

**РЕЗЮМЕТА НА ТРУДОВЕТЕ  
И ПРИНОСИТЕ В ПУБЛИКАЦИИ НА  
Д-Р ДОБРИН ДИМИТРОВ ТОПОРОВ**

**представени на конкурса за заемане на академична**

**длъжност „доцент“**

**по научна специалност**

**„Промислена топлотехника“**

**професионално направление**

**”5.4 Енергетика“**

**(обявен в ДВ бр. No 101/09.12.2014 г.)**

В конкурса участвам с 32 публикации. От тях 1 книга – монография (пореден номер 1 от Списъка с публикации, с които участвам в конкурса); 1 Автореферат на защитена дисертация (пореден номер 2 от Списъка с публикации, с които участвам в конкурса); 10 са статии в международни научни списания (това са публикации с поредни номера 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 12 от Списъка с публикации, с които участвам в конкурса); 10 са статии в сборници от международни научни форуми (това са публикации с поредни номера 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 и 22 от Списъка с публикации, с които участвам в конкурса); 10 патента (това са публикации с поредни номера 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 и 32 от Списъка с публикации, с които участвам в конкурса).

Ще представя работите си в четири тематични групи.

## **I. ЧИСЛЕНО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КИСЛОРОДНО ГОРЕНЕ НА ГАЗООБРАЗНИ И ТВЪРДИ ГОРИВА**

1. Dobrin Toporov (2014), **Combustion of Pulverised Coal in a Mixture of Oxygen and Recycled Flue Gases**, A volume in the Elsevier Insight Series, May 2014, Elsevier Ltd, London, United Kingdom, ISBN: 978-0080999982.

Това е индивидуална монография, издадена във Великобритания.

Тази книга представя едно фундаментално изследване на процеса на изгаряне на въглищен прах в смес от кислород и рециркулирани димни газове (РДГ).

Книгата започва с въвеждане (Глава 1) на читателя в сферата на промишленото използване на въглища и свързаните с това икономични, социални и екологични въпроси. Представен е нов метод за изгаряне, а именно кислородното горене (наречена *oxyfuel* или *oxycoal*). Това е един нов горивен процес, който е разработен с цел намаляване на емисиите от въглероден двуокис при изгаряне на изкопаеми горива. Изгарянето на горива в смес от РДГ и кислород, обаче, представя нови предизвикателства пред инженерите. Експериментални изследвания на кислородно изгаряне на въглищен прах в конвенционални горелки (конструирани за горене във въздух) показват, че температура на пламъка и неговата стабилност са силно променени. Това води до нестабилност на пламъка и непълно изгаряне на горивото. Отчитайки, че въглеродния двуокис (основната съставна част на РДГ) има различни термодинамични и оптични свойства в сравнение с въздуха, основната цел на тази работа е да се изследват ефектите на конкретните свойства на CO<sub>2</sub> върху химичните реакции и върху преноса на топлина при кислородното горене. Следващият етап на това изследване има за цел да дефинира основните принципи за контрол на процеса на горене на въглищен прах в CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> атмосфера, проправяйки по този начин пътя за неговото внедряване.

Първо, в Глава 2, са представени най-съвременните промишлени технологии за използването на въглища. Направен е подробен преглед на постиженията в областта на чистите въглищни технологии отчитайки най-съвременните разработки за ефективно и екологично използване на въглищата. Накрая, технологията на кислородно горене е представена и са изброени основните предизвикателства стоящи пред внедряването на тази технология в промишлеността.

Книгата е разделена на две основни части:

Част I (Глави 3 и 4) разглежда теоретичните аспекти на процеса на горене на прахообразни горива в смес от РДГ и кислород. Глава 3 подчертава основните механизми за изгаряне на въглищни частици, като се обръща специално внимание на горене в атмосфера с високо съдържание на  $\text{CO}_2$  и водна пара. Основните разлики при изгаряне на прахообразни горива във въздушна и в РДГ/ $\text{O}_2$  атмосфери са идентифицирани, и тяхното влияние върху характеристиките на пламъка и върху дизайна на праховите горелки са разгледани в Част II на книгата. Математическо моделиране на двуфазно горене като общо понятие и спецификата в моделирането на кислородно горене, в частност, са разгледани в Глава 4. Представен е разработен в рамките на това изследване математичен модел, базиран на методите на изчислителната хидродинамика (CFD), включващ под-модели за хомогенно и хетерогенно горене, които са адаптирани към спецификите на кислородно горене. Обсъдени са основните предимства и недостатъци на съществуващите математически модели, като модели за турбулентно течение, модели на турбулентно горене с отчитане на кинетиката на химическите реакции, модели за отделяне на летливите компоненти (пиролиза) и модели за хетерогенно изгаряне на коксовите частици, както и модели за излъчвателната способност на димните газове. Направени са препоръки за използването на гореспоменатите модели при моделиране на кислородно горене. Извършено е валидиране и оценка на възможностите на най-съвременните модели за горене на въглищна частица като са обхванати различни атмосфери на горене и различни условия на експеримента.

Част II (Глави 5 и 6) обобщава основните резултати, получени по време на научното изследване на кислородно изгаряне на въглищен прах, включващо както теоретични така и лабораторни и пилотни експерименти, които бяха проведени в Института по Топло- и масообмен в Университета в гр. Аахен (RWTH Aachen), Германия.

Глава 5 представя експериментални и числени изследвания на горене на газообразни горива в  $\text{N}_2/\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  атмосфери, извършени в реактор с мощност 25 kW. Тук ефектите на  $\text{CO}_2$  върху скоростта на окисляване на метан и въглероден окис са подробно изследвани и анализирани. Глава 6 представя разработването, проектирането и тестването на вихрова горелка за кислородно горене на въглищен прах. Подробни данни за пламъчните характеристики, получени експериментално при различни експлоатационни условия в пилотната инсталация (100 kW), са представени с цел валидиране на числените модели. Анализирано е влиянието на състава на РДГ, на коефициента на рециркулация (съдържание на  $\text{O}_2$  в горивната смес), и на настройките на горелката върху стабилността на пламъка и степента на изгаряне на горивото. По този начин основните принципи на проектиране и експлоатация на горелки от промишлен мащаб, които са в състояние да работят и в двата режима, а именно въздушно и кислородно горене са формулирани.

Накрая, Глава 7 разглежда подробно емисиите от азотни окиси в кислородно изгаряне на въглища и представя оценка на влиянието на различни експлоатационни параметри върху образуването на  $\text{NO}_x$  в реални условия.

Книгата завършва с резюме на основните резултати (Глава 8) и с вижданията на автора за необходимостта от по-нататъшни изследвания в областта на кислородното горене преди внедряването на тази технология в индустрията.

3. Ikeda M., **D. Toporov**, D. Christ, H. Stadler, M. Förster and R. Kneer (2012): **Trends in NO<sub>x</sub> Emissions during PF Oxyfuel Combustion**, *Energy Fuels*, 26(6), pp.3141-3149
- статия с импакт фактор 2.853

Представени са тенденциите в емисиите на NO<sub>x</sub> в процеса на кислородно изгаряне на прахово гориво в пилотната инсталация (100 kW) при RWTH Aachen University. В това съоръжение, три режима на прахово изгаряне на въглища са изследвани, а именно, (1) изгаряне във въздух (въздушен режим), (2) изгаряне в смес от кислород и въглероден двуокис (O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>) чрез вариране на концентрацията на O<sub>2</sub> в сместа O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>, и (3) изгаряне в смес от кислород и рециркулирани димни газове (O<sub>2</sub> / РДГ). Установено е, че емисиите на NO<sub>x</sub> в режим O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> са с около 20 % по-ниски от тези във въздушен режим. Това е резултат от по-високите температури получени в близост до горелката в режим на въздушно горене, което води до образуване на големи количества термични-NO<sub>x</sub>. От друга страна, емисиите на NO<sub>x</sub> в режим на O<sub>2</sub> / РДГ са значително намалени до около 50%. Това се дължи на факта, че NO<sub>x</sub> съдържащи се в РДГ се рециркулират обратно към пламъка, и по този начин, се декомпозират в атмосфера бедна на кислород и богата на летливи вещества отделени в следствие на пиролизата на въглищните частици.

Изследването разглежда също така ефекта на настройките на вихровата горелка върху емисиите на NO<sub>x</sub>. Установено е, че намаляване на количеството на първичния поток води до подобрена (по-стабилен) горивен процес, но и до увеличаване на емисиите на NO<sub>x</sub> за всички видове горивни режими. Увеличаване на вторичния поток води до по-високи емисии на NO<sub>x</sub> в въздушния и O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> режими. В случая на режим на O<sub>2</sub> / РДГ, увеличаването на вторичния поток води до намаляване на емисиите на NO<sub>x</sub>. Причината е, че по-висок момент на вторичния поток води до по-силно завихряне в зоната близо до горелката. Това води до повишаване на емисиите на NO<sub>x</sub>, т.к. горенето се интензифицира и се образува голямо количество горивен-NO<sub>x</sub>. В случай на режима на O<sub>2</sub> / РДГ, т.к. количеството на вторичния поток е увеличено, а следователно количеството NO<sub>x</sub>, които са във вторичния поток също е увеличено, водейки до по-голямо количество NO<sub>x</sub> които се декомпозират от летливите вещества в пламъка.

Използвайки получените резултати, метод за прогнозиране на емисиите на NO<sub>x</sub>, базирани на математичен модел, използващ мултиплексен анализ е приложен за условията на кислородно горене. По този начин, тенденциите в емисиите на NO<sub>x</sub>, получени в съоръжение от пилотен мащаб могат да бъдат приложени в котли от промишлен мащаб.

4. Habermehl M., Erfurth J., Toporov D., Förster M., Kneer R.: **Experimental and Numerical Investigations on a Swirl Oxycoal Flame**” *Applied Thermal Engineering*, Thermal and Environmental Issues in Energy Systems (ASME/ATE/UIT), Elsevier, Volume 49, 31 Dec. 2012, pp. 161-169
- статия с импакт фактор 2.624
  - статията е цитирана в 4 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

Технологията за кислородно горене се радва на засилен интерес като една перспективна възможност за улавяне и съхранение на въглерод (Carbon Capture and Storage) в последните няколко години. Замяната на въздуха със смес от

рециркулирани димни газове (РДГ) и кислород, обаче, е последвано от промени в процеса на горене на въглищен прах, както и в преноса на топлина вътре в пещта. В RWTH Aachen University са изследвани основните механизми, контролиращи кислородното горене и влиянието на този процес върху горелката и дизайна на пещта по отношение на последващо внедряване на технологията в индустрията. В началото са проведени експерименти с горелка конструирана за конвенционално изгаряне на въглищен прах с въздух. На тази база са разработени мерки за аеродинамично стабилизиране на вихровия пламък в условията на кислородно горене. Методите на изчислителната хидродинамика (CFD), използващи адаптирани модели за кислородно горене, са използвани като инструмент за изследване и проектиране на вихровата горелка, която в последствие е изработена и тествана успешно в пилотната инсталация на Университета RWTH Aachen. С помощта на тази горелка е постигнато стабилно кислородно горене в рамките на широк спектър от концентрации на кислород в окислителната газова смес  $O_2$  / РДГ (от 18 до > 30 об. - %). По нататък са представени числени симулации на 1210 MWth промишлен котел в който се изгарят битуминозни въглища по метода на кислородното горене. Извършеното сравнение между режимите на конвенционално горене и кислородно горене показва, че лъчистия топлинен поток към стените на котела е значително повлиян от променените оптични свойства на димните газове вътре в пещната камера получени при кислородно горене. Специално внимание е отделено на концентрацията на кислород в окислителната газова смес, което е необходимо за постигане на сходни условия за пренос на топлина, каквито са получени при конвенционалния процес на изгаряне на въглищата с въздух.

5. Stadler, H., Christ, D., Habermel, M., Heil, P., Kellermann, A., Ohliger, A., **Toporov, D.**, Kneer, R. (2011): **Experimental Investigation of NO<sub>x</sub> Emissions in Oxycoal Combustion**, *Fuel* Volume 90, Issue 4, pp. 1604-1611

- статия с импакт фактор 3.248
- статията е цитирана в 24 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

В тази работа са представени резултати от експериментално изследване на емисиите на NO<sub>x</sub> от изгарянето на въглища в пилотна експериментална инсталация с мощност 100 kW. Три окислителни атмосфери са сравнени, а именно въздух, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> и рециркулирани димни газове обогатени с O<sub>2</sub>. Изследвани са емисиите на NO<sub>x</sub> получени от два различни режима на горене, а именно от вихров пламък и при беспламенно горене. Направен е анализ на влиянието на коефициента на излишък на кислород върху образуването и редуцирането на NO<sub>x</sub>. С увеличаване на излишъка на кислород в горелката, се наблюдава увеличаване на емисиите на NO<sub>x</sub> при атмосфери „въздух“ и „CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>“ и в двата режима на горене: вихров пламък и беспламенно горене. В случай на вихров пламък, рециркулацията на димните газове води до намаляване на емисиите на NO<sub>x</sub> до 50%, докато в случая на беспламенно горене това намаление е с около 40% в сравнение с CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>. Не е установено значимо влияние на концентрациите на окислителя O<sub>2</sub> в сместа CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> върху емисиите на NO<sub>x</sub> за вихрови горелки при изследваните граници между 18 и 27 об.-%. Направеният анализ на механизмите на образуване и редуциране на NO<sub>x</sub> показва, че наблюдаваното намаляване на емисиите на NO<sub>x</sub> чрез рециркулация на

димни газове не се дължи само на редуцирането на рециркулирания NO<sub>x</sub>, но също така и на намаленото преобразуване на горивния-N в NO.

6. Heil, P., **Toporov, D.**, Förster, M., Kneer, R.: (2011) **Experimental Investigation on the Effect of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on Burning Rates during Oxyfuel Combustion of Methane**, *Proceedings of Combustion Institute* 33, pp.3407-3413
- статия с импакт фактор 3.633
  - статията е цитирана в 15 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

При горене в CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> атмосфера, известно като кислородно горене, би трябвало да се очаква силно променена динамика на химическите реакции. Предишни изследвания докладват, че това не може да се обясни само с различните топло-физични и радиационни свойства, но също така и от факта, че CO<sub>2</sub> участва пряко в химичните реакции. Настоящата статия представя експериментално проучване на кислородно горене на метан с цел изследването на значението на химическите ефекти при високи концентрации на CO<sub>2</sub>. Експериментите са проведени в експериментална пещна камера с мощност от 25 kW, която е специално разработена за безпламъчно горене, като по този начин се осигурява възможността да се постигне стабилно горене на метан в широк диапазон от концентрации на кислород в CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> сместа при поддържане на постоянна температура на реактора. Това позволява изследването да се съсредоточи върху химическите ефекти на CO<sub>2</sub>, като останалите фактори засягащи скоростта на горене не се променят. Четири различни смеси на окислителя (CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> съответно с концентрация на кислорода от 21 обемни-% и 18 обемни-%) са изследвани чрез детайлни измервания на състава и температурата на димните газове. При горене в N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> атмосфера, профилите на CO, получени за различни O<sub>2</sub>-концентрации в окислителя се препокриват, което показва, че промяната на концентрацията на O<sub>2</sub> не е повлияло на скоростта на химическите реакции, при постоянна температура на пещта. При горене в CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> атмосфера, получените концентрации на CO са много по-високи от тези в N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> атмосфера. За разлика от N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, концентрациите на O<sub>2</sub> имат значително влияние върху скоростта на образуване и консумация на CO в кислородно горене. Резултатите получени и докладвани в тази работа демонстрират, че чрез елиминиране на влиянието на: специфичния топлинен капацитет на газовата смес (чрез поддържане на постоянна температура в пещта), дисоциацията на CO<sub>2</sub> (температури в камерата под 900 °C), и на топлинното излъчване (малки размери на камерата), може да се твърди, че наблюдаваните ефекти на високите концентрации на CO<sub>2</sub> върху скоростта на горене може да се дължи на участието на CO<sub>2</sub> в химическите реакции. Увеличение на концентрацията на O<sub>2</sub> при кислородното горене води до намаляване на това въздействие, но, по-нататъшни изследвания са необходими да се установи точния механизъм на това въздействие.

7. R. Kneer, **D. Toporov**, M. Forster, D. Christ, Ch. Broeckmann, E. Pfaff, M. Zwick, S. Engels and M. Modigel (2010), **OXYCOAL-AC: Towards an integrated coal-fired power plant process with ion-transport membrane-based oxygen supply**, *Energy Environ. Sci.*, 2010, 3, 198-207
- статия с импакт фактор 9.446

- статията е цитирана в 33 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

В рамките на изследователския проект OXYCOAL-AC са извършени детайлни експериментални и числени изследвания на вихров пламък при кислородно изгаряне на въглищен прах. Ефектите на повишени концентрации на CO<sub>2</sub> в газовата смес при кислородно изгаряне върху възпламеняването на летливите вещества и на коксовите частици, разпространение на пламъка, стабилността на пламъка, емисиите и преноса на топлина в котела, са проучени и анализирани. Начертани са мерки за стабилизиране на пламъка като функция от степента на рециркулиране на димните газове (съдържание на O<sub>2</sub>). В резултат е разработена вихрова горелка способна да работи в два режима, а именно на конвенционално (с въздух) и кислородно изгаряне. По този начин, OXYCOAL-AC става първата в света пилотна експериментална инсталация, където въглищата могат да се изгарят в стабилен пламък, в атмосфера на CO<sub>2</sub> със съдържание на кислород между 18 и 30 об. %. Освен това, развитието на ключови компоненти в процеса на OXYCOAL-AC, като например йонна транспортна мембрана за ефективно производство на кислород, е в процес на разработка и първи технически изпитания. Подходящи мембранни материали са идентифицирани и изследвани за тяхната приложимост към условията на кислородно горене. Модули от лабораторен мащаб са проектирани и успешно тествани като самостоятелно звено за разделяне на въздух и получаване на кислород базирано на мембранните технологии. Дизайнерски концепции на мембранни модули от промишлен мащаб и тяхното интегриране в пилотни или промишлени съоръжения са в процес на разработка. Отделянето на пепелните частици от димните газове преди тяхното рециркулиране в горивната камера е изследвано чрез серия от изпитания на различни керамични филтърни материали в условията на реален процес.

8. P. Heil, **D. Toporov**, H. Stadler, S. Tschunko, M. Förster and R. Kneer, (2009) **Development of an Oxycoal Swirl Burner Operating at Low O<sub>2</sub>-concentrations**, *Fuel*, 88, pp. 1269-1274
  - статия с импакт фактор 3.179
  - статията е цитирана в 32 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

Тази работа изяснява основните механизми на горене на въглищен прах в смес от CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. Изследвани са експлоатационните качества на два различни прототипа вихрови горелки, една с централна дюза тип (SCO) и една с единична пръстеновидна дюза тип (CAO) работещи в условията на кислородно горене в пилотна изпитателна инсталация. Въз основа на детайлни измервания в зоната на пламъка, съчетани с числени симулации, основните параметри, които влияят върху стабилността на вихровия пламък са изследвани. Установено е, че вихровия пламък може да се стабилизира в условията на кислородно горене чрез: увеличаване на концентрацията на O<sub>2</sub> над 34 обемни %, без конструктивни промени в дизайна на конвенционална горелка, първоначално конструирана за горене във въздух, и чрез модификации на геометрията на горелката които водят до променена аеродинамична картина на пламъка. Предложената модификация на горелката позволи намаляване на концентрациите на O<sub>2</sub> до 23 обемни % за SCO горелката и по-малко от 21 обемни % за CAO горелка. Представени са подробни данни за

аксиалните и тангенциални компоненти на скоростта, температурата на димните газове и концентрацията на кислород. Тези данни са придобити чрез детайлно измерване на вихров пламък стабилизирани при концентрация на кислород от 21 об. % в окисляващата газова смес. Отчетените резултати могат да бъдат използвани при разработване на промишлена вихрова горелка осигуряваща стабилен горивен процес и в двата режима, а именно: в режим на горене във въздух и в режим на кислородно горене.

10. **Toporov D.,** P. Bocian, P. Heil, A Kellermann, H. Stadler, S. Tschunko, M. Forster and R.Kneer (2008), **Detailed Investigation of a Pulverised Fuel Swirl Flame in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Atmosphere**, *Combust. Flame* 155, 605-618

- статия с импакт фактор 2.16
- статията е цитирана в 76 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

Разработен е нов метод за стабилизиране на вихров пламък при кислородно изгаряне на въглищен прах в Института по Топло- масообмен в Университета в гр. Аахен (RWTH Aachen University), Германия. Конструкцията и експлоатационни характеристики на вихрова горелката са променени така, че да се увеличи образуването на СО в пламъка и по този начин да се получи стабилизиране на пламъка и пълно изгаряне на горивото в пещната камера при концентрации на O<sub>2</sub> в O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> сместа, подобни на тези, във въздуха. Статията представя резултатите от детайлни числени и експериментални изследвания на стабилен вихров пламък получен при концентрация на кислорода от 21%-обемни в условията на кислородно изгаряне на въглищен прах. Експериментите са извършени във вертикална пещ от пилотен мащаб (100 kW) в рамките на изследователския проект OXYCOAL-AC имащ за цел разработването на процес на кислородно изгаряне, който е базиран на мембранните технологии за производство на кислород. Получени са експериментални резултати за скоростите на пещните газове, температурата на пещните газове и на въглищните частици както и на концентрациите на отделните компоненти в газовата смес. Данните са подробно анализирани като акцентът е поставен върху основополагащите механизми, както и върху аеродинамиката на пламъка при кислородно горене. Направеното сравнение на получените експериментални данни с резултати от числени симулации демонстрира валидността на използвания числен метод. Докладваните подробни експериментални данни могат да се използват за проверка на числени модели, разработени за моделиране на кислородно горене.

11. **Toporov, D.,** Forster M. and R. Kneer (2008), **Burning Pulverized Coal in CO<sub>2</sub> Atmosphere at Low Oxygen Concentrations**, *Clean Air*, Vol. 8, pp. 1-18, 2007, Beggel House, Inc, USA, ISSN 1561-4417

- статията е цитирана в 3 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

Статията представя един нов подход за стабилизиране на вихров пламък в условията на кислородно изгаряне на въглищен прах. Конструкцията на вихрова горелка и нейните експлоатационни характеристики са оптимизирани по такъв начин, че да се постигне засилено образуване на СО в областта на горелката, като по този начин се

постигне стабилизиране на вихровия пламък и в резултат пълно изгаряне при концентрации на кислорода в окислителната газова смес  $O_2/CO_2$  равни на тези във въздуха. Представени са числени и експериментални изследвания на стабилността на вихров пламък при кислородно изгаряне на въглищен прах. Проследен е хронологично процеса на разработка на базата на методите на изчислителната хидродинамика и процеса на тестване на горелката в експерименталната пещна камера. Обсъдени са последствията от основополагащите механизми към реализацията на техническото решение: Стабилизацията на вихров пламък при кислородно горене е възможна при концентрации на  $O_2$  равни или по-ниски от тези във въздуха.

16. **Toporov D., M. Forster and R. Kneer: “OXYCOAL-AC: Towards the Realisation of a Coal-Fired Power Plant Process with Membrane-based Oxygen Supply – a Survey of Accumulated Experience”, *Proceedings of 35<sup>th</sup> International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems*, June 6-10, 2010-Sheraton Sand Key-Clearwater, Florida, USA**

Изследователският проект OXYCOAL-AC е насочен към развитието на основните компоненти на интегриран процес на електроцентраля, изгаряща прахово гориво в смес от рециркулирани димни газове (РФГ) и кислород. Кислородът се произвежда от керамична йонна мембрана на базата на разделяне на въздуха. Докладът представя текущото състояние на проекта, като се фокусира върху основните компоненти на процеса, а именно стабилността на пламъка при кислородно горене, дизайн на вихрови горелки за кислородно горене на въглищен прах, горещо пречистване на рециклираните димни газове и преноса на топлина в индустриална пещна камера. Показани са процеса на развитие, експериментални тестове и увеличаване от пилотен към индустриален мащаб на вихрова горелка, която е проектирана да работи в различни режими на горене: конвенционално горене във въздух и кислородно горене. Представени са мерки за стабилизиране на пламъка в зависимост от степента на рециркулация на димните газове (съдържание на  $O_2$ ) и е разработена вихрова горелка, която може да работи стабилно както при работа с въздух така и при кислородно горене. По този начин OXYCOAL-AC е първият пилотен проект, където въглищата могат да се изгарят в стабилен пламък, в атмосфера на  $CO_2$  със съдържание на кислород между 18% и 30% при рециркулация на сухи и влажни пещни газове.

Пещните газове, получени в котела в процеса на OXYCOAL-AC (съдържат пепелни частици, серен диоксид и съединения на алкални метали), трябва да бъдат пречистени преди достигане им на мембранный модул. С цел да се увеличи ефективността на процеса, РФГ се пречистват при температурни нива, определени от мембраната (около  $850^{\circ}C$ ). За тази цел, газоочистващия модул е свързан чрез изолиран горещ газопровод с изхода на пещта. Проведени са пилотни тестове с използване на различни филтърни материали. Първите експерименти показват, че при температури нива над  $500^{\circ}C$ , пепелните частици омекват и по този начин полепват по повърхността на филтъра и възпрепятстват почистването на филтъра чрез обратен импулс като предизвикват сериозни проблеми. Т.к. наличието на алкални елементи в пепелта има силно въздействие върху температурата на омекване на пепелта, добавянето на алкални- поглъщащи материали (алуминиев

силикат) към въглищата доведе до намаляване на измерените  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  концентрации в газовата фаза. Така прилепването и лепкавостта на летлива пепел при високи температури (около  $800^\circ\text{C}$ ) може да бъде намалена. Въз основа на това се очаква, подобряване на процеса на обезпрашаване на горещия рециркулиран газ, но са необходими по-нататъшни експерименти, които да докажат това.

Проведени са числени симулации на промишлени котли (1200 MWth) работещи в процес на кислородно горене на битуминозни въглища с цел тяхната модернизация. Използван е т.н. Exponential Wide Band Model, който е специално разработен за моделиране на емисионните характеристики на пещните газове в процеса на кислородно горене. Направени са сравнения между изгаряне на въглища във въздух и кислородно изгаряне при различни условия по отношение на съдържанието на кислород и водни пари в окислителя. Числените изследвания показват, че значително увеличение на концентрация на кислород в сместа  $\text{O}_2/\text{РФГ}$  (прибл. 27% при рециркулиране на влажни димни газове и 30% при рециркулиране на сухи димни газове) е необходимо за да се компенсира по-високият топлинен капацитет на  $\text{CO}_2$  и по този начин да се получат пламъчни температури близки до тези при конвенционалното горене с въздух. Но в този случай, поради промяната на оптичната плътност на пещните газове, това ще доведе до 16% увеличение на падащия лъчист поток към стените на пещта, в случай на рециркулация на влажни димни газове и 5% при сухи такива. Резултатите показват, че за да се получи топлообмен в горивната камера подобен на този при конвенционално изгаряне с въздух, кислородно обогатяване на рециркулираните димни газове трябва да е около 24 об.-% при влажни и около 29 об.-% при сухи димни газове съответно.

17. Erfurth J., D. Toporov, M. Forster and R. Kneer (2009): **Simulation der Strahlungswärmeübertragung in einem Oxycoal-Grossdampferzeuger**, 24. Deutscher Flammentag, Verbrennung und Feuerungen, VDI-Berichte 1988, Sept, 2009, Bochum, Germany

В промишлените котли лъчистия топлообмен е от първостепенно значение. В случай на кислородно горене (Oxycal) на въглища, оптичните свойства (абсорбция и излъчване) на пещните газове ще са значително променени в сравнение с тези при конвенционално изгаряне с въздух. Това се дължи на по-високите парциални налягания на  $\text{CO}_2$  и водна пара (в случай на рециркулиране на влажни газове) при кислородното горене. Ето защо, при числени симулации на кислородни горивни процеси в индустриални котли е необходимо да се обърне специално внимание на моделите за лъчист топлообмен, които трябва да отчитат променените абсорбционни/емисионни свойства на средата, причинени от променения състав на димните газове. Статията представя резултати от числени изследвания на индустриален котел изгарящ битуминозни въглища. Три горивни процеса са изследвани: конвенционално горене с въздух, кислородно горене с рециркулация на сухи димни газове ( $\text{CO}_2$ ); и кислородно горене с рециркулация на влажни димни газове ( $\text{CO}_2$  + водни пари). Различни методи за изчисляване на локалния коефициент на поглъщане (WSGGM и EWBM) са използвани в симулациите. Установено е, че някои основни физични ефекти, като например повишаване на лъчистото натоварване върху стените на горивната камера, не могат да се отчетат при използване на модели от типа WSGGM. Този модел се прилага успешно при

конвенционално горене, но в случай на променени концентрации на пещните газове използването му води до грешни тенденции. Ето защо, в случай на кислородно горене се препоръчва да се използва модифициран модел на WSGGM, който е специално адаптиран за тези условия или физично по-коректния модел EWM. По този начин се очаква основни въпроси като преноса на топлина и опасност от прегряване или корозия да могат да се решат с помощта на числените симулации.

19. Erfurth J., **Toporov D.**, Förster M., Kneer R.: **“Oxycoal Swirl Burners: From Bench to Industrial Scale”**. In: *10<sup>th</sup> Conference on Energy for a Clean Environment, CleanAir 7-10 July 2009, Lisbon, Portugal*

В предишни свои публикации авторите представят нов подход за стабилизиране на вихров пламък използван при разработването на пилотна (40 kWth) горелка, която работи в широк диапазон от концентрации на кислород (18-34 об.-%) в условията на кислородно горене на въглищен прах. Тази статия се фокусира върху процеса на увеличаване (scale up) до 100 kWth на мощността на този тип горелка и представя получените числени и експериментални резултати от работата и в условията на кислородно горене. Освен това, е представен подход, базиран на изчислителната хидродинамика (CFD), за конструирането на индустриална горелка (70 MWth) за кислородно и въздушно горене на пулверизирани битуминозни въглища. Стабилизиране на пламъка в различни съотношения на рециркулация на димните газове (съдържание на O<sub>2</sub>) се постига чрез отчитане на комбинирания ефект на:

- 1) намалена стабилност на вихровия пламък поради по-високия моларен топлинен капацитет на CO<sub>2</sub>;
- 2) ендотермичността на реакцията на Boudouard и
- 3) променения лъчист топлинен поток вследствие на повишената оптична плътност (по-висока излъчвателна и абсорбираща способност от въздуха) на димните газове.

Извършено е числено изследване, използващо спектрален модел за локалната излъчвателна способност на димните газове в индустриален котел работещ при кислородно горене с различни съотношения на рециркулация. Анализирано е въздействието на концентрацията на O<sub>2</sub> в горелката и вида на рециклиране (мокри или сухи димни газове) върху лъчистия топлообмен в пещта по отношение на тяхното адаптиране към условията на кислородно горене.

20. Toporov, D., Förster M. and R. Kneer: **“Combustion of Pulverized Fuel under Oxycoal Conditions at Low Oxygen Concentrations”**, *Third International Conference on Clean Coal Technologies for our Future*, 15-17 May 2007, Cagliari, Sardinia, Italy

Технологията на кислородното горене съчетана с улавяне на CO<sub>2</sub> след изгарянето се радва на оправдан интерес, т.к. предлага възможност за значително и сравнително бързо намаляване на емисиите от изкопаеми горива при производство на електроенергия. Изгарянето на въглищен прах в смес от CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> вместо във въздух, обаче, ще доведе до модифициран разпределение на температурата, концентрациите и лъчистите потоци вътре в горивната камера въздействайки по този начин хомогенните и хетерогенните химически реакции. Използвайки горелка,

която е оптимизирана за изгаряне на въглища във въздух, за кислородно горене ще доведе до нестабилен пламък и непълно изгаряне. Стабилизиране на процеса на горене може да се получи при:

- I) повишена концентрация на кислород (по-голямо от 21%-об.) в окислителната смес, като по този начин се постигнат подобни нива на излъчване и пламъчни температури като при конвенционалните пламъци без значителни промени в аеродинамиката на пламъка;
- II) промени в аеродинамиката на горелката, както са представени в настоящата статия.

Резултатите в това проучване са получени в рамките на OXYCOAL-AC, научноизследователския проект, имащ за цел да осъществи изгаряне на пулверизирани въглища в CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>-атмосфера с кислород, произведен от високотемпературни керамични мембрани като по този начин се постигне висока ефективност на целия процес. Докладвани са резултатите от числени и експериментални изследвания на стабилен кислороден пламък, получен при концентрация на кислорода в окислителната смес  $\leq 21\%$ -об. в горящата смес. Изследвани са два различни прототипа горелки. Открити са основни зависимости как да се получи стабилен кислороден пламък при O<sub>2</sub> концентрации, равни или по-ниски от тези във въздуха.

32. Förster M., Kneer R., **Toporov D.: Method for the Combustion of Fuel**, Pat. Nr.: DE 10 2007 021 799 A1, WO 2008/135275 A1, EP 2 149012 A1, US 2010/0190118 A1

Настоящото изобретение се отнася до метод за изгаряне на горивен материал в горивната зона на горелката с помощта на кислород или смес от кислород и въглероден диоксид. Освен това, изобретението се отнася до горелка за осъществяване на метода съгласно изобретението. За да се осигури процеса, при който горенето на горивото с кислород или смес от кислород и въглероден диоксид, който е със съдържание на кислород по-малко от 21 обемни % може да бъде стабилно, се предлага с изобретението, че в зоната на горене трябва да се генерира един силен рециркуляционен поток, където протича хомогенно смесване на горещи продукти на горенето с материала на горене и кислорода от една страна или към горивната материал и сместа от кислород и въглероден диоксид от друга страна в зоната на горене.

## II. ЧИСЛЕНО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА БЕЗПЛАМЕННО ГОРЕНЕ НА ГАЗООБРАЗНИ И ТВЪРДИ ГОРИВА

9. H. Stadler, D. Toporov, M. Förster, R. Kneer (2009), **On the Influence of the Char Gasification Reactions on NO Formation in Flameless Coal Combustion**, *Combust. Flame*, 156, pp. 1755-1763
- статия с импакт фактор 2.923
  - статията е цитирана в 24 статии (справка Scopus към 02.02.2015)

Безпламъчното горене е добре известен метод за намаляване на емисиите на NO<sub>x</sub> при горенето на природен газ, но тази технология не е още напълно приложима при

горенето на въглищен прах. Числени симулации могат да предоставят подробна информация за процеса на горене като по този начин играят съществена роля в разбирането на основните механизми на образуване на вредни вещества. В симулации на конвенционално горене на въглищен прах газификационните реакции с  $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}$  обикновено се пропускат, тъй като общият им принос към окислението на коксовата частица е незначителен в сравнение с окислението с  $\text{O}_2$ . В безпламъчното горене, обаче, поради силната рециркулация на горещи продукти на горене, предимно  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и намаляването по този начин на концентрацията на  $\text{O}_2$  в реакционната зона, локалните парциални налягания на  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  стават значително по-високи от тези на  $\text{O}_2$ . Ето защо, значението на реакциите на коксовата частица с  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  трябва да се преразгледа. Тази статия представя едно изследване на значение на тези реакции при образуването на вредни вещества в процеса на безпламъчно горене на въглищен прах. Използваните числените модели са валидирани по отношение на експериментални данни получени в пещна камера в Университета в гр. Аахен (RWTH Aachen University), Германия. Чрез вариране на температурата на пещната камера и на коефициента на излишък на въздуха в горелката, са разгледани различни тестови случаи. Анализирано е влиянието на газификационните реакции върху процеса на образуване на  $\text{NO}$ . Установено е, че в изследваните граници на тези параметри, фракцията на кокс, която е газифицирана се увеличава до 35%. Това води до промени в локалния състав на газовата смес, предимно разпределението на  $\text{CO}$ , което от своя страна влияе на образуването на азотни окиси. Изследването показва, че при отчитане на газификационните реакции емисиите на  $\text{NO}_x$  са с до 40% по-ниски от очакваните емисии когато газификационните реакции не са взети под внимание.

15. Kellermann, A., Heil, P., Stadler, H., **Toporov, D.**, Kneer, R.(2011): **Experimental Investigation of Flameless Pulverised Coal Combustion under Oxyfuel Conditions**; 5th International Conference on Clean Coal Technologies, CCT2011, 08.-12.05.2011, Zaragoza, Spain

В тази работа са представени резултати от експериментално изследване на емисиите на  $\text{NO}_x$  от безпламъчно изгарянето на въглища в пилотна пещна камера (40kWth). Три окислителни атмосфери са сравнени, а именно въздух,  $\text{CO}_2$  /  $\text{O}_2$  и рециркулирани димни газове обогатени с  $\text{O}_2$ . Анализирани са влиянието на коефициента на излишък на въздуха за горелката и концентрацията на  $\text{O}_2$  в окислителя върху емисиите на  $\text{NO}_x$ . По-висок коефициент на излишък на кислород в горелката води до увеличаване на емисиите на  $\text{NO}_x$  в случаите на горене във въздух и в  $\text{CO}_2$  /  $\text{O}_2$  атмосфери. Горенето в атмосфера на рециркулирани димни газове обогатени с  $\text{O}_2$  води до намаляване на емисиите на  $\text{NO}_x$  до 40% в сравнение с  $\text{CO}_2$  /  $\text{O}_2$  случай. Получените експериментални данни за влиянието на концентрациите на  $\text{O}_2$  в окислителя върху емисиите на  $\text{NO}_x$  съвпадат с вече публикувани данни в литературата. С нарастване на концентрацията на  $\text{O}_2$ , емисиите на  $\text{NO}_x$  също се повишат. Тази тенденция е в противоречие с тенденцията наблюдавана за вихрови пламъци.

22. Erfurth J. **Toporov D.**, Tschunko S., von Petery Ch. and R. Kneer: **Modellierung der flammlosen Verbrennung in einer Druckkohlenstaubeuerung**, VDI Berichte, vol. 1888, pp. 433-440, 2005

Безпламъчното горене е един от начините да се намалят значително емисиите на азотни окиси в процеса на изгаряне на въглищен прах. Извършено е числено симулиране на безпламъчно горене на пулверизирани въглища в условията на повишено налягане (3 бара). Изследвани са два различни вида въглища, които са използвани в пилотната инсталация в Института за топло-масообмен в Университета RWTH Aachen. Получените числени резултати са анализирани и обсъдени. Извършено е сравнение с експериментални данни по отношение на разпределение на температурата, концентрациите на отделните вещества и компонентите на скоростта на въглищните частици.

### **III. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА ЕДНОФАЗНИ И ДВУФАЗНИ ПРОЦЕСИ В ПРОМИШЛЕННОСТТА**

2. **Топоров Д. Д.**, Автореферат на дисертационен труд на тема **“Числено моделиране на турбулентно горене на природен газ в индустриални пещи”**, София (2000), шифър 01.02.05. „Механика на флуидите“

Дисертационният труд е посветен на изследване на турбулентно горене на природен газ в индустриални пещи. Извършено е систематизирано проучване и анализ на методите и моделите за симулиране на турбулентно горене в индустриални пещи. В рамките на дисертационния труд е създаден математичен модел, който се базира на метода на контролния обем и включва модели на турбулентност, радиационен топлообмен и на турбулентно горене. Конкретната задача на дисертацията е свързана със следването на най-съвременните тенденции в моделирането на химически реакции, а именно моделирането на сложни многостъпкови редуцирани химически механизми, които включват както бързите така и бавните реакции, характеризиращи горенето на метан. За целта е създаден математичен модел на химически реакции, отчитащ по-пълно и адекватно сложното взаимодействие между турбулентното течение, кинетиката на химическите реакции и топлообмена, които съществуват в турбулентното горене на природен газ. В резултат са извършени числени изследвания на горивния процес в радиационните камери на парен котел ПК-35 и водогреен котел ПТВМ 100 (реконструиран). Сравнението на получените числени резултати за емисиите на азотен окис, въглероден окис и въглероден двуокис със съответните налични експериментални данни показва добро съвпадение на предсказаните величини.

Разработеният в рамките на дисертационния труд софтуерен продукт представлява един изключително удобен, надежден и ефективен по отношение на време и ресурси изследователски инструмент за изучаване на процесите в пещната камера и търсене на оптимизационни решения за организиране на горивния процес с оглед постигане максимална ефективност при минимално вредно въздействие върху околната среда.

12. **Toporov, D., Azevedo, J.L.T. "A CFD-based Analysis of Low Volatile Coal Combustion in Different Scale Burners", *Clean Air*, Vol. 7, Numb 1, pages 1-16, Beggel House, Inc, USA, (2006) ISSN 1561-4417**

Изгарянето на ниско летливи въглища е свързано с редица технически предизвикателства, произтичащи от трудното естество на горивото. Традиционно ниско летливи въглища се изгарят в специално конструирани за целта специфични и скъпи арко-образни котли. Горелките са монтирани в горната част на котела и образуват факел насочен надолу. Характерно за тези котли е огнеупорната облицовка в зоната на горелката, която е поставена с цел генериране на висока температура в тази зона и следователно улеснява запалването на въглищата. От друга страна конюнктурата принуждава операторите на въглищни ТЕЦ да увеличат обхвата на въглища, които могат да се изгарят в традиционните горивни системи, които са с "най-ниска капиталова цена", като например котлите със стенно, хоризонтално монтиране на горелките. Следователно, успешното използване на конвенционални котли при изгаряне на въглища със съдържание на летливите по-малко от 15% (суха, безпепелна база) е икономически обосновано.

Съвременните методи на изчислителната хидродинамика имат незаменима роля в процеса на разработване на нови горелки. Основната цел на настоящата статия е да оцени, на базата на числени изследвания, ефекта на основните фактори влияещи върху производителността на вихрова горелка, която е разработена за изгаряне на въглища с ниско съдържание на летливи компоненти.

Статията представя числено изследване на влиянието на качеството на въглищата върху процеса на изгаряне в пещ с една горелка при различни условия на работа. Извършени са симулациите на горелка от пилотен мащаб (500kW) работеща с два типа въглища, а именно стандартни (битуминозни) въглища и въглища с ниско съдържание на летливи компоненти (полу-антрацити).

Извършено е също така числено изследване на горелка от индустриален мащаб (35 MW) изгаряща полу-антрацитни въглища с ниско съдържание на летливи.

Сравненията с експериментални данни показват, че моделът качествено и количествено отчита промените в производителността на горелката. Числените резултати показват също така, че аеродинамиката на горелката не се влияе от качеството на въглищата в случай на силно стабилизирани пламък. Изследвани са ключови параметри, влияещи върху стабилността на пламъка. Установено е, че топлинното излъчване на стените на пещната камера оказва най-силен ефект върху скоростта на нагриване на въглищните частици в случая на горелка от пилотен мащаб. Високата температура на стената ускорява отделянето на летливи компоненти, създавайки по този начин „отворен“ вихров пламък със силна рециркулация, което е предпоставка за стабилизирането му.

В случая на горелка от индустриален мащаб, обаче, нагриването на частиците е основно чрез конвекция. Увеличения диаметър на горелката и високата степен на завихреност на вторичния въздух увеличават количеството на рециркулирани горещите пещни газове които навлизат дълбоко в муфата на горелката, като по този начин се подобрява запалване на частиците и се подобрява стабилността на пламъка.

Следователно, влиянието на температурата на въздуха, заедно с предложената

конструкция на горелка, са от голямо значение за ефективното използване на ниски летливи въглища като антрацит или полу-антрацит в котли със стенно монтиране на горелките. Числените симулации показват, че механизмите на загряване на въглищните частици са различни при горелки тествани с пилотна пещ и в горелки използвани в индустриални котли. Ето защо резултатите получени от тестове в пилотна инсталация трябва внимателно да се екстраполират към индустриална такава.

18. Christ D., **Toporov D.**, Kneer R. (2009): **On the Influence of Mesh Generation and Manipulation Methods on the Quality of RANS-based Rurbulent Combustion Simulations**, 4<sup>th</sup> European Combustion Meeting, Proceedings of the ECM, 14-17 April, Vienna, Austria

Съществуват много методи за генериране и манипулация на мрежи, използвани в числените симулации. Тези методи се различават съществено по отношение на необходимата подготвителна работа и на тяхната експлоатация. Тази статия представя метода „Планиране на експеримента“ за оценка на влиянието на различни параметри в процеса на моделиране на турбулентно горене. С помощта на този метод става възможно не само да се определи влиянието на отделните параметри, но също така да се определи количествено тяхното взаимодействие. Няколко параметри са проучени, включващи ръчно построени структурирани и автоматично генерирани неструктурирани мрежи. Разгледани са мрежи, състоящи се от шестостенен, тетраедър и многостенни елементи. В допълнение са ализирани различни методи за оптимизиране на мрежата в комбинация с различни схеми на дискретизация на конвекционните членове. Оценено е влиянието на тези параметри върху качеството на симулациите чрез сравнение с експериментални данни.

21. **Toporov D.**, Z. Liu and J.L.T. Azevedo (2005): **A Numerical Investigation of the Influence of Different Combustion Models on Pulverised Coal Flames Simulations**, 1<sup>st</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, 21-25 June, Lisbon, Portugal

Численото симулиране на процеса на изгаряне на въглищен прах се нуждае от модели, които представят еволюцията на въглищната частица по време на процеса. Подобни модели бяха разработени и представени през последните две десетилетия. Затова е важно да се прецени дали подобряването на моделите на еволюцията на въглищната частица води и до подобряване на качеството на резултатите при симулиране на въглищни пламъци.

Изгарянето на въглища, включва моделирането на пренос на топлина към частицата, нейното загряване, пиролизация и последващи реакции на летливите вещества, реакциите на оксидация на коксовата частица и образуването на пепел. В момента има разработени много подробни горивни модели и тяхното приложение в рамките на CFD изчислителни програми като под-модели са обсъдени тук. Нивото на детайлност в описанието на еволюцията на въглищна частица има също така пряко отражение върху възможностите за изчисляване на газова фаза на горене.

Настоящата статия представлява числено изследване на поведението на различните модели при симулиране на въглищни пламъци. Симулирани са реални пламъци, за които съществуват експериментални данни. Два модела за турбулентно горене, а

именно Eddy Dissipation Model и Eddy Dissipation Concept Model бяха приложени като е взето по внимание кинетиката на химическите реакции. Еволюцията на въглищната частица е моделирана с помощта на Chemical Percolation Devolatilisation модел. Скоростта на оксидация на коксовата частица е изчислена използвайки комбиниран модел отчитащ кинетиката на реакцията по повърхността на частицата и дифузията на окислителя в граничния слой на частицата. Числените резултати получени с различни модели са сравнени с експерименталните данни. Обсъдени са и са анализирани възможностите на различните горивни модели да симулират коректно изследвания въглищен пламък.

#### **IV. ТЕРМИЧНА ГАЗИФИКАЦИЯ НА ТВЪРДИ ГОРИВА ЗА ПРОМИШЛЕНО ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ, СИНТЕТИЧНИ ГОРИВА И ХИМИЧНИ ПРОДУКТИ.**

13. **Dobrin Toporov, Ralf Abraham, Gasification of low-rank coal in high-temperature Winkler (HTW) process, (2014) Industrial Fluidisation South Africa (IFSA 2014) Conference pp.121-133, Edited by A. Luckos & B.C. North Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy, November, 2014**

Докладът представя процеса на високотемпературна термична газификация по метода на Winkler (HTW), която е предназначена за използване на нискокачествени суровини като въглища с високо съдържание на пепел, лигнитни въглища, биомаса, торф, твърди битови отпадъци и т.н. Методът се характеризира с реагиращ стационарен кипящ слой, който работи при повишено налягане и температури като по този начин се постига висока ефективност и висока степен на гъвкавост по отношение на качеството на суровината, условията на работа, производителност и качество на синтезния газ. Използването на двукамерни дюзи за подаване на газификационните агенти (кислород, водна пара и CO<sub>2</sub>) осигурява възможност за постигане на равномерна флуидизация в кипящия слой и отличен контрол на температурата и стехиометричните условия по височината на газ-генератора.

HTW е напълно развита и доказала се газификационна технология за оползотворяване на нискокалорични суровини. Повече от 30 години интензивно изследователска и внедрителска дейност доведе до изграждането и експлоатацията на няколко промишлени системи за производство на синтезен газ, опериращи на комерсиална основа в продължение на много години. Последните иновации, направени от ThyssenKrupp Industrial Solutions AG са фокусирани върху разширяване на портфолиото от суровини и подобряване на дизайна на газ-генератора и съпътстващите системи. Провеждат се интензивни изследвания в рамките на амбициозна програма за развитие, която включва серия експерименти в новопостроената пилотна инсталация (500 kW) в ТУ-Дармстадт, Германия в съчетание с числени симулации, използващи най-новите постижения в моделирането на химически процеси в кипящ слой.

Посочени са основните етапи в процеса на проектиране на HTW-генератор от промишлен мащаб. Специално внимание е отделено на създаването на модели на процеса: включващи глобални изчисления на топлинния и масов баланс на

генератора, както и подробни три-измерни симулации на реагиращ кипящ слой. Представени са и са обсъдени също така примерни триизмерни числени резултати получени при моделирането на термична газификация на лигнитни въглища в HTW газ-генератор при налягане от 10 атмосфери.

14. **Dobrin Toporov, Jens Böttcher, Ralf Abraham (2014), HTW based Gasification of Indonesian Low Rank Coal as an Alternative for an Efficient and Sustainable Production of Chemicals, Asian Nitrogen + Syngas 2013 International Conference ((Jakarta 17 - 19 November 2014)**

Търсенето на химикали като амоняк, карбамид, метанол и други непрекъснато се увеличава в световен мащаб. От друга страна, силната конкуренция притиска производителите на химични вещества да намаляват постоянно производствените си разходи и да търсят: (I) по-ефективни апарати и технологии, и (II) алтернативни и по-евтини суровини. Наскоро природния газ (ПГ), който е основна суровина за производство на химикали, стана изключително скъп в някои региони в Азиатско-тихоокеанския регион, а в много случаи дори не се предлага поради изчерпване на местните находища или поради липса на инфраструктура. В резултат на това, производството на химични вещества на базата на ПГ стана нерентабилно, а в много случаи недостъпни за местната промишленост и аграрен сектор. Ето защо, използването на други, по-евтини суровини, като например, нискокалорични местни въглища може да бъде алтернатива не само за да се спаси, но също така да се осигури дългосрочна и устойчива перспектива за целия сектор. Този въпрос стана изключително актуален в страни, които имат огромни запаси на нискокалорични въглища, като Индонезия, Китай и Индия.

Газификацията е процес на термично преобразуване на твърди въглеводородни материали в газообразно гориво, наречено синтезен газ. Термичната газификация е ефективна технология за редица системи включващи производството на електроенергия с ниски вредни емисии и на други продукти с висока стойност, като химични продукти, синтетични горива и т.н.

Статията представя процеса на високотемпературна газификация по метода на Винклер (High Temperature Winkler), който е специално проектиран за използване на нискокачествени суровини като въглища с високо съдържание на пепел, лигнитни въглища, биомаса и др. Процесът се характеризира с (I) стационарен кипящ слой с температури в интервала 800 – 1000°C, в който вследствие на пиролизата се отделят летливите вещества и започва частичното окисление на оставащия кокс и (II) т.н. свободен борд, разположен над кипящия слой, където протичат газификационните реакции на коксовите частици при температури от порядъка на 900 – 1200°C. Високите температури в тази зона спомагат да се разградят тежките въглеводороди (смоли), отделени в процеса на пиролиза, като по този начин синтезния газ произведен в газ-генератора на Винклер се характеризира с висока чистота, практически не съдържащ смоли.

Статията прави подробен хронологичен преглед на развитието на тази технология през последните 40 години и представя ценна информация за производителността на тези газ-генератори при различни експлоатационни условия и горива. Представен

е нов пилотен проект на газ-генератор от 500 kW, който е разработен от авторите на статията и който отчита най-новите разработки в тази технология.

23. Langenkamp G., Pavone D., Schirrmeister S., Schulze-Eckel R., Abraham R.; **Toporov D.**; **“Apparatus and Process for Gasification of Solid Hydrocarbonaceous Fuels in Dust Form in an Entrained Flow”**, Pat. Nr.: WO 2013/113478 A1, DE 10 2012 001 986 A1, PCT/EP2013/000191

Изобретението се отнася до газификационен реактор за термична газификация на пулверизирано въглищно гориво във т.н. реактор с увлечен поток. Реакторът се състои от: (1) реакционна зона разположена в горната част на реактора, в чиято горна област са разположени горелките за подаване на горивото. Страничните стени на реакционната зона са снабдени с тръби с водно охлаждане от тип мембрана на повърхността на които свободно се движи течна шлака, без да се допуска шлаката да се втвърдява. От долна страна на реакционната зона е предвидено да се намира отвора за източване на шлаката и на произведения в реакционната зона синтезен газ, (2) последвано от втора зона в долната част на отвора, в който суровия газ се охлажда в сухо пространство чрез лъчист топлообмен и където е предвидено едно устройство за генериране на водна завеса, последвано от трето пространство в долната част на второто пространство, предвидено за устройствата доставящи вода, последвано от дъното на третото пространство, което е също едно устройство за източване на сместа вода-шлака, като суровият охладен газ напуска реактора в долната част или отстрани на трето пространство. Характерно е наличието на аксиално симетрично удължено пространство, което образува прехода от първото във второто пространство, и чийто долен край е разположен на същото ниво или над нивото на изхода на свободно падане на водната завеса.

24. Pavone D., Abraham R., **Toporov D.**; **“Bottom Product Cooling in a Fluidised-Bed Gasification”**, Pat. Nr.: WO 2013/120721 A1, DE 10 2012 002 711 A1, EP 2 814 914 A1, CA 2865027 A1,

В досега действащите системи, използващи кипящ слой, горещия твърд остатък (основно пепел) се отделя от системата и се охлажда директно чрез впръскване на вода или индиректно във винтов (шнеков) конвейер с водно охлаждане.

Изобретението се отнася до нов метод за охлаждане и разхерметизиране на твърд остатъчен продукт, произведен в кипящ слой при газификация на биомаса, кафяви въглища или битуминозни въглища с високо съдържание на пепел. Методът представлява едно икономично решение, което е постигнато като остатъчния твърд продукт напускащ кипящия слой с температура максимум 1500 С и налягане до 40 бара се подава към междинен съд, откъдето постъпва в резервоар, който е под налягане и който е снабден с индиректна охладителна система. Там продукта се охлажда, а отдадената топлинна енергия се използва в процеса. След като продукта се охлади, се подава към системата за разхерметизация.

25. Abraham R., **Toporov D.**, Pavone D.; **“Centrifugal Separator”**, Pat. Nr.: WO 2013/131768 A1, DE 10 2012 004 590 A1

Представен е метод и уред за оптимизиране на центробежен сепаратор (циклон), в частност циклон, които се използват във високотемпературен газ-генератор. Целта е да се увеличи значително сепариращата способност на циклона. Това е постигнато чрез прикрепването на допълнително тяло към изходящата тръба на циклона като по този начин се получава локално увеличаване на центробежната сила.

26. Abraham R., Pavone D., Hafner S., **Toporov D.**; **“Method for utilisation of by-products from gasification plants”**, Pat. Nr.: WO 2014/131700 A1, DE 10 2013 101 945 A1

Метод за по-нататъшното използване на вторични продукти получени в процеса на газификация, особено от високотемпературен процес на Winkler газификатор, където получените по време на газификацията твърди фракции са отделени от газа чрез центробежен сепаратор. В предложеното изобретение, газообразните и/или течни продукти, не се губят и по този начин се подобрява производителността на газ-генератора. Това се постига като компонентите, нереагирани при температури от 900° до 1200 °C, като C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>10</sub>H<sub>8</sub> и NH<sub>3</sub>, се отделят от компонентите на основния синтезен газ, като CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O и се рециклират в процеса на газификация.

27. Abraham R., **Toporov D.**, Werner Th., Pavone D.; **“Fluidised-bed Gasifier”**, Pat. Nr.: WO 2014/124875 A1, DE 10 2013 101 368 A1

Изобретението се отнася към газ-генератор с кипящ слой, в частност високотемпературен Winkler газификатор на който е монтиран циклон или центробежен сепаратор в горната част на газификатора, и тръба връщаща отделените в циклона частици обратно в долната част на газификатора. Изобретението има за цел да се избегнат известните недостатъци, свързани с монтирането и демонтирането на стартовата горелка при всяко пускане на газ-генератора. Това се постига чрез монтирането на плоски горелки в долната част на газ-генератора, които имат метална или керамичена клетъчната структура.

28. Werner Th., Pavone D., **Toporov D.**, Abraham R.; **“Gasifier”**, Pat. Nr.: WO 2014/187551 A1, DE 10 2013 105 149 A1

Изобретението се отнася до газ-генератор с кипящ слой, където материал съдържащ въглерод реагира химически при температура между 500°-1200° C с газификационен агент, като например кислород, въздух, пара, въглероден двуокис в резултат на което се формира синтезен газ.

Методът предлага едно икономическо и конструктивно просто решение, чрез което се гарантира оптималната температура в генератора, по-специално в зоните, където са разположени дюзите за кислород. Изобретението предлага монтирането на най-малко два отделни топлинни датчика (термодвойки) в огнеупорната стена на генератора. По този начин се гарантира непрекъснат контрол на температурата в различни области на генератора с цел избягване на прегаряне и формиране на шлакови образувания по стената на реактора.

29. Pavone D., **Toporov D.**, Abraham R.; **“Method for Heating a High Temperature Winkler Gasifier”**, Pat. Nr.: WO 2014/090599 A1, DE 10 2012 112 182 A1

Представен е метод за загряване на високо-температурен Winkler газификатор по време на стартиране на газификатора с използването на най-малко една газова горелка. Това се постига, като в горната част на генератора се инсталира горелка, чиито пламък е насочен надолу. Връзката между горната част на генератора и циклона се затваря и по този начин горещия поток от димни газове ще се насочи към долната част на генератора, а от там чрез рециркулиращата линия ще се насочи към циклона и т.н.

30. Jass K.-H, Abraham R., **Toporov D.**, Pavone D., Heinritz-Adrian M.; **“Method for Producing Synthesis Gas for Conversion to Products”**, Pat. Nr.: WO 2014/161640 A1, DE 10 2013 103 356 A1

Изобретението се отнася до метод за производство на синтезен газ за производство на химични продукти, по-специално за втечняване на газ. Метода предлага увеличаване на производството на синтезен газ, което може да се постигне по следния начин: а) подаване на въглищно гориво в реактор, в който горивото се преобразува в суров синтезен газ; б) пречистване на суровия газ, при което пречистения суров синтезен газ съдържащ метан се доставя като главен поток в процеса на синтеза за производство на синтезирани химични продукти като метанол, амониак, Fischer-Tropsch синтетични горива и т.н., в която един отработен газ е също произведен; в) конвертиране на произведения отработен газ и метана, който се съдържа в основния поток и който е инертен в процеса на синтеза в чист синтезен газ и доставка на този чист синтезен газ в основния поток на синтезния газ. По този начин се постига увеличаване на производителността с около 20%.

31. Abraham R., Pavone D., Schulze-Eckel R., **Toporov D.** Hafner S.; **“Device and Method for Introducing Oxygen into a Pressurised Fluidised-Bed Gasification Process”**, Pat. Nr.: WO 2014/026748 A1, DE 10 2012 016 086 A1

Изобретението се отнася до дюза за подаване на кислород, която има не по-малко от 3 коаксиални тръби, монтирани една в друга, всяка от които има поне един пръстеновиден отвор. Външната тръба е конструирана да транспортира прегрята пара, централната тръба е конструирана като един пръстеновиден отвор и вътрешната тръба е конструирана да транспортира кислород с температура не по-висока от 180 C. Температурен сензор е инсталиран в рамките на най-вътрешната тръба с цел да показва изменението на температурата на върха на дюзата. Предложената конструкция цели недопускане на кондензация на парата в дюзата като по този начин се осигури безпроблемно подаване на парата в газ-генератора и в резултат предпазване на дюзата от изгаряне.

(д-р Добрин Димитров Топоров)