

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

ОЦЕНКА НА ВЪЗМОЖНОСТТА ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВОДОРОД В ПРОИЗВОДСТВЕНИЯ ПРОЦЕС НА КОТЛИ ПК-38-4 В ТЕЦ „МАРИЦА ИЗТОК 2“ ЕАД

Никола Байкалов, Васил Раденков

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING HYDROGEN IN THE PRODUCTION PROCESS OF BOILERS IN TPP "MARITSA EAST 2" EAD

Nikola Baykalov, Vasil Radenkov

Abstract: Making Europe the world's first climate-neutral continent is a binding commitment under the European Climate Act. Achieving these ambitious European climate goals requires a transformation of the current energy system. The EU's priority is the development of renewable hydrogen and it aims to produce 10 Mt and import 10 Mt by 2030. Realization of renewable hydrogen produced by PV installations can be volatile given the unpredictability of markets. Therefore, this report considers the possibility of burning "unrealized" renewable hydrogen in large power steam generators (burning coal) through the installation of gas burners (used for their start-up operations), both during the start-up of the boilers and during normal operation.

Keywords: steam generator, boiler modes, renewable hydrogen, hydrogen burners.

ВЪВЕДЕНИЕ

Превръщането на Европа в първия неутрален по отношение на климата континент в света е обвързващ ангажимент съгласно Европейския закон за климата [1]. Държавите от ЕС са решени да постигнат неутралност до 2050 г., като изпълнят ангажиментите по Парижкото споразумение. Европейският зелен пакт [2] е пакет от политически инициативи, чиято цел е ЕС да поеме по пътя към екологичен преход, като крайната цел е постигане на неутралност до 2050 г. През юли 2021 г. са представени предложения за подготвяне на всички сектори на

икономиката на ЕС да посрещнат това предизвикателство, като се започне с намаляване на емисиите с най-малко 55% до края на 2030 г. С вече напълно приетото законодателство „Подготвени за цел 55“ ЕС излиза на пътя към постигане на целите си в областта на климата по справедлив, разходно ефективен и конкурентоспособен начин.

Европейската комисия представи плана REPowerEU през май 2022 г. Планът се основава на изпълнението на предложенията от пакета „Подготвени за цел 55“. Механизмът за възстановяване и устойчивост (МВУ), създаден след кризата с COVID-19, като временен инструмент за смекчаване на икономическото и социалното въздействие на пандемията, е основният инструмент за финансиране на плана. През декември 2022 г. преговарящите от Съвета и Парламента постигнаха предварително споразумение за преразглеждане на Регламента за МВУ. Измененията дават възможност на държавите членки да добавят в своите планове за възстановяване и устойчивост специални глави за REPowerEU за финансиране на мерки за инвестиции и реформи в съответствие с целите на плана REPowerEU. Съветът официално прие новите разпоредби през февруари 2023 г. [3]

Постигането на тези амбициозни европейски климатични цели минава през трансформация на сегашната енергийна система на Република България и неизбежно води до сериозни социално-икономически последици. Планът за развитие на преносната електрическа мрежа на страната за периода 2022 ÷ 2031 г., предвижда присъединяването на нови 6 500 MW възобновяеми източници. Същевременно, в Плана за възстановяване и устойчивост на Република България (ПВУ) [4], приет с решение на министерски съвет и одобрен с решение за изпълнение на Съвета на ЕС, включва намаляване на въглеродните емисии от производството на електроенергия с 40% на база изходните нива от 2019 г., което да бъде постигнато през 2025 г.

В същото време ЕС илюстрира краткосрочните предизвикателства на увеличаването на зеления водород. Водородната стратегия на ЕС и планът REPowerEU представиха всеобхватна рамка за подкрепа на възобновяемия и нисковъглероден водород, за да се помогне за декарбонизирането на Съюза по рентабилен начин и да се намали зависимостта му от вносни изкопаеми горива. През 2022 г. водородът представлява по-малко от 2% от потреблението на енергия в Европа [5] и се

използва предимно за производство на химически продукти (пластмаси и торове), като 96% от този водород е произведен с природен газ, което води до значителни количества CO₂ емисии. Приоритетът на ЕС е разработването на възобновяем /зелен/ водород и има за цел да произвежда 10 Mt и да внася 10 Mt до 2030 г. Той може да бъде получен чрез електролиза с използване на възобновяема електроенергия за разделяне на водата на водород и кислород и се нарича „възобновяемо гориво от небиологичен произход“[6]. Производството на всеки 10 Mt водород ще изисква около 100 GW капацитет на електролизатори. Комисията изчислява, че са необходими около 500 TWh електроенергия от възобновяеми източници, за да се изпълни амбицията за 2030 г. в REPowerEU. Когато се произвежда във времена, в които ресурсите на слънчева и вятърна енергия са изобилни, възобновяемият водород може също да подпомогне електроенергийния сектор на ЕС, осигурявайки дългосрочно и широкомащабно съхранение. Това означава, че възобновяемият водород може да спомогне за подобряване на гъвкавостта на електроенергийните системи чрез балансиране на търсенето и предлагането, когато се генерира твърде много или недостатъчно енергия.

Министерството на иновациите и растежа (МИР) на България разработи Водородната пътна карта, която е получила одобрението от Европейската комисия. Тази политика ще отключи изцяло нова ниша и ще отвори възможности за инвестиции в нова индустрия - водородните технологии. Такъв е получилият популярност в последната година проект „Захир“ за изграждане на водородна долина в района на гр. Стара Загора. В него ключова роля играе „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД, която има ангажимент да построи на своята територия следните инсталации:

- Фотоволтаична инсталация с мощност 20 MWp, която да обезпечи с електроенергия 5 модула за производство на водород, от които 3 са разположени на територията на дружеството, а останалите два модула в гр. Стара Загора
- Система за производство на чист водород с електрическа мощност 3 MW, разпределена в три модула по 1 MW. Всеки електролизатор (алкален тип) е с производителност 200 Nm³/h (17,8 kg/h) и консумация на електроенергия 3,6-5,0 kWh/Nm³ (56kWh/kg). Разходът на омекотена вода е 180 l/h. Система е компактна и се предвижда да се изгради извън съществуващия сграден фонд. Също така се предвижда система за компресиране на произведения водород и неговото съхранение в трейлъри (400

бутилки по 50 литра) с работно налягане 200 bar и общ капацитет 20 000 литра.

- Газова турбина с електрическа мощност 16,5 MW, която ще се използва за изгаряне на смес от природен газ и водород в различни съотношения, в зависимост от наличното количество водород, като се очаква, количеството на водород в сместа да не надвишава 10%.

- Водородна зарядна станция (HRS) с капацитет от 30 kg/day за нуждите на транспорта в дружеството.

- Осигуряване на технологичните нужди от водород за работата на съществуващите генераторни групи, заменяйки старата електролизаторна система в централата.

Фотоволтаичните централи произвеждат електрическа енергия, която се използва от електролизатори, които от своя страна произвеждат зелен водород. Произведеното количество водород се използва от зарядната станция или се подава към газопреносната мрежа на ТЕЦ за изгаряне в газовата турбина. От друга страна, газовата турбина е предвидено да работи в комбиниран цикъл с Блок №8, като за целта изгорелите газове от турбината постъпват заедно с горещия въздух за горене в пещна камера на котела и по този начин да се оползотворява тяхната топлина.

Съществува възможност за възникване на следния казус:

Фотоволтаичната инсталация ще произвежда ток всеки ден, следователно електролизаторната инсталация ще произвежда зелен водород. Ако блок № 8 заедно с газовата турбина не работят (планов ремонт, авария и т.н.) и трейлърите за H₂ са запълнени, то разхода за технологични нужди и през зарядната станция няма да бъде достатъчен за да се изконсумира новопроизведения водород. Това ще доведе до спиране на електролизаторите.

За да се избегне този казус със спирането на инсталацията, в настоящия доклад е разгледана възможността за изгаряне на излишният водород в котлите през газовите горелки, като се блендира с природен газ, както в периодите на пуск, така и в периодите на нормална експлоатация.

Когато водородът се добавя към природния газ, ключово е да се гарантира, че концентрацията на водород не превишава допустимите нива, които биха могли да повлияят негативно на металните тръби в следствие на т.н. „водородна крехкост“. Изразява се в намаляване на пластичността на метала поради

абсорбиран водород . Водородните атоми са малки и могат да проникват в твърди метали. Веднъж абсорбиран, водородът намалява напрежението, необходимо за възникване и разпространение на пукнатини в метала, което води до крехкост. Когато става въпрос за стомани, с увеличаването на якостта, издръжливостта на счупване намалява, така че вероятността водородната крехкост да доведе до счупване се увеличава. [8] [9] [10]

Поради актуалността на проблема с материалите на тръбопроводите за пренос на водород са проведени редица проучвания, финансирани от МЕ на САЩ. Изследвани са много видове стомани, от които са изградени техните газопроводи и се стига до заключението, че стомани Х42 и Х52 са подходящи за пренос на водород. Газопровода в ТЕЦ „Марица Изток 2“ е изграден от Х42m (модификация на Х42), и е подходящ за блендиране на водород към природния газ. [11] [12] [13]

ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Изследвано е изгарянето на метан-въздух без предварително смесване в газовите горелки на големи енергийни правотокови котли тип ПК-38-4, инсталирани в „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД. След това метанът е смесен с водород в различни обемни съотношения, като е запазен максималния разход на гориво за всяка горелка. Газовата горелка е с топлинна мощност 16,75 MWth и номинален разход на природен газ от 1800 Nm³/h. Използван е Ansys CFX - софтуерен инструмент за изчислителна динамика на флуидите (Computational fluid dynamics - CFD), който предоставя надеждни и точни решения, бързо и стабилно в широка гама от CFD и мултифизични приложения.

Производството на възобновяем водород на територията на дружеството по проект би се осъществило от три модула електролизьори с електрическа мощност от по 1 MW и около 200 Nm³/h водород за всеки от тях. При максимално производство от трите модула ще трябва да се блендира около 600 Nm³/h водород към газопреносната мрежа. От друга страна, газовите горелки се използват само при пускови операции на котлите, което силно би ограничило използването на водород. Възможно е производения водород да се изгаря не само по време на пускови операции, но и по време на нормалната експлоатация на котлите, когато може да се стартират една или няколко газови горелки и да се намали разхода на въглища през праховите горелки. Също така е

възможно изгарянето на водород едновременно в няколко котли или само в един. Като цяло вариантите са много, но е достатъчно да бъде изследвана една газова горелка при различно съотношение на природен газ и водород. За оптимизиране на моделите, природния газ е заменен с метан, който има сходни характеристики. Проведени са много подобни изследвания на изгарянето на смес от метан и водород [14]. Това ще даде възможност за съпоставяне на получените резултати.

Обогатяването с водород на метан е изследвано по такъв начин, че в един от случаите да бъде използвано цялото количество водород само в една газова горелка. Коефициента на излишък на въздух е $\alpha=1,2$ за всички разгледани случаи. Разгледани са четири случаи, които са показани в табл.1.

Таблица.1

	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4
	100% CH ₄ , 0% H ₂	88.9% CH ₄ , 11.1% H ₂	77.8% CH ₄ , 22.2% H ₂	66.7% CH ₄ , 33.3% H ₂
Водород, Nm ³ /h	0	200	400	600
Метан, Nm ³ /h	1800	1600	1400	1200

Водородът има значително по-различни характеристики от тези на метана. Той има много по-лека молекула и по-ниска стойност (около пет пъти) на топлината на изгаряне за единица обем. Поради това ще е необходим много повече водород, отколкото природен газ при запазване на топлинната мощност на газовата горелка. В случаите, разгледани в табл.1., се придържаме към запазване на максималния разход на горелката, което ще доведе до намаляване на топлинната и мощност с увеличаване на блендираното количество водород.

Както за числените симулации, така и за експериментални изследвания са необходими изчисления на входните данни. За да се определят основните параметри на горенето се използват формули и изчисления, базирани на теорията. Тези изчисления и получените предварителни резултати могат да се използват за определяне на входните и изходните параметри в числените симулации и за установяване на режимите на работа, потоците гориво – въздух и т.н. По-долу е направено изчисление на

количеството на излишен въздух и калоричността на изгаряната смес от метан и водород.[15]

Стехиометричния процес на горене на въглеводороди с въздух като окислител е:



Въпреки че въздухът съдържа и други съединения в малки количества, освен кислород (20,95%) и азот (78,08%), в посоченото уравнение се счита, че е съставен само от кислород (21%) и азот (79%). Така моларното съотношение между двете съединения се счита за 3,76 в горната зависимост. Следователно за изгарянето на всеки мол гориво са необходими $(n+m/4)(1+3,76)$ мола въздух, което води до $4,76(n+m/4)+m/4$ мола продукти на реакцията.

Следващата реакция е за стехиометричното изгаряне на метан:

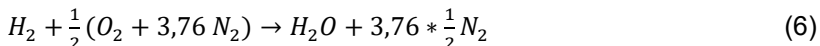


Моларната маса на метана е 16,043 g/mol, от където може да определим стехиометричното съотношението на горивото и въздуха:

$$\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f (CH_4)}\right) = \frac{2 * \left(32 + \frac{79}{21} * 28\right)}{16,043} = 17,16 = L_{0 CH_4} \quad [kg_{air} / kg_{CH_4}] \quad (4)$$

За изгарянето на 1 kg CH_4 са необходими 17,16 kg въздух и се отбелязва с $L_{min CH_4}$ или $L_{0 CH_4}$.

Следващата реакция е за стехиометричното изгаряне на водород:



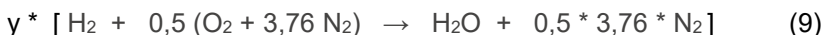
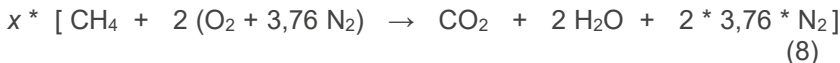
Моларната маса на водорода е 2,016 g/mol, от където може да определим стехиометричното съотношение на гориво/въздух:

$$\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f(CH_4)}\right) = \frac{0,5 \cdot (32 + \frac{79}{21} \cdot 28)}{2,016} = 34,32 = L_{O_{H_2}} [kg_{air}/kg_{H_2}] \quad (7)$$

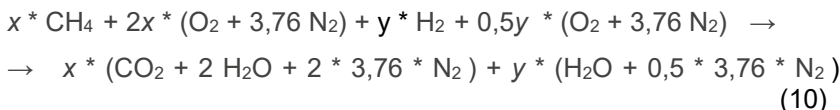
За изгарянето на 1 kg H₂ са необходими 34,32 kg въздух и се отбелязва с $L_{min_{H_2}}$ или $L_{O_{H_2}}$.

Класическият стехиометричен метод (1) е използван за описване на уравнение (3) за метан и уравнение (6) за водород.

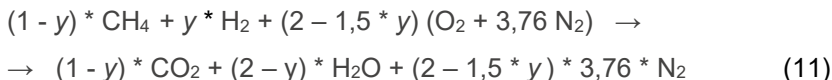
След това тези стехиометрични уравнения се умножават по моларните фракции на горивната смес. За тази статия са приети следните обозначения и правила: моларната фракция (или обемният процент чрез умножаване по 100) за CH₄ се отбелязва с x , а за H₂ се отбелязва с y . Условието е $x + y = 1$. При тези условия:



Чрез смесване на уравнения (8) и (9) се получава едно стехиометрично уравнение за изгаряне на смес от CH₄ – H₂:



Като заместим $x = 1 - y$ се получава:



От уравнение (11), в зависимост от моларното (обемното) съотношение, стехиометричното количество въздух за сместа е означена с L_s [$Kmol_{air} / Kmol_{fuel}$] ($[m_{N_{air}}^3 / m_{N_{fuel}}^3]$):

$$L_s = \frac{(2-1,5y)(1+3,76)}{(1-y)+y} = (2 - 1,5 * y) * 4,76 [m_{N_{air}}^3 / m_{N_{fuel}}^3] \quad (12)$$

Минималното количество теоретичен въздух [kg_{air}/kg_{fuel}] :

$$L_0 = L_S * \frac{M_{air}}{M_{fuel}} = \frac{M_{air} * (2 - 1,5 * y) * 4,76}{M_{fuel}} \quad [\text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}] \quad (13)$$

Където:

$M_{air} = 28,84$ [kg/kmol] е моларната маса на въздуха;

$M_{fuel} = (1 - y) * 16 + 2y$ [kg/kmol] е моларната маса на горивната смес.

Като резултат се получава:

$$L_0 = \frac{8,5799 * (2 - 1,5 * y)}{1 - 0,875 * y} \quad [\text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}] \quad (14)$$

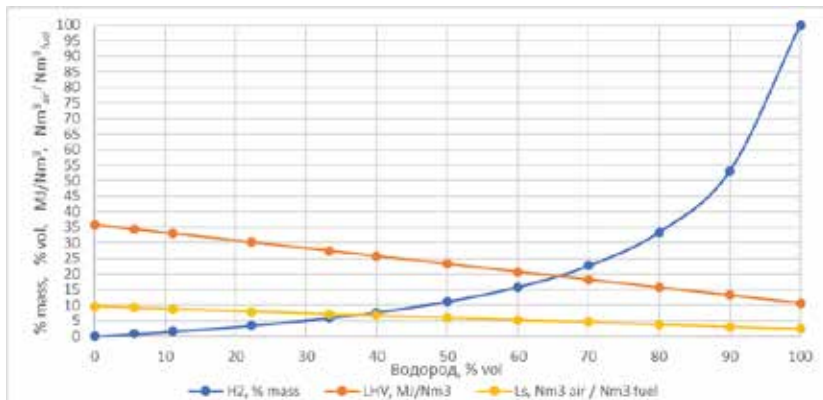
В следващата табл.2. са показани тези параметри при различно съотношение на метан и водород в горивната смес. Разгледани са седем случая, като първите четири случая са посочените в табл.1., а останалите са през 10% до достигане на 100% водород.

Таблица.2

	H ₂ (y), % vol	H ₂ , % mass	M _{fuel}	L ₀ , [kg/kg]	L _S , Nm ³ air / Nm ³ fuel	LHV, MJ/Nm ³	
Случай 1	0	0.00	16.043	17.11	9.52	35.80	
Случай 2	11.1	1.54	14.486	17.38	8.73	33.01	
Случай 3	22.2	3.46	12.929	17.70	7.93	30.23	
Случай 4	33.3	5.90	11.372	18.11	7.14	27.44	
Случай 5	60	15.86	7.627	19.80	5.24	20.74	
Случай 6	80	33.45	4.821	22.78	3.81	15.72	
Случай 7	100	100.00	2.016	34.05	2.38	10.70	

С получените резултати от табл.2. и е изградена диаграма с основните показатели на газовата смес CH₄ - H₂ (масов дял, калоричност и стехиометрично количество въздух за горене) при

промяна на обемното съдържание на H_2 , показана на следващата фиг.1.



Фиг.1. Показатели на газовата смес $CH_4 - H_2$ (масов дял, калоричност и стехиометрично количество въздух за горене) при промяна на обемното съдържание на H_2

При блендирането на водород в обемни проценти се наблюдава много малка промяна в масовата част на водорода в първите случаи и при 30% vol масовата част на водорода е 5,9% mass. Също така, с увеличаване на обемното съдържание на водород, намаляват общата топлина на изгаряне на газовата смес и необходимото стехиометрично количество въздух, което ще рефлектира върху топлинната мощност на горелката, обема на димните газове, температурата на факела и т.н.

Поради ограниченото максимално производство на електролизаторите от 600 Nm³/h е невъзможно горелката да работи с по-високо съдържание на водород в газовата смес от 33,3% vol. Трябва да се отбележи, че има възможност газовата горелка да работи и при намалена мощност, при която може да се постигнат и по-високи концентрации на водород в сместа, но като се има в предвид, че концентрации над 20% са значително по-опасни от гледна точка на възникване на водородна крехкост в метала, то затова няма да бъдат разглеждани.

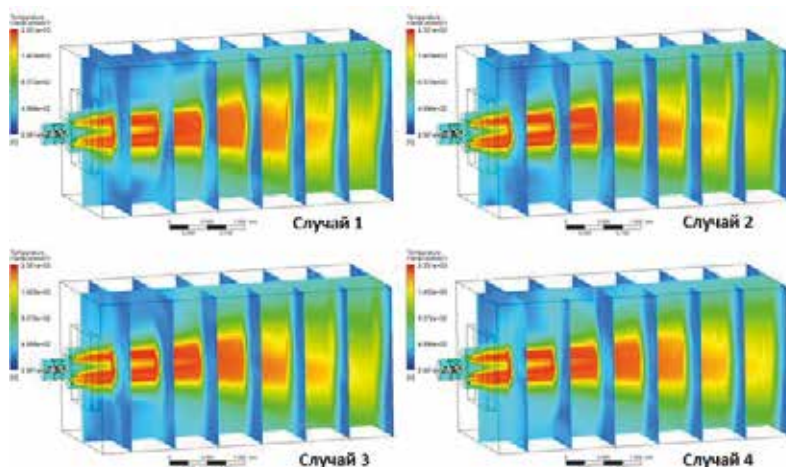
РЕЗУЛТАТИ ОТ ЦИФРОВИТЕ МОДЕЛИ

Инсталацията за производство на водород е предвидено да бъде от три самостоятелни електролизьора, всеки от които с производителност 200 Nm³/h водород. Поради тази причина, е проведено моделно изследване на първите четири случая, посочени в Табл. 2:

- **Случай 1** – изгаряне на метан;
- **Случай 2** – комбинирано изгаряне на CH₄ и H₂ при работа на един електролизьор;
- **Случай 3** – комбинирано изгаряне на CH₄ и H₂ при работа на два електролизьора;
- **Случай 4** – комбинирано изгаряне на CH₄ и H₂ при работа на три електролизьора;

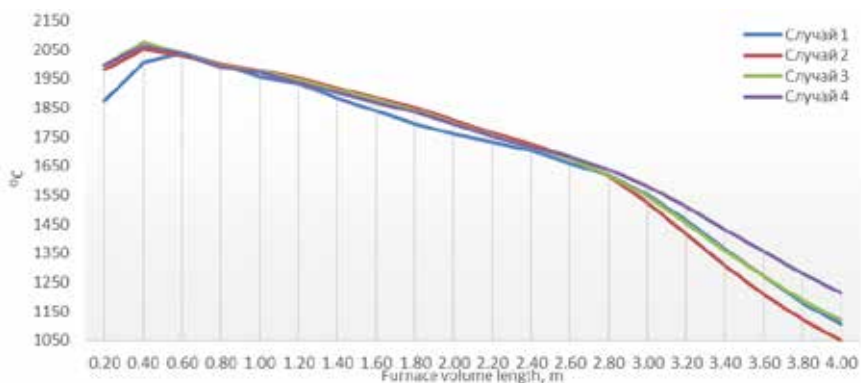
Изследването е извършено при еднакви условия за четирите случая, с изключение на разхода на метан, водород и въздух за горене. За целта на настоящата числена симулация, не е необходимо да се разглежда цялата пещна камера заедно с газовата горелка, а само част от нея, достатъчна да онагледя процеса на горене по дължина на факела. Така се оптимизира модела за по-бързо и лесно пресмятане. Разглежда се една газова горелка и част от пещен обем с размери 4x2x2 м.

Като резултати от численото решение на моделите се получава голям обем от данни за всеки един параметър в всяка една клетка от разглежданият дискретизиран обем. Те могат да бъдат представени в графичен или табличен вид. За целите на настоящото изследване е избрано графично представяне на част от получените резултати. На следващата фиг.2. са показани температурните полета на факела след газовата горелка за четирите случая. За целта са използвани седем напречно разположени на факела равнини и една по неговата дължина.



Фиг.2. Температурно поле на факела на газовата горелка

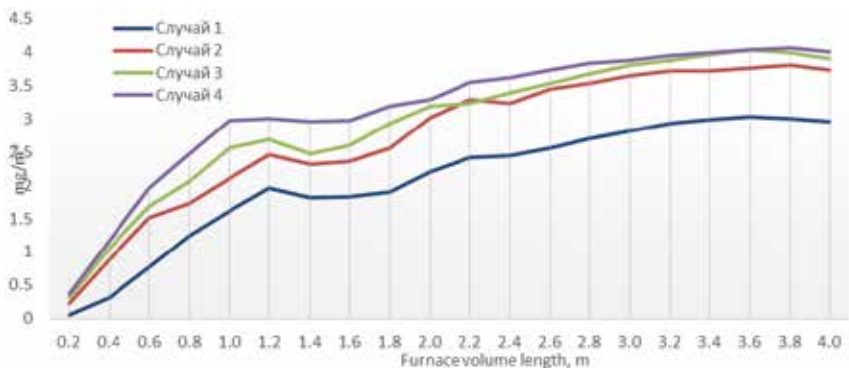
За да се анализира изменението на температурата (максимална и следна), неизгорелият въглероден оксид (CO) и генерираните емисии от азотни оксиди (NOx) в разглеждания обем от пещната камера, са свалени числените стойности на тези характеристики в 20 напречни на факела сечения (през 0,2 m от амбразура на горелката) и са построени съответните диаграми. На Фиг. 3 е представено изменението на максималните температури по протежение на факела.



Фиг. 3. Максимална температура по дължина на факела на газовата горелка

Максимални температури при изгаряне на метан се получават на около 0,6 m от абразура на горелката и достигат 2038°C. Водородът в горивния процес повишава максималните температури до 2075°C и при това на 0,4 m от горелката. Подобна е ситуацията и в края на разглеждания пещен обем, където температурата при Случай 4 достига 1214°C и с около 108°C по-висока от тази при Случай 1.

Добавянето на водород в газовата смес повишава максималните температури във факела на газовата горелка, което от своя страна благоприятства за по-интензивното образуване на термични азотни окиси, за които също е синтезирана диаграма (Фиг.4).

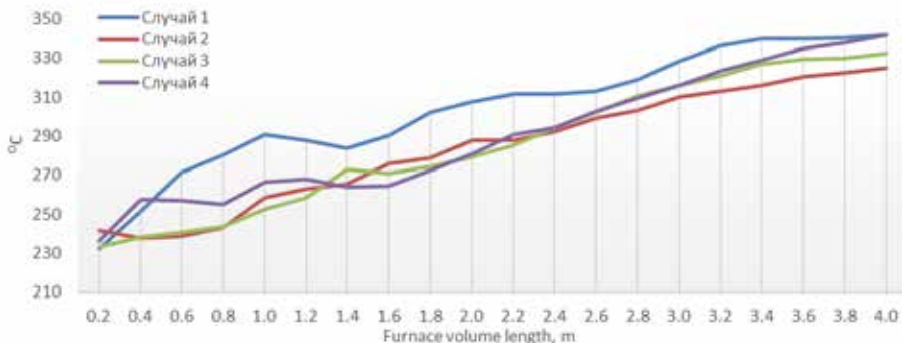


Фиг. 4. Масова концентрация на NO по дължина на факела

Графиката на Фиг. 4. напълно кореспондира с данните за максималните температури от Фиг. 3. В началото на факела (от 0,2 m до 1,0-1,2 m), където са и най-високите температури, има и най-интензивно генериране на азотен оксид. Следва зона (от 1,0-1,2 m до 1,6 m), в която се наблюдава забавяне на генерацията и дори спад на концентрацията на азотни оксиди, дължаща се на изчерпване на кислорода постъпващ с първичния въздух и поради наличието на неизгоряло гориво се активизира реакцията за разпад на вече генерираните NO. В останалата зона, почти до края на разглеждания обем се вижда плавно повишаване на тези

емисии, дължащо се на кислорода от вторичния въздух. Генерираните азотни оксиди са повече при трите модела със смесено изгаряне на метан и водород. Концентрацията им нараства с 35% при Случай 4 спрямо Случай 1.

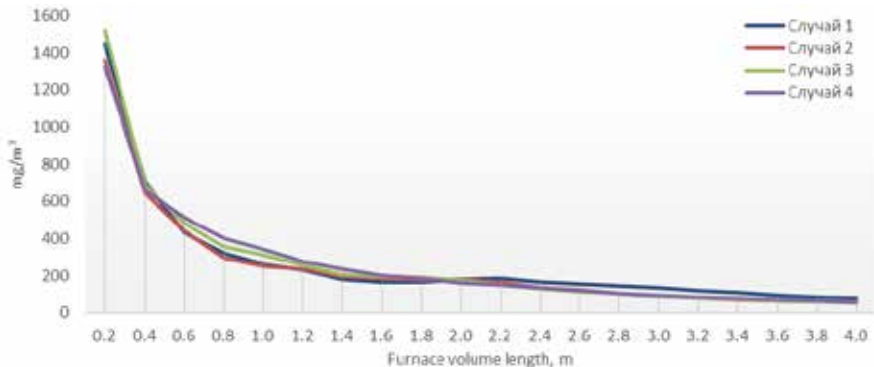
При разглеждане на средните температури по дължина на факела се наблюдават по-високи стойности при изгарянето на метан. За всички случаи със смесено изгаряне на метан и водород, стойностите са по-ниски, видимо от следващата фиг.5.



Фиг. 5. Средна температура на полето за всяка равнина по дължина на факела

Като главна причина за това може да се посочи по-ниската calorificност LHV на газовата смес от метан и водород за сметка на чистия метан. Така общото количество отделена топлина в пещния обем е по-малко и води до по-ниски средни температури. Това състояние ще се отрази и в икономическия модел за смесеното изгаряне на метан и водород във въглищните котли.

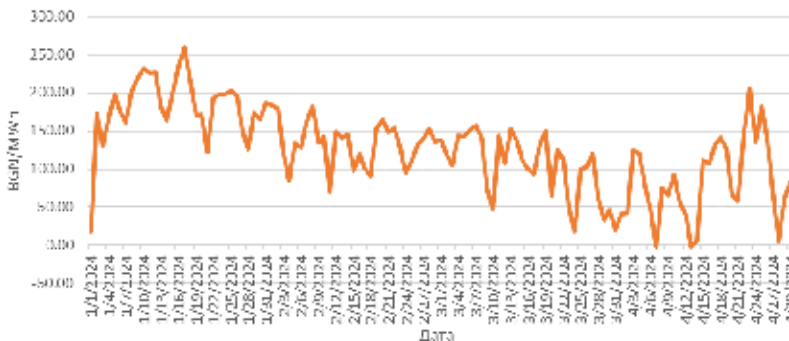
Не на последно място е и въглеродния окис. На Фигура 6 се вижда намаляване на неговата концентрация при добавянето на водород към метана. На изхода от разглеждания пещен обем, концентрацията на CO за Случай 4 е с 29% по-ниска от Случай 1.



Фиг. 6. Масова концентрация на CO по дължина на факела

ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА

Комбинираното изгаряне на въглища, природен газ и водород в котлите на „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД не е свързано с промяна на съществуващи и изграждане на нови съоръжения, тръбопроводи и т.н., което не води до допълнителни инвестиционни разходи. Освен екологичния ефект, който се постига, от съществено значение е и икономическия, като такъв ефект в случая би бил намалението на крайната цена на електрическата енергия. За изчисляването ѝ са необходими цените на трите вида горива. Особено внимание трябва да се обърне при определянето на цената за водорода, поради постоянно променящата се в големи граници цена на електроенергията през деня в едногодишен период. Тъй като ще бъде изградена собствена ФЕЦ, цената на ел. енергия ще е съставена основно от цената на инвестицията. В случая е заложен период за възвръщаемост на инвестицията в срок от 15г. Също така са свалени почасови данни за цената на електроенергията на електроенергийната борса (БНЕБ) [16] за първите 4 месеца на 2024г. и са осреднени тези данни в периода, в който работи ФЕЦ - от 07:00 до 18:00ч. (Фиг.2).



Фиг. 2. Цена на електроенергията в сегмент „Ден напред“ на БНЕБ за периода януари-април 2024г.

Както се вижда от графиката, цената се движи в намаляващ тренд със значително по-ниски цени през почивните дни. Средната цена за периода 01.01. – 30.04.2024г. е 126,16 BGN/MWh. Тенденцията е запазване на намаляващия тренд и през летните месеци, когато производството на електроенергия от ФЕЦ достига своя максимум.

Крайна цена на произведената от ФЕЦ електроенергия е средната цена на БНЕБ за разглеждания период, но не по-ниска от цената за MWh от инвестицията за изграждане и въвеждане в експлоатация ФЕЦ с период на възвръщаемост от 15 години, при средно електропроизводство за площадката на дружеството от 1 316,68 kWh/kWp. Данните са показани в Табл.3.

Таблица.3

Мощност на ФЕЦ MWp	Производство на ел.ен. MWh/year	Инвестиция BGN	Цена на ел.ен. от БНЕБ BGN/MWh	Цена от инвестиция за 15г. BGN/MWh	Крайна цена BGN/MWh
20	26 334	27000 000	126,16	68,35	126,16

За определяне на цената на водорода се използва крайната цена на електроенергия от ФЕЦ (табл.3.) от 126,16 BGN/MWh, цена на електролит 8,82 BGN/m³ от дружеството. Електролизаторната инсталация за **зелен водород** ще работи средно 8 часа на ден и 355 дни в годината (10 дни ремонт/профилактика). Данните от извършените изчисления са показани в Табл.4.

Таблица.4

Електролизатори – 3 броя по 1 MW							
Мощност	Производство		Разход ел.ен.	Разход електролит		Инвестиция	
MW	Nm ³ /h	kg/h	kWh/Nm ³	l/h		BGN	
3	600	53,4	5	540		8220 000	
Цена на произведения водород							
от Ел.ен.		от Електролит		от Инвестиция за 15г.		Крайна цена	
BGN/Nm ³	BGN/kg	BGN/Nm ³	BGN/kg	BGN/Nm ³	BGN/kg	BGN/Nm ³	BGN/kg
0,63	7,09	0,00794	0,089	0,32	3,61	0,96	10,79

Крайна цена на произвеждания водород на територията на „ТЕЦ Марица Изток 2“ е 10,79 BGN/kg или 0,96 BGN/Nm³. Цената за месец март 2024г.на лигнитните въглища е 20,81 BGN/t на работна маса с топлина на изгаряне , на природния газ е 78 BGN/MWh, на варовика е 37 BGN/t и на въглеродните емисиите е 116 BGN/tCO₂. Направени са изчисления, свързани с изгарянето на трите вида горива в различни съотношения на смесване, като резултатите са показани в следващата таблица (Табл.5). Случай 0 е за изгаряне само на въглища, Случай 1 е за смесено изгаряне на въглища и природен газ, а останалите случаи са за смесено изгаряне на трите горива.

Таблица.5

	Електр. мощност, MW	Разход на въглища, природен газ и варовик при номинален товар на блок					Цена BGN/MWh
		Въглища	Природен газ	Варовик	Водород	Общо CO ₂	
		t/h	Nm ³ /h	t/h	Nm ³ /h	t/h	
Случай 0	177,3	251,167	0	16,58	0	200,45	164,22
Случай 1	177,3	242,440	1 800	16,00	0	197,03	169,26
Случай 2	177,3	243,098	1 600	16,04	200	197,16	169,58
Случай 3	177,3	243,756	1 400	16,09	400	197,29	169,90
Случай 4	177,3	244,414	1 200	16,13	600	197,42	170,22

При добавянето на природен газ в горивния процес (Случай 1) се постига понижаване на количеството въглероден диоксид, както и количеството на използвания варовик в СОИ. От друга страна, намаляването на въглищата е свързано и с намаляване на количеството серни оксиди, което обуславя работата на СОИ с по-висока ефективност. Добавянето на водород за сметка на природен газ води до намаляване на топлината, която се освобождава при изгарянето на газовата смес в газовата горелка

(Фиг.1. и Фиг.5). За да се запази топлинната мощност на блока се добавят въглища към горивния процес, а това води до увеличаване на въглеродния диоксид и серните оксиди. Така, получената цена на електроенергията при различните съотношения на трите вида използвани горива бележи тенденция за увеличаване с добавянето на иначе по-екологичните горива - природен газ и водород. Най-ниска остава цената при използването само на гориво въглища. Ако разгледаме цената ел. енергията като функция само на инвестицията 68,35 BGN/MWh, то тогава цената на водорода ще бъде 7,54 BGN/kg. Крайната цена на произведената електроенергия в Случай 4 ще се понижи до 169,24 BGN/MWh.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направеното проучване показва, че газопроводите в ТЕЦ Марица Изток 2^а са подходящи за блендиране на малки количества водород. Във връзка с получените резултати от CFD моделите, могат да се направят следните изводи:

- добавянето на водород променя структурата на пламъка и подобрява неговата стабилност;
- максималните стойности на температурата на изгорелите газове се увеличават с 37°C в ядрото на факела и с около 108°C на изхода от печния обем;
- добавянето на водород намалява концентрациите на CO₂
- по-високите температури водят до генериране на повече емисии от NOx в сравнение с изгаряне на чист метан. Увеличението е с 35% повече азотни емисии при Случай 4, в сравнение със Случай 1.

От друга страна, данните в Табл.5. показват, че разхода на въглища се намалява с 3,6% при работа на газовата горелка с метан и с 2,76% при работа на газовата горелка със смес от газ и водород в Случай 4. Подобна е ситуацията и с емисиите CO₂, които намаляват с 1,74% в Случай 1 и с 1,54% в Случай 4. Блендирането на 600Nm³/h водород към газовата горелка води до увеличаване на разхода на въглища и въглеродни емисии спрямо Случай 1 съответно с 0,82 % и 0.2 %.

При цени на горивата, варовик и въглеродни квоти за месец март 2024г., най-ниска остава цената на електроенергията при използването само на гориво въглища в Случай 0, а добавянето на водород към газовата смес води до нейното повишаване.

ЛИТЕРАТУРА

- [7] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_bg
- [8] <https://www.consilium.europa.eu/bg/policies/green-deal/>
- [9] <https://www.consilium.europa.eu/bg/infographics/repowereu/>
- [10] https://www.mig.government.bg/wp-content/uploads/2022/07/bg_finalrrp_2022_04_06_08_30_tca_.pdf
- [11] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
- [12] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/hydrogen-delegated-acts_en
- [13] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
- [14] Lynch, S. P. (2011-01-01), Raja, V. S.; Shoji, Tetsuo (eds.), "2 - Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms", Stress Corrosion Cracking, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Woodhead Publishing, pp. 90–130, ISBN 978-1-84569-673-3, retrieved 2022-06-10
- [15] Jonathan A. Lee, National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, Huntsville Alabama, „Hydrogen Embrittlement“ April 2016, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160005654/downloads/20160005654.pdf>
- [16] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8194130/>
- [17] B.P. Somerday, K.A. Nibur, C. San Marchi, and M. Yip, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, „Mechanical Properties of Structural Steels in Hydrogen“, DOE Hydrogen Pipeline Working Group Meeting Aiken, SC September 25-26, 2007
- [18] Thanh Tuan Nguyen, Jong Seo Park, Seung Hoon Nahm, Un Bong Baek, „Evaluation of hydrogen related degradation of API X42 pipeline under hydrogen/natural gas mixture conditions using small punch test“, Center for Energy Materials Measurement, Division of Industrial Metrology, Korea
- [19] B.P. Somerday, Sandia National Laboratories, Livermore CA, „Technical Reference on Hydrogen Compatibility of Materials“
- [20] Mustafa Kemalettin Büyükakın, Semiha Öztuna, „Numerical investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and non-premixed burner system from flame structure and pollutants aspect“, International Journal of Hydrogen Energy Volume 45, Issue 60, 9 December 2020, Pages 35246-35256

- [21] Razvan Carlanescu, Marius Enache, Raluca Maier, Andreea Alcea, Raluca Condruz, Cristian Stoica and Madalina Ghilvacs, „Calculation of the main parameters involved in the combustion process of CH₄-H₂ mixtures at different proportions“, Romanian Research and Development Institute for Gas Turbines COMOTI, 220 D Iuliu Maniu Bd.,sector 6, Bucharest, Romania
[22] <https://ibex.bg/dam-history.php>

АВТОРИ

д-р. инж. Никола Емилов Байкалов, „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД,
Производствено-технически отдел, Ръководител Звено Режими, е-
mail: nikola.baykalov@gmail.com

д-р. инж. Васил Емилов Раденков, Тракийски Университет – Стара
Загора, катедра Енергетика, vasil.radenkov@trakia-uni.bg