

**Стеван Ђ. Немода, Милица Р. Младеновић, Александар М. Ерић,
Миљана Ј. Пајриќа, Дејан М. Буровић, Бранислав С. Рејић**

Лабораторија за термотехнику и енергетику,
Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

CFD нумеричка симулација флуидизационе коморе сагоревања базиране на Ојлер–Ојлер грануларном моделу

Оригинални научни рад

У раду је предложен дводимензијски модел нумеричке симулације сагоревања течних горива у флуидизованом слоју, који се заснива на двофлуидном Ојлер–Ојлер приципиу моделирања флуидизованог слоја, при чему се одређивање поља брзина гаса и честица у двофазним грануларним токовима заснива на аналозији са кинетичком теоријом гасова. Свеобухватан модел комплексних процеса у флуидизационој комори сагоревања подразумева, поред одређивања поља брзина гасне и честичне фазе, уградња енергетских једначина гасне и честичне фазе, као и транспортних једначина хемијских компоненти са изворним члановима услед конверзије компоненти. Бројни нумерички експерименти показују да избор коефицијената у изразима за силе трења приликом интеракције фаза има изузетан значај и мора се одређивати за сваки, значајно различит режим флуидизације, посебно. Урађене су серије нумеричких експеримената са симулацијом процеса сагоревања у флуидизованом слоју са и без значајног садржаја воде у гориву. Прорачуни су нестационарни, а моделирани временски период одговара времену за које гас прође кроз целу висину реактора. Изложени нумерички експерименти су првенствено примењени за потврду претпоставке која се односи на утицај садржаја влаге у гориву на кинетику реакција у флуидизованом ложистику.

Кључне речи: CFD моделирање, сагоревање, флуидизовани слој, грануларни ток, течна горива

Увод

Реактори на бази мехурастог гас-чврсте честице флуидизованог слоја (ФС) се користе у многим индустријским операцијама, као што су производња енергије и петрохемијски процеси. У последње време ови реактори се све чешће примењују за потребе термичке дезинтеграције (инсинерације) непотребних и отпадних индустријских продуката. Предности сагоревања неконвенционалних горива (са високим садржајем воде и других баластних материја) у флуидизованом слоју су

* Одговорни аутор; електронска адреса: snemoda@vinca.rs

вишеструке, Као прво, велики топлотни капацитет слоја, топлотна проводност и интензиван пренос топлоте између честица инертног материјала и горива омогућавају стабилан процес сагоревања широког опсега неконвенционалних горива, уз веома малу осетљивост на промене квалитета горива. Зона интензивног сагоревања заузима релативно малу запремину, јер већи део горива сагорева у самом слоју уз догоревање мањег дела у *splash* зони изнад слоја. Поред тога, флуидизационо ложиште може да ради на нижим температурама (850 °C) које су оптималне са аспекта смањене концентрације NO_x једињења у димним гасовима. Такође, ова ложишта су повољна и са аспекта ефикасности одсумпоравања кречњаком у самом ложишту [1], када је то неопходно. Због свега наведеног ова технологија је препоручена од стране ЕУ за сагоревање отпадних материја.

За потребе развоја технологије за спаљивање (инсинерације) талога из резервоара сирове нафте, као и других отпадних материја са карактеристикама нискокалоричних горива, на еколошки прихватљив начин у Институту Винча – Лабораторија за термотехнику и енергетику, обавља истраживања на развоју технологије за сагоревање неконвенционалних чврстих и течних горива, односно отпадних индустријских материја, у флуидизационом ложишту. У том циљу урађене су серије мерења на полуиндустријској експерименталној инсталацији са ФС за сагоревање тешког течног горива, као и на демонстрационо-експерименталном топлотном котлу (снаге око 300 kW) са флуидизационим ложиштем.

Упоредо са експерименталним методама све чешће се примењује нумеричка симулација за потребе развојног истраживања у области енергетике и процесне технике. Нумерички модели пружају велике могућности код уштеде средстава и времена приликом развоја постројења и технологија на овом пољу. Ипак, треба имати у виду да нумерички алати за симулацију сложених процеса процеса, као што су сагоревање у флуидизованом слоју, нису у потпуности развијени због потешкоћа приликом описивања релативно сложеног двофазног струјања и специфичности у процесима преноса топлоте и масе, заступљених код мехурасте гас-честице флуидизације. Поред тога, многи од постојећих нумеричких поступака нису прилагођени инжењерским потребама јер су релативно сложени и захтевају скупу рачунарску опрему, па нису погодни за развојну и инжењерску примену.

У литератури се могу издвојити два основна приступа моделирању гас – честице двофазних токова. Један од њих је Лагранж-Ојлеров приступ, који се често зове и моделирање посебних честица (*discrete particle modeling – DPM*) и код кога се решавају једначине кретања посебних честица, односно пакета честица (парцел) са истим карактеристикама. При томе се континуална (гасна) фаза моделира у складу са Ојлеровом приступу, док се трајекторије честица симулирају према Лагранжовом принципу [2-4]. За велике и сложене двофазне системе, као што је флуидизовани слој, Лагранж-Ојлеров приступ захтева веома моћне рачунарске ресурсе, због великог броја једначина које се решавају.

Други приступ моделирању гас – честице двофазних токова је тзв, дво-флуидни Ојлер-Ојлер приступ моделирању [5-8]. Код овог поступка, који се често означава као моделирање грануларног тока (*granular flow model – GFM*), основна претпоставка је да се обе фазе (честична и фазна) посматрају као два одвојена флуида уз моделирање сила отпора, како између фаза, тако и у оквиру честичне фазе, честице у грануларном току се могу посматрати по аналогији са кретањем молекула у гасу, што је примењено код дво-флуидног моделирања двофазних токова, па је у складу са

тима развијена кинетичка теорија грануларног тока (*kinetic theory of granular flow – KTGF*). Код ове теорије грануларних токова фигурише тзв, грануларна температура, која је мера стохастичких осцилација честица представља репрезент специфичне кинетичке енергије флуидизације брзина честица око средње вредности њихових брзина. Детаљан опис KTGF математичког моделирања се може наћи у [9].

Иако се користи детаљан математички модел за описивање комплексних процеса у FS, одређивање сила отпора у дво-флуидним моделима је у основи семиемпиријско. Сходно томе, неопходно је применити модел отпора, који коректно узима у обзир услове минималне брзине флуидизације, када се честице налазе у стању суспензије као резултат равнотеже интерфазних и запреминских сила. У том циљу се често примењује Syamlal-O'Brien-ов модел сила отпора приликом интерфазне интеракције [10] где коефицијент отпора између флуида и честице зависи само од порозности (удела гасне фазе), али не и од карактеристика флуидизације.

У раду је испитиван утицај константи модела сила отпора услед интерфазне интеракције за различите режиме флуидизације, при чему су мењани интензитет флуидизације, геометрија реактора, величина и материјал честица, мулти-компонентни и температурски услови флуида. Резултати истраживања такође обухватају нумеричке експерименте различитих режима сагоревања течног горива у флуидизованом слоју ложишта за сагоревање неконвенционалних течних горива. Поред тога, посебна пажња је посвећена утицају садржаја воде у гориву на положају зоне интензивног сагоревања и емисије CO.

Ојлер–Ојлер грануларни модел флуидизованог слоја

Ојлер–Ојлер приступ моделирања флуидизованог слоја претпоставља да се гас и густа фаза ФС (систем гас-честице при условима минималне флуидизације) посматрају као два флуида са различитим карактеристикама. У транспортним једначинама преноса количине кретања ефективног флуида, који представља густу фазу ФС, моделира се интеракција флуид-честице при условима минималне брзине флуидизације, као и интеракција између самих честица. Притисак је исти за све фазе при чему се усваја притисак континуалне фазе. Моментна једначина и једначина континуитета се решава за сваку фазу, при чему се за грануларну фазу рачунају грануларна температура (флуидизацијска енергија честица) као и вискозност услед напона смицања и запреминска вискозност, који се одређују применом кинетичке теорије гасова на грануларно струјање. Такође је потребно дефинисати коефицијенте за рачунање отпора међуфазног струјања.

За моделирање интеракција између гасне и честице фазе, у оквиру предложеног Ојлер–Ојлер грануларног приступа моделирању флуидизованог слоја, примењене су рутине садржане у модулима комерцијалног CFD програмског пакета FLUENT 6.3.26. Овај код дозвољава присуство више фаза у оквиру једне контролне запремине нумеричке мреже, уводећи појам запреминског удела сваке фазе. Чврста фаза представља грануларни слој сачињен од сферних честица, униформног пречника. Једначине одржања масе и количине кретања се решавају за сваку фазу посебно.

Основне и конститутивне једначине двофлуидног грануларног модела флуидизованог слоја се могу представити следећим сетом израза [11]:

– једначина континуитета гасне фазе

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + (\alpha_g \rho_g \bar{u}_g) = 0 \quad (1)$$

– једначина континуитета чврсте фазе

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s) = 0 \quad (2)$$

– закон одржања количине кретања гасне фазе

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{u}_g) + (\alpha_g \rho_g \bar{u}_g \bar{u}_g) + \alpha_g p - \bar{\tau}_g - \alpha_g \rho_g \bar{g} - K_{gs}(\bar{u}_g - \bar{u}_s) \quad (3)$$

– закон одржања количине кретања врсте фазе

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{u}_s) + (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s \bar{u}_s) + \alpha_s p - \bar{\tau}_s - \alpha_s \rho_s \bar{g} - K_{gs}(\bar{u}_g - \bar{u}_s) \quad (4)$$

При чему су тензори напона гасне и грануларне фазе, односно:

$$\bar{\tau}_g = 2\mu_g \bar{S}_g - (\lambda_g - \frac{2}{3}\mu_g) \bar{u}_g \bar{u}_g \quad (5)$$

$$\bar{\tau}_s = p_s \bar{I} - 2a_s \mu_s \bar{S}_s - a_s (\lambda_s - \frac{2}{3}\mu_s) \bar{u}_s \bar{u}_s \quad (6)$$

где је:

$$\bar{S}_k = (1/2)(\bar{u}_k + (\bar{u}_k)^T)$$

$k = g, s$ – тензор брзина деформације,

$$p_s = 2\rho_s \Theta_s (1 + e_s) \alpha_s^2 g_{0s}$$

– притисак грануларне фазе [12], g_{0s} – функција радијалне дистрибуције

$$g_0(\alpha_s) = \frac{1}{1 - \alpha_s} - \frac{3\alpha_s}{2(1 - \alpha_s)^2}$$

e_s – коефицијент реституције.

Запреминска вискозност λ_s је мера отпора чврсте честице експанзији односно компресији и према Lun *et al.* моделу [13] се дефинише као:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0s} (1 - e_s) \frac{\Theta_s}{\pi}^{\frac{1}{2}}$$

Вискозност грануларне фазе састоји се од смицајне μ_s и запреминске вискозности λ_s . Смицајна вискозност је последица транслаторног кретања (кинетичка вискозност $\mu_{s,kin}$), међусобног сударања честица (колизиона вискозност $\mu_{s,coll}$) и фриксионе вискозности ($\mu_{s,fr}$): $\mu_s = \mu_{s,kin} + \mu_{s,coll} + \mu_{s,fr}$.

Према Syamlal-овом моделу [12] кинетичка вискозност је:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{12 \eta} \left(1 - \frac{8}{5} \eta \frac{3\eta}{2 \alpha_s g_{os}} \right), \quad \eta = \frac{1}{2} \alpha_s \quad (7)$$

а за колизиону вискозност важи следећи израз: $\mu_{s,coll} = 8/5 \alpha_s \rho_s d_s g_{os} \eta (\Theta_s / \pi)^{1/2}$. Према Шеферовом моделу [14] се може дефинисати фриксиона вискозност: $\mu_{s,fr} = (p_s \sin \phi) / (I_{2D})^{1/2}$, где је p_s – притисак грануларне фазе, ϕ – унутрашњи угао трења, и I_{2D} – друга инваријанта девијаторског дела тензора напона.

Последњи члан у једначинама (3) и (4) је последица силе отпора интерфазне интеракције, при чему коефицијент отпора између флуида и чврсте (грануларне) фазе, према Syamlal-O'Brien моделу [10], гласи:

$$K_{gs} = \frac{3 \alpha_g \alpha_s \rho_g}{4 u_{r,s}^2 d_s} C_D |\vec{u}_s - \vec{u}_g|, \quad C_D = 0.63 \frac{4.8}{\sqrt{\text{Re}_s}}, \quad \text{Re}_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{u}_s - \vec{u}_g|}{\mu_g} \quad (8)$$

$u_{r,s}$ је брзина при којој честица лебди у флуидизованом слоју:

$$u_{r,s} = 0.5(A - 0.06 \text{Re}_s) \sqrt{0.06 \text{Re}_s^2 - 0.12 \text{Re}_s - 2B} / A \quad (9)$$

$$A = \alpha_g^{4.14}, B = \begin{cases} 0.8 \alpha_g^{1.28} & \text{за } \alpha_g < 0.85 \\ \alpha_g^{2.65} & \text{за } \alpha_g > 0.85 \end{cases}$$

Грануларна температура полазећи од једначина конзервације флукутирајуће грануларне енергије гласи:

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} \rho_s \alpha_s \Theta_s + \rho_s \alpha_s \vec{u}_s \Theta_s - \left(\rho_s \bar{\bar{I}} \bar{\bar{v}} \right)_s / \vec{u}_s - (k_{\Theta_s} - \Theta_s) \gamma_{\Theta_s} = \phi_{gs} \quad (10)$$

Коефицијент дифузије или кондуктивност грануларне температуре је према Syamlal-у [12]:

$$K_{\Theta_s} = \frac{15 \alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left(1 - \frac{12}{5} \alpha_s g_{os} \eta^2 (4\eta - 3) \right) \quad (11)$$

Дисипацију грануларне енергије услед нееластичних судара честица Lun *et al*, [13] дефинишу на следећи начин: $\gamma_{\Theta_s} = [12(1 - e_s) g_{os} / d_s (\pi)^{1/2}] \rho_s \alpha_s \Theta_s^{3/2}$. Размена кинетичке енергије између фаза се одређује преко: $\phi_{gs} = -3K_{gs} \Theta_s$.

Нумеричка симулација флуидизационог реактора при различитим режимима флуидизације

Нумерички експерименти са симулацијом мехурастог ФС, изведени у оквиру овог рада, показују да је избор константи коефицијента B у једначинама (8 и 9) Syamlal-O'Brien-овог модела сила отпора приликом интерфазне интеракције, у оквиру двофлуидног поступка математичког модела грануларних токова, од великог значаја на резултат предвиђања токова обе фазе и формирања мехура. У том циљу обављен је низ нумеричких симулација 2-D флуидизационог реактора са различитим величинама и густинама честица, као и при различитим температурама и саставом гасне фазе.

Нумеричко решавање основних једначина Fluent-овог Ојлер–Ојлер грануларног модела (једн., 9–11), се такође обавља применом методе контролних запремина, при чему се међусобни утицај и корекција брзина и притиска обавља поступком за вишефазно струјање применом *Phase Coupled SIMPLE* (PCSIMPLE) алгоритма. Дискретизација конвективних чланова се обавља по узводној шеми другог реда.

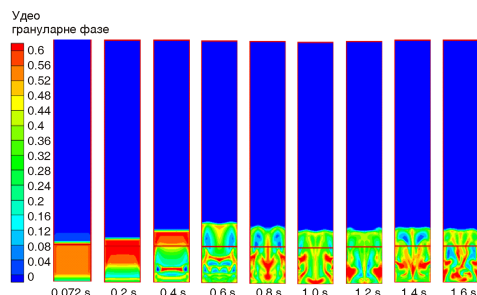
Прорачуни су нестационарни са временским кораком од 1 ms, који је омогућио релативно брзу конвергенцију са максимум 100 итерација по једном временском кораку, при чему конвергенциони критеријум износи $1 \cdot 10^{-3}$. Број временских корака, односно укупно време симулације, је одређивано на основу времена потребног за пролазак флуида кроз целокупну висину коморе сагоревања. Нумеричка мрежа се састоји од преко 13000 чворова.

Модел сила отпора приликом интерфазне интеракције је инкорпориран у сет једначина целокупног модела грануларног тока уградњом специјализованих потпрограма у “C”-језику (*user defined functions*), којима корисник може надоградити поједине делове Fluent-овог програмског кода.

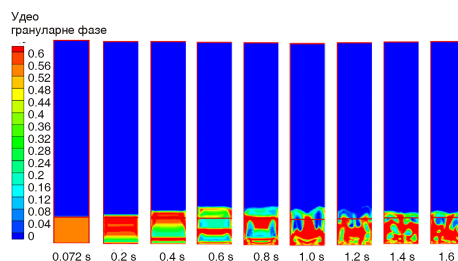
Предложени CFD модел флуидизованог слоја је примењен на три режима флуидизационог реактора, чије су основне карактеристике приказане у таб. 1. При томе је за сва три режима степен флуидизације имао вредност приближно 3. Вредности константи 0,8 и 2,65 коефицијента B основног Syamlal-O'Brien-овог модела сила отпора су адаптиране да би се што реалније симулирале карактеристике разматраних флуидизационих режима. У складу са тиме, ове константе су за режим 1 биле 0,281632 и 9,07696, а за режиме 2 и 3, 3,2 и 0,6625, односно.

Таблица 1. Режији флуидизације

Режим	Димензије реактора [m]	Висина ФС [m]	Пречник честица [mm]	Густина честица [kgm^{-3}]	Састав гаса за флуидизацију	Улазна брзина гаса за флуидизацију [ms^{-1}]	Температура [K]
1	1 0,15	0,15	0,3	2600	ваздух	0,25	300
2	0,23 0,4	0,3	0,8	2400	ваздух	1	300
3	0,23	0,3	0,8	2400	Ваздух ($\text{O}_2 + \text{N}_2$)	1	1200

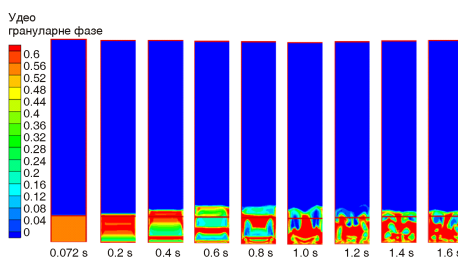


Слика 1. Развој поља запреминског удела честичне фазе код режима 1 флуидизације



Слика 2. Развој поља запреминског удела честичне фазе код режима 2 флуидизације

Слика 3. Развој поља запреминског удела честичне фазе код режима 3 флуидизације



Резултати нумеричких симулација сва три режима дати су на сл. 1–3, које приказују дистрибуцију запреминског удела честичне фазе (α_g) у различитим фазама развоја мехурастог флуидизованог слоја.

2-D симулација сагоревања течног горива у флуидизационој комори сагоревања

Свеобухватан модел комплексних процеса у флуидизационом ложишту се може формирати надградњом предложеног дво-флуидног модела ФБ (погл. Ојлер–Ојлер грануларни модел ФС), у који се морају уврстити енергетске једначине за обе фазе као и транспортне једначине одржања хемијских врста, са изворним чланом услед конверзије хемијских компонената. Додатни сет једначина, које употпуњују модел сагоревања у ФС, представљен је изразима (12)–(13):

– Енергетска једначина гасне фазе

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g c_{p,g} T_g) + (\alpha_g \rho_g \bar{u}_g c_{p,g} T_g) - \frac{k_t}{c_{p,g}} T_g - (\alpha_g \rho_g D_{i,m} c_{p,i} T_g - Y_i) h(T_s - T_g) \quad (12a)$$

– Енергетска једначина честичне фазе

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s c_{p,s} T_s) - (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s c_{p,s} T_s) - \frac{k_s}{c_{p,s}} T_s = h(T_s - T_g) \quad (12b)$$

– Једначине одржања хемијских компоненти

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g Y_i) - (\alpha_g \rho_g \bar{u}_g Y_i) - (\alpha_g \rho_g D_{i,m} Y_i) = R_i \quad (13)$$

За размену топлоте између фаза (последњи члан у једначинама (12a) и (12b) примењен је запремински коефицијент прелаза топлоте, који је дефинисан у раду [15]. Коефицијент топлотне проводљивости грануларне (честичне) фазе одређиван је на основу Syamlal и Gidaspow формулације [16]. Овде треба напоменути да је на резултат нумеричких експеримената у великој мери утицао и избор ефективног коефицијента топлотне проводљивости смеше гасне и грануларне фазе.

Изворни члан R_i у једначини (13) који садржи брзину хемијске реакције компоненте i , може се дефинисати, применом Архениусовог израза за константу брзине реакције, на следећи начин:

$$R_i = k_{o,i} \exp \left(-\frac{E_{a,i}}{RT_g} \right) [Y_i]^{a_1} [Y_j]^{a_2} \quad (14)$$

Пошто је приказани рад саставни део обимних истраживања сагоревања неконвенционалних горива и отпадних индустријских материјала, као гориво у обрађеним нумеричким експериментима коришћено је дизел гориво ($C_{10}H_{22}$) са високим садржајем воде, као нека врста модел-горива, које представља отпадне сагориве течне материје из индустрије.

Листа реакција, заједно са константама израза за брзину реакције, које фигуришу у изворним члановима сета једначина (13) одржања хемијских компоненти, је приказана у таб. 2, таблица садржи две реакције које нису стриктно хемијске, јер дефинишу брзину деволатизације горива и генерисање водене паре из воде у гориву, Почетне вредности коефицијента реакција из таб. 2, су преузете из [17, 18].

Таблица 2. Листа хемијских реакција

Број	Реакција Формула	Преекспоненцијални коефицијент k_o	Енергија активације E_a [J/kmol]	Ред реакције првог реактанта a_1	Ред реакције другог реактанта a_2
1	$C_{10}H_{22(течност)} \rightarrow C_{10}H_{22(пара)}$	11,2	1,7E6	1	–
2	$C_{10}H_{22} + 10,5 O_2 = 10CO + 11H_2O$	2,587e+10	1,256e+08	0,25	1,5
3	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	1,0E12	1,0E8	1	1
4	$H_2O_{(течност)} \rightarrow H_2O_{(пара)}$	22,39	1,7E6	1	–

Треба нагласити да се овде ради о квази трофазном систему: течна вода, гасови са воденом паром и честице, при чему се узима да гориво тренутно испари. Практично се гориво на излазу из млазнице посматра као смеша течне воде и гасовитих испарљивих компонената. Нумерички систем није стварно трофазан јер се користе једначине само за две фазе: флуидну, коју чине течна вода са гасовима (водена пара, испарљиве и ваздух) и честичну, коју чини грануларни слој честица.

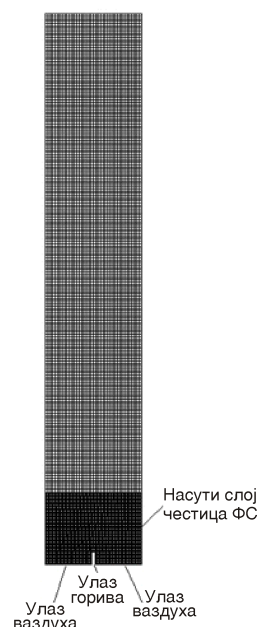
Резултати нумеричке симулације сагоревања течног горива у флуидизационом реактору

Обрађени нумерички експерименти са сагоревањем течног горива у ФС у оквиру првих истраживања изведени су у циљу испитивања ефеката утицаја садржаја воде у течном гориву на кинетику сагоревања у ФС.

У оквиру експеримената у пилот ложишту Лабораторије за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча” са дозирањем течног горива у ФС, уочено је повлачење зона интензивног сагоревања ка областима дубље испод површине слоја приликом сагоревања течног горива са значајним садржајем воде, у односу на гориво без садржаја воде [19, 20]. На основу оваквих резултата експеримената може се закључити да вода у гориву повећава глобалну брзину реакције сагоревања у ложишту са ФС, у коме се гориво дозира бочно у слој. Ова појава је скопчана са наглим преласком воде у парно стање приликом уласка у загрејан ФС (900 °С), што изазива проширење улазног млаза и боље мешање горива са оксидатором (ваздухом), као и разбијање течног (још неиспареног) горива на ситне капи и повећање површине додира горива са околином. Овај ефекат је примећен и код лако и теже испарљивих течних горива, при чему код лако испарљивих горива ефекат бољег мешања волатила горива са оксидатором, услед наглог преласка воде у парно стање и проширења улазног млаза, има израженији утицај од ефекта разбијања течног горива на ситне капи. У раду су приказани резултати нумеричких експеримената, обављених применом Fluent-овог грануларног модела ФС, у циљу потврде претпоставке о ефекту бољег мешања волатила горива са оксидатором када се лако испарљиво гориво, које садржи знатну количину воде, дозира у флуидизационо ложиште. Први покушаји нумеричке симулације наведеног феномена су објављени у раду [21].

Шематски приказ геометрије нумерички симулираног флуидизационог реактора је дата на сл. 4, при чему су висина и ширина реактора са флуидизованим слојем износиле 2,3 m и 0,4 m, односно. Моделиран грануларни слој се састоји од честица пречника 0,8 mm и густине 2600 kg/m³, висина слоја у насутом стању је 0,3 m.

Гориво се дозира кроз вертикалну млазницу, висине 0,05 m, постављене аксијално на дну реактора. Ваздух је дозирован ануларно, као што је то приказано на сл. 4. Улазна температура горива и ваздуха је била амбијентална (300 K).



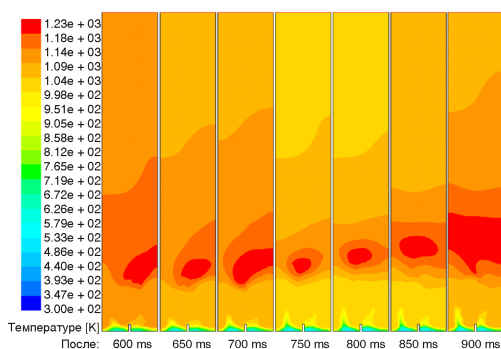
Слика 4. Скица нумеричке реже флуидизационог реактора

Као што је већ напоменуто, тест гориво је био дизел са различитим садржајем воде. Представљени нумерички експерименти су обављени са 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, и 0,4 масених удела воде у гориву. Улазни масени проток ваздуха и чистог дизела је био 0,11627 kg/s и 0,002586 kg/s, односно, код свих прорачуна, што одговара коефицијенту вишка ваздуха од $\lambda_v = 3$. У случајевима када је гориво садржавало од 0,1 до 0,4 масених удела воде укупни улазни масени проток горива је био: 0,00287, 0,00323, 0,00370, и 0,00431 kg/s. Поступак прорачуна нумеричке симулације ФС, као и нумерички метод, примењени су у складу са процедуром описаном у претходном поглављу. Нумеричка мрежа, чија је скица приказана на сл. 4, састоји се од 13130 чворова, при чему је 3430 чворова смештено у зону насутог слоја честица.

Прорачунска процедура се састоји од два корака, при чему се у првом кораку формирају параметри развијеног флуидизованог слоја, загрејаног на температуру од 1200 К, у складу са прорачунима приказаним у претходном поглављу (сл. 3). Поља вредности варијабли, израчунатих у првом кораку симулације, употребљена су као иницијални услови за други корак прорачуна. Поред тога, у другом прорачунском кораку измењени су гранични услови улазних протока горива, уз активирање изворних чланова у транспортним једначинама одржања хемијских компоненти. Сваки од прорачунских корака обухвата период симулације у трајању од приближно 2,5 s, при чему други прорачунски период почиње са увођењем горива, после успостављања развијене турбуленције и завршава се након 2,5–3 s. После овог периода може се усвојити да наступа квазистационаран период јер су даље промене, у основи периодичне, али у средњем обиму са занемарљивим променама.

Симулација нестационарног температурског поља у ФС

Прорачунати распореди температура добијени нумеричком симулацијом сагоревања чистог дизел горива у ФС приказани су на сл. 5. Поља температура гасова са сл. 5 представљају термичке карактеристике флуидизационог реактора за период почев од 600 ms после почетка увођења горива у загрејани ФС. Температурско поље у зони интензивних реакција у оквиру флуидизационе коморе сагоревања, како се са сл. 5 види, хармонички се мења у времену, па се у оваквим ложиштима могу разматрати квази-стационарни услови.



Слика 5. Развој температурског поља у ФС при сагоревању чистог дизел горива

Утицај присуства влаге у гориву

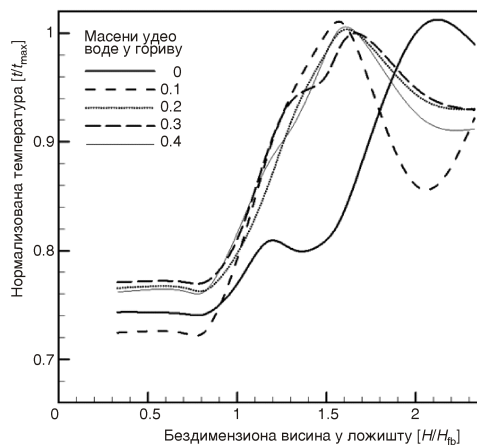
Израчунати профили усредњених по времену температура по висини флуидизационог реактора, за свих пет режима (без присуства воде у гориву и са присуством воде у гориву, чија се вредност масених удела кретала од 0,1 до 0,4) су приказани на сл. 6. Пошто радијални профили температура нису симетрични, већ се стохастички мењају у времену, разматране су масено усредњене вредности радијалних температура. На ординати сл. 6 је норма-

лизована температура (температура подељена са максималном температуром (T_{\max}) за дати режим), а на апсциси је бездимензиона висина у реактору, која представља висину подељену са висином насутог слоја (H_{fb}) у ложишту. Као што се са сл. 6 може видети, максималне температуре на профилима по висини реактора су више померене ка површини ФС код случајева сагоревања горива које садржи воду. Из овога се може закључити да присуство воде у гориву доводи до повлачења зоне интензивног сагоревања ка нижим зонама реактора, тј. до ефикаснијег сагоревања, које захтева мању запремину зоне интензивног сагоревања. Са приложених дијаграма се, такође може закључити да је запажени ефекат повлачења зона сагоревања датог горива, најизраженији када гориво садржи око 10 масених процената воде.

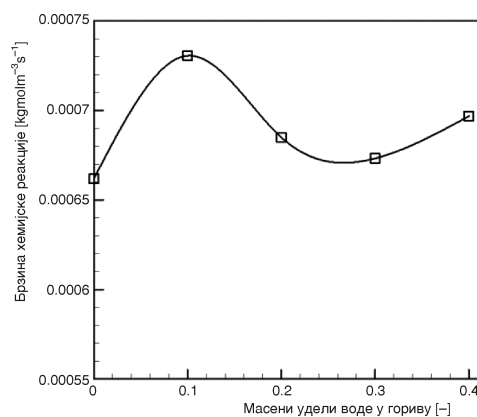
Ефекат утицаја садржаја воде у течном гориву, може да се анализира и праћењем усредњених вредности глобалне кинетике реакција свих 5 симулираних режима сагоревања у флуидизационом реактору. Слика 7 приказује зависност усредњених вредности глобалних брзина сагоревања (за период од последње 2 s за сваки режим) у зависности од садржаја воде у гориву. Како се са дијаграма види, глобалне брзине реакција код режима са водом у гориву су веће него код случаја сагоревања чистог горива, при чему је кинетика сагоревања најинтензивнија за случај када масени удео воде у гориву има вредност 0.1.

Запажени ефекат утицаја воде у гориву на глобалну кинетику сагоревања течног горива у ФС може да се објасни побољшањем контакта између горива и оксидатора услед експанзије водене паре, у већем броју нумеричких чворова симулиране зоне сагоревања. С друге стране, већи садржај воде у гориву доводи до снижења локалних температура а тиме и брзина реакција (у складу са Архенијусовим изразом). Због ова два супротна ефекта, дијаграм на сл. 7 има максимум.

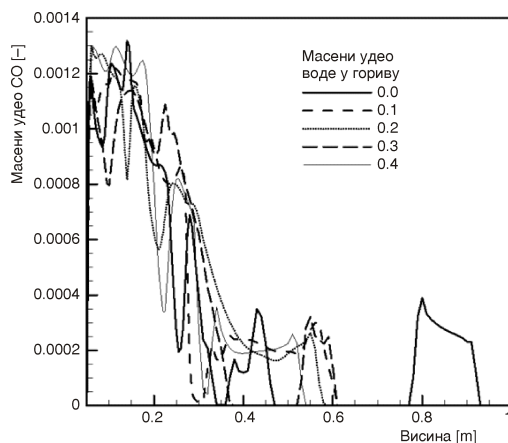
Слика 8 садржи масено усредњене по попречном пресеку реактора профиле масених удела CO , за период од последње 2.5 s за сваки режим. Прорачунати профиле масених удела CO показују да код режима са горивом без воде концентрације CO добија занемарљиву вредност на висини од 0.9 m од дна реактора, што одговара бездимензионој висини 3, док код режима са присуством воде у гориву концентрација CO постаје блиска



Слика 6. Предвиђање профила средњих температура дуж висине ложишта



Слика 7. Усредњене сумарне брзине хемијских реакција сагоревања дизел горива



Слика 8. Предвиђање профила концентрација CO дуж висине ложишта

флуида са различитим карактеристикама за које се посебно рачунају једначине континуитета и преноса количине кретања, при чему се за грануларну фазу рачунају грануларна температура као и вискозност услед напона смицања и запреминска вискозност, уз примену Syamlal-O'Brien модела сила отпора између фаза.

За реалније нумеричко праћење флуидо-динамичких карактеристика мехурастог флуидизованог слоја са хемијским реакцијама, неопходно је прилагодити константе коефицијента B из израза Syamlal-O'Brien-овог модела сила отпора између фаза, једн. (8) и (9).

Нумерички експерименти, представљени у раду, су у првом реду примењени на анализу утицаја присуства воде у модел гориву (дизел) на кинетику реакција у флуидизационој комори сагоревања течного горива. При томе су прорачуни обрадили случајеве сагоревања дизел горива са 0, 0,1, 0,2, 0,3, и 0,4 масена удела воде, а од резултата симулације приказани су: вертикални профили температура, осредњене вредности глобалних брзина хемијских реакција и вертикални профили концентрација CO у комори сагоревања.

Сви анализирани резултати нумеричких симулација указују да присуство воде у гориву повећава сумарну брзину хемијских реакција, што се првенствено може видети у повлачењу зоне са максималним температурама, тј. интензивног сагоревања, ка нижим зонама реактора и у повећању сумарних брзина хемијски реакција код режима где гориво садржи воду.

Запажени ефекат утицаја воде у гориву на глобалну кинетику сагоревања течного горива у ФС може бити објашњен интензивирањем контакта између горива и оксидатора услед експанзије водене паре. Међутим, већи садржај воде у гориву доводи до снижења локалних температура а тиме и брзина реакција, па ови ефекти имају свој максимум, тј. најизраженији су код режима са 10 масених процената воде у гориву, за разматране случајеве сагоревања дизел горива.

Захвалност

Овај рад је реализован у оквиру пројекта "Унапређење индустријског постројења са флуидизованим слојем у оквиру развоја технологије за енергетски

нули већ на бездимензионој висини 2. Ово такође може да се објасни побољшањем контакта између горива и оксидатора услед експанзије водене паре, што доводи до повећања брзине реакције 3 у таб. 2.

Закључак

У раду је представљен дводимензијски CFD модел флуидизованог слоја, заснован на двофлуидном поступку симулације ФС у складу са Ојлер-Ојлер грануларним моделом ФС. Предложени грануларни модел подразумева да се гас и густа фаза FS (грануларни слој) посматрају као два

ефикасно и еколошки оправдано сагоревање различитих отпадних материја у флуидизованом ложишту", TR33042, Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Ознаке

C_D	– коефицијент отпора
$C_{p,g}$, $C_{p,s}$	– специфичне топлоте гаса и честица
$D_{i,m}$	– дифузиони коефицијент компоненте i
d_s	– средњи пречник честице
E_a	– енергија активације
e_s	– коефицијент реституције честица између судара
\vec{g}	– гравитационо убрзање
H	– висина
H_{fb}	– висина насутог слоја
g_{os}	– функција радијалне дистрибуције
\underline{l}	– коефицијент прелаза топлоте
I	– јединични тензор
I_{2D}	– друга инваријанта девијатора тензора
K_{gs}	– коефицијент отпора између флуида и чврсте (грануларне) фазе
k_t	– термичка проводност
k_o	– пре-експоненцијални коефицијент
k_s	– дифузиони коефицијент грануларне енергије
p	– притисак
R	– универзална гасна константа
\bar{S}_k	– тензор брзине деформације
T	– апсолутна температура
T_{max}	– максимална температура за дати режим
\vec{u}	– вектор брзине
Y_i	– масени удео компоненте i

Грчки симболи

α	– запремински удео фазе
γ_s	– дисипација грануларне енергије услед нееластичних судара честица
Θ_s	– грануларна температура
ρ	– густина
λ	– запреминска вискозност
λ_v	– коефицијент вишка ваздуха
$\mu_{s, kin}$	– кинетичка компонента смицајне вискозности грануларне фазе
$\mu_{s, cool}$	– компонента смицајне вискозности услед судара
$\mu_{s, fr}$	– фрикциона вискозност
$\bar{\tau}$	– тензор напона фазе
ϕ	– угао међучестичне колизије
ϕ_{gs}	– интензитет преноса кинетичке енергије

Индекси

b	– флуидизован слој
g	– гасна фаза
s	– честице, чврста фаза

Литература

- [1] Saxena, S. C., Jotshi, C. K., Fluidized Bed Incineration of Waste Materials, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 20 (1994), 281-324
- [2] Gera, D., et al., Computer Simulation of Bubbles in Large-Particle Fluidized Beds, *Powder Technol.*, 98 (1998), 3847
- [3] Ibsen, C., et al., Comparison of Multifluid and Discrete Particle Modelling in Numerical Predictions of Gas Particle Flow in Circulating Fluidized Beds, *Powder Technol.*, 149 (2004), pp. 29-41
- [4] Bokkers, G. A., et al., Mixing and Segregation in a Disperse Gas-Solid Fluidized Bed: A Numerical and Experimental Study, *Powder Technol.*, 140 (2004), pp. 176-186
- [5] Di Renzo, A., Di Maio, F. P., Homogeneous and Bubbling Fluidization Regimes in Dem-Cfd Simulations: Hydrodynamic Stability of Gas and Liquid Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, 62 (2007), pp. 116-130
- [6] Enwald, H., et al., Simulation of the Fluid Dynamics of a Bubbling Fluidized Bed, Experimental Validation of the Two-Fluid Model and Evaluation of a Parallel Multiblock Solver, *Chem. Eng. Sci.*, 54 (1999), 311-328
- [7] Cammarata, L., et al., 2d and 3d CFD Simulations of Bubbling Fluidized Beds Using Eulerian-Eulerian Models, *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 1 (2003), 48, article ???
- [8] Behjat, Y., Shahhosseini, S., Hashemabadi, S. H., CFD Modeling of Hydrodynamic and Heat Transfer in Fluidized Bed Reactors, *Int Commun Heat Mass Transfer*, 35 (2008), 357-368
- [9] Gidaspow, D., *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*, Academic Press, San Diego, Cal., USA, 1994
- [10] Syamlal, M., O'Brien, T. J., Simulation of Granular Layer Inversion in Liquid Fluidized Beds, *Int. J. Multiphase Flow*, 14 (1988), 4, 473-481
- [11] Vejahati, F., et al., CFD Simulation of Gas-Solid Bubbling Fluidized Bed: A New Method for Adjusting Drag Law, *Can. J. Chem. Eng.*, 87 (2009), 19-30
- [12] Syamlal, M., Rogers, W., O'Brien, T. J., MFIX Documentation Theory Guide, U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy Morgantown Energy Technology Center, Morgantown, W. Va., USA, 1993
- [13] Lun, C. K. K., et al., Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field, *J. Fluid Mech.*, 140 (1984), 223-256
- [14] Schaeffer, D. G., Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow, *J. Diff. Eq.*, 66 (1987), 19-50
- [15] Gunn, D. J., Transfer of Heat or Mass to Particles in Fixed and Fluidized Beds, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21 (1978), 467-476
- [16] Syamlal, M., Gidaspow, D., Hydrodynamics of Fluidization: Prediction of Wall to Bed Heat Transfer Coefficients, *AIChE J.*, 31 (1985), 127-135
- [17] Penyazkov, O. G., Autoignitions of Diesel Fuel/Air Mixtures Behind Reflected Shock Waves, *Proceedings European Combustion Meeting*, 2009
- [18] Brennan, J. F., Shapiro, J. S., Watton, E. C., Evaporation of Liquids: A Kinetic Approach, *J. Chem. Educ.*, 51 (1974), 4, p. 276
- [19] Mladenović, M. R., et al., Vertical Temperature Profile in the Installation for the Combustion of Waste Fuels in the Fluidized Bed furnace, 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, *Proceedings on CD-ROM*, ISBN 978-86-6055-018-9, pp. 490-499, Sokobanja, Serbia, October 18-21, 2011
- [20] Младеновић, М. Р., Вертикални профил температуре у инсталацији за сагоревање отпадних горива са флуидизованим слојем, *Термоинженеринг*, XXXVIII, 2012, 1, 11-24
- [21] Nemoda, S., Numerical Simulation of Gas and Liquid Fuel Feeding in a Fluidized Bed Using Fluid-Porous Medium Model and Two-Fluid Euler-Euler Granular Flow Model, International Conference Power Plants 2012, October 30-November 2nd 2012, Zlatibor, Serbia, *Proceedings on CD ROM*, pp. 1150-1169, ISBN 978-86-7877-021-0

Abstract

**Fluidized Combustion Chamber CFD Simulation
Based on Euler-Euler Granular Flow Model**

by

*Stevan Dj. NEMODA, Milica R. MLADENVIĆ, Aleksandar M. ERIĆ,
Milijana J. PAPIKA, Dejan M. DJUROVIĆ, and Branislav S. REPIĆ*

Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

A comprehensive 2-D numerical model of the bubbled fluidized bed with combustion of liquid fuels is proposed in the paper. The proposed numerical model is based on the Eulerian-Eulerian granular flow modeling with the kinetic theory of granular flow. The model includes the following basic governing equations: the continuity equations of the solid and gas phase, the momentum conservation equations of the gas and solid phase, the energy equations of gas, and the solid phase and conservation equations for chemical components. The choice of the semi empirical constants of the inter-phase interaction drag force model is significant and these constants must be adjusted for each particular regime of fluidization. Presented numerical experiments primarily were applied to verification of the assumptions about the impact of water content in a liquid fuel on FB combustion intensity. The presented numerical experiments were carried out with 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, and 0,4 mass fractions of water in the diesel fuel. Within the analysis of the results of the numerical simulation of fluidised bed combustion of the fuel with different water contents, the temperature profiles, the kinetic ratio of diesel fuel oxidation and CO concentration profiles were considered.

Key words: *CFD model, combustion, fluidized bed, granular flow, liquid fuels*

*Corresponding author, e-mail: snemoda@vinca.rs

Рад примљен: 18. децембра 2013.
Рад ревидиран: 5. марта 2014.
Рад прихваћен: 10. јануара 2014