалов Н., Бонев Б., Раденков В., Аеродинамично изследване на потоците в газовите горелки, инсталирани на котлите в ТЕЦ „МАРИЦА ИЗТОК 2“ ЕАД, НК „Енергиен Форум 2019“, Варна 2019
- [3] Байкалов Н. Бонев Б., Икономическа оценка на замяната на мазут (леко котелно гориво) с природен газ като разпалващо гориво в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД, НК „Енергиен Форум 2018“, Варна 2018
- [4] Байкалов Н. Бонев Б., Анализ на пусковите режими на котлите в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД, НК „Енергиен Форум 2016“, Варна 2016
- [5] Байкалов Н. Бонев Б., Особенности на пусковите процедури и диаграми за енергийни блокове с котли ПК-38-4 и ЕП 670/140, НК „XXI Научна конференция с международно участие ЕМФ 2016“, Созопол 2016
- [6] Б. Ангелов, Тотев Т., Б. Игнатов, Изследване влиянието на различни фактори върху разпределението на количеството въглища постъпващи в горелките на котел тип П-62, Годишник на ТУ-София, ISSN 1311-0829, том 63, книга 4, 2013, стр. 109-118;
- [7] Русев Ст., Т. Тотев, Б. Игнатов, Анализ на емисиите от азотни оксиди и въглероден оксид, генерирани от енергийните парогенератори на ТЕЦ „София“, XXII НК с международно участие ЕМФ 2017, ISSN 1314-5371, 17-20 септември 2017, Созопол, том 1, стр. 71 – 78;

- [8] Genovski Iv., K. Hristov, “ Optimal heat load distribution between cogeneration steam turbine installations in combined heat and power (CHP) plant”, The Journal of MacroTrends in Technology and Innovation, ISSN 2333-1011, Vol. I Issue I, 2014;

## **Автори**

маг. инж. Никола Емилов Байкалов, ТУ-София, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, e-mail: nikola.baykalov@gmail.com

д-р инж. Васил Емилов Раденков, ТУ-София, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, e-mail: vradenkov@gmail.com