



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



мр Боривој Степанов, дипл. инж. маш.

**МОДЕЛОВАЊЕ ПРОЦЕСА СТРУЈАЊА,
САГОРЕВАЊА И ПРЕНОСА ТОПЛОТЕ У
ГАСНОМ ПРОСТОРУ ЛОЖИШТА КОТЛА
ЛОЖЕНИМ ПШЕНИЧНОМ СЛАМОМ
ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Нови Сад, 2014.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Боривој Степанов
Ментор, МН:	Др Иван Пешењански, ванредни проф.
Наслов рада, НР:	Моделовање процеса струјања, сагоревања и преноса топлоте у гасном простору ложишта котла ложеним пшеничном сламом
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2014.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	4/ 109/ 94/ 24/ 76/ 0/ 0
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Термоенергетика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Обновљиви извори енергије, Сагоревање, Ефикасност, Прорачунска динамика флуида
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Постоји потреба за развојем котлова који сагоревају ефикасно биомасу и који задовољавају све строжије еколошке прописе. Да би се ови циљеви постигли поред експерименталног метода и класичних прорачуна веома корисна је примена савремених софтвера из области Прорачунске динамике флуида (CFD). Једна од битних карактеристика квалитетног сагоревања је време задржавања гасова у ложишту. Ова величина се не може израчунати, а њено експериментално одређивање је упитно. У овом раду је развијен метод прорачуна времена задржавања гасова помоћу CFD. Посматрано је изотермно струјање, при чему је у нумеричким експериментима разматран утицај геометријских и погонских карактеристика на време задржавања гасова. Установљено је да угао млазница секундарног ваздуха, као и брзина секундарног ваздуха доводе до 20 процентне релативне разлике средњег времена задржавања између најбољег и најлошијег случаја. По питању положаја и димензија прегрлада овај распон је 30 процената.
Датум прихватања теме, ДП:	27.06.2012.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Душан Узелац, ред. проф. Члан: Др Миладин Бркић, ред. проф. Члан: Др Милан Мартинов, ред. проф. Члан: Др Радивоје Бјелаковић, ред. проф. Члан, ментор: Др Иван Пешењански, ванр. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic Publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Borivoj Stepanov
Mentor, MN :	Professor Ivan Pešenjanski, PhD
Title, TI :	Modeling of flow, combustion and heat transfer in the freeboard of the boilers' furnace fired with wheat straw
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	4/ 109/ 94/ 24/ 76/ 0/ 0
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Thermal power engineering
Subject/Key words, S/KW :	Renewable energy sources, Combustion, Efficiency, Computational fluid dynamics
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg D. Obradovića 6, N. Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>There is a need for development of boilers for burning biomass, that are energy efficient, and additionally satisfying increasingly stringent ecological regulations. In order to reach these goals beside usage of classic approaches, experiments and standard calculations, it would be very useful to use contemporary softwares from the field of Computational fluid dynamics. One of the important characteristics of proper combustion is residence time of gases in the boilers furnace. This parameter can not be calculated, and its measurement is very difficult. In this work method for its determination has been developed using CFD. Problem analysed included isothermal flow, and variations in the geometric and plant parameters. Results of numeric experiments are: angle of the secondary air jets as also velocity of the secondary air results in 20 percent in difference expressed as relative average gas residence time between best and worst case. With baffles, its position and length this difference was 30 percents.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	27.06.2012.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Dušan Uzelac, PhD, Full Professor
Member:	Miladin Brkić, PhD, Full Professor
Member:	Milan Martinov, PhD, Full Professor
Member:	Radivoje Bjelaković, PhD, Full Professor
Member, Mentor:	Ivan Pešenjanski, PhD, Assistant Professor
	Mentor's sign

САДРЖАЈ

1.0 Увод.....	1
1.0.1 Биомаса као енергент	1
1.0.2 Опште термотехничке карактеристике биомасе	2
1.1 Преглед савремене литературе.....	7
1.1.1 Развој уређаја за коришћење биомасе за енергетску сврху	7
1.1.2 Примена повратног струјања	10
1.1.3 „ЕСОТУБЕ“ систем	12
1.1.4 Динови вртлози	17
1.1.5 Примена изотермног приступа моделовања	21
1.2 Теоријске основе.....	31
1.2.1 Математички модел система сагоревања	31
1.2.2 Метод коначних запремина-дискретизација	38
1.2.3 Време задржавања и ефикасност	61
1.2.4 Управљање струјањем	64
1.2.5 Приступ методологијом изотермног струјања	65
1.2.6 Метод израчунавања времена задржавања	67
1.2.7 Преграде	69
1.3 Циљ, хипотеза.....	72
1.3.2 Циљ	73
1.3.3 Хипотеза	74
2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДИ.....	74
2.0 Начин решавања проблема	74
2.1 Метод	75
2.2 Експерименти	76
2.2.1 Експеримент 1	76
2.2.2 Експеримент 2	79
2.2.3 Експеримент 3	82

2.2.4	Експеримент 4	83
3.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	84
3.0	Експеримент 1: Резултати неизотермног експеримента	84
3.1	Експеримент 2: Утицај угла млазнице секундарног ваздуха	86
3.1.1	Резултати	86
3.2	Експеримент 3: Утицај брзине секундарног ваздуха	91
3.2.1	Резултати	91
3.3	Експеримент 4: Преграде	95
3.3.1	Резултати	95
3.4	Дискусија	98
4.	ЗАКЉУЧЦИ	101

ОЗНАКЕ

Велика
латинична
слова

A	—	Предекспоненцијални фактор
A/F	—	Однос доведених количина ваздуха и горива, (Енг.: Air to fuel ratio)
ACd	%	Елементарни удео пепела у гориву у односу на суву масу, (Енг.: Ash content on a dry basis)
$B(u)$	—	Функција густина вероватноће за брзину
C	%	Елементарни удео угљеника у гориву
C	$mol\ m^{-3}$	Моларна концентрација
Cl	%	Елементарни удео хлора у гориву
CO	—	Удео угљен-моноксида у продуктима сагоревања
CO_2	—	Удео угљен-диоксида у продуктима сагоревања
C_xH_y		Еквивалентна формула лаких угљоводоника насталих процесом деволатилизације
$C_xH_yO_z$		Еквивалентна формула тешких угљоводоника насталих процесом деволатилизације
D	m	Пречник ложишта
Da	—	Дамкелеров број
D_{AB}	$m^2\ s^{-1}$	Молекуларна дифузивност супстанце А у Б
Ea	$J\ mol^{-1}$	Енергија активације
F	N	Сила
F	—	Функција густине вероватноће
F	—	Степен мешања
F		Апроксимација површинског интеграла
F_D	N	Сила отпора струјању
F_G	N	Гравитациона сила
F_e		Средњи флуks кроз лице e (источно)
G	$m^2\ s^{-3}$	Генерисање турбулентне кинетичке енергије
H	%	Елементарни удео водоника у гориву
H	m	Висина
H_d	$kJ\ kg^{-1}$	Доња топлотна моћ горива
H_g	$kJ\ kg^{-1}$	Горња топлотна моћ горива

H_{vol}	$J kg^{-1}$	Енергија ослобођена у процесу пироллизе
K	%	Елементарни удео калијума у гориву
L	m	Дужина ложишта
M	$kg mol^{-1}$	Моларна маса
MC_w	%	Удео влаге у односу на влажну масу, (Eng. Moisture content on a wet basis)
N	%	Елементарни удео азота у гориву
NO_2	—	Удео азот-диоксида у продуктима сагоревања
NO_x	$mg m^{-3}$	Удео азотних оксида у продуктима сагоревања (NO+NO ₂)
O	%	Елементарни удео кисеоника у гориву
P	—	Вероватноћа
Q		Апроксимација запреминског интеграла
R	$J mol^{-1} K^{-1}$	Универзална гасна константа
S	%	Елементарни удео сумпора у гориву
S	m^2	Површина границе контролне запремине
S_n	—	Степен вртложења
T	K	Температура
U	$m s^{-1}$	Средња вредност брзине
V_a	$m s^{-1}$	Аксијална брзина
V_m	$m s^{-1}$	Брзина главног млаза
VOC	—	Удео лакоиспарљивих материја у продуктима сагоревања
VR	—	Однос брзина секундарне и примарне струје
V_s	$m s^{-1}$	Брзина секундарног млаза (млаз велике брзине)
V_t	$m s^{-1}$	Тангенцијална брзина
X	m	Аксијална позиција на којој се читава одређена величина
X/D	—	Бездимензиона величина која означава положај у аксијалном правцу
Y	$kg kg^{-1}$	Масени удео

Мала
латинична
слова

a_i	—	Коефицијенти биквадратне функције облика
c_p	$J kg^{-1} K^{-1}$	Специфична топлота при константном

		притиску
d	m	Пречник излазног отвора
d/D	—	Однос пречника излазног отвора и цилиндричног ложишта
dS	m^2	Инфинитезимална површина границе контролне запремине
e		Грешка (Енгл.: error)
f		Флукс физичке величине кроз границу контролне запремине
g	$m s^{-2}$	Убрзање земљине теже
g_1, g_2	—	Фактори QUICK шеме
h	m	Димензија прорачунске мреже
k	$Wm^{-1}k^{-1}$	Коефицијент провођења топлоте
k		Константа брзине хемијске реакције
k	$m^{-2} s^{-2}$	Кинетичка енергија турбулентних флукуација
\dot{m}'''	$kg m^{-3} s^{-1}$	Брзина хемијске реакције
m_a/m_{aj}	—	Однос масеног протока ваздуха и горива
m_{ζ}	kg	Маса честице
m_p	$kg s^{-1}$	Масени проток примарне струје
m_s	$kg s^{-1}$	Масени проток секундарне струје
\mathbf{n}		Вектор нормале на припадајућу инфинитезималну граничну површину контролне запремине
p	Pa	Притисак
p	—	Ред апроксимације
q		Подинтегрална функција у запреминском интегралу
\bar{q}		Средња вредност подинтегралне функције у запреминском интегралу у посматраној контролној запремини
q_P		Вредност подинтегралне функције у запреминском интегралу у централном P чвору посматране контролне запремине
q_{rad}	Wm^{-3}	Топлотни флукс зрачења
r	m	Полупречник на којем се читава одређена величина
r/r_0	—	Бездимензионална величина која означава радијални положај
r_0	m	Полупречник ложишта

t	s	Време
t	$^{\circ}C$	Температура
t_{10}	s	Време потребно да 10% флуида напусти суд
t_p	$^{\circ}C$	Температура примарне струје
t_s	$^{\circ}C$	Температура секундарне струје
u	$m s^{-1}$	Компонента брзине
u_{ξ}	$m s^{-1}$	Брзина честице
v	$m s^{-1}$	Компонента брзине
w	$m s^{-1}$	Компонента брзине
w	m	Ширина
x	m	Координата
y	m	Координата
z	m	Координата

Грчка слова

α	—	Фактор подрелаксације
β	—	Снага рецикулације
$\gamma_{i,j}$	—	Експонент уз концентрацију компоненте j у изразу за одређивање брзине реакције i
δ	—	Кронекеров оператор
ΔH	Jkg^{-1}	Топлота реакције
Δt	s	Временски интервал
ΔY	m	Раздаљина између оса млазница секундарног ваздуха
ΔZ	m	Раздаљина између осе главне млазнице и равни у којој се налазе секундарне млазнице
ε	$m^{-2} s^{-3}$	Дисипација кинетичке енергије
ε	—	Фазно кашњење система
η	—	Степен корисности, топлотна ефикасност
η	—	Ефикасност мешања
θ_{sr}	s	Хидрауличко време задржавања
λ	—	Коефицијент вишка ваздуха
λ	m^3	Фактор линеарне интерполације
μ	$Pa s$	Динамичка вискозност
ρ	$kg m^{-3}$	Густина
σ	$m s^{-1}$	Дисперзија око средње вредности

τ_t	s	Временски размер тока
τ_c	s	Временски размер хемијске реакције
Ψ	—	Струјна функција
Ψ_0	—	Струјна функција која ограничава област рецикулације
Ω	—	Стехиометријски коефицијент
Ω	m^3	Запремина (контролне запремине)
Γ	$m^2 s^{-1}$	Коефицијент дифузије
ϕ		Физичка величина која се билансира
ϕ_h		Израчуната билансирана физичка величина на мрежи димензије h

Индекси

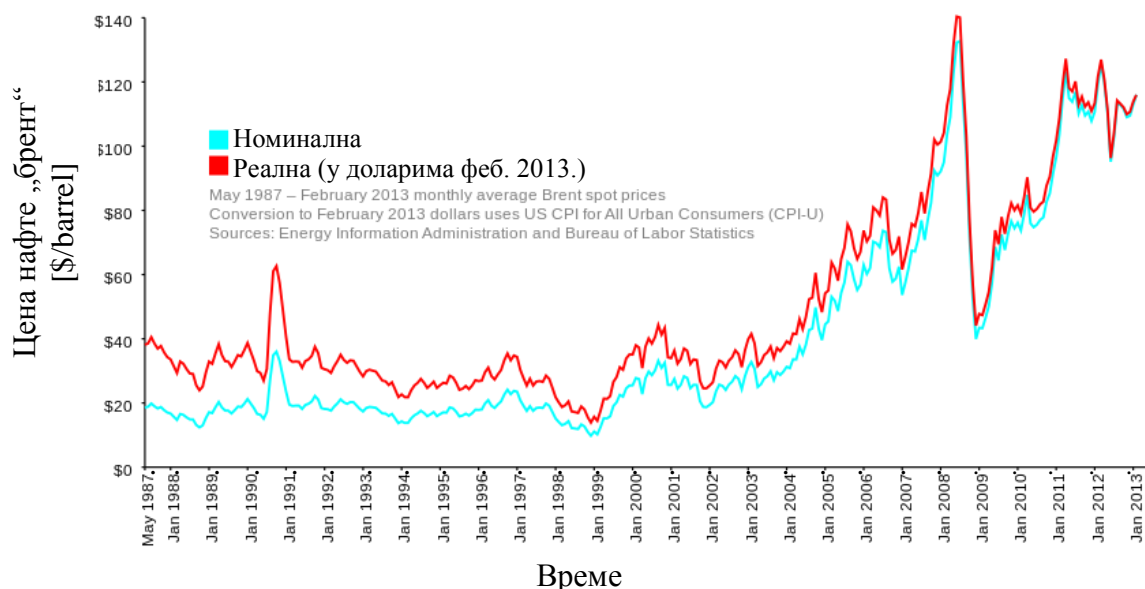
'	Корективна вредност (за p , u и v)
'''	По јединици запремине
*	Претпостављена вредност (за p , u и v)
a	Аксијална компонента
<i>char</i>	Чврсти остатак
e	Исток
<i>ins</i>	Тренутна вредност (енг: instantaneous)
k	Индекс контролне запремине
k	Ред итерација
n	Север
<i>nb</i>	Суседна тачка у прорачунској мрежи (енг.: neighbour grid point)
<i>ne</i>	Североисток
p	При константном притиску
P	Чвор унутар контролне запремине (енг: p. point)
p	Притисак
p	Честица (енг.: particle)
<i>podr</i>	Подрелаксирана вредност
<i>rad</i>	Зрачење (топлотни флуks)
s	Југ
<i>se</i>	Југоисток
t	Тангенцијална компонента
t	Турбулентно

v	Брзина
w	Запад
<i>Скраћенице</i>	
<i>ASME</i>	Америчко удружење машинских инжењера, Енг.: American society of mechanical engineers
<i>CFD</i>	Енг.: Computational fluid dynamics Срп.: Прорачунска/рачунарска динамика /механика флуида
<i>СКТИ</i>	Централни котловско турбински институт Рус.: Центральный котлотурбинный институт
КЗ	Контролна запремина
<i>QUICK</i>	Енг: Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
<i>RTD</i>	Енг.: Residence time distribution Срп.: Расподела времена задржавања
<i>SIMPLE</i>	Енг: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
<i>TDMA</i>	Тродијагонални матрични алгоритам
<i>VOC</i>	Лакоиспарљиве органске материје, Енг.: Volatile organic compounds
<i>Изрази</i>	
<i>char</i>	Чврсти остатак
grad ϕ	Градијент физичке величине ϕ
<i>kten/god</i>	Јединица годишње енергетске потрошње изражена у хиљадама тона (еквивалентне) нафте.
<i>Mten/god</i>	Јединица годишње енергетске потрошње изражена у милионима тона (еквивалентне) нафте.
<i>Swirler angle</i>	Угао лопатица ваздушног регистра – утиче на степен завртложења струја
„Tipping point“	Тачка преливања, момент након којег је брзина промена неког феномена непредвидљива.
„Vortex break down“	Нагла промена у структури вртложног тока.
„Well stirred reactor“	Реактор са потпуним мешањем, када је у целој запремини реактора исти састав.

1.0 УВОД

1.0.1 Биомаса као енергент

Енергетске потребе се највећим делом покривају коришћењем фосилних горива. Резерве фосилних горива које се доступне конвенционалним методама експлоатације су ограничене. Ова ограниченост ресурса заједно са геополитичким дешавањима утиче на цену нафте, а самим тим и на цене осталих енергената и неенергената. Производи поскупљују, стандард становништва опада, конкуритивност производа је под знаком питања. Цена нафте је од 1986. до 2001. износила 20 \$ по барелу. После тог периода стагнације цена је почела да расте тако да је достигла максималну вредност у јулу 2008. 145 \$ по барелу, да би пола година након тога у децембру пала на 30 \$ по барелу, на најнижу вредност од почетка финансијске кризе (2007-2010). У времену од 2011. до данас цена осцилује у распону од 100 до 125 \$ по барелу. [1] На слици 1 је приказана промена цене нафте „брент“ у периоду од 1987-2013.



Слика 1. Промена цене нафте „брент“ од маја 1987 – фебруара 2013.[2]

Одговор на овакву ситуацију је двојак. Један пут је у изналажењу нових извора енергије, а други у ефикаснијем коришћењу постојећих. У складу са тим земље Света више или мање успешно покушавају да постигну или да се приближе енергетској независности. У томе је успела Данска, применом оба пута. [3]

Ситуацију додатно усложњава још један проблем данашњице. Реч је о глобалном загревању. Глобално загревање или ефекат стаклене баште настаје тако што се део сунчевог зрачења долазећи до Земљине атмосфере рефлектује назад ка свемиру. Остатак доприноси загревању површине планете, које доводи до емитовања зрачења веће таласне дужине ка свемиру. Пошто је Земљина атмосфера мање пропусна за ова зрачења, услед присуства гасова стаклене баште, они апсорбују зрачење и реемитују га. Данас је утврђено да се као последица људских активности повећало присуство гасова стаклене баште. Последице глобалног загревања су сваког

дана све видљивије, значајно је повећана учесталост природних катастрофа и временских непогода, при чему се наглашава непредвидивост овог феномена, јер не постоји историјски слична појава на основу које би се могли извући закључци и предвиђања. Реч је о феномену “ *tipping point* ”, енглески израз који означава тачку преливања, момент када промене престају да буду поступне.

Енергетски се Република Србија у највећој мери ослања на фосилна горива. Када је реч о обновљивим изворима енергије Република Србија према стратегији развоја енергетике до 2015. године рачуна на обновљиве изворе енергије и то на 3 Mten/god, где 80% чини биомаса, и то 1,0 Mten/god дрвна биомаса, а 1,5 Mten/god остаци пољопривредне производње. Једна од смерница у овом документу је и домаћи развој или трансфер технологије за сагоревање нискоквалитетних угљева, биомасе и отпада.

Подаци за Аутономну покрајину Војводину су дати у табели 1, и пошто је реч о региону са развијеном пољопривредном производњом као потенцијал доминирају остаци из пољопривредне производње.

Табела 1. Потенцијал обновљивих енергената у АП Војводини [4]

<i>ОИЕ</i>	<i>Укупан поменцијал (kten/god)</i>
<i>Чврста биомаса (1/3 укупне количине)</i>	768
<i>Биогас</i>	3
<i>Биогориво</i>	150
<i>Ветар (300 MW)</i>	65
<i>Геотермална</i>	22
<i>Комунални отпад</i>	158
<i>Мали хидропотенцијал</i>	7,77
<i>Велики хидропотенцијал</i>	85,0
<i>Соларна енергија</i>	34
	УКУПНО 1,293

У фокусу овог рада је чврста биомаса, жетвени остаци, тј. сви остаци органске материје настале од пољопривредних усева, као што су пшеница, кукуруз, и њихових остатака, слама, морски организми, до градског отпада. Са генералног становишта материје анималног порекла такође спадају у биомасу, међутим у овом раду се подразумевају само материје вегетативног порекла.

1.0.2 Опште термотехничке карактеристике биомасе

Једно од основних својстава горива је његова топлотна моћ. На величину топлотне моћи утиче садржај сагорљивих материја, као и садржај баластних материја: воде и пепела. Доња топлотна моћ биомасе сведена на суву масу износи према [5] 15,9 MJ kg⁻¹, према [6] 16,2 MJ kg⁻¹, а према [7] од 15,7 до 18 MJ kg⁻¹, при чему су подаци преузети из [8]. Насипна густина сламе износи од 30 до 50 kg m³, компримованих бала од 80 до 130 kg m⁻³. Ове вредности су значајно мање у

поређењу са насипном густином каменог угља која износи 900 kg m^{-3} , тако да је енергетска густина када је реч о слами 10 до 15 пута мања од оне за камени угаљ. Насипна густина биомасе може значајно да се повећа коришћењем процеса пелетирања и брикетирања, тако да се постижу вредности од 600 до 700 kg m^{-3} . Добијање више насипне густине за случај пелетирања захтева додатно улагање електричне енергије које се креће у распону $120\text{-}200 \text{ kWh t}^{-1}$, ако се у обзир не узима енергија потребна за претходно сушење. [9]

Садржај воде у стабљаци пољопривредних култура износи 20-30 %. Влажност након складиштења сламе износи 12-14 %.

Главна даљна карактеристична разлика биомасе и угља јесте у високом садржају волатила. При загревању биомасе у ложишту долази до њиховог ослобађања, при знатно нижим температурама од оних које одговарају угљу. Ове температуре су ниже $200\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$. У табели 2 дате су карактеристике најчешћих врста биомасе. Додатно су приказане одговарајуће вредности и за угљеве, поређења ради.

Табела 2. Карактеристике (у односу на суву масу) најчешћих врста биомасе у поређењу с угљевима [10]

Гориво	Hd MJ kg ⁻¹	Садржај волатила %	Садржај пепела %	Елементарни састав, % суве масе						
				C	H	O	N	S	Cl	K
Фосилна горива:										
Камени угаљ	29,7	34,7	8,3	72,5	5,6	11,1	1,1	0,94	<0,13	
Јаран до	26,3	31,6	20,9	62,91	4,53	5,26	1,21	5,21		
Лигнит	20,6	52,1	5,1	65,9	4,9	23,0	0,7	0,39	<0,1	
Колубара	19,6	43,3	28,8	45,1	3,73	20,13	1,32	0,88		
Биогена черста горива:										
Топола (са кором)	18,5	81,2	1,8	47,5	6,2	44,1	0,42	0,031	0,004	0,35
Врба (са кором)	18,4	80,3	2,0	47,1	6,1	44,3	0,54	0,045	0,004	0,26
Оморика (са кором)	18,8	82,9	0,6	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015	0,005	0,13
Буква (са кором)	18,4	84,0	0,5	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015	0,006	0,15
Пшенична слама	17,2	77,0	5,7	45,5	5,8	42,4	0,48	0,082	0,19	1,01
Пшеница (читава биљка)	17,1	77,6	4,1	45,2	6,4	42,9	1,41	0,12	0,09	0,71
Пшенично зрно	16,9	81,0	2,1	43,6	6,5	44,9	2,28	0,12	0,04	0,46
Кукурузовина	17,2	78,2	5,0	46,5	5,72	41,7	0,68	0,056	0,32	

Садржај азота и сумпора је непожељан, јер при сагоревању они се делимично оксидишу и доводе до штетних NO_x и SO₂. С аспекта сумпора, уколико се он веже у

пепелу, постоји могућност да се недостигну граничне дозвољене вредности емисије SO₂ и без постројења за издвајање сумпора. Садржај азота у многоне зависи од врсте биомасе. Дрво показује веома мали садржај, док код сламе ова вредност може бити реда величина као код каменог угља, па и виша.

Значајнији проблем од азота и сумпора јесте присутност хлора, који поред емисионих проблема, такође, узрокује и оперативне проблеме постројењу. Висок садржај хлора код сламе нпр. је последица ђубрења земље са КСl. Хлор код парних котлова изазива високо-температурску корозију, а доводи и до емисије штетних диоксида и фурана. У табели 3 дате су карактеристичне температуре метаморфозе пепела најчешћих врста биомасе.

Табела 3. Карактеристичне температуре метаморфозе пепела најчешћих врста биомасе[10]

Пепели горива	Почетак синтеровања	Тачка омекшавања	Тачка полулопте	Тачка течења
	у °C			
Топола	1.280	1.340	б.п.	1.480
Оморика	1.190	1.430	1.600	1.600
Слама житарица	930	960	1.170	1.210
Житарице (читава биљка)	750	870	1.040	1.080
Зрна житарица	710	740	800	850
Камени угљ	б.п.	1.140	1.295	1.360

Промене физичких карактеристика пепела у погледу топљења су један од најзначајнијих фактора који ће одредити да ли ће се нека шема сагоревања применити, јер може да наступи зашљакивање површина, које су у контакту са димним гасовима. Карактеристике пепела дрвета су донекле слична пепелу каменог угља; пепео се у оба случаја топи на температурама у дијапазону од 1.200 до 1.400 °C. Проблеми настају при сагоревању пшеничне сламе, јер температура топљења њеног пепела износи око 750 °C[10], тако да се при вишим температурама од ове могу очекивати проблеми са зашљакивањем.

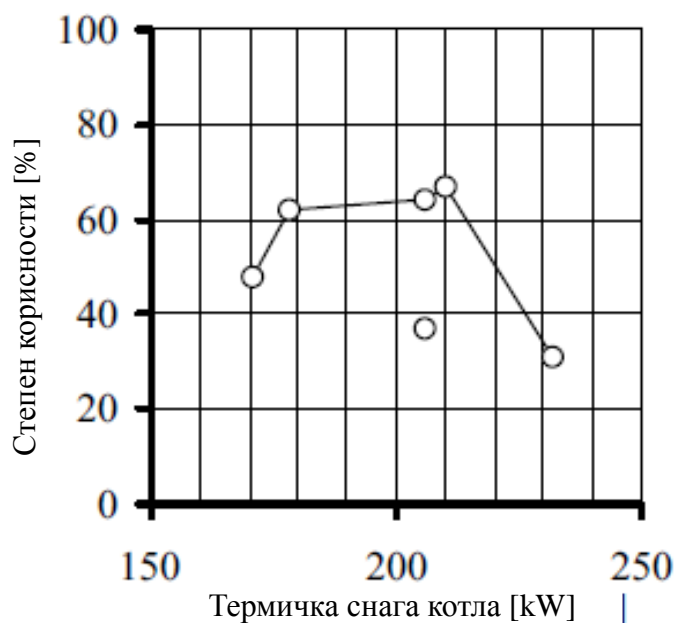
На основу изложеног може да се закључи да дрво може да сагорева релативно без проблема и негативних утицаја по околину, док пшенична слама може да узрокује значајне проблеме.

Табела 4 показује да је код малих и средњих котлова на балирану сламу низак степен корисности. Он износи од 31 до 73 % или у просеку 52 %. Вредност коефицијента вишка ваздуха достижу и вредност 8,8, док у просеку износи 5,1. Ове високе вредности коефицијента вишка ваздуха утиче на процес сагоревања двојако. Са једне стране се хлади ложиште, снижава се температура и успоравају процеси сагоревања, а са друге стране се услед већег протока гасова снижава време задржавања гасова. Тако да оба ова фактора знатно повећавају могућност да из котла кроз димњак изађу продукти непотпуно сагоревања. Да је присутно непотпуно сагоревање показују подаци из колоне за измерене концентрације угљен-моноксида, где је максимално измерена вредност чак 9.023 ppm.

Табела 4. Резултати испитивања узорка котлова ложених балираном сламом[11]

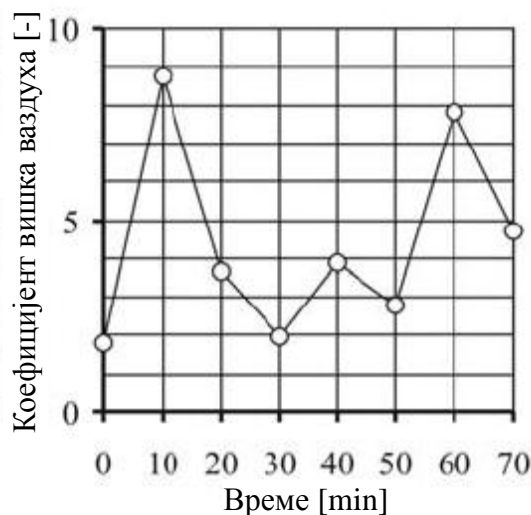
Произвођач	Номинална снага (kW)	Измерена снага (kW)	η (%)	λ (-)	CO (mg m ⁻³)	NO ₂ (mg m ⁻³)	VOC (mg m ⁻³)
“Братство”, Суботица	40	41,9	54	1,7-3,6	2.280- 5.910	-	-
“Шуком”, Књажевац	250	171-232	31- 67	1,8-8,8	1.560- 9.023	34-97	-
“Братство” Суботица	360	145-317	64- 72	1,3-2,7	2,8 0-4,8		
“Развој”, Кула	400 500	249-369 340-685	63 66	2,1-4,8 1,5-5,9	2.020- 5.230	21-36	
“Терминг” Кула	500	59-170	50- 73	1,34- 3,54	4.042- 6.403	1-7	
“Нигал”, Нови Сад	750	299-530	43- 69	2,8-7,9	1.816- 2.814	1,7-2,43	180-573

На слици 2 приказани су подаци о реализованим степенима корисности типичног узорка котла у функцији снаге.



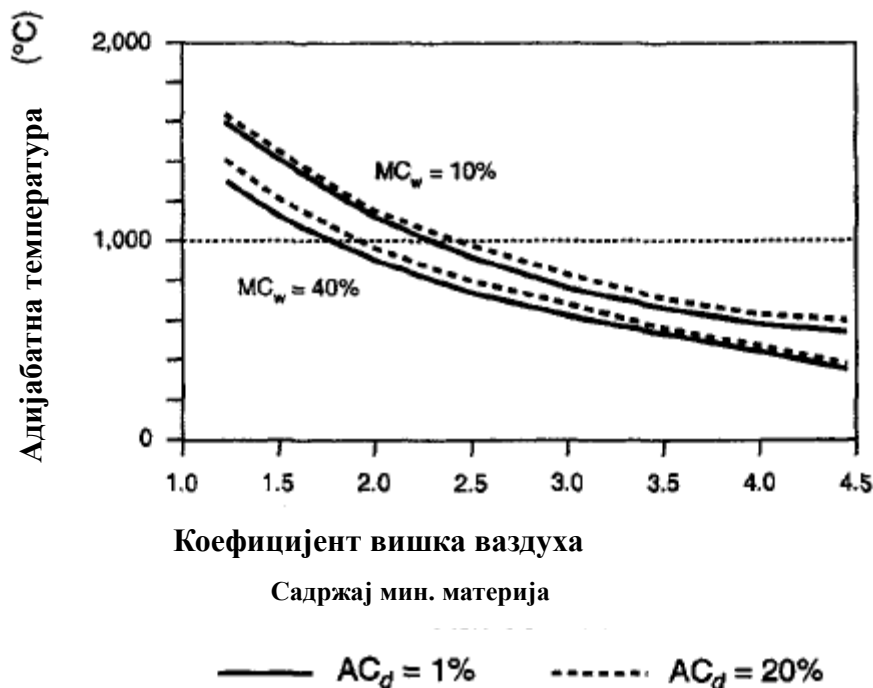
Слика 2. Реализовани степени корисности типичног узорка котла у функцији снаге [12]

На сликама 2 и 3 су приказани резултати испитивања котла за сагоревање биомасе [12]. Котао даје максималну топлотну снагу од 232 kW, при степену корисности од 30,9 %. Максимални степен корисности од 66,7 % је постигнут при снази од 210 kW. Коефицијент вишка ваздуха је при испитивањима осциловао између вредности 1,78 и 8,75, док се температура излазних димних гасова кретала у границама од 277 до 464 °C. Закључак овог испитивања јесте да према препорученим вредностима топлотног оптерећења запремине и површине ове димензије котла одговарају котлу од 600 – 1200 kW, значи котлу са три до шест пута већим топлотним капацитетом.

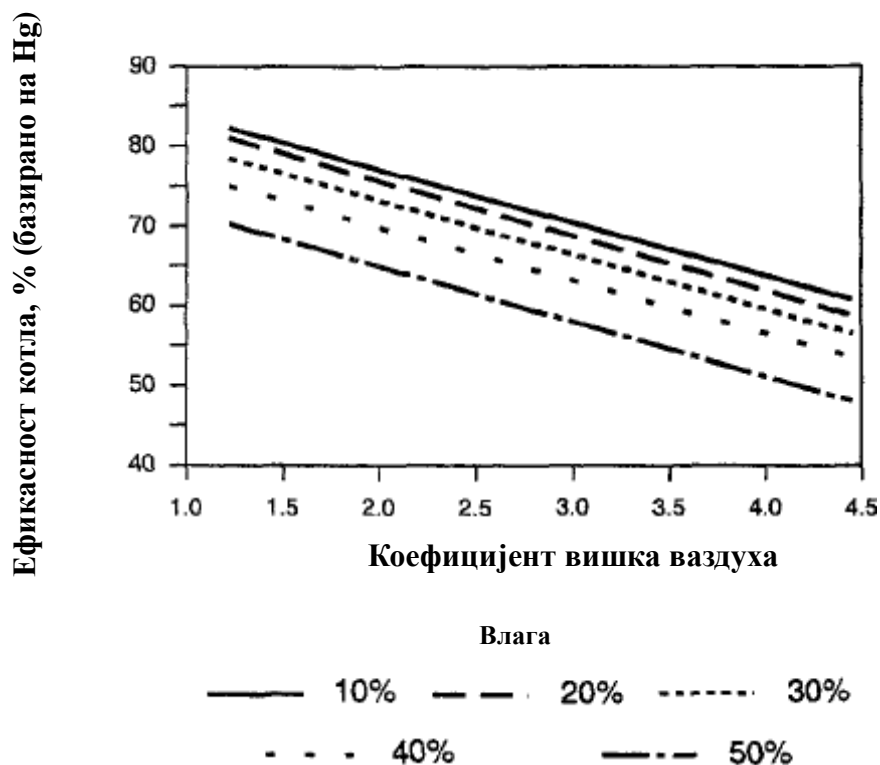


Слика 3. Промена коефицијента вишка ваздуха током мерења [12]

Високе вредности коефицијента вишка ваздуха имају двојаке последице по перформансе котла, са једне стране се снижава адијабатна температура, и самим тим успоравају процеси сагоревања и предаје топлоте, а са друге стране се снижава ефикасност котла. Ови утицају су приказани на сликама 4 и 5.



Слика 4. Утицај вишка ваздуха и влажности на адијабатну температуру пламена [13]



Слика 5. Утицај вишка ваздуха и влажности на ефикасност котла¹ [13]

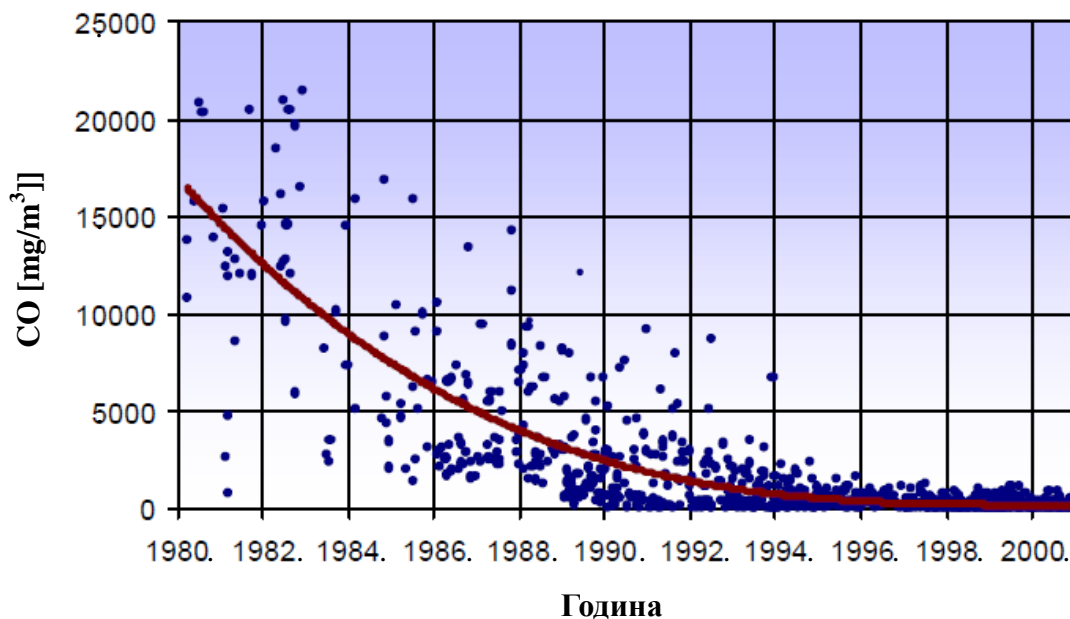
1.1 ПРЕГЛЕД САВРЕМЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

Преглед савремене литературе може да се групише у три целине. Свака од целина садржи низ сродних примера. Тако прва представља приказ активности на развоју котлова на биомасу у којој се настоји да демонстрира потреба за развојем котлова на биомасу, и то је демонстрирано на два примера развоја: аустријском и данском. Друга целина представља практичну примену CFD софтвера на визуелизацији, моделовању и решавању проблема који на други начин не би могли да буду тако ефикасно приказани и проучавани. Реч је о рециркулационим струјањима, патентираном „ЕСО TUBE“ систему довођења секундарног ваздуха и Диновим вртлозима. Трећи део чини приказ низ примена изотермног струјања у проблемима сагоревања.

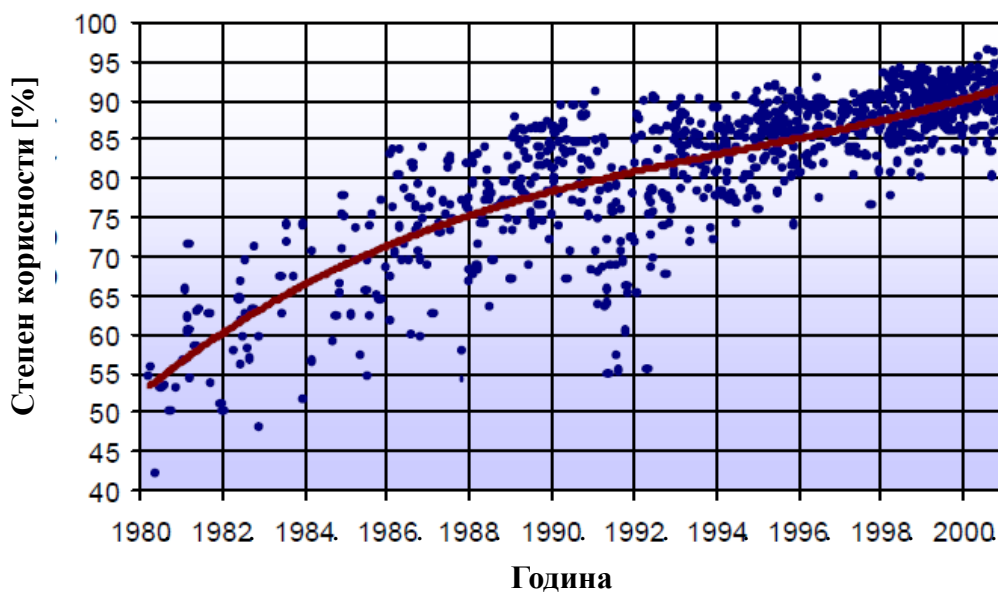
1.1.1 Развој уређаја за коришћење биомасе за енергетску сврху

Имајући у виду изложено у претходном поглављу очигледно је да постоји потреба, а и могућност за побољшање ефикасности котлова на биомасу. У следеће две слике могу да се виде ефекти развоја ових уређаја у Аустрији, која као главни обновљив енергент користи дрво. У посматраном периоду од 1980. до 2000-те год. је емисија угљен-моноксида снижена са готово преко 15.000 mg m^{-3} на вредности готово занемарљиве (слика 6), у исто време је ефикасност котлова са почетних 55 % порасла на преко 90 % (слика 7).

¹ Ефикасност котла је изражена у односу на горњу топлотну моћ, излазна температура гасова је 200°C



Слика 6. Емисије CO у ложиштима на биомасу у Аустрији од 1980-1999. [14]



Слика 7. Ефикасност ложишта на биомасу у Аустрији од 1980-2001. [14]

Пошто је у Данској доминантан вид чврсте биомасе слама житарица детаљније ће се простудирати њихово искуство.

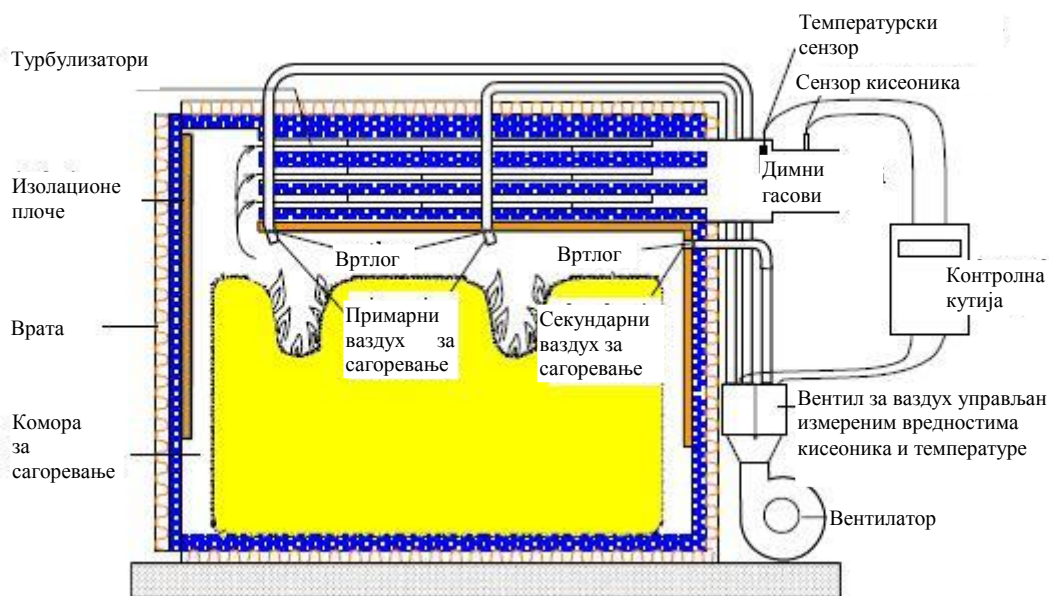
Ложење сламом се користи у Данској у последњих 25 година. Први котлови ложени сламом су били веома једноставни шаржни котлови са лошим процесом сагоревања, што је резултовало ниском ефикасношћу (30 – 40 %) и високим садржајем угљен-моноксида у продуктима сагоревања (више од 10.000 ppm)[15]. Побољшање конструкције је уследило кроз осамдесете и у истом периоду су развијени аутоматски ложени котлови. Ипак, економски подстицај за даљи технички развој је био недовољан пошто је гориво – слама била јефтина. За пољопривредника није било економски оправдано да инвестира у скупи котло са високом ефикасношћу који доводи до уштеде у гориву, које је широко расположиво.

У деведесетим је расла забринутост у вези с емисијама CO_2 , насталим сагоревањем фосилних горива и Данска је започела енергетски акциони програм. Циљ овог плана је било смањење емисије CO_2 за 20 % до 2005. [16] Ниво емисија из 1988. је постављен као репер за ову редукују. Пошто су биогорива CO_2 - неутрална, влада Данске је желела да охрабри замену котлова малих снага у приватном власништву. Тада се појавила потреба за развојем ефикаснијих котлова на биомасу. Данска Енергетска агенција је 1995. увела систем субвенција у којем су накнаде исплаћиване како купцима, тако и произвођачима колова на сламу, дрво и зрневље који су испитали своје котлове. Субвенционирање је прекинуто 2002. [17]

Да би се добила субвенција неопходно је било да котлоа задовољи унапред постављене нивое ефикасности, потпуности сагоревања и емисије честица прашине. Захтеви постављени пред котлове су се разликовали од типа до типа. Додатно је систем субвенција подразумевао да се са квалитетнијим котлом више добија. Оваква стратегија је резултовала у великој потражњи за котловима на биогорива еколошки прихватљивим и високих ефикасности.

Произвођачи котлова нису били под принудом да учествују у процесу сертификације. Али, ипак су готово сви произвођачи учествовали.

Снаге котлова о којима је реч се крећу од 50 до 500 kW.



Слика 8. Шема типичног шаржног котла у Данској - нове генерације [17]

У принципу су сви котлови произведени у Данској типа приказаног на слици 8. Ложиште може да буде цилиндричног или призматичног облика. Ватростални материјали прекривају горњи део ложишта и већи део зидова. Примарни ваздух се удувава кроз једну или две млазнице лоциране у горњем делу ложишта, док се секундарни ваздух удувава са задњег зида. Укупну количину ваздуха и његову расподелу одређује електронска управљачка јединица на бази измерених вредности кисеоника и температуре излазних димних гасова. Температура се мери са термопаром, док се кисеоник мери тзв. „ламбда сондом“. Струјање кроз 30 до 50 цеви опремљеним турбулизујућим елементима омогућава хлађење гасне струје. [17]

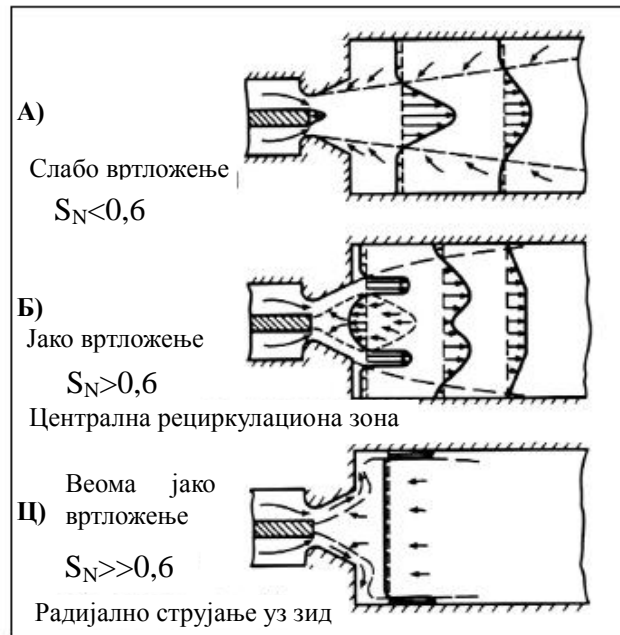
За ложење оваквог котла се користи трактор са предњим утоваривачем. Врата чине један зид ложишта котла. Топлота која се ослободи у једној шаржи и преда води се акумулира у акумулатору топлоте, који се поставља или поред или изнад котла. Пепео такође може да се одстрани помоћу трактора са специјалним наставком.

Да би се постигло квалитетно сагоревање са ниским вредностима концентрације угљен-моноксида у излазним гасовима, температура сагоревања мора да буде довољно висока, довољна количина ваздуха да се доведе и мора да постоји турбуленција ваздушне струје која обезбеђује што потпуније мешање. За котлове на сламу, искуство показује да се оптимална вредност кисеоника у продуктима сагоревања креће између 6 и 8 %. Габарити коморе за сагоревање, односно ложишта, морају да омогуће време задржавања продукта сагоревања у комори/ложишту довољно за остваривање потпуног сагоревања. Задржавање у ложишту је у значајној мери зависно од присутности турбуленције. Већа турбуленција захтева мање време и обрнуто. За аутоматски ложене котлове ово време износи око секунде, док за шаржне котлове дупло више.

1.1.2 Примена повратног струјања

У разним системима за сагоревање, као што су: гасне турбине, дизел-мотори, индустријски горионици и котлови, вртложна струјања су коришћена да би се ставила под контролу брзина мешања струја горива и оксиданта са циљем прилагођавања кинетике процеса и интензитета генерисања топлоте. При довољно високом вртложном броју (однос обимног и аксијалног импулса), преко 0,6 ствара се унутрашња рецикулациона зона која подстрекава интензитет реакција, ослобађање топлотне снаге и пораст температуре у пламеној зони. Обичним језиком речено, продукти сагоревања бивају враћени и пале надолazeћу струју горива и оксиданта. Ова појава омогућава стабилан, компактан пламен, са веома добрим карактеристикама и када је у питању сагоревање горива лошијег квалитета.[18]

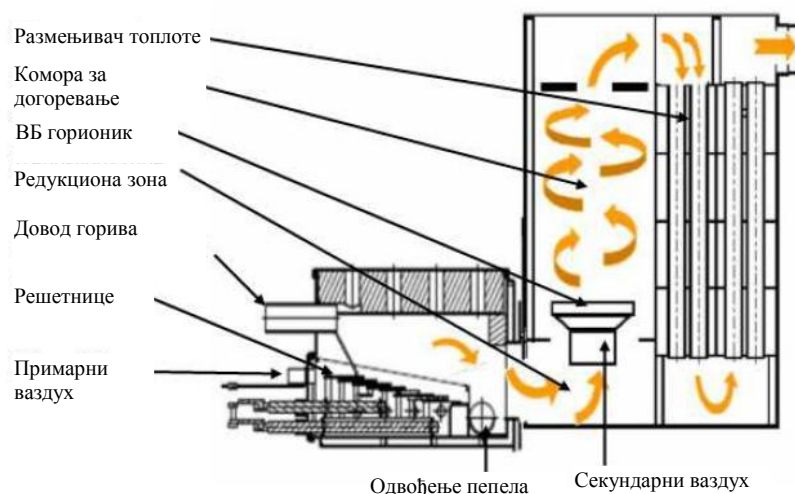
На слици 9 је приказан ефекат вртложног броја на карактер струјања. На улазу струје у комору за сагоревање се налази тело тупог облика (енг. Blunt body), које потпомаже вртлог. На слици су приказана три случаја означена као А, Б и Ц. За прва два случаја, А и Б, брзине се приказане у два односно у три пресека. Од интереса су места где се појављују повратне брзине. При вредностима вртложног броја струје мањим од 0,6 (слика 9А), што означава да је струја слабо завртложена, до повратног струјања долази само уз зидове коморе за сагоревање. При вредностима вртложног броја струје већим од 0,6 (слика 9Б), што означава јако завртложење струје, последица је присутност централне рецикулационе зоне. При знатно већим вредности вртложног броја струје од 0,6 (слика 9Ц) формира се специфично радијално струјање уз зид. Највеће брзине у пресеку се остварују у уском појасу уз сам зид, а у делу пресека изван тог уског појаса су присутне мале по интензитету повратне брзине. Пресек у којем су приказане брзине је на слици 9Ц приказан испрекиданим линијама. Повратне брзине су веома малог интензитета, тако да се у овој резолуцији приказа готово и не примећују. Док је појас уза зид веома узак да се готово не разазнаје.



Слика 9. Утицај вртлога на струјно поље [19]

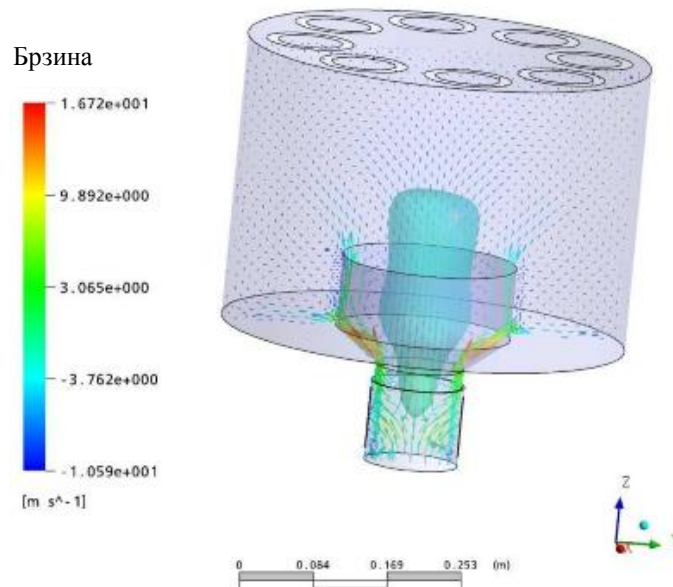
Овај феномен иначе познат под називом “Vortex break down” је коришћен и на котлу ложеном пелетима биомасе снаге 15 kW. Резултати мерења из [20] показују практично елиминисање непотпуног сагоревања. По питању емисије азотних оксида је забележено снижење у износу од 20%, које се повезује са сниженим температурским пиковима. Али, пошто је порекло емисије азотних оксида у азоту из горива, ова мера мора да се допуни са другима. [20]

На слици 10 приказан је котао који ради на поменутом принципу. Котао као гориво користи пелете, чине га три целине: предложиште, комора за накнадно сагоревање и размењивач топлоте. Ефекат “Vortex break down” се ствара довођењем завртложене струје секундарног ваздуха у ВБ (ВБ су прва слова назива феномена) горионик. Образује се потпритисак у централном делу коморе за накнадно сагоревање, који узрокује повратно струјање у тој комори. На излазу из коморе за накнадно сагоревање је постављена прстенаста преграда, која додатно утиче на струјно поље, и има исти ефекат као грло циклона.



Слика 10. Котао на пелете који укључује “Vortex breakdown” феномен [20]

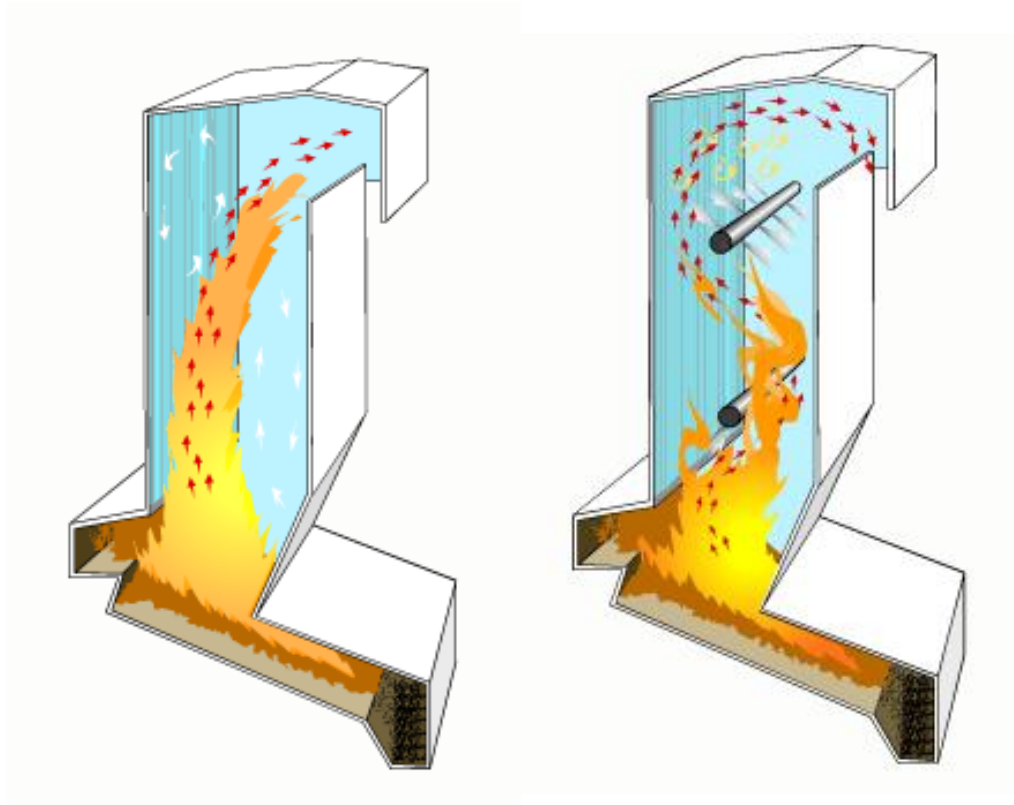
На слици 11 приказана је CFD симулација горе поменутог котла. Слика приказује само део котла, и то секундарну комору сагоревања са ВБ гориоником. Приметна је изоповршина у централном делу коморе за сагоревање, према чијој боји -светлоплавој (боја означава брзину, према приложеној легенди се види да је реч о негативној вредности, повратној брзини) се види да је реч о повратном струјању, односно негативној брзини, брзини усмереној према грлу ВБ горионика, и та зона представља зону рецикулације.



Слика 11. Нумеричка симулација струјања у котлу на пелете, који укључује феномен „Vortex-break-down“ [20]

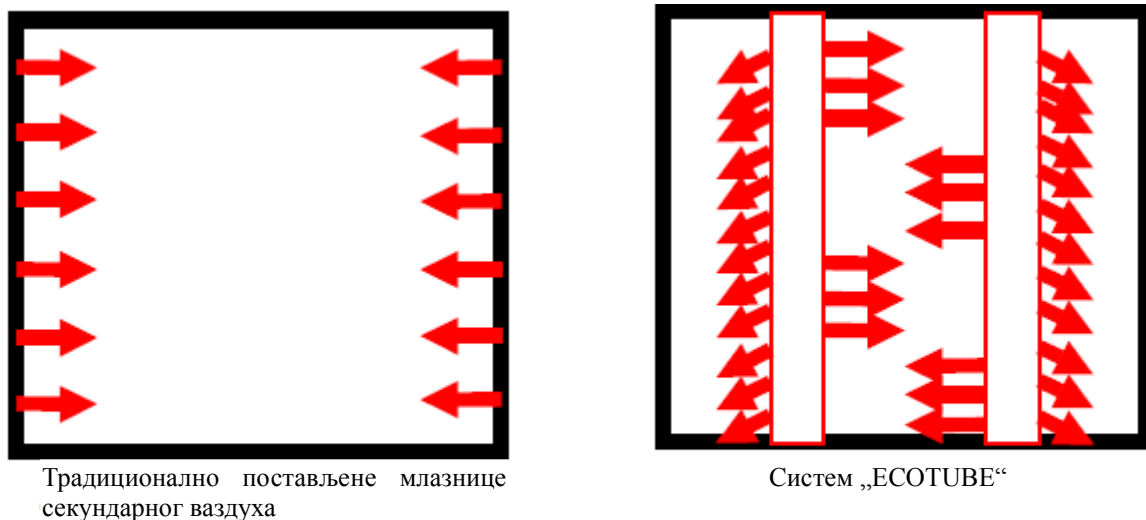
1.1.3 „ECOTUBE“ систем

Намена “ECOTUBE” система [21] је да се побољша сагоревање горива на решетки. Сагоревање горива на решетки се налази у широкој примени. За ову технику су карактеристични проблеми мешања и сагоревања у простору. Ови проблеми се решавају начином довођења секундарног ваздуха. Систем без уграђених дувача “ECOTUBE” система, који је приказан на слици 12 лево, одликује чињеница да значајан део запремине ложишта не заузима главни ток гасова. Белим стрелицама су означене рецикулационе области. Додатно, недостатак представља низак ниво помешаности у струји. Степен мешања горива и ваздуха је од великог значаја за квалитетно сагоревање. У [21] се наводи да се може рећи да је реч о присуству ламинарног струјања. На слици десно је приказано ложиште у које је уграђен систем дувача „ECOTUBE“.



Слика 12. Струјно поље у ложишном простору без (лево), и са постављеним дувачима “ECOTUBE” система (десно)[21]

На слици 13 приказана је разлика у начинима довођења секундарног ваздуха у ложишту, без и са постављеним дувачима “ECOTUBE” система. Са слике је приметна разлика да се дувачи “ECOTUBE” система постављају у ложиште за разлику од класичног положаја дувалки на зидовима ложишта. На слици 12 се види да постоји могућност и постављања на више висина – две, као и да се према слици 13 у једној равни на једној висини могу да поставе два система дувача. При чему се положај по висини, број по висини, положај и број по хоризонтали, смерови удувавања ваздуха, укључење/искључење појединих отвора може да мења и ова подешавања су резултат оптимизације.



Слика 13. Лево приказ традиционалног система довођења секундарног ваздуха, десно “ECOTUBE” система [22]

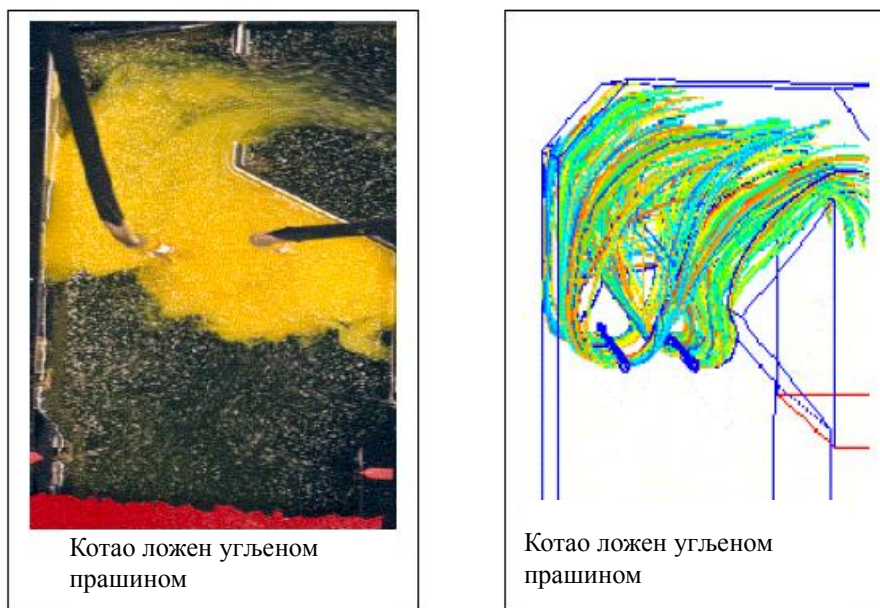
Систем “ECOTUBE” конципиран је тако да се секундарни ваздух равномерније распоређује од класичног приступа и тиме се постиже побољшање мешања гасова у области изнад решетке. У конструктивном смислу систем чине цеви које су хлађене водом и кроз чије зидове су избушене перфорације пречника 10 мм са две стране, асиметрично, при чему су ови отвори на једној страни усмерени паралелно са решетком, а на другој под оштрим углом. Брзине ваздуха су знатне и превазилазе вредности од 150 м/с.

Област ложишта око цеви може да се сматра као реактор у којем је остварено квалитетно мешање (на енглеском „well-stirred“), а област након ове карактерише равномерност брзина и концентрација, тако да она може да се представи као реактор цевног типа. Предност овакве равномерности је у томе да се смањује емисија угљен-моноксида и удео несагорелог горива. Постављањем више парова цеви овог система у ложиште добија се наизменичан низ ова два карактеристична реактора. У раду који датира из 70-тих година прошлог века [23] приказано је да распоред ових типских реактора утиче на вредности ефикасности сагоревања и количине топлоте која се ослобађа у јединици запремине, као и на време задржавања гасова. Више вредности могу да се постигну применом оваквих комбинација у односу на случај када је доминантан један од ова два реакторска система.

Први “ECOTUBE” систем је уграђен 1995. године, при чему је од тада уграђиван у инсинераторе снага од 10 до 85 MW, и котлове ложене биомасом и угљем, топлотних снага од 25 до 270 MW. Резултати уградњи [24] показују смањење емисије NOx у распону од 30 до 90%, смањење емисије CO од 30 до 90%, смањење летећег пепела од 5 до 10%, омогућавање повећања оптерећења и смањење трошкова одржавања.

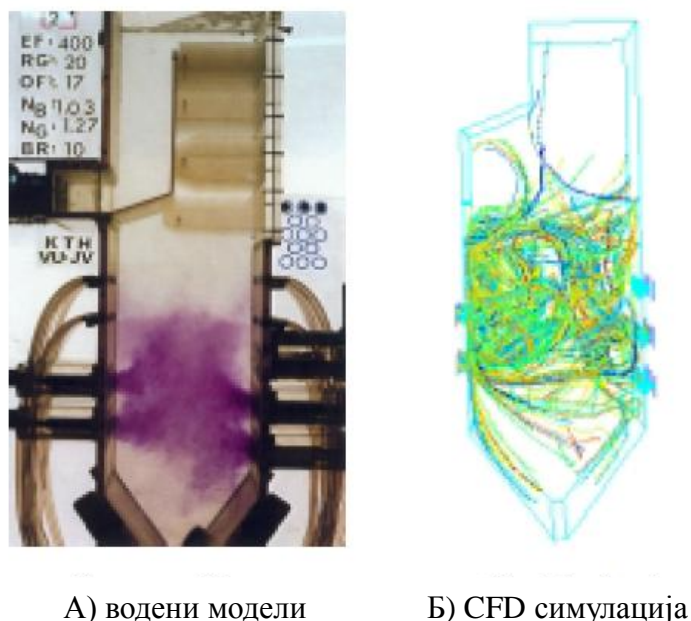
Испитивања су обављана нумерички и коришћењем физичког воденог модела. Физички модел је урађен у размери 1:10 у односу на посматрано ложиште и дводимензионалан је. За визуелизацију струјања коришћене су боје. Овај физички модел је коришћен ради потврде утицаја “ECOTUBE” система на мешање, затим да прикаже струјну слику, и да послужи као валидација за математичко моделовање. На слици 14 су дата поређења резултата симулације добијених путем физичког и

математичког модела, при сагоревању на решетки.



Слика 14. Поређење резултата симулације добијених путем физичког и нумеричког модела за случај котла ложем угљем, при сагоревању у простору [24]

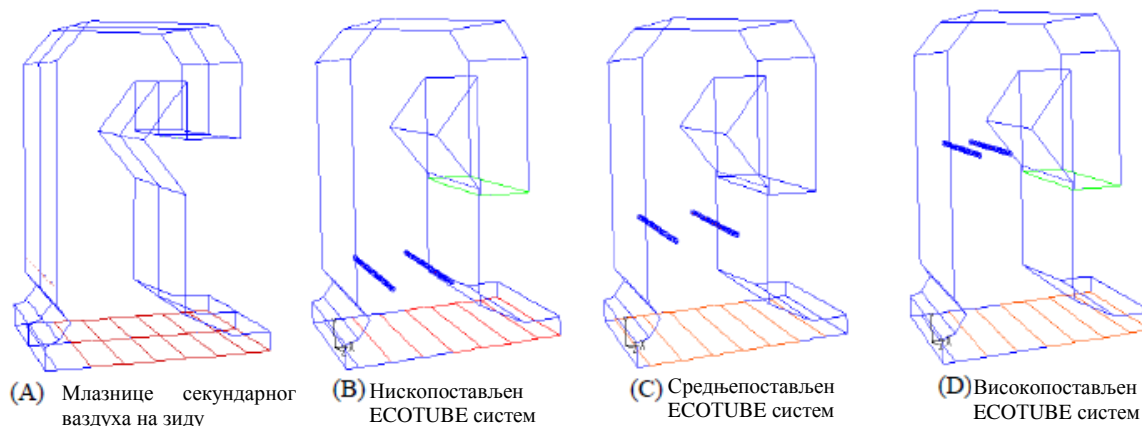
Поређење резултата симулације применом физичког и нумеричког модела при сагоревању спрашеног угља у просторном вртлогу, уз визуелизацију мешања у простору ложишта, приказано је на слици 15.



Слика 15. Испитивање мешања помоћу физичког (А) и нумеричког модела (Б) [24]

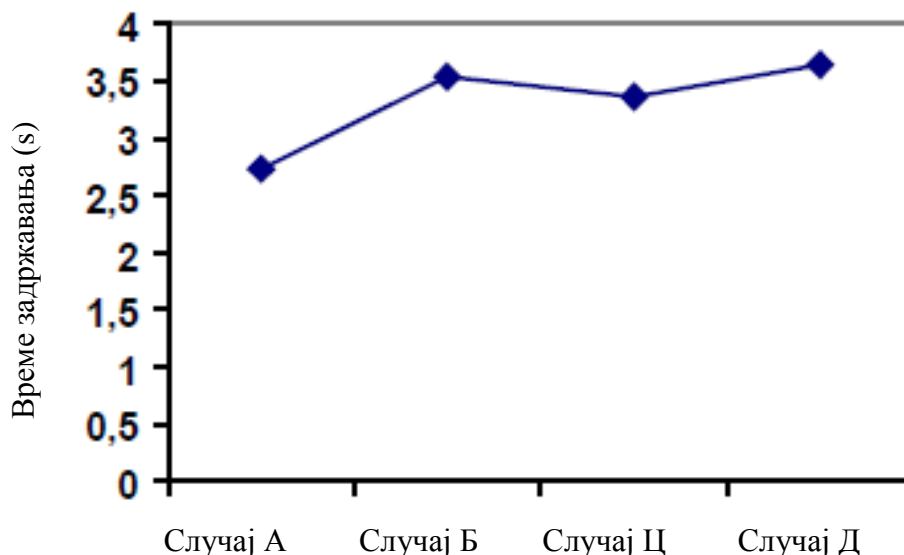
На перформансе система за довођење секундарног ваздуха утичу висина постављања цеви и смер млазова ваздуха. А, свакако утиче и раздаљина између цеви и удаљеност од зида. Број могућих комбинација ових параметара је велик. У оквиру [24] је разматран утицај висине постављања. На слици 16, једино 16А је без „ECOTUBE“ система и у том случају су млазнице постављене на зидове ложишта,

док је на Б, Ц и Д приказано редом ниско, средње и високо постављење „ECOTUBE“ система.



Слика 16. Поређење различитих система [24]

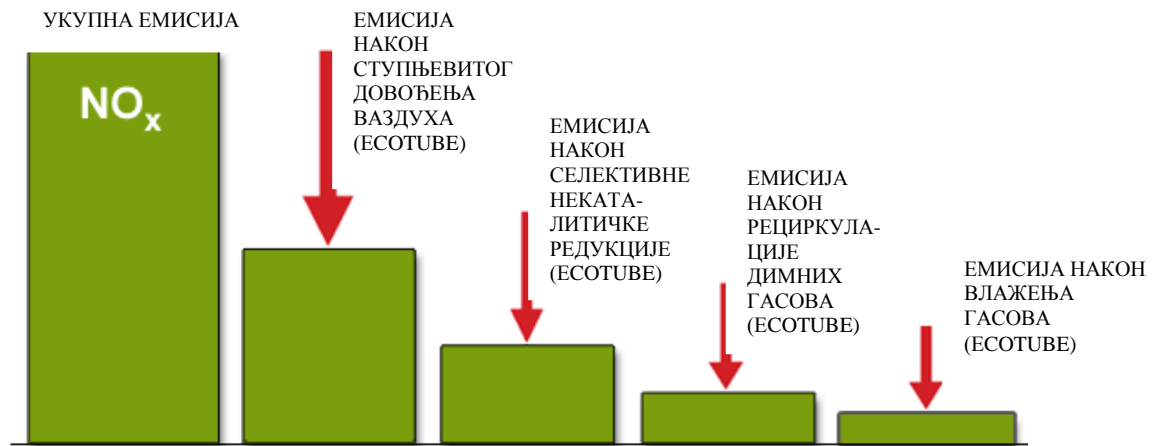
Резултати нумеричких симулација показују да најнижу вредност времена задржавања, а самим тим и најлошије мешање од 2,73 s одговара случају када су млазнице секундарног ваздуха постављене на зидовима ложишта. Повећање времена задржавања, које се постиже увођењем система “ECOTUBE”, у просеку је 30 посто, при чему се не разазнаје тренд, јер порастом висине постављања прво расте време задржавања, а потом незнатно опада, да би затим поново расло. Ова зависност је приказана на слици 17.



Слика 17. Време задржавања гасова [24]

Додатна предност овог система је да се уместо ваздуха могу да доводе и други агенси по потреби. На слици 18 дат је приказ ефеката примене различитих метода снижавања емисије азотних оксида, при чему свака може да се изведе коришћењем

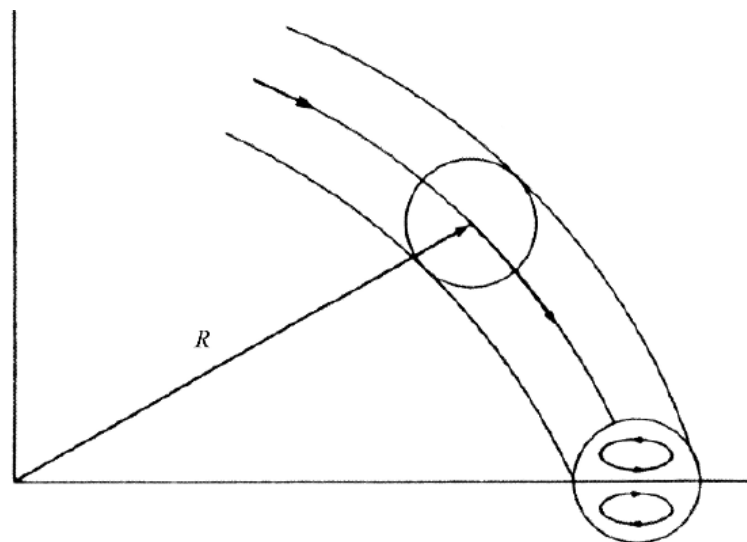
„ECOTUBE“ система. Само при првој методи (друга колона) се доводи ваздух. Прва колона на слици представља укупну емисију азотних оксида. Друга колона приказује могућност снижења укупне емисије ступњевитим довођењем ваздуха. Трећа колона представља следећи корак смањења емисије азотних оксида, коришћењем селективне некаталитичке редуције. Четврта колона представља потенцијал примене рецикулације димних гасова и као последња мера, у петој колони је приказано снижавање емисије азотних оксида помоћу влажење гасова, односно снижавања температуре гасова.



Слика 18. Методе снижавања емисије азотних оксида [25]

1.1.4 Динови вртлози

На слици 19 је шематски приказано настајање Динових вртлога у закривљеној цеви.



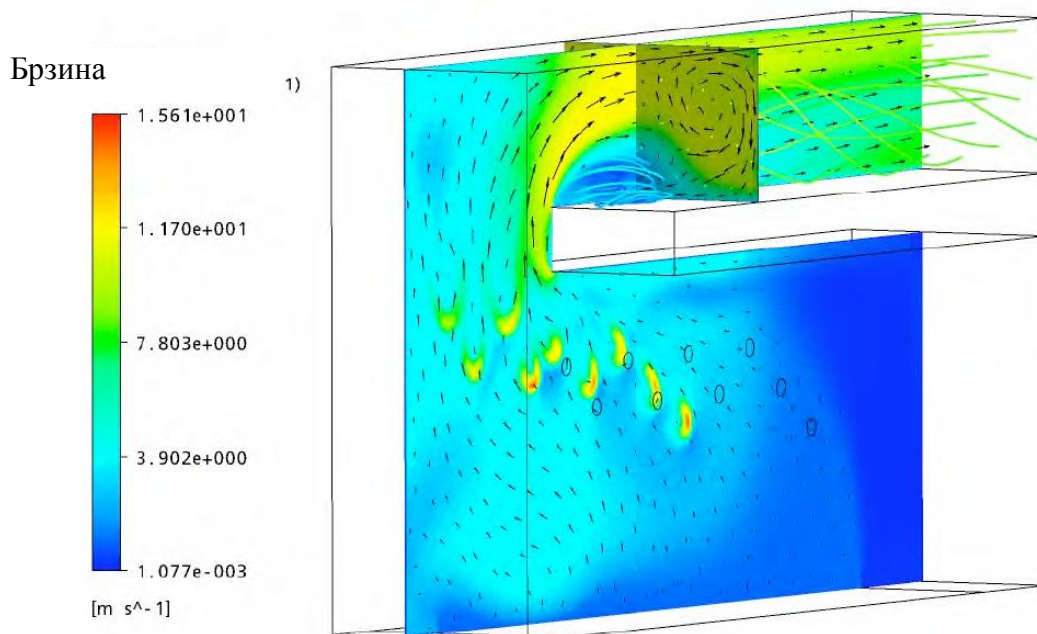
Слика 19. Шематски приказ струјања у закривљеној цеви [26]

На слици 20 предочена је визуелизација Динових вртлога методом димне цеви (енг. Smoke wire). Метод се изводи тако што се на танку жицу која се поставља унутар цеви нанесе танак слој уља, које испарава када се жица загреје краткотрајним пропуштањем струје. На слици 20а се овим методом постиже визуелизација профила брзине, а на слици 20б визуелизација два Динова вртлога.



Слика 20. Визуелизација Динових вртлога методом “smoke wire” [27]

У раду [28] се разматра феномен Динових вртлога применом изотермног приступа. На слици 21 приказани су резултати визуелизације CFD симулацијом. У ложишту котла са преградом гасови скрећу под оштрим углом у канал између преграде и горње стране ложишта. У секундарној комори за сагоревање се запажа да као последица области нижег притиска, који се јавља након скретања, стварају се вртлози. У случају да ови симетрично позиционирани вртлози заузму читав пресек, тада може да се постигне висок квалитет мешања, као и максимално искоришћење простора за сагоревање.

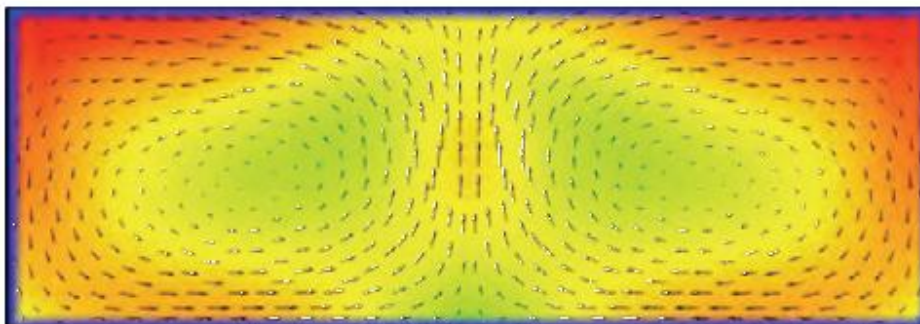
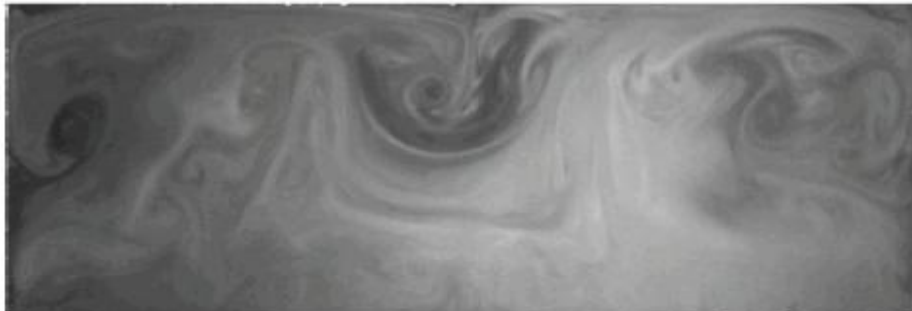


Слика 21. CFD визуелизација Динових вртлога у ложишту у делу пресека иза ложишта [28]

Ово вртложење доприноси хомогенизацији температурског поља, бољем искоришћењу запремине ложишта и последично утиче на реакције како сагоревања, тако и реакција које доводе до настајања штетних емисија. При смањењу оптерећења долази до снижавања брзине струјања. У тим случајевима зависно од геометрије и

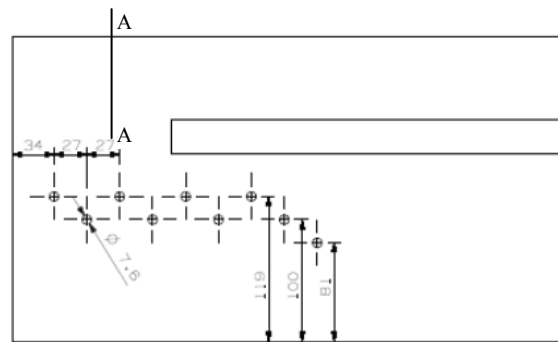
карактеристика струјања може да се рачуна на нестајање ових вртлога. Њихово нестајање доводи до повећања емисије штетних материја.

На слици 22 приказано је поређење/верификација CFD симулација експериментом. У експерименту је коришћен модел изграђен у размери 1:5, где се струјање визуелизује додавањем дима. Резултати експеримента који су приказани на слици 22 горе, потврђују постојање вртлога добијеног CFD симулацијом, чији су резултати приказани на слици 22 доле. Накнадно су измерена и поља брзина.

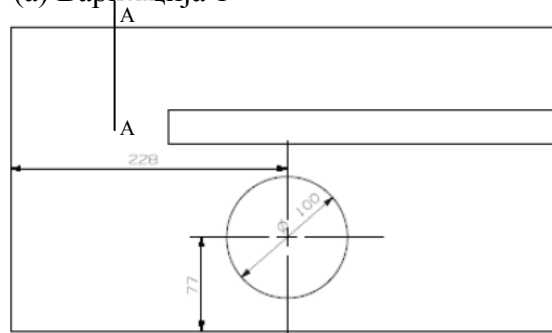


Слика 22. Визуелизација са честицама магле (слика горе) и CFD визуелизација поља брзина у пресеку коморе за сагоревање (слика доле) [28]

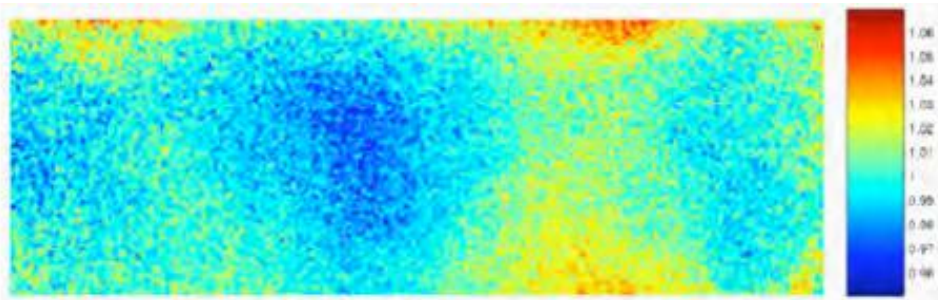
Слика 23 (а и б) приказује два случаја положаја места довођења секундарног ваздуха [28], и испитиван је утицај на интензитет секундарног струјања, односно степена мешања. Варијација 1 приказана на слици 23 (а) укључује укупно 18 млазница пречника 7,6 mm постављених по 9 на сваком бочном зиду, док варијација 2 приказана на слици 23 (б) укључује два велика отвора на бочним зидовима пречника 100 mm. Површина којом се доводи секундарни ваздух је у варијацији 1 мања 18 пута од површине у варијацији 2. По питању брзине је ситуација обрнута, у варијацији 1 је брзина секундарног ваздуха 18 пута већа, пошто је количина секундарног ваздуха који се доводи у оба случаја иста. Резултати CFD симулација приказани на слици 23 (ц и д) показују да је прва варијанта повољнија. Средња вредност величине која карактерише степен мешања је у варијанти 1 износила $\bar{\eta} = 0,989$, а у варијанти 2 0,954. Мерења на које се ове величине односе обављена су у пресеку А-А. Положај овог пресека графички је приказан на слици 23 (а и б). Метод мерења примењен је Планарно ласерски индукована флуоросценција. Осредњавање степена мешања је неопходно услед турбуленције. Средња вредност се односи на 150 мерења.



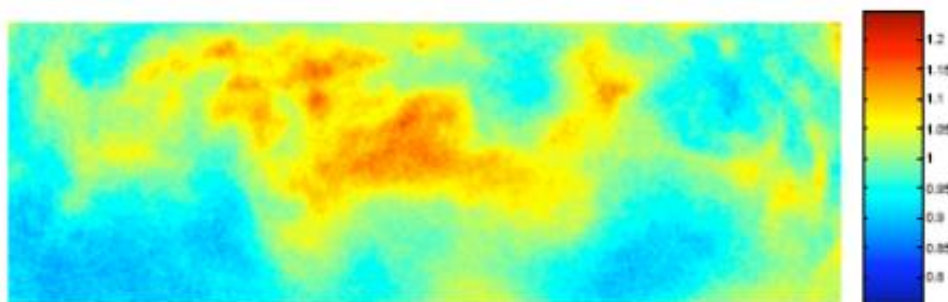
(а) Варијација 1



(б) Варијација 2



(ц) степен мешања у пресеку А-А; $\bar{\eta}= 0,989$, Варијација 1



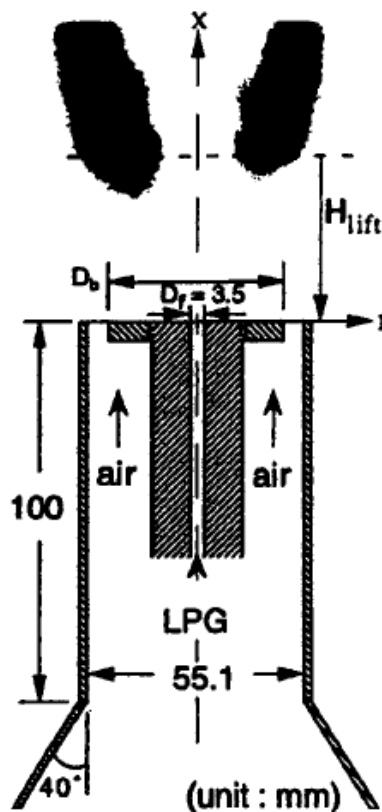
(д) степен мешања у пресеку А-А; $\bar{\eta}= 0,954$, Варијација 2

Слика 23. Две варијанте положаја места уградње довода секундарног ваздуха [28]

И овде треба нагласити која комбинаторика је могућа, и по питању положаја, смера, димензија млазница, што све чини проблем изузетно комплексним. У сваком случају предност CFD приступа је да варијанте могу знатно брже и ефикасније да се прорачунају и самим тим проуче, у поређењу с експерименталним приступом.

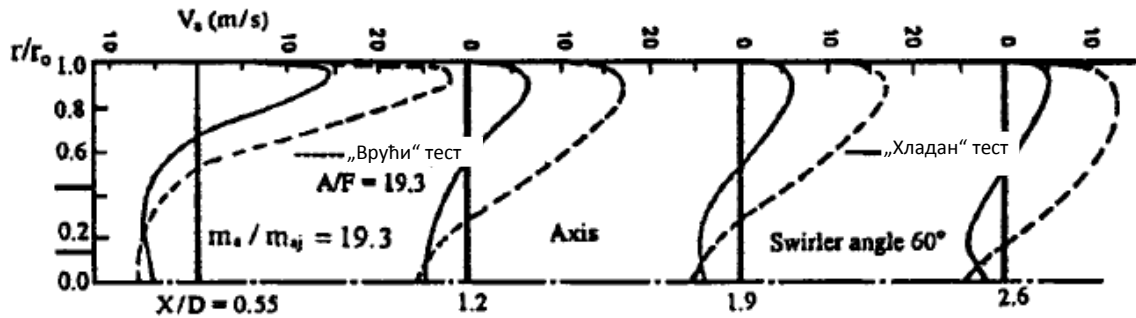
1.1.5 Примена изотермног приступа моделовања

У радовима [29, 30] обављани су експерименти у цилиндричном ложишту у које је постављен горионик без претходног мешања горива и ваздуха приказан на слици 24. Отвори за ваздух и гориво су концентрични. Циљ испитивања је био да се одреди колико хемијска реакција утиче на аеродинамику процеса.



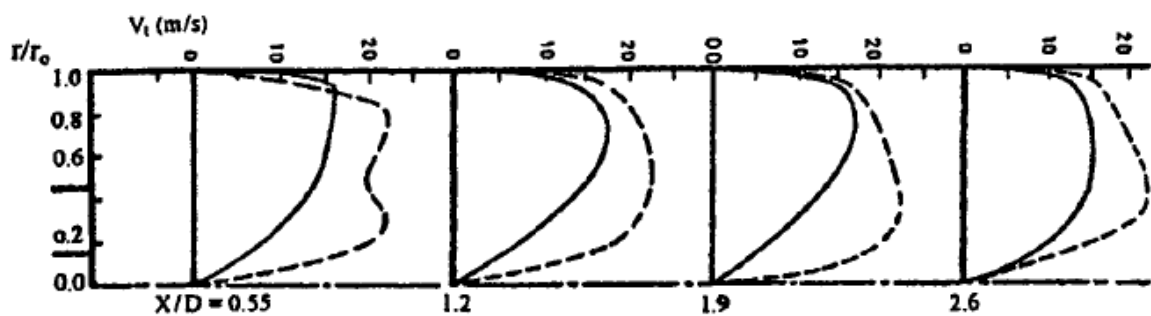
Слика 24. Испитивани горионик [29, 30]

Тестови чију су резултати приказани у [29, 30] показали су следеће: да хемијска реакција не утиче битно на форму криве радијалне зависности тангенцијалне и аксијалне компоненте брзине, али кинематска сличност није постигнута. Под кинематском сличношћу се подразумева да су односи интензитета брзина и убрзања на одговарајућим местима на прототиповима константни, и да су правци брзина и убрзања на одговарајућим местима паралелни. Ови резултати су приказани на слици 25, где су испрекиданим линијама приказани резултати „врућег“ теста (теста који укључује сагоревање), док су са пуном линијом означени резултати „хладног“ теста (теста који не укључује сагоревање). На слици су приказани резултати у зависности од бездимензионе величине која означава положај у радијалном правцу (r/r_0), где вредност 0 одговара оси цилиндричног ложишта, док 1 одговара зиду ложишта. Доња x оса означава позицију у аксијалном правцу, такође преко бездимензионе величине (X/D), где је X аксијална позиција, а D пречник ложишта. Горња x оса означава вредност аксијалне брзине V_a у m/s. Резултати су приказани за четири пресека, локације где су обављена мерења су означена пуном вертикалном линијом. A/F и Swirler angle 60° представљају однос ваздуха и горива (Air/Fuel) и угао завртложења струје од 60° .



Слика 25. Утицај сагоревања („врући тест“) на радијалну расподелу аксијалне брзине дуж ложишта [29, 30]

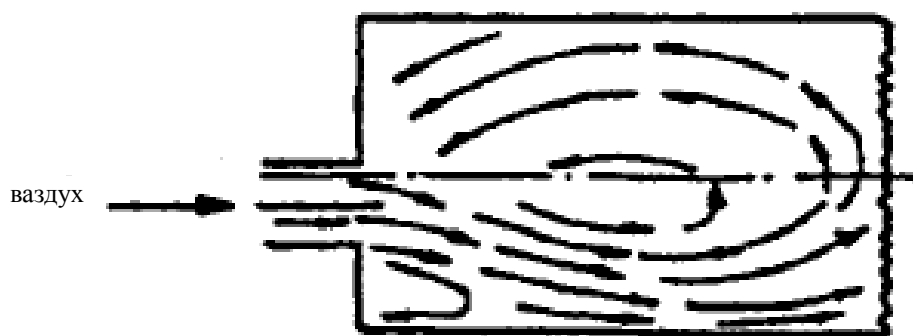
На слици 26 приказана је радијална расподела тангенцијалне брзине, где је означавање оса и пресека, као и „врућег“ и „хладног“ теста исто као на слици 25.



Слика 26. Утицај присуства сагоревања на радијалну расподелу тангенцијалне брзине дуж ложишта [29, 30]

Утицај низа параметара у изотермном току од истих аутора је приказан и у следећим радовима. На пример решавање проблема сагоревања горива лошег квалитета је разматрано изотермним приступом. [31] Проблем код сагоревања ових горива је и у паљењу и стабилизацији пламена. Разлози за то су двојаки. Са једне стране присутан је велики аксијални импулс носеће струје који доводи до брзог напуштања честице горива зоне високих температура близу горионика. Док са друге стране значајна количина топлоте је потребна да се доведе да би дошло до деволатилизације горива, а и сама кинетика деволатилизације може да буде препрека, може да буде преспора.

Овај проблем се решава образовањем повратних токова врелих продуката сагоревања. То се постиже завртложењем струје ваздуха или постављањем тупог тела у основну струју. Исти ефекат може да се постигне асиметричним довођењем млаза ваздуха. (слика 27)

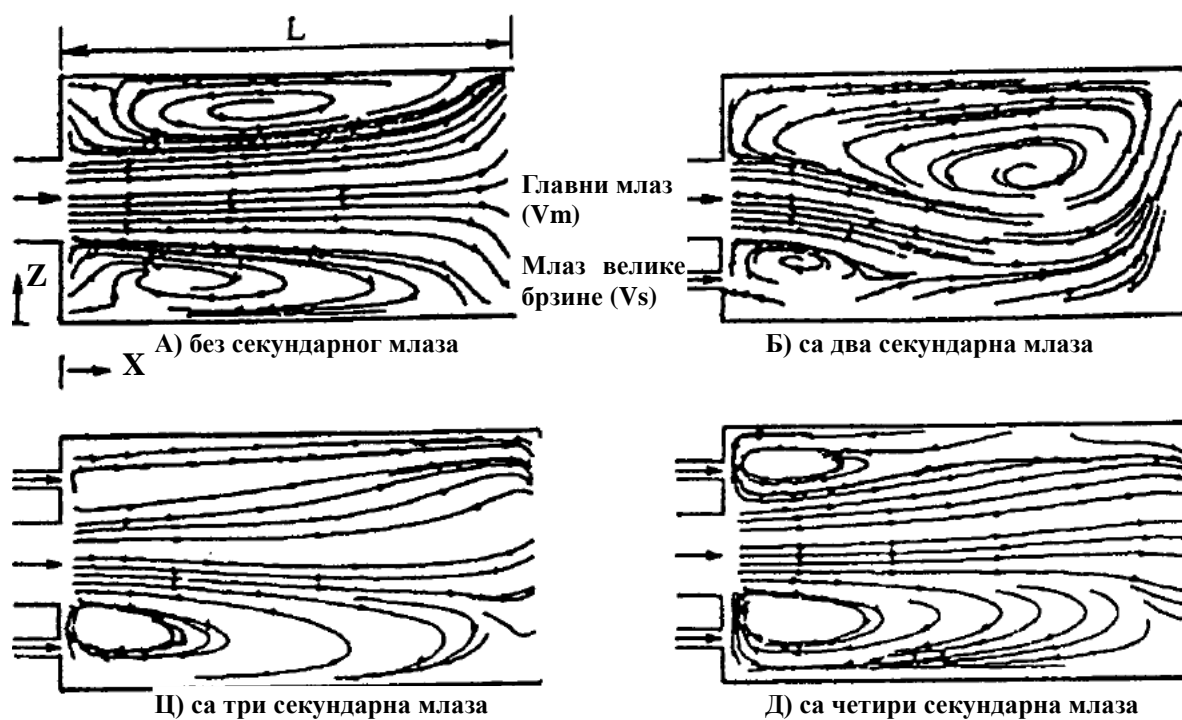


Слика 27. Шематски приказ асиметричног млаза ваздуха [32]

Постоје случајеви када је потребно да се повећа предаја топлоте у реакторима без прекорачења дозвољене граничне температуре зидова због неугрожавања механичке чврстоће, корозије и емисије штетних материја. Начин постизања овог циља је, такође, интензивирањем рецикулације што се постиже увођењем секундарних струја ваздуха великих брзина. На овај начин се побољшава мешање врелих гасова са ваздухом који се доводи у ложиште.

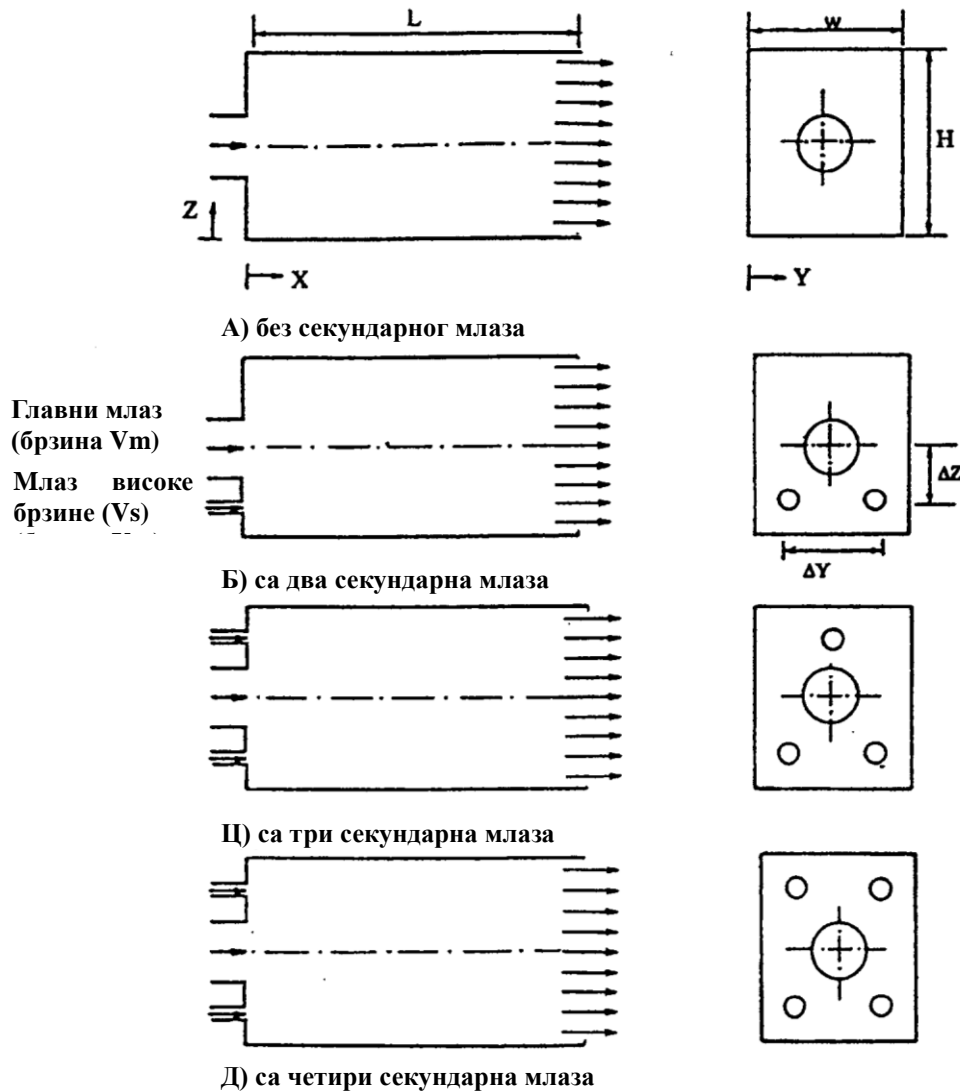
У студији [33] разматран је утицај броја секундарних струја ваздуха, однос брзине примарног и секундарног ваздуха, као и растојања између млазница секундарног ваздуха такође и њихова удаљеност од главне млазнице.

Уочено је да струја ваздуха велике брзине усисава главни ток, што је приметно са слике 28. Млазница главног тока је централно постављена. Рецикулациона зона се оцењује преко два параметра, који описују њену величину и снагу. Величина рецикулационе зоне се описује величином/ површином контуре у којој је аксијална брзина једнака нули, а снага β је функција аксијалне удаљености и израчунава се за сваку вредност координате X (према слици 28), као масени проток повратног тока изражен релативно у односу на масени проток директног тока.



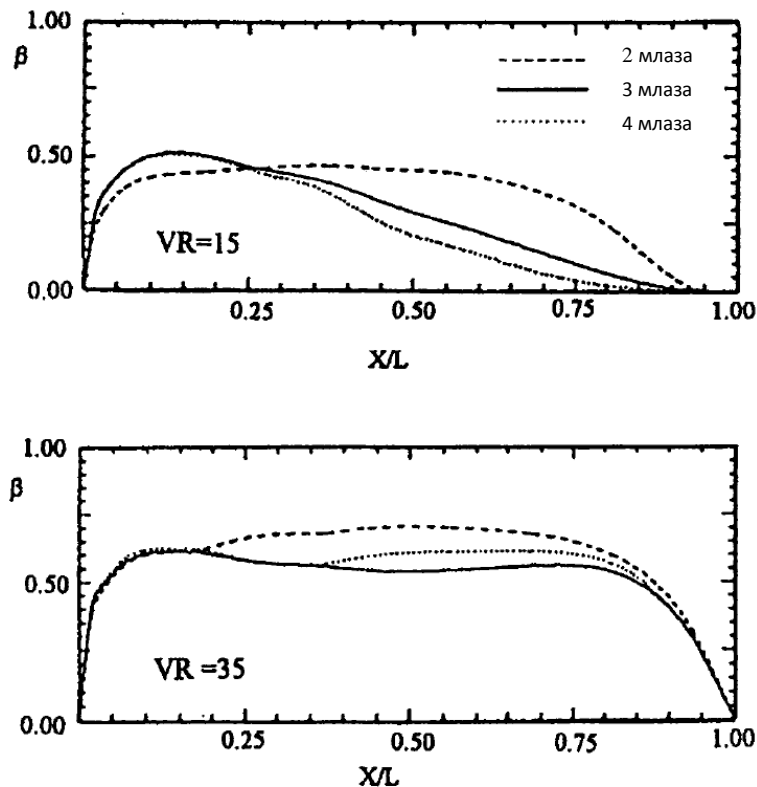
Слика 28. Увођења секундарних струја високих брзина (горе лево: без; горе десно: са две; доле лево: са три; доле десно са четири)[33]

На слици 29 су положаји отвора за довођење секундарних струја приказани у две пројекције како би се појаснила слика 28. Карактеристичне димензије ложишта су w - ширина, H - висина и L - дужина. Са ΔY је приказана раздаљина између оса млазница секундарног ваздуха, а са ΔZ раздаљина између осе главне млазнице и хоризонталне равни у којој леже осе секундарних млазница.



Слика 29. Увођења секундарних струја високих брзина –појашњење просторног распореда секундарних млазница (уз слику 27) [33]

Резултати из [33] приказани на слици 30 показују да је мешање када су присутна два секундарна млаза најбоље, и да даље додатно повећање снаге рецикулације β треба обавити подешавањем односа брзина ова два млаза у односу на млаз главног тока. Y координата дијаграма приказаног на слици представља снагу рецикулације β . Снага рецикулације β је масени проток повратног тока изражен релативно у односу на масени проток директног тока. Према слици $\beta=1$ вредност се не постиже, а ова вредност би представљала да је у датом попречном пресеку одређеном релативном аксијалном координатом X/L присутан само повратни ток. Вредност $\beta=0$ са друге стране означава да повратног тока нема. На слици приказан израз $VR=15$ представља однос брзина секундарних млазова и брзине главног млаза. Све секундарне млазове карактерише иста брзина.



Слика 30. Утицај односа брзина на интензитет рецикулације [33]

У раду [34] је проучаван ефекат завртложења и / или секундарне и примарне струје на карактер струјног поља. И то проучавани су случајеви када се једна од струја завртложи, када су обе завртложене и када су смерови вртложења исти и супротни. Најбољи резултати су постигнути када су обе струје завртложене и када су смерови вртложења супротни.

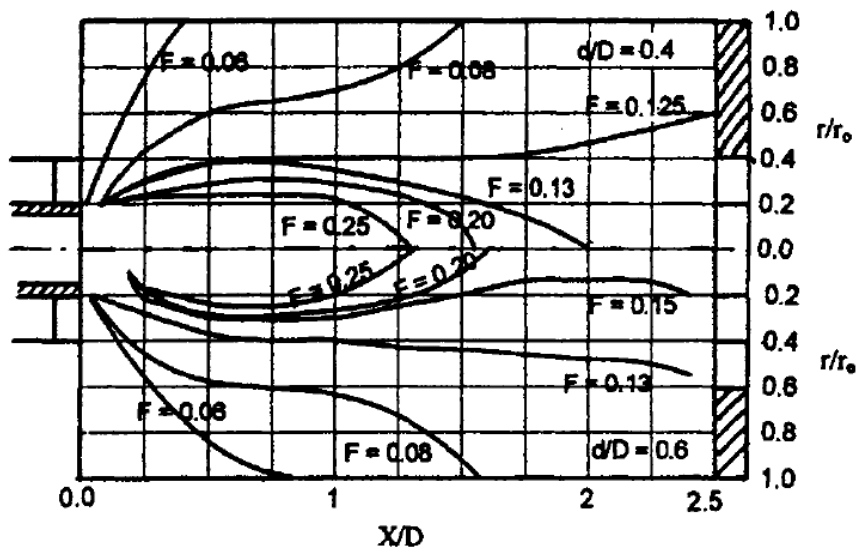
У раду [35] је разматран утицај дужине и излазног пресека ложишта изотермним приступом. Различите дужине и излазни пресеци су постизани тако што је коришћен цилиндар који се могао да помера у правцу осе и тиме мења дужину цилиндричног ложишта, а истом се могао да мења пречник, и на тај начин мења излазни пресек.

За потребе одређивања степена мешања коришћен је температурски метод. Степен мешања се овим методом израчунава коришћењем једначине 1 у којој су редом са t , t_p и t_s означене локална температура, температура примарне струје, а са m_p и m_s редом масени проток примарне струје и секундарне струје. Вредност степена мешања од 0 одговара делу ложишта у којем није присутна примарна струја, док вредност 1 одговара делу ложишта у којем је само присутна примарна струја, и то на пример испред грла млазнице примарног ваздуха.

$$F = \frac{t - t_s}{t_p - t_s} = \frac{1}{\left(1 + \frac{m_s}{m_p}\right)} = \frac{m_p}{m_p + m_s} \quad \text{Једн.1}$$

На слици 31 је приказан степен мешања F преко изолинија. У горњој половини слике су приказане изолиније степена мешања за случај када је однос излазног пречника према пречнику цилиндричног ложишта 0,4 (d/D), а у доњој половини су предочени резултати мерења исте величине само за однос (d/D) 0,6. Радијална позиција је приказана преко величине (r/r_0) , где r представља текућу радијалну координату, а r_0 полупречник ложишта. Аксијална позиција се слично

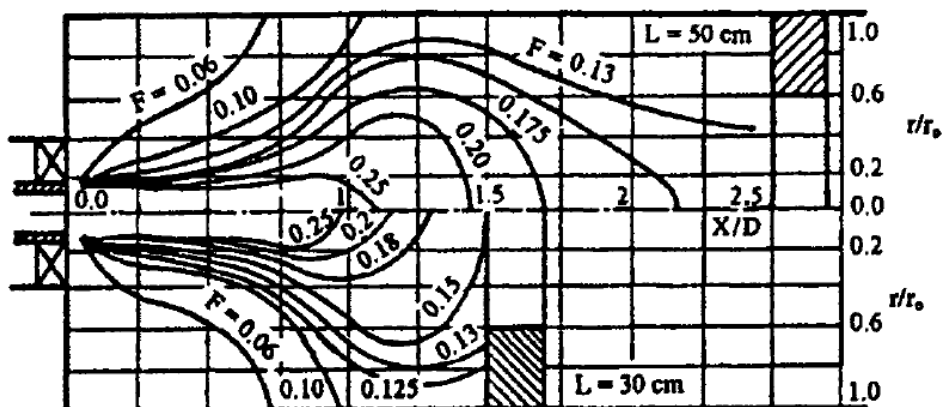
одређује, преко односа (X/L), где је X текућа аксијална координата, а L укупна дужина ложишта.



Слика 31. Контуре константне концентрације за различите геометрије излазног пресека [35]

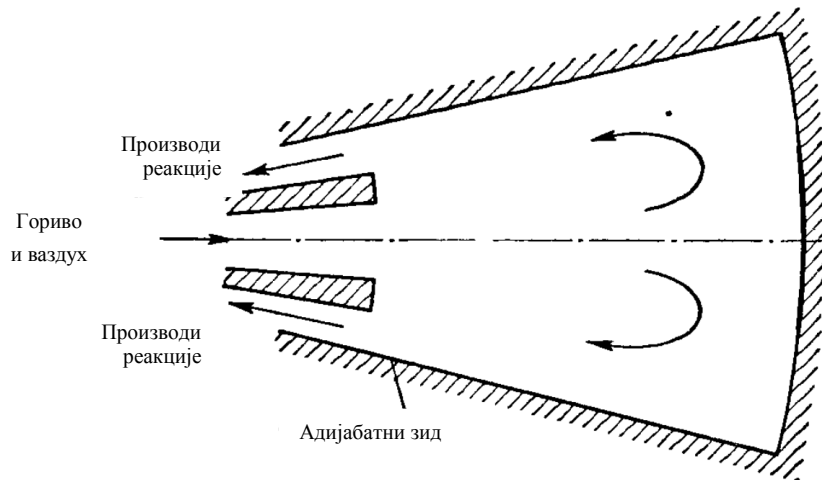
Резултати које илуструје слика 31 показују да смањење излазног пресека доводи до убрзања брзине мешања примарне и секундарне струје. При томе је ово мешање верификовано на тај начин што је између струја разлика од 120 степени, што представља примену температурског метода маркирања струјања. Узрок за ово је интензивирање повратног тока близу излазног пресека.

При промени дужине ложишта (слика 32) уочено је смањење дужина кривих, које означавају константни ниво помешаности при смањењу дужине ложишта. На слици 32 су у горњој половини приказане изолиније степена мешања F за случај дужине ложишта $L=50$ cm, док доњи део цртежа приказује резултате за случај краћег ложишта, и то када је $L=30$ cm. Означавање радијалне и аксијалне позиције је исто као на слици 31.



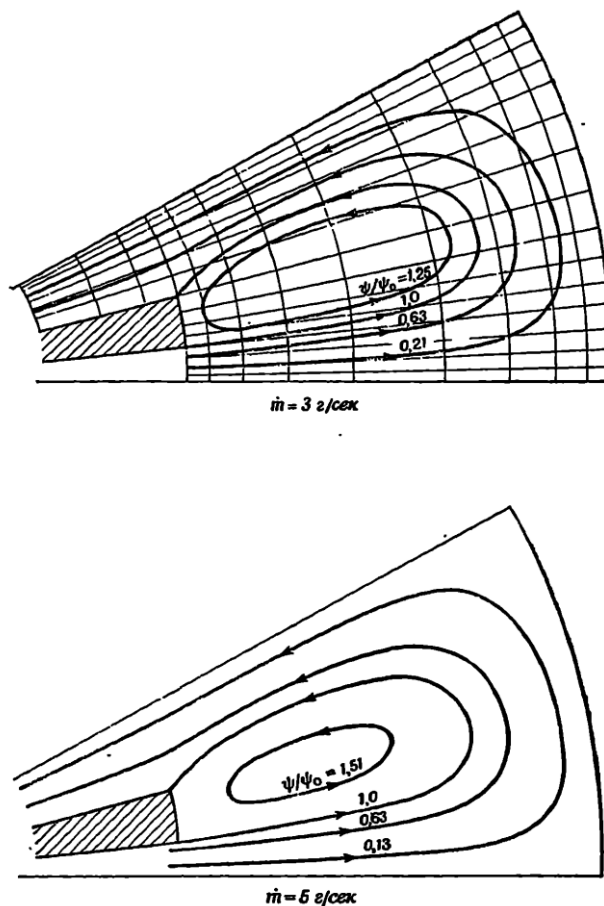
Слика 32. Контуре константне концентрације за различите дужине ложишта [35]

На слици 33 приказан је конични реактор. Гориво и ваздух се доводе дуж осе, а производи реакције се одводе кроз два бочна излаза.



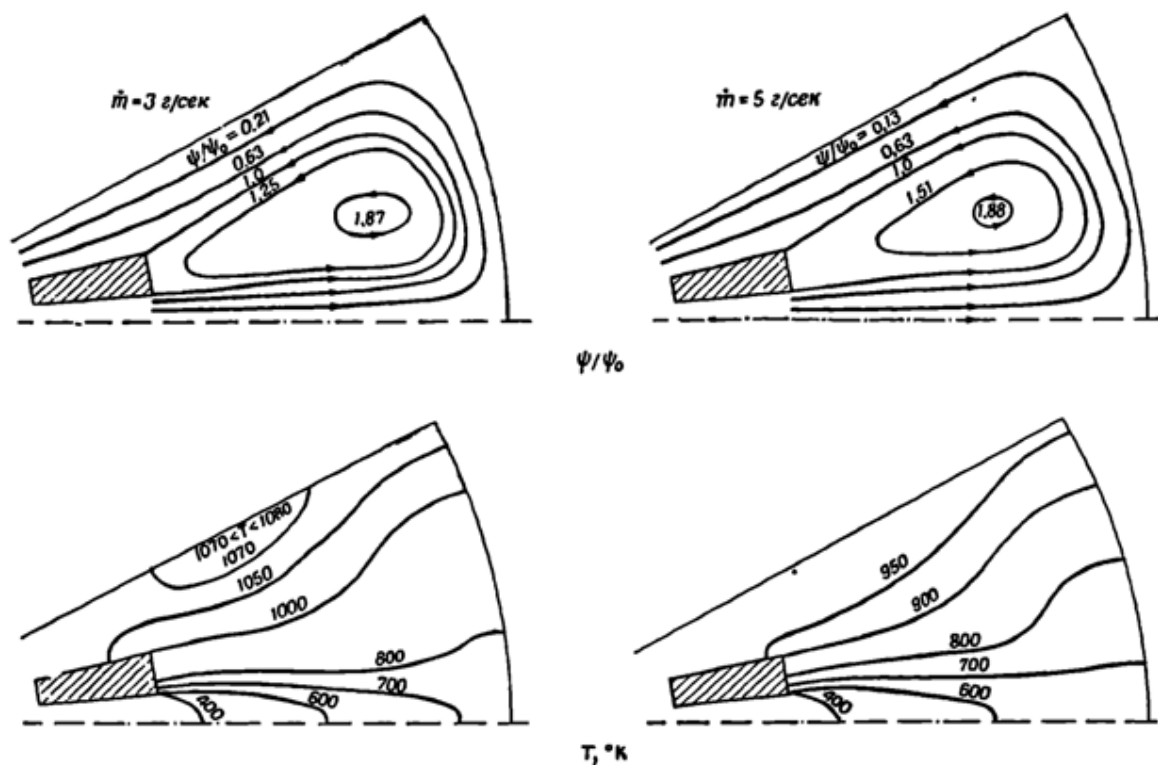
Слика 33. Конусна комора за сагоревање [36]

Слике 34 и 35 омогућавају поређења хладног тока без и врелог тока са хемијским реакцијама. Експерименти [36] су рађени на примеру конусне коморе за сагоревање. Резултати показују да је струјно поље незнатно измењено, као последица топлотног ширења гасова које је узроковано сагоревањем. Центри вртложења су се незнатно померили од улазног пресека. На сликама 34 и 35, ψ представља струјну функцију при чему за равански случај струјања $\psi = const$ означава струјницу.



Слика 34. Струјнице при два протока, без присуства хемијских реакција [36]

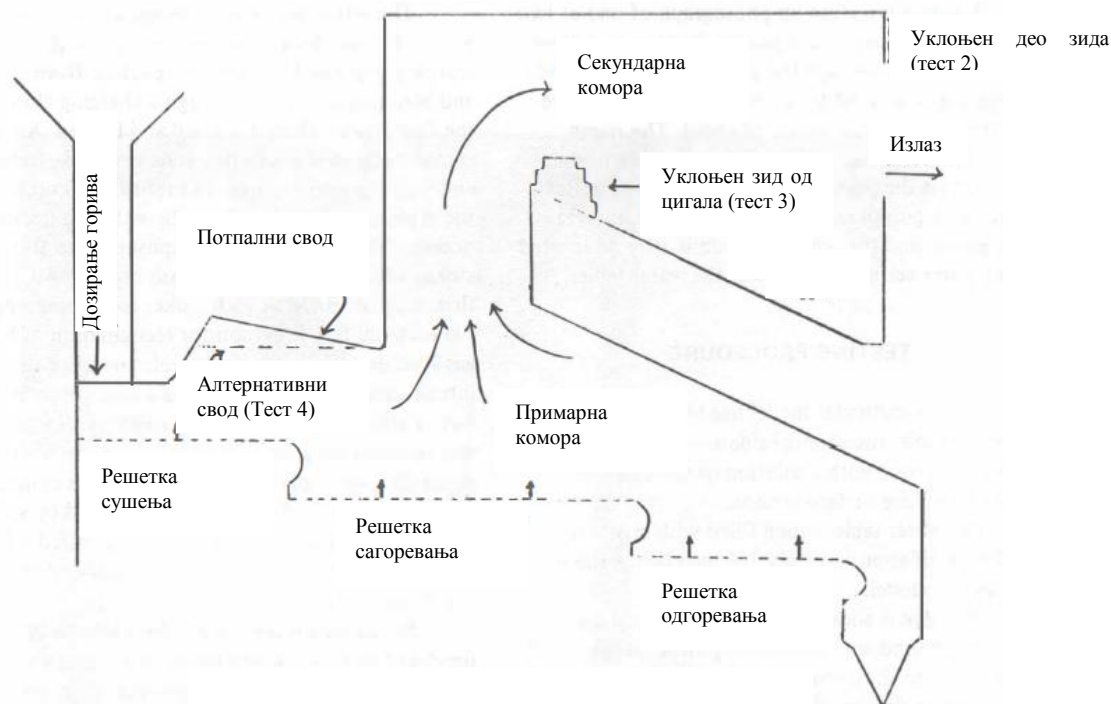
Имајући у виду коничну форму реактора, за очекивати је присуство зоне рецикулације. Она је ограничена на сликама 34 и 35 са вредношћу струјне функције $\psi = \psi_0$. На слици 35 (доњи ред) приказано је температурско поље у коничном реактору. Разматрана су два протока, и то 3 и 5 g/s, при чему утицај протока на карактер струјања није приметан.



Слика 35. Струјнице и температурске расподеле при два протока, при присуству хемијских реакција [36]

И у области моделовања комора за сагоревање изотермни приступ је присутан. За ово су примери у [37] и [38]. Струјно поље у коморама за сагоревање гасних турбина је веома сложено. Примењени изотермни приступ даје бољи увид у карактер рецикулационих струјања унутар коморе. У [38] разматран је утицај величина на улазном пресеку у комору, аксијалне и радијалне компоненте брзине на карактер тока. Паралелно су обављани физички и нумерички експеримент за вредности на улазном пресеку које су измерене експериментално. Резултати студије показују значајан утицај улазних величина. Физички и нумерички експеримент су поређени по три основа. Параметри поређења су: карактер струјања (енг. Flow pattern), саме струјнице и турбулентна кинетичка енергија. Тачност предикције нумеричким методом је висока. Приликом ових експеримената је вариран степен завртложења струје. Примењен је метод водене табле.

У раду [39] су ради побољшања рада инсинератора путем хидрауличког моделирања токова (метод водене табле) испитиване следеће модификације постојеће геометрије: Тест 1 је почетно стање, Тест 2 повећање излазног пресека из секундарне коморе, Тест 3 – уклањање преграде од цигала на улазу у секундарну комору, Тест 4 – промена позиције и Тест 5 – спуштање свода за паљење, Тест 5 повећање отпора на излазу из секундарне коморе. Шематски приказ је дат на слици 36.



Слика 36. Приказ геометрије и тестова који су обављени методом “водене табле” [39]

Резултати су приказани на слици 37, где су редом под А, Б, Ц, Д и Е, приказани резултати тестова 1, 2, 3, 4 и 5. У основном случају, првом тесту, слика 37 А, струјање у примарној зони сагоревања је оцењено као добро. Проблем који треба да се савлада је велики градијент брзине у секундарној комори који резултује највећим брзинама при плафону секундарне коморе. Високе брзине у овој зони могу да доведу до извођења несагорелих материја из секундарне коморе и до непотпуног сагоревања. Примећене су и мале брзине у доњем делу излазног пресека.

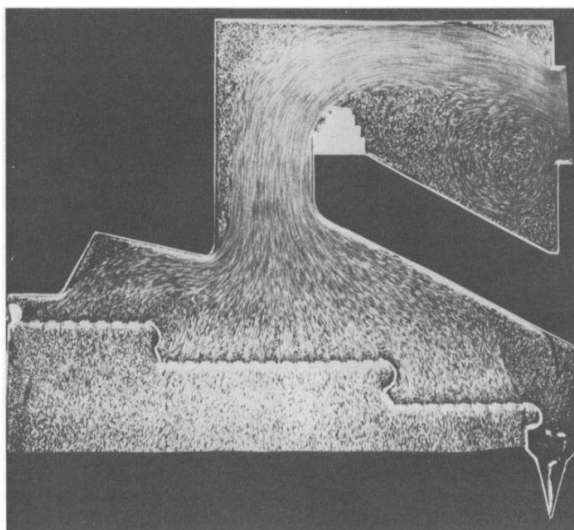
У другом тесту, слика 37Б, је повећан излазни пресек, тако што је горњи део постојећег зида уклоњен. Сврха овог теста је да се покаже да ова модификација не утиче на смањење високих брзина при плафону у секундарној комори. Пошто измена није довела до побољшања излазни пресек је враћен у почетно стање за следеће тестове.

У трећем тесту, слика 37 Ц, је уклоњена преграда на улазу у секундарну комору. Уклањање преграде је довело до повећања пресека, тако да је снижена средња брзина у том пресеку. Резултат ове промене је и смањење градијента брзине. Струјна слика је оцењена као задовољавајућа.

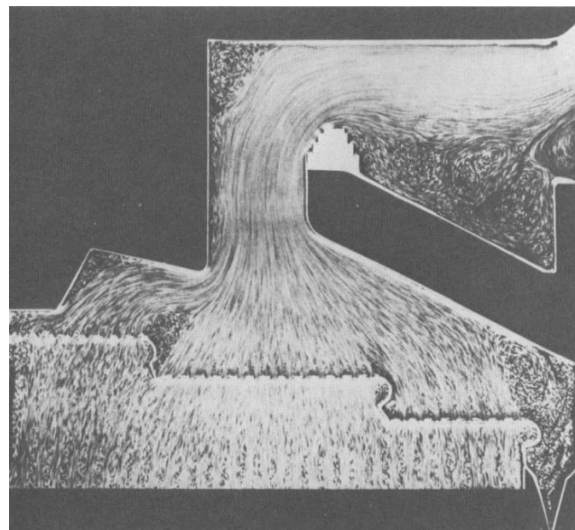
У четвртм тесту, слика 37 Д, се коси потпални свод у примарној комори модификује у хоризонтални. Утицај на струјно поље није знатан изван зоне испод самог свода. При томе није примећено негативно дејство, тако да је и ова модификација оцењена позитивно.

У петом тесту, слика 37 Е, је додат отпор у излазном пресеку. Резултат је општа равномернија расподела брзине у секундарној комори.

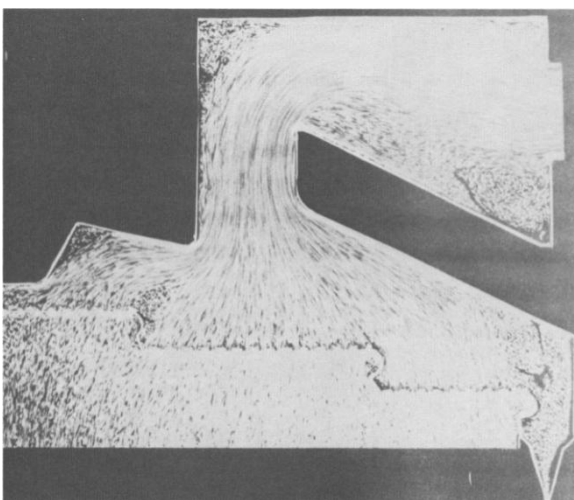
Према изложеном закључак студије је да су тестови 3, 4 и 5 прихватљиви. Зидана преграда на улазу у секундарну комору треба да буде уклоњена. Да ли ће бити коришћен хоризонтални или коси свод је само питање економије.



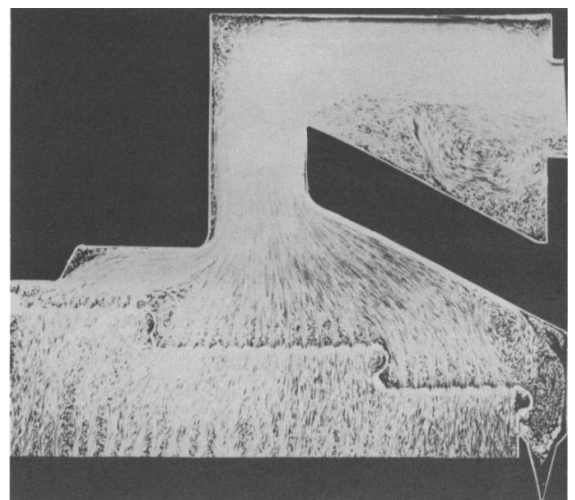
А) тест 1



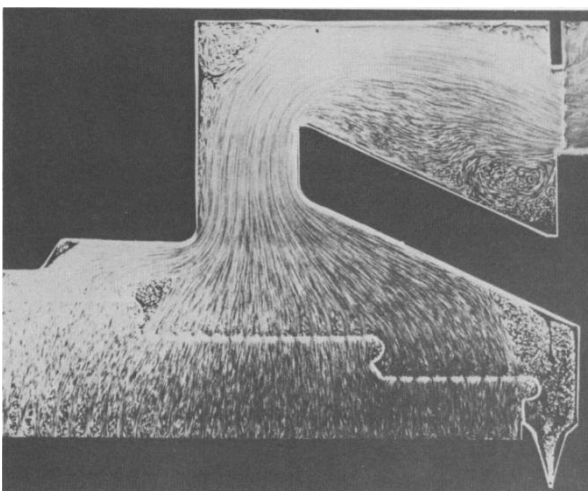
Б) тест 2



Ц) тест 3



Д) тест 4



Е) тест 5

Слика 37. Резултати експеримента типа “водене табле”[39]

1.2 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

1.2.1 Математички модел система сагоревања

Детаљан приказ математичког модела система сагоревања је дат у [40].

Систем у којем се одвија сагоревање може да се опише једначинама одржања масе (једн. 2), количине кретања (једн. 3), енергије (једн. 4) и компонената.

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad \text{Једн. 2}$$

где су ρ - густина флуида

- u, v, w - компоненте брзине

- x, y, z - координате положаја

Ова једначина тврди да је промена масе у јединици запремине зависна од улазног и излазног тока из исте. Струјање медијума кроз запремину се описује једначином одржања количине кретања:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial u}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{\partial v}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial v}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= \frac{\partial w}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial w}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z, \end{aligned} \quad \text{Једн. 3}$$

где су: μ - динамичка вискозност

- p - притисак

- g_x, g_y, g_z - пројекције гравитационог убрзања (у зависности који се координатни систем усвоји)

Температура медијума се описује једначином одржања енергије:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial c_p T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial c_p T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_p T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial c_p T}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{m}''' \Delta H + q_{\text{rad}}, \end{aligned} \quad \text{Једн. 4}$$

где су: c_p - специфична топлота при константном притиску

- T - температура

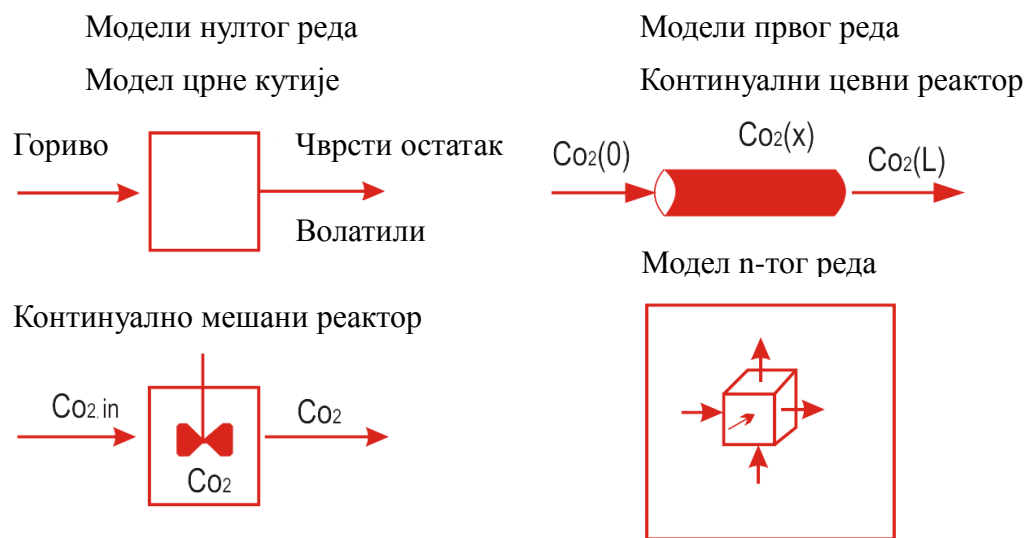
- k - коефицијент топлотне проводљивости
- Q_{rad} - топлотни флуks зрачењем
- \dot{m}''' - брзина хемијске реакције
- ΔH - топлота реакције

У наведеним једначинама одржања први члан са леве стране представља промену у времену, затим следи конвективни члан. На десној страни први члан означава транспорт величине која се билансира дифузијом. Остали чланови су различити извори, осим у једначини одржања количине кретања, где је присутан и градијент притиска.

Ове једначине се заједно са граничним условима решавају симултано у софтверима за CFD (Computational fluid dynamics). Да би се решиле једначине велики број потмодела је потребно дефинисати и укључити. Проблеми одређивања адекватних потмодела и данас представљају један од највећих изазова.

CFD софтверски пакети решавају проблем у три димензије, са могућношћу решавања непоједностављених система једначина, али у пракси ипак није увек неопходно посматрати најсложенији могући опис. Некада је довољно описати проблем тако да се као резултат добије мање информација и у времену и/или у простору. Један уобичајен приступ је да се систем за сагоревање прикаже као низ реактора, тако да се, на пример, први део посматра као реактор с идеалним мешањем, а други део/излазни као реактор са клипним струјањем, где се индиректно уводи претпоставка да се мешање и сагоревање одвијају у првом делу.

На слици 38 дат је приказ модела процеса сагоревања, од најједноставнијег модела нултог реда, преко модела првог реда до најсложенијег модела n-тог реда.

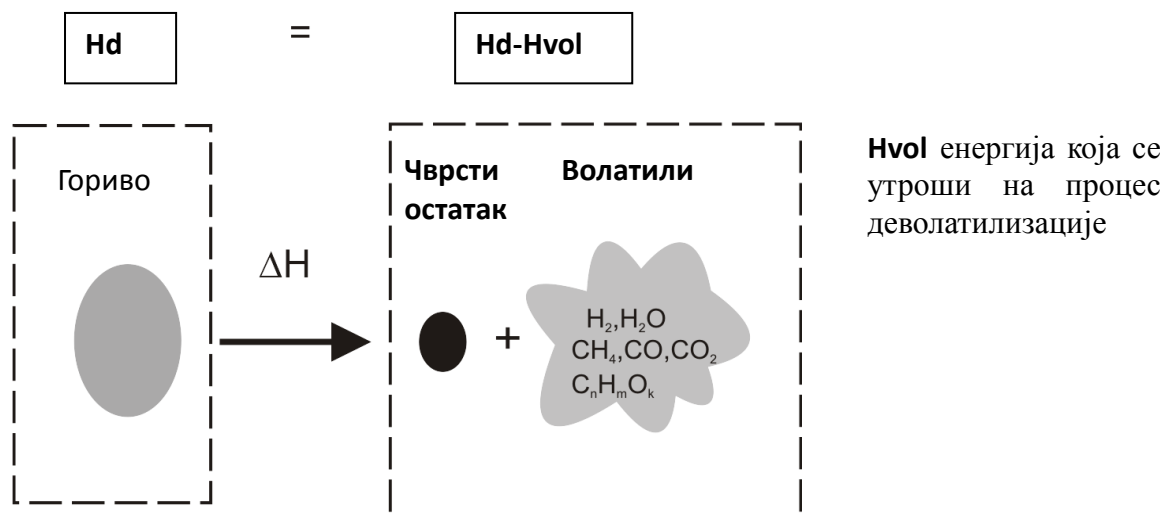


Слика 38. Врсте модела

1.2.1.1 Модел црне кутије

Када започиње проучавање система за сагоревање, препоручује се да се поставе једноставни биланси масе, појединих компонената и енергије у систему, када се систем третира као црна кутија. Овде се једначине конзервације свде на изворне чланове масе и једначину енергије. Овај тип модела се често назива модел нултог реда, јер не даје просторне информације. Овај тип модела може бити веома користан као потмодел у сложеним моделима као на пример када је реч о деволатилизацији биомасе. Резултат ове примене јесте одређивање састава волатила, који настају

приликом почетних фаза сагоревања биомасе. На слици 39 приказана је реакција деволатилизације.



Слика 39. Приказ реакције деволатилизације

Деволатилизација је сложен термохемијски процес у којем се чврсто гориво термички распада на велики број компонената, међу којима настали тешки угљоводоници се даље распадају на лакше. Ово је тешко моделовати чак и када се посматра једна честица, а сложеност се значајно повећава када се посматра реалан систем. Разлози су следећи: потребно је моделовати образовање и ослобађање великог броја компонената заједно са загревањем честице, структурним променама у самој честици, као и ток гаса и реакције насталог гаса унутар честице. Приликом моделовања у реалним системима се стога као неизбежна прихватају поједностављења, таква да би се модел поједноставио до нивоа на којем се може да се обави израчунавање. Решење је да се постави, када је у питању једна честица, граница система на површину честице. На тај начин се унутрашњост система третира као црна кутија, тако да се од све комплексности процеса који се у "њој" одвијају остаје само да се одреди састав и количине гасова, који пролазе кроз границу система. То може да се одреди решавањем биланса масе, компонената и енергије, при чему су једначине одржања свде на изворне термине који се односе на хемијске реакције.

Сагорљиви део горива чине угљеник, водоник и кисеоник, на пример удели за дрво су 50, 44 и 6 процената. Доња топлотна моћ дрвета је 18,5 MJ/kg и удео пепела је 0,5 процената, што чини доњу топлотну моћ сведену на сагорљиви део горива 18,6 MJ/kg. Чврсти остатак у случају дрвета чини 20 % и представља угљеник. Његова топлотна моћ је 33 MJ/kg чврстог остатка. Да би се деволатизовало гориво потребно је отприлике 0,2 MJ/kg (топлота пиролизе). Енталпија гасова, ослобођеним у процесу пиролизе, може да се израчуна према (једн. 5):

$$H_{vol} = \frac{18.6 - 0.2 - 0.2 \times 33}{1 - 0.2} = 14,75 \text{ MJ / kg volatila} \quad \text{Једн. 5}$$

Овај новонастали гас чини 6 главних компонената. То су редом: угљен-моноксид, угљен-диоксид, вода, водоник, лаки и тешки угљоводоници. Лаки угљоводоници су у гасовитом стању на температури околине и не кондензују се. Хемијски ови угљоводоници су најчешће метан и етилен, при чему је удео метана и

до три пута већи од удела етилена. Еквивалентна формула новонасталих лаких угљоводоника је стога $C_{1.15}H_4$ са топлотном моћи од 49,4 MJ/kg. Тешки угљоводоници који се кондензују на температури околине, се распадају на стабилније форме као што су бензен, нафтален и толуен на температурама које су уобичајене у системима сагоревања. Груба процена ових угљоводоника даје еквивалентну формулу: $C_6H_{6.2}O_{0.2}$ са топлотном моћи од 37 MJ/kg. Биланс енергије за волатиле је записан у (једн. 6):

$$Y_{CO}\Delta H_{CO} + Y_{CO_2}\Delta H_{CO_2} + Y_{H_2O}\Delta H_{H_2O} + Y_{H_2}\Delta H_{H_2} + Y_{C_iH_j}\Delta H_{C_iH_j} + Y_{C_nH_nO_k}\Delta H_{C_nH_nO_k} = H_{vol} \quad \text{Једн. 6}$$

Ако се замене претходно наведене вредности, добија се (једн. 7):

$$Y_{CO}10,25 + 0 + 0 + Y_{H_2}120 + Y_{C_{1.15}H_4}49,4 + Y_{C_6H_{6.2}O_{0.2}}37 = 14,75 \quad \text{Једн. 7}$$

Важи релација (једн. 8):

$$Y_{CO} + Y_{CO_2} + Y_{H_2O} + Y_{H_2} + Y_{C_iH_j} + Y_{C_nH_nO_k} = 1 \quad \text{Једн. 8}$$

Биланси компонената могу да се напишу за С, H_2 и O_2 .

У једначини 9 изражен је биланс масе за угљеник:

$$Y_{CO}\frac{M_C}{M_{CO}} + Y_{CO_2}\frac{M_C}{M_{CO_2}} + Y_{C_iH_j}\frac{M_{C_i}}{M_{C_iH_j}} + Y_{C_nH_nO_k}\frac{M_{C_n}}{M_{C_nH_nO_k}} = \frac{Y_C - Y_{char}}{1 - Y_{char}} \quad \text{Једн. 9}$$

Након замене бројчаних вредности добија се (једн. 10):

$$Y_{CO}0,429 + Y_{CO_2}0,273 + Y_{C_iH_j}0,775 + Y_{C_nH_nO_k}0,885 = \frac{0,5 - 0,2}{1 - 0,2} = 0,375 \quad \text{Једн. 10}$$

За елементарни водоник биланс масе гласи (једн. 11):

$$Y_{H_2} + Y_{H_2O}\frac{M_{H_k}}{M_{H_2O}} + Y_{C_iH_j}\frac{M_{H_j}}{M_{C_iH_j}} + Y_{C_nH_nO_k}\frac{M_{H_n}}{M_{C_nH_nO_k}} = \frac{Y_{H_2}}{1 - Y_{char}} \quad \text{Једн. 11}$$

Након замене бројчаних вредности добија се (једн. 12):

$$Y_{H_2} + Y_{H_2O}0,111 + Y_{C_iH_j}0,225 + Y_{C_nH_nO_k}0,076 = 0,075 \quad \text{Једн. 12}$$

За елементарни кисеоник O_2 биланс масе је приказан у (једн. 13):

$$Y_{CO}\frac{M_O}{M_{CO}} + Y_{CO_2}\frac{M_{O_2}}{M_{CO_2}} + Y_{H_2O}\frac{M_O}{M_{H_2O}} + Y_{C_nH_nO_k}\frac{M_{O_k}}{M_{C_nH_nO_k}} = \frac{Y_{O_2}}{1 - Y_{char}} \quad \text{Једн. 13}$$

Након замене бројчаних вредности добија се (једн. 14):

$$Y_{CO}0,571 + Y_{CO_2}0,727 + Y_{H_2O}0,889 + Y_{C_nH_nO_k}0,04 = 0,55 \quad \text{Једн. 14}$$

Ови биланси дају четири једначине, али пошто је шест непознатих, потребне су још две једначине за решавање система. Мерењем са конвенционалним анализаторима гасова могуће је поставити преостале две једначине, као односе између CO према CO_2 и C_iH_j према CO_2 . Мерењем у флуидизованом слоју на $850\text{ }^\circ\text{C}$, у инертној атмосфери, измерен молекуларни однос CO према CO_2 је приближно 3,

док C_iH_j према CO_2 је приближно 1,5. Ове односе би требало посматрати само као пример, јер су добијени под специфичним условима. Недостајуће једначине су стога (једн. 15 и 16):

$$Y_{CO} - Y_{CO_2} \cdot 3 \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} = 0 \quad \text{Једн. 15}$$

$$Y_{CO} - Y_{CO_2} \cdot 1.5 \frac{M_{C_iH_j}}{M_{CO_2}} = 0 \quad \text{Једн. 16}$$

Систем једначина може да се представи у матричној форми:

$$\begin{bmatrix} 10,25 & 0 & 0 & 120 & 49,4 & 37 \\ 0,429 & 0,273 & 0 & 0 & 0,775 & 0,885 \\ 0 & 0 & 0,111 & 1 & 0,225 & 0,075 \\ 0,571 & 0,727 & 0,889 & 0 & 0 & 0,04 \\ 1 & -1,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,61 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{CO} \\ Y_{CO_2} \\ Y_{H_2O} \\ Y_{H_2} \\ Y_{C_iH_j} \\ Y_{C_nH_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14,75 \\ 0,375 \\ 0,075 \\ 0,55 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решење овог система једначина је:

$$Y_{CO} = 0,361$$

$$Y_{CO_2} = 0,190$$

$$Y_{H_2O} = 0,227$$

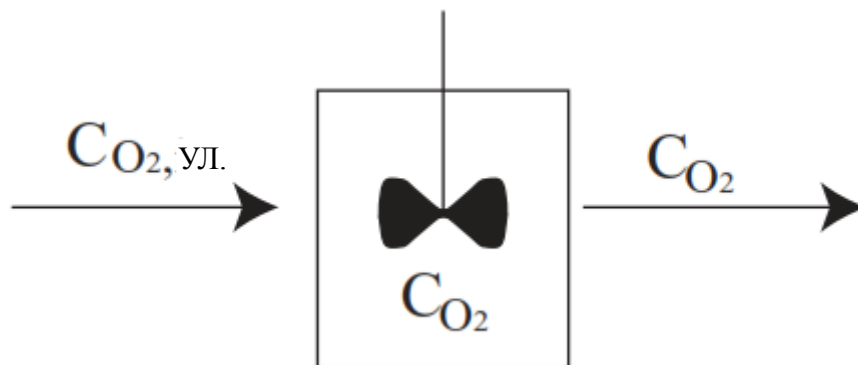
$$Y_{H_2} = 0,227$$

$$Y_{C_iH_n} = 0,116$$

$$Y_{C_nH_nO_k} = 0,089$$

1.2.1.2 Модел реактора с идеалним мешањем

Након модела „црне кутије“ по сложености је следећи модел реактора с идеалним мешањем, који је приказан на слици 40.



Слика 40. Модел реактора с идеалним мешањем

Овај модел се базира на две претпоставке. Прва је да је температура унутар реактора константна, ток је изотерман, тако да је решавање једначине одржања енергије тривијално. Друга претпоставка јесте да је реакција еквимоларна, што значи да је број молекула које продукује реакција идентичан броју молекула који се потроше у реакцији. То доводи до тога да је решавање једначине одржања количине кретања и укупне масе тривијално. Преостаје само решавање једначина одржања масе компонената. Проблем је у томе што само мали број реакција испуњавају услове еквимоларности. Изузетак су реакције воденог гаса $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ и потпуно сагоревање метана $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Налажење реакција које су термички неутралне је теже, али и то се може постићи уз ограничење, да се у обзир узимају одређени температурски нивои.

Математички опис реактора с идеалним мешањем може да се изведе из једначине одржања компоненте (једн. 17).

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \dot{m}_i''' \quad \text{Једн. 17}$$

Уз додатну претпоставку да је дифузивни члан занемарљив и уз дискретизацију добија се (једн. 18):

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \frac{Y_{i-1} - Y_i}{\Delta x} = \dot{m}_i''' \quad \text{Једн. 18}$$

Овде је Y_{i-1} масени удео компоненте на улазу у реактор. Пошто је реактор изотермалан и еквимоларан, једначина може да се изрази моларно уместо масено. Уз укључивање константе брзине хемијске реакције добија се (једн. 19):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{C_{i-1} - C_i}{\Delta x} = C_i k \quad \text{Једн. 19}$$

Под претпоставком устаљеног стања и кроз дефинисање времена задржавања у реактору као $\tau = \Delta x / u$, добија се (једн. 20):

$$\frac{C_{i-1} - C_i}{\tau} = C_i k \quad \text{Једн. 20}$$

Константа брзине хемијске реакције се приказује преко Аренијусове формулације (једн. 21):

$$\frac{dC}{dt} = Ck, \text{ где је } k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \text{Једн. 21}$$

Уколико се у систему одвија велики број реакција, не само првог реда, директно решавање је веома захтевно. Да би се омогућило решавање укључује се још један временски зависан члан и читав систем се даље решава као систем обичних диференцијалних једначина (једн. 22) за које постоје солвери, и решење се добија када се сви ти чланови са леве стране изједначе са нулом.

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= -\frac{C_{1,0} - C_1}{\tau} + \sum_{i=1}^N \Omega_{1i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{\gamma_{i,j}} \\ \frac{dC_2}{dt} &= -\frac{C_{2,0} - C_2}{\tau} + \sum_{i=1}^N \Omega_{2i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{\gamma_{i,j}} \\ \frac{dC_3}{dt} &= -\frac{C_{3,0} - C_3}{\tau} + \sum_{i=1}^N \Omega_{3i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{\gamma_{i,j}} \\ \frac{dC_n}{dt} &= -\frac{C_{n,0} - C_n}{\tau} + \sum_{i=1}^N \Omega_{ni} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{\gamma_{i,j}} \end{aligned}$$

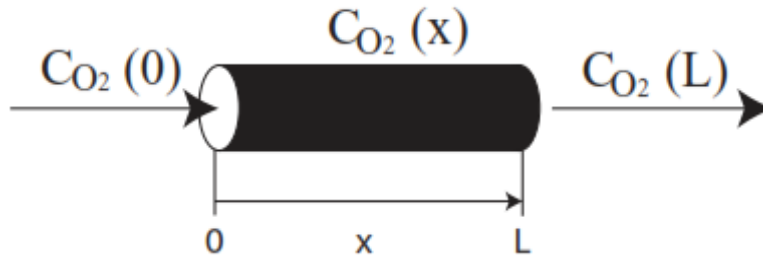
Једн. 22

Овде је Ω стехиометријски коефицијент за дату компоненту у реакцији i , а $\gamma_{i,j}$ је експонент уз концентрацију компоненте j у изразу за брзину реакције i .

Почетни услови за сваку компоненту је концентрација на улазу у реактор.

1.2.1.3 Модел реактора са клипним струјањем

Након реактора с идеалним мешањем по сложености следи реактор са клипним струјањем, шематски приказан на слици 41.



Слика 41. Модел реактора са клипним струјањем

У случајевима када је потребно познавати одвијање сагоревања у систему који није сложен, једнодимензионални опис може бити довољан. Овакви описи се називају моделима клипног струјања. Најједноставнија форма оваквог струјања је она коју прати изотермност и еквимоларност, и тада се само једначине одржања за компоненте разматрају (једн. 23):

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \dot{m}_i''' \quad \text{Једн. 23}$$

Даљња поједностављења модела клипног струјања су да се уведе претпоставка устаљености и занемари дифузни члан. Добија се следећа формулација (једн. 24):

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \dot{m}_i''' \quad \text{Једн. 24}$$

Ова једнакост се у литератури обично изражава преко функције времена задржавања ($\tau = x/u$) у реактору и преко моларне концентрације (једн. 25):

$$\frac{dC_i}{dt} = C_i k \quad \text{Једн. 25}$$

Уколико се у систему одвија више реакција различитог реда добија се следећи систем обичних диференцијалних једначина (једн. 26), где је N укупан број реакција, Ω_{ji} је стехиометријски коефицијент компоненте j у реакцији i , A_i представља предекспоненцијални коефицијент за одређивање константе брзине реакције i , Π означава производ:

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= \sum_{i=1}^N \Omega_{1i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{Y_{ij}} \\ \frac{dC_2}{dt} &= \sum_{i=1}^N \Omega_{2i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{Y_{ij}} \\ \frac{dC_3}{dt} &= \sum_{i=1}^N \Omega_{3i} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{Y_{ij}} \\ \frac{dC_n}{dt} &= \sum_{i=1}^N \Omega_{ni} A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \prod_{j=1}^n C_j^{Y_{ij}} \end{aligned} \quad \text{Једн. 26}$$

Гранични услов је концентрација на улазу одговарајуће компоненте.

1.2.1.4 Приступи моделовања транспорта дискретне фазе

Бројни су примери техничких уређаја у којима се одвија сагоревање који укључују велики број чврстих честица или капљица, које бивају ношене струјом гасова. То су на пример сагоревање спрашеног угља, течног горива, а чак и код дрвета постоји слична проблематика. Овакви проблеми се описују тако што се гасови посматрају као континуум, док чврсте или течне честице се посматрају као дискретна фаза. Опис кретања ових честица представља посебан изазов. Постоје два приступа која се користе за моделовање дискретне фазе: Ојлеров и Лагранжов.

Ојлеров приступ посматра контролну запремину која је фиксна у простору. Једначине одржања сличне онима које описују струјање гасне фазе се постављају и за дискретну фазу. Узајамно дејство између дискретне фазе и гасне фазе се укључује кроз одговарајуће изворне термине.

Лагранжов приступ посматра контролну запремину у чијем је центру честица. Овај приступ прати честицу дуж њене путање при кретању кроз простор. Кретање честице може да се опише преко:

$$m_{\xi} \frac{d\vec{u}_{\xi}}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_G, \quad \text{Једн. 27}$$

где m_{ξ} представља масу честице, u_{ξ} брзину честице, t је време, F_D и F_G представљају силе отпора струјању и гравитације. Аеродинамички отпор струјању је функција разлике између брзине струјања гаса и честица, Рејнолдсовог броја и турбулентних флукуација у гасу. Посебно је потребно узети у обзир, кроз додатне једначине промену масе честице, као последицу сагоревања.

1.2.2 Метод коначних запремина-дискретизација

Полазиште метода коначних запремина је интегрална форма једначине одржања. Ако се посматра стационаран случај, ако се изузме временски члан, добија се једн. 28 у којој израз са леве стране представља конвективни члан, први израз са десне стране представља дифузијски члан, а други израз са десне стране представља изворни члан.

$$\int_S \rho \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \mathbf{grad} \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega, \quad \text{Једн. 28}$$

где су:

ρ - густина

ϕ - физичка величина која се билансира

\mathbf{v} – вектор брзине

\mathbf{n} – вектор нормале на припадајућу инфинитезималну граничну површину контролне запремине

dS – инфинитезимална гранична површина контролне запремине

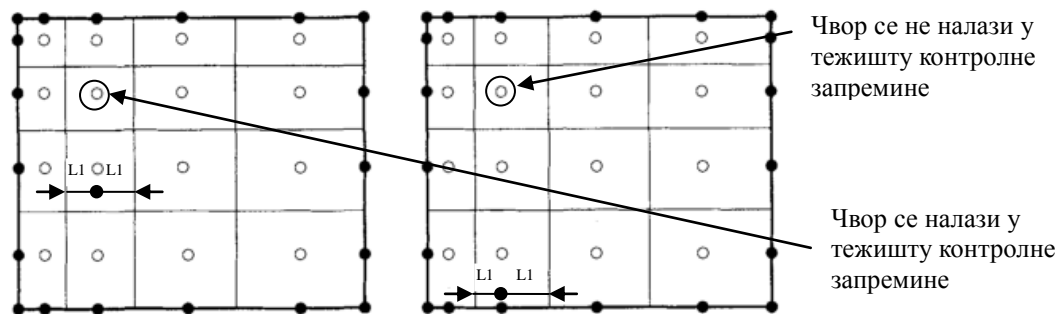
Γ - коефицијент дифузије

$\mathbf{grad} \phi$ – градијент физичке величине ϕ

Ω - запремина (контролне запремине)

Q_Φ - извор физичке величине Φ унутар контролне запремине

Простор у којем се тражи решење за непознату величину, за коју се обавља прорачун, се дели на коначан број запремина. Димензије ових запремина нису инфинитезималне, него су коначне. У свакој запремини се налази чвор. Чворови могу да се поставе тако да они представљају тежиште коначне запремине, а постоји могућност да се прво дефинише положај чворова, а да се унутрашње границе запремина потом повуку, тако да полове растојање између чворова. У овом другом случају чворови се не налазе у тежишту коначне запремине. Чворови се и у том случају могу наћи у тежишту коначне запремине, ако су суседни чворови еквилидистантни. У првом случају приказаном на слици 42 лево, удаљеност чвора од једне и друге границе је једнака, $L1=L1$. У другом случају није, $L1 \neq L1$. Ова два система поделе запремине су приказана на слици 42.



Слика 42. Типови мрежа: чворови центрирани у контролној запремини (лево) и стране центриране (десно) [42]

Интегрална форма једначине одржања (једн. 28) важи како за сваку коначну запремину (КЗ), тако и за читав домен проблема. Да би се добила алгебарска једначина за поједину КЗ, потребно је да се површински и запремински интегрални апроксимирају. У зависности од шеме апроксимације резултујуће једначине могу бити идентичне оним, које се добијају методом коначних разлика.

Површину која ограничава коначну запремину чине четири (дводимензионални случај) или шест (тродимензионални случај) лица. Стране се означавају малим латиничним словима у зависности од положаја у односу на централни чвор P (P потиче од Point-тачка), и то са e (што потиче од east-исток)), w (west-запад)), n (north-север), s (south-југ), t (top-горњи) и b (bottom-доњи).

Укупни флуks кроз границу контролне запремине је сума флуkseва кроз свако лице КЗ. Укупни флуks се изражава преко (једн. 29):

$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS, \quad \text{Једн. 29}$$

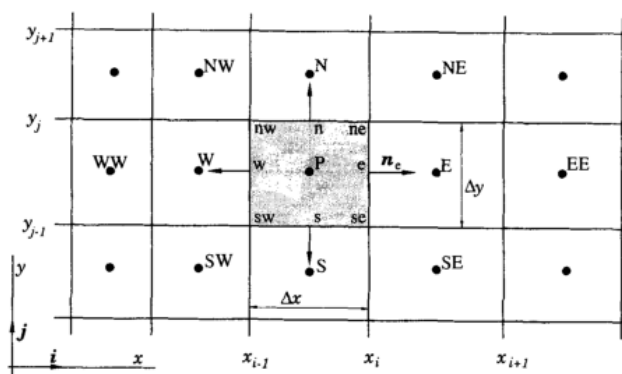
где је:

f - флуks физичке величине кроз границу контролне запремине

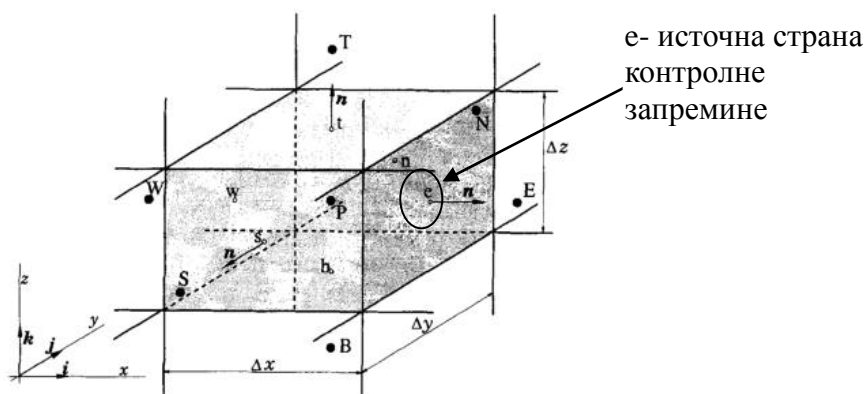
k – индекс контролне запремине

Овде се са f означава флуks, који чине два дела: конвективни и дифузни, оба у смеру нормале на лице КЗ. Конвективни флуks се представља као $\rho \Phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$, а дифузни

као $\Gamma grad\phi \cdot \mathbf{n}$. Коначне запремине не смеју да се преклапају. На сликама 43 и 44 су приказани примери редом контролне запремине у две и три димензије, са припадајућим означавањем.



Слика 43. Пример 2Д контролне запремине [42]



Слика 44. Пример 3Д контролне запремине [42]

1.2.2.1 Апроксимација површинског интеграла

На примеру лица e (источне стране контролне запремине) биће приказано извођење апроксимације површинског интеграла.

За израчунавање површинског интеграла из (једн. 29) је потребно познавати вредност подинтегралне функције на читавој страни e . Ова информација није расположива пошто се само вредности у чвору КЗ-е израчунавају, тако да је неопходно да се уведе апроксимација. Интеграл се апроксимира на основу једне или више вредности променљиве на страници КЗ, а ове вредности се одређују преко вредности у суседним чворовима. Најједноставнија апроксимација је помоћу формуле правоугаоника (једн. 30), чијим коришћењем се интеграл апроксимира производом подинтегралне функције у центру стране и површине стране.

$$F_e = \int_{S_e} f dS = \bar{f}_e S_e \approx f_e S_e \quad \text{Једн. 30}$$

Ова апроксимација је другог реда тачности. Пошто вредност f није позната ни у једној тачки површине стране, самим тим ни у центру, она мора да се добије интерполацијом. Да би се задржала тачност другог реда, вредност f мора да се израчуна коришћењем методе бар другог реда тачности. Може да се примени и формула трапеза (једн. 31), чија тачност је истог реда, као и формула правоугаоника.

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{2} (f_{ne} + f_{se}) \quad \text{Једн. 31}$$

У овом случају је потребно да се одреде вредности у угловима КЗ. Уколико је потребна већа тачност, неопходно је одређивање вредности у већем броју тачака. Апроксимација четвртог реда се добија Симпсоновим правилом (једн.32)

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{6} (f_{ne} + 4f_e + f_{se}) \quad \text{Једн. 32}$$

Овде се вредности f одређују на три места, у центру странице и у два угла ne и se . Да би се задржао четврти ред тачности неопходно је да се вредности у центру и у угловима одреде коришћењем полинома трећег степена.

И у тродимензионалном случају правило правоугаоника је најједноставније, при чему су могуће апроксимације вишег реда које захтевају одређивање подинтегралне функције не само у центру, него и у угловима и средиштима ивица, али се тешко имплементирају у код.

1.2.2.2 Апроксимација запреминских интеграла

Најједноставнија апроксимација запреминских интеграла тачности другог реда је замена интеграла производом средње вредности подинтегралне функције и запремине коначне запремине (једн. 33), при чему се вредност подинтегралне функције узима у чвору КЗ.

$$Q_P = \int_{\Omega} q d\Omega = \bar{q} \Delta\Omega \cong q_P \Delta\Omega, \quad \text{Једн. 33}$$

где q_P представља вредност q у чвору контролне запремине. Пошто су све величине у чвору P познате, интерполација није потребна. Ова апроксимација је тачна ако је q или константна или се мења линеарно у оквиру КЗ, у супротном садржи грешку другог реда. Уколико је тражена тачност вишег реда, тада је потребно да се одреде вредности на више места у КЗ, или интерполацијом или коришћењем функција облика.

У дводимензионалном случају, запремински интеграл постаје површински, при чему апроксимација четвртог реда може да се добије коришћењем биквадратне функције облика (једн.34):

$$q(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2 \quad \text{Једн. 34}$$

Девет коефицијената у овој једначини се одређују фитовањем ове полиномне криве вредностима на девет локација ($nw, w, sw, n, P, s, ne, e$ и se).

Да би се апроксимирали интегрални неопходно је познавање вредности променљивих изван прорачунских места, односно централних чворова у контролној запремини. Овде ће бити приказане узводна, линеарна и QUICK шема.

Ако се користи узводна шема, тада се вредност у центру стране (страна е се посматра) износи (једн. 35):

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P \text{ ако је } (v \cdot n)_e > 0 \\ \phi_E \text{ ако је } (v \cdot n)_e < 0 \end{cases} \quad \text{Једн. 35}$$

Уколико се функција развије у Тејлоров ред у близини чвора Р добија се (једн.36):

$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_P) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{(x_e - x_P)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H \quad \text{Једн. 36}$$

Пошто апроксимација обухвата само први члан са десне стране, она је првог реда. Значајну грешку представља други члан са десне стране једнакости који има форму дифузног феномена, и назива се лажна дифузија. Да би се утицај овог члана свео на минимум, неопходне су гушће мреже, него у осталим шемама.

Ако се користи линеарна шема, тада се за вредност ϕ_e добија (једн. 37):

$$\phi_e = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e), \quad \text{Једн. 37}$$

где је λ_e дефинисан преко (једн. 38):

$$\lambda_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \quad \text{Једн. 38}$$

QUICK шема представља побољшање у односу на линеарну апроксимацију, тако што се промена функције између чворова Р и Е представља параболом. Да би се конструисала парабола потребно је познавање вредности у три тачке. За случај да је ток у смеру од Р до Е добија се (једн. 39):

$$\phi_E = \phi_U + g_1(\phi_D - \phi_U) + g_2(\phi_U - \phi_{UU}), \quad \text{Једн. 39}$$

где су: g_1 и g_2 фактори који се дефинишу посредством једн. 39а и једн 39.б.

$$g_1 = \frac{(x_e - x_U)(x_e - x_{UU})}{(x_D - x_U)(x_D - x_{UU})} \quad \text{Једн. 39а}$$

$$g_2 = \frac{(x_e - x_U)(x_D - x_e)}{(x_U - x_{UU})(x_D - x_{UU})} \quad \text{Једн. 39б}$$

1.2.2.3 Решавање система алгебарских једначина

Сумирањем израза који апроксимирају флуксе и изворне чланове, добија се алгебарска једначина, која повезује вредност у чвору КЗ-е са вредностима чворова неколико суседних КЗ-а. Пошто је број једначина једнак броју непознатих, систем је решив.

Резултат дискретизације је систем алгебарских једначина, које су линеарне или нелинеарне у зависности од врсте парцијалне диференцијалне једначине из које су изведене. Уколико је систем линеаран тада су на располагању директне и индиректне или итеративне методе. Под класу директних метода спадају Гаусов метод елиминације и метода примене Крамеровог правила. Директно решавање система N једначина са N непознатих захтева N^3 операција. Додатно је потребно обезбедити меморијске локације за N^2 променљивих. Уколико је случај нелинеаран, дискретизоване једначине се решавају итеративним поступком. Итеративне методе се базирају на примени релативно једноставног алгоритма, који доводи до конвергенције ка решењу након великог броја итерација. Решење се претпоставља, једначине се линеаризују око тог решења, а потом се добија ново побољшано решење

које се итерира. Укупан број операција, број итерација, не може да се унапред процени. По једној итерацији је број потребних операција реда величине N .

У оквиру CFD проблема систем чини од 100.000 до 1,000.000 једначина, тако да су итеративни методи ефикаснији у решавању проблема.

Додатан битан аспект система који се решава у оквиру CFD проблема је тај да су матрице које се добијају дискретизацијом увек ретке, тј. већина елемената су нуле. Елементи који нису нуле леже у неколико дијагонала. Ова чињеница је последица да су величине у једном чвору у зависности од величина у суседним чворовима.

Један од најефикаснији начина за решавање система алгебарских једначина јесте коришћење ТДМА поступка, који се базира на Томасовом алгоритму. ТДМА је скраћеница од Three diagonal matrix algorithm– тро-дијагонални матрични алгоритам. Код који имплементира овај алгоритам у Фортрану може да се испише у само 8 линија. Предност овог метода је то што је број операција потребан да се он изведе n , док у случају поступка Гаусове елиминације је тај број операција n^3 .

Ако се посматра систем једначина који има тродијагоналну форму (једн. 40).

$$\phi_1 = C_1$$

$$-\beta_2 \phi_1 + D_2 \phi_2 - \alpha_2 \phi_3 = C_2$$

$$-\beta_3 \phi_2 + D_3 \phi_3 - \alpha_3 \phi_4 = C_3$$

$$-\beta_4 \phi_3 + D_4 \phi_4 - \alpha_4 \phi_5 = C_4$$

$$-\beta_n \phi_{n-1} + D_n \phi_n - \alpha_n \phi_{n+1} = C_n$$

$$\phi_{n+1} = C_{n+1}$$

Једн. 40

где су ϕ_1 и ϕ_{n+1} су гранични услови.

Једначине могу да се напишу у следећој општој форми (једн. 41-45):

$$-\beta_j \phi_{j-1} + D_j \phi_j - \alpha_j \phi_{j+1} = C_n \quad \text{Једн.41}$$

$$\phi_2 = \frac{\alpha_2}{D_2} \phi_3 + \frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \quad \text{Једн.42}$$

$$\phi_3 = \frac{\alpha_3}{D_3} \phi_4 + \frac{\beta_3}{D_3} \phi_2 + \frac{C_3}{D_3} \quad \text{Једн.43}$$

$$\phi_4 = \frac{\alpha_4}{D_4} \phi_5 + \frac{\beta_4}{D_4} \phi_3 + \frac{C_4}{D_4} \quad \text{Једн.44}$$

$$\phi_n = \frac{\alpha_n}{D_n} \phi_{n+1} + \frac{\beta_n}{D_n} \phi_{n-1} + \frac{C_n}{D_n} \quad \text{Једн.45}$$

ϕ_2 из једначине (једн. 42) се замењује у једначину (једн.43) и добија се (једн.46):

$$\phi_3 = \left(\frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right) \phi_4 + \left[\frac{\beta_3 \left(\frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \right) + C_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right] \quad \text{Једн. 46}$$

Уколико се усвоје смене приказане у (једн. 47 и 48):

$$A_2 = \frac{\beta_2}{D_2} \quad \text{Једн. 47}$$

$$C_2' = \left(\frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \right) \quad \text{Једн. 48}$$

Једначина (једн. 46) може да се испише у следећој форми (једн. 49):

$$\phi_3 = A_3 \phi_4 + C_3' \quad \text{Једн. 49}$$

где су A_3 и C_3' приказане у (једн. 50 и 51):

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad \text{Једн. 50}$$

$$C_3' = \frac{\beta_3 C_2' + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad \text{Једн. 51}$$

Добија се следећа рекурентна формула (једн. 52):

$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C_j' \quad \text{Једн. 52}$$

Формуле (једн. 49 и 52) могу да се примене и на граничне услове, где су A_j и C_j' приказане у (једн. 53 и 54)

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad \text{Једн. 53}$$

$$C_j' = \frac{\beta_j C_{j-1}' + C_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad \text{Једн. 54}$$

За потребе решавања система једначина, једначине се прво организују у форми (једн. 41), при чему се одређују коефицијенти α_j, β_j, C_j и D_j . Вредности A_j и C_j' се рачунају са почетком у $j=2$ до $j=n$. Пошто је вредност ϕ_j позната на граници, $j=n+1$, вредности ϕ_j могу да се израчунају уназад од $j=n$ до $j=2$, коришћењем рекурентних формула (једн. 55 и 56).

$$A_1 = 0 \quad i \quad C_1' = \phi_1 \quad \text{Једн. 55}$$

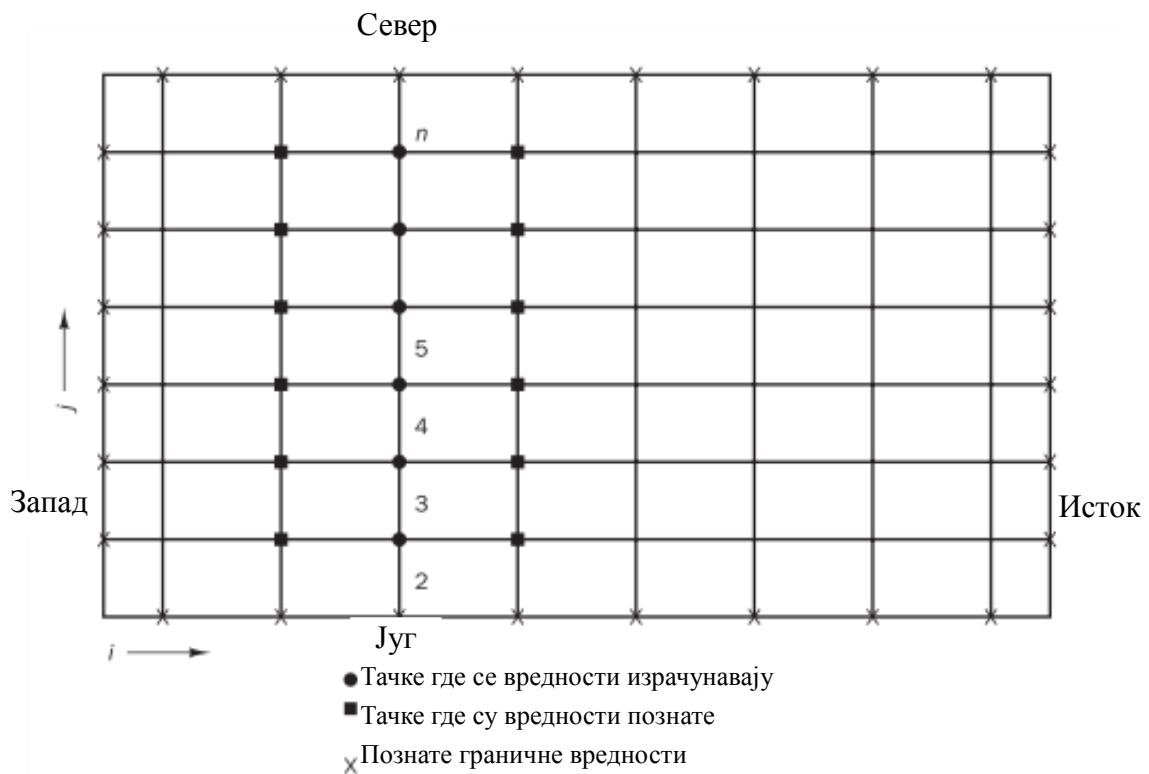
$$A_{n+1} = 0 \quad i \quad C_{n+1} = \phi_{n+1} \quad \text{Једн. 56}$$

У оквиру CFD-а појављују се дво- и тро-димензионални проблеми. И за решавање ових проблема се примењује исти алгоритам, само нешто модификован. Главна разлика је у томе да сада он поприма итеративни карактер. Овде ће бити демонстриран и појашњен приступ решавању дводимензионалног проблема.

Вредност у чвору P је повезана алгебарском једначином са вредностима суседних чворова, и може да се прикаже преко (једн. 57):

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad \text{Једн. 57}$$

Посматрани дводимензионални проблем је приказан на слици 45, где су са x приказани чворови у којима су познате вредности – гранични услови, са пуним круговима су означени чворови у којима се вредности израчунавају, а са пуним квадратима су означени чворови у којима су вредности познате.



Слика 45. Линијски метод примене ТДМА алгоритма [42]

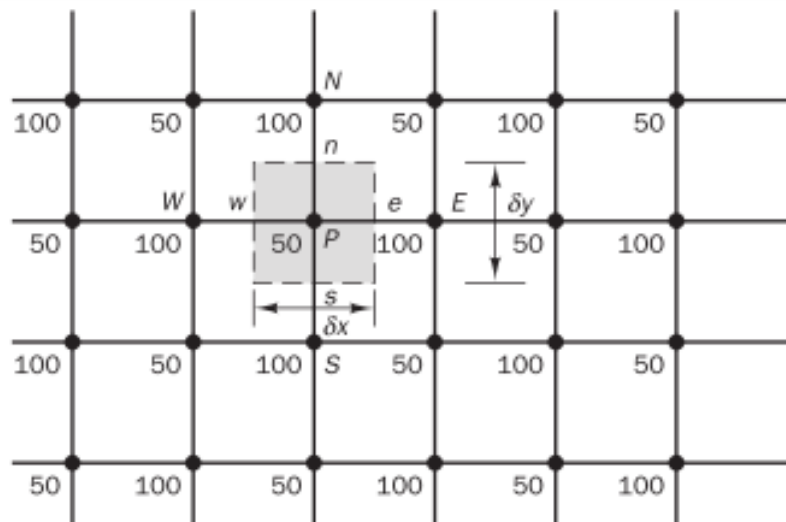
Да би се применио претходно објашњен Томасов алгоритам бира се рута којом ће се решавати проблем у овом случају север југ, тако да се вредности у чворовима P, N и S постављају на леву страну, а остали на десну. Сматра се да су вредности у чворовима изван правца север југ познате, или из претходне итерације или су тривијално усвојене на почетку као нуле. Алгоритам се примењује. Према (једн. 41) овде су сада $\alpha_j \equiv a_N, \beta_j \equiv a_S, D_j \equiv a_P, C_j \equiv a_W \phi_W + a_E \phi_E + b$. Након спровођења калкулације по правцу југ север прелази се на следећу линију паралелну првобитној, која пролази кроз чвор E (једн. 58).

$$-a_S \phi_S + a_P \phi_P - a_N \phi_N = a_W \phi_W + a_E \phi_E + b \quad \text{Једн. 58}$$

Процедура се у три димензије одвија слично као у две димензије, са разликом да се поред померања у равни правац помера и у простору, тако да се процедура из две димензије понавља у равнима које су померене у односу на првобитну раван у правцу $U - D$.

1.2.2.4 Померена мрежа

Један од проблема је представљало и питање у којим тачкама простора треба рачунати компоненте брзина, да ли у истим оним у којима се рачунају скаларне величине, као што су то притисак и температура, или не. Проблем је повезан са притиском. Уколико би брзине и притисци били рачунати у истим тачкама тада у случају изразито неравномерног поља притиска, добијени резултат био би нереалан. То може да се демонстрира на следећем дводимензионалном проблему приказаном на слици 46.



Слика 46. Неравномерно поље притисака [42]

Ако се притисци на e и w странама добијају линеарном интерполацијом, тада градијент притиска у x правцу је дат преко (једн. 59):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_e - p_w}{\delta x} = \frac{\left(\frac{p_E + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_W}{2}\right)}{\delta x} = \frac{p_E - p_W}{2\delta x} \quad \text{Једн. 59}$$

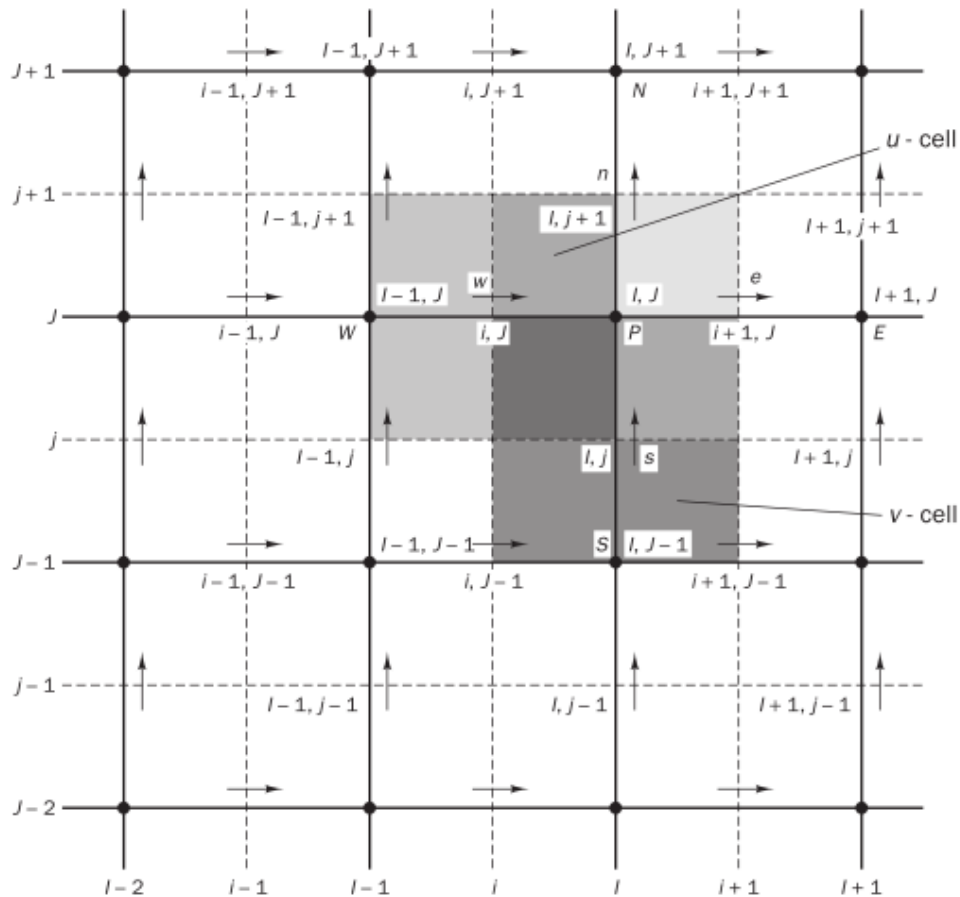
Слично је и у y правцу (једн. 60):

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_N - p_S}{2\delta y} \quad \text{Једн. 60}$$

Оно што је приметно јесте то да притисак у централном чвору P се уопште не појављује у једначинама (једн. 59, једн. 60).

Уколико би се замениле вредности притиска из датог примера на слици градијенти притиска у оба правца би били једнаки нули. Као последица, утицај притиска на струјање, према овим једначинама, не постоји. Решење за овај проблем

је нађено (Harlow and Welch, 1965.) такво да се скаларне величине као што су притисак, температура и густина одређују у централним чворовима, док се компоненте брзине одређују на одговарајућим странама, тако да се u компонента одређује на e и w странама, а v компонента на n и s странама. То решење је приказано на слици 47.:



Слика 47. Приказ померене мреже [42]

1.2.2.5 SIMPLE алгоритам

Акроним SIMPLE представља Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, полуимплицитни метод за једначине које повезује притисак. Аутори овог алгоритма су Патанкар и Спалдинг (1972). Проблем приликом решавања Навије-Стоксових једначина је у спрегнутости притиска и компонената брзина, при чему је ситуација усложњена присутношћу притиска у форми парцијалног извода. Иако су за решавање четири променљиве, све три компоненте брзине и притисак, на располагању четири једначине, поред једначина одржања момента у три правца, на располагању је и једначина одржања масе. Проблем представља чињеница да је притисак у овој једначини имплицитно приказан. У једначинама одржања момента су присутне нелинеарности кроз производе компонената брзине. Све три једначине (одржања момента) су спрегнуте, с тим да у свакој су присутне све три компоненте брзине.

Први корак **SIMPLE** алгоритма је претпоставка поља притиска p^* . Дискретизоване моментне једначине се решавају коришћењем датог поља притиска и добијају се компоненте u^* и v^* (једн. 61 и 62):

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad \text{Једн. 61}$$

$$a_{i,j}v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{I,J-1}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad \text{Једн. 62}$$

Затим се дефинише корекција притиска p' као разлика између стварне вредности p и претпостављене вредности p^* , тако да се добија (једн. 63):

$$p = p^* + p' \quad \text{Једн. 63}$$

Слично се дефинишу и корекције брзине

$$u = u^* + u' \quad \text{Једн. 64}$$

$$v = v^* + v' \quad \text{Једн. 65}$$

Заменом (једн. 63, 64 и 65) у (једн. 61 и 62) добијају се (једн. 66 и 67)

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb} (u_{nb} - u_{nb}^*) + (p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad \text{Једн. 66}$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb} (v_{nb} - v_{nb}^*) + (p_{I,J-1}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad \text{Једн. 67}$$

Поједностављењем ових једначина добијају се (једн. 68 и 69):

$$a_{i,j}u_{i,j}' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_{I-1,J}' - p_{I,J}')A_{i,j} \quad \text{Једн. 68}$$

$$a_{i,j}v_{i,j}' = \sum a_{nb} v_{nb}' + (p_{I,J-1}' - p_{I,J}')A_{i,j} \quad \text{Једн. 69}$$

Уколико се занемари члан са сумом добија се израз за корекцију компонената брзина (једн. 70 и 72):

$$u_{i,j}' = (p_{I-1,J}' - p_{I,J}') \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad \text{Једн. 70}$$

$$v_{i,j}' = (p_{I,J-1}' - p_{I,J}') \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad \text{Једн. 71}$$

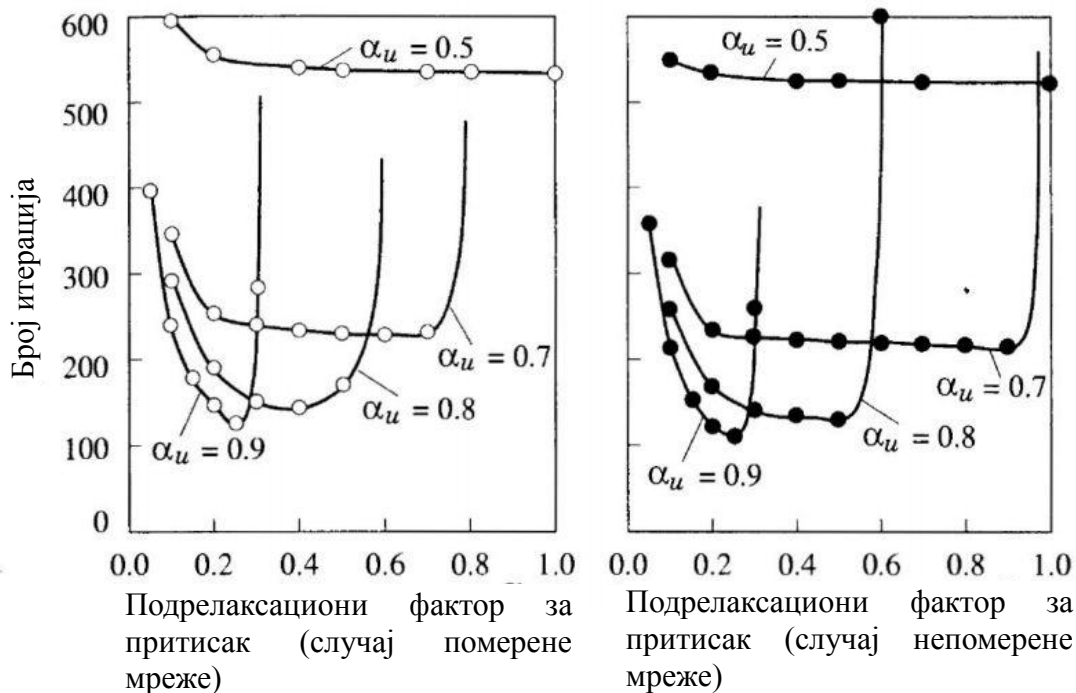
Добијају се нове претпоставке за вредности компонената брзина (једн. 72 и 73):

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + (p_{I-1,J}' - p_{I,J}') \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad \text{Једн. 72}$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + (p_{I,J-1}' - p_{I,J}') \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad \text{Једн. 73}$$

Да би се побољшала конвергенција уводи се подрелаксација која се дефинише кроз факторе α_p и α_v . Правилан избор ових вредности значајно утиче на конвергенцију. Превисоки фактори могу да се доведу до осцилаторног или чак дивергентног понашања, док уколико се изабере ниска вредност, тада наступа спора конвергенција. Оптималне вредности ових фактора зависе и од врсте струјања, тако

да се од случаја до случаја морају изнова тражити. Оквирне препоруке су дате у [41], где се препоручују вредности: $\alpha_p = 0,8$, $\alpha_v = 0,5$. Према [42] пак овај избор није оптималан, што је приказано на слици 48, на којој је забележено у једном конкретном случају (симулација 2D струјања флуида у шупљини узрокованог померањем поклопца, енг.: Lid-driven cavity flow), колико је потребно итерација да се грешка/резидуал у свим једначинама смањи за три реда величине, при комбинацији различитих подрелаксационих фактора. Слика 48 лево приказује резултате када је примењен SIMPLE метод на помереној мрежи, а десно на непомереној мрежи (колоцираној).



Слика 48. Приказ утицаја фактора подрелаксације [42]

1.2.2.6 Тачност

На тачност утичу два фактора, први су грешке, а други су несигурности. Разлика између грешака и несигурности је у томе што су ове друге последица недовољног познавања феномена који се описује. Несигурности тешко могу да се квантификују уколико не постоји поређење с експериментом. Грешке са друге стране могу бити нумеричке, грешке програмирања и корисничке грешке.

Нумеричке грешке су резултат разлика између тачних једначина које описују један струјни проблем и њихове дискретизоване форме. Ове грешке могу да се умање повећањем густине мреже и/или смањењем временског корака. Грешке моделовања потичу из потребе адекватног описа

1.2.2.6.1 Грешке услед несигурности модела

Приликом описивања сложених струјних проблема, у којима су присутни турбуленција, сагоревање, пренос масе и топлоте, неопходно је укључивање

потмодела који су често полуемпиријски. Свакако ови подмоделу одговарају данашњем нивоу сазнања из тих области. Оно што карактерише ове подмоделе је то да се у њима јављају константе које се одређују експериментима са једноставним струјањима. Тако на пример двоједначински модел турбуленције $k-\epsilon$ укључује пет констаната. Детаљи о томе ће бити изложени у секцији описа турбуленције.

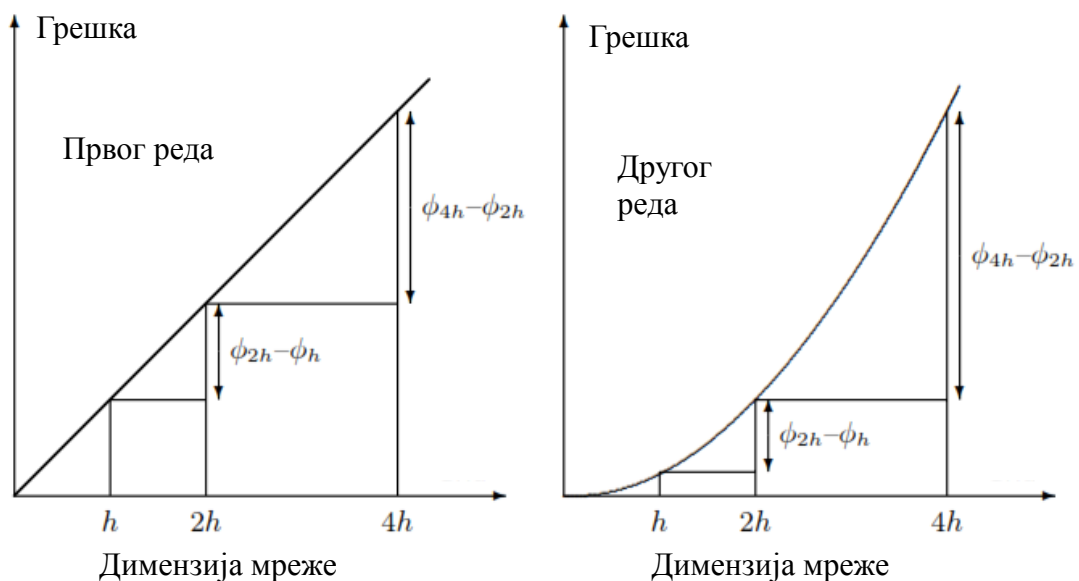
1.2.2.6.2 Процена грешке услед дискретизације

Величина ове грешке зависи од густине мреже и од примењене дискретизационе шеме. Ако се са ϕ прикаже тачна вредност, са ϕ_h израчунато решење, h димензија мреже и p ред апроксимације, важи следећа релација (једн. 74):

$$\phi = \phi_h + Ch^p + O(h^{p+1}) \quad \text{Једн. 74}$$

У (једн. 74) C је константа која зависи од извода ϕ у околини порорачунске тачке, али не зависи од h . Грешка $e_h = \phi - \phi_h$ је линеарно зависна од p -тог степена основне димензије мреже, при чему је коефицијент правца константа C , а слободни члан O је функција $(p+1)$ -ог и виших степена вредности основне димензије мреже.

На слици 49 приказана је грешка услед дискретизације за методе првог и другог реда.



Слика 49. Зависност грешака првог реда (лево) и другог реда (десно) од густине мреже[43]

Уколико се нађу решења за величине мреже $4h$, $2h$ и h , тада ове вредности могу да се уведу у (једн. 74) и добијају се три једначине са три непознате ϕ , C и p . Решавањем по p добија се стварни ред дискретизације према (једн. 75):

$$p \approx \frac{\log\left(\frac{\phi_{2h}-\phi_{4h}}{\phi_h-\phi_{2h}}\right)}{\log 2} \quad \text{Једн. 75}$$

Константа C , уз познато p , износи (једн. 76):

$$C \approx \frac{\phi_h - \phi_{2h}}{(2^p - 1)h^p} \quad \text{Једн. 76}$$

Грешка може да се апроксимира са (једн.77):

$$e_h \approx \frac{\phi_h - \phi_{2h}}{2^p - 1} \quad \text{Једн. 77}$$

Тако да решење које не зависи од густине мреже може бити процењено са (једн. 78):

$$\phi \approx \phi_h + \frac{\phi_h - \phi_{2h}}{2^p - 1} \quad \text{Једн. 78}$$

Приказана процедура је позната као Ричардсова екстраполација.

Поставља се питање који ред тачности користити. Апроксимације вишег реда јесу тачније, али систем једначина који продукују је често “прескуп”, односно захтева превише процесорског времена. Препоруке из низа практичних симулација су да је боље користити апроксимације нижег реда, а повећати број чворова, при чему се други ред показао као солидан компромис.

Поред грешака услед дискретизације под нумеричке грешке спадају и грешке заокруживања, а последица су представљања реалних бројева коначним бројем цифара. Ове грешке се избегавају уколико се при аритметичким операцијама са покретним зарезом (floating point operations) избегава одузимање великих бројева, који се мало разликују или сабирање бројева који се знатно разликују. Један пример како је ова стратегија примењена у CFD-у јесте коришћење релативног уместо апсолутног притиска у калкулацијама, при чему се за референтни притисак узима вредност притиска негде у струјном пољу.

Грешке постављања излазних граница су специфична грешка. Уколико се излазна граница постави преблизу чврстој препреци, постоји могућност да струјање неће постићи потпуно развијено стање (градијенте брзина једнаке нули у правцу струјања), што може да доведе до значајне грешке. На слици 50 приказан је један такав случај:



Слика 50. Утицај позиције излазног пресека

1.2.2.7 Подрелаксација

С обзиром на то да се при решавању нелинеарних једначина примењује итеративни поступак може доћи до дивергенције. Са циљем смањења могућности дивергенције примењује се поступак подрелаксације приказан (једн. 79).

$$\phi_C^{podr} = \phi_C^k + \alpha(\phi_C^{k+1} - \phi_C^k) \quad \text{Једн. 79}$$

Ако је коефицијент $\alpha=1$ нема подрелаксације, а за случај $\alpha>1$ наступа надрелаксација

Општи израз који повезује величине у суседним чворовима може да се прикаже као (једн. 80):

$$a_C^k \phi_C^{k+1} = \sum_{nb=1}^N [a_N^k \phi_N^{k+1}]^{nb} + b^k \quad \text{Једн. 80}$$

Заменом (једн. 80) у (једн. 79) добија се (једн. 81):

$$\phi_C^{podr} = \phi_C^k + \alpha \left(\frac{\sum_{nb=1}^N [a_N^k \phi_N^{k+1}]^{nb} + b^k}{a_C^k} - \phi_C^k \right) \quad \text{Једн. 81}$$

Сређивањем се добија (једн. 82):

$$\frac{a_C^k}{\alpha} \phi_C^{podr} = \sum_{nb=1}^N [a_N^k \phi_N^{k+1}]^{nb} + b^k + \frac{1-\alpha}{\alpha} a_C^k \phi_C^k \quad \text{Једн. 82}$$

Ако се усвоје следеће смене у (једн. 83 и 84):

$$a_C = \frac{a_C^k}{\alpha} \quad \text{Једн. 83}$$

$$b = b^k + \frac{1-\alpha}{\alpha} a_C^k \phi_C^k \quad \text{Једн. 84}$$

Добија се крајњи израз (једн. 85):

$$a_C \phi_C^{podr} = \sum_{nb=1}^N [a_N^k \phi_N^{k+1}]^{nb} + b \quad \text{Једн. 85}$$

Ефекат подрелаксације повећава централни коефицијент и мења слободни члан [44]. Слично се дешава и при временској интеграцији, тако да се поступак подрелаксације може да се схвати као псеудовременска интеграција. Подрелаксација се користи само код стационарних проблема, код нестационарних ефекат подрелаксације се добија смањивањем временског корака интеграције.

1.2.2.8 Трајекторија

Једначина трајекторије је дата посредством формуле (једн. 86) у којој је са десне стране износ брзине честице (без масе) у посматраној тачки у посматраном тренутку времена:

$$\frac{Dx}{Dt} = v_{ins}^p \quad \text{Једн. 86}$$

Једначина је обична диференцијална једначина. Ове једначине могу да се решавају на два приступа, коришћењем линеарног мултистеп метода или методама Рунге-Кута.

Општи израз горње једначине је приказан у (једн. 87):

$$\frac{D\phi}{Dt} = f \quad \text{Једн. 87}$$

Коришћењем линеарног мултистеп метода, најједноставнији случај даје (једн. 88):

$$\alpha_1 \phi^{n+1} + \alpha_0 \phi^n = \Delta t (\beta_0 f^n + \beta_1 f^{n+1}), \quad \text{Једн. 88}$$

где индекси n и $n+1$ означавају претходни и текући временски тренутак. Када се примењује Ојлерова шема првог реда када су редом коефицијенти: $\alpha_1 = 1, \alpha_0 = -1, \beta_0 = 0,5$ и $\beta_1 = 0$ добија се (једн. 89):

$$\phi^{n+1} - \phi^n = \Delta t f^n \Rightarrow \phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t f^n \quad \text{Једн. 89}$$

За случај шеме трапезе која је другог реда са следећим коефицијентима $\alpha_1 = 1, \alpha_0 = -1, \beta_0 = 0,5$ и $\beta_1 = 0,5$ добија се (једн. 90):

$$\phi^{n+1} - \phi^n = \Delta t (0.5 f^n + 0.5 f^{n+1}) \Rightarrow \phi^{n+1} = \phi^n + 0.5 \Delta t (f^n + f^{n+1}) \quad \text{Једн. 90}$$

Приликом примене шеме Рунге-Кута општа шема је форме (једн. 91):

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t \sum_{r=1}^R c_r f^r, \quad \text{Једн. 91}$$

где су $f^r = f(t + \Delta t a_r, t + \Delta t \sum_{s=1}^R b_{rs} f^s)$ и $a^r = \sum_{s=1}^R b_{rs}$. Горња једначина представља имплицитну Рунге-Кута шему, при којој се у сваком временском кораку мора да одређује итеративна вредност f^r . Да би се то избегло, мења се горња граница у изразу са суму $\sum_{s=1}^R b_{rs} f^s$ на **R-1**. Постављањем $c_1 = 1, b_{11} = 1$ и $a = 0$ добија се експлицитна шема и она је идентична Ојлеровој шеми првог реда. За случај шеме другог реда и двоструког ступња ($R=2$) експлицитна Рунге-Кута шема, побољшана Ојлерова шема постаје (једн. 92 и 93):

$$\phi^* = \phi^n + \Delta t f^n \quad \text{Једн. 92}$$

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t (0.5 f^n + 0.5 f^*) \quad \text{Једн. 93}$$

Највише коришћена шема у многим моделима праћења честица с циљем постизања тачнијих решења јесте шема четвртог реда са четири ступња ($P=4$). Алгоритам ове шеме је приказан следећим једначинама (једн. 94-97):

$$\phi^* = \phi^n + 0.5 \Delta t f^n, \quad f^* = f(t^{n+1/2}, \phi^*) \quad \text{Једн. 94}$$

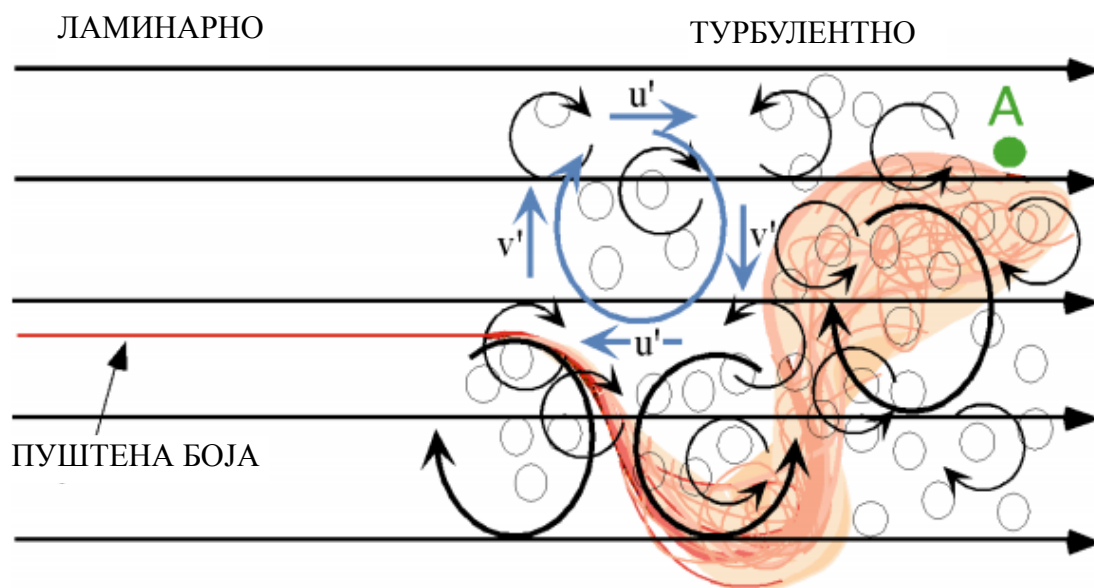
$$\phi^{**} = \phi^n + 0.5 \Delta t f^*, \quad f^{**} = f(t^{n+1/2}, \phi^{**}) \quad \text{Једн. 95}$$

$$\phi^{***} = \phi^n + \Delta t f^n, \quad f^{***} = f(t^{n+1/2}, \phi^{***}) \quad \text{Једн. 96}$$

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \frac{\Delta t}{6} (f^n + 2f^* + 2f^{**} + f^{***}) \quad \text{Једн. 97}$$

1.2.2.9 Турбуленција

Ако су силе инерције у флуиду утицајније од вискозних сила онда поремећај у току доводи до формирања вртлога. Експеримент са бојом приказан на слици 51 приказује дешавања у флуиду. У ламинарном току су струјнице паралелне. Уласком у турбулентну област већи вртлози воде латерално струју боје, док мањи узрокују мешање и доводе до дифундовања боје.



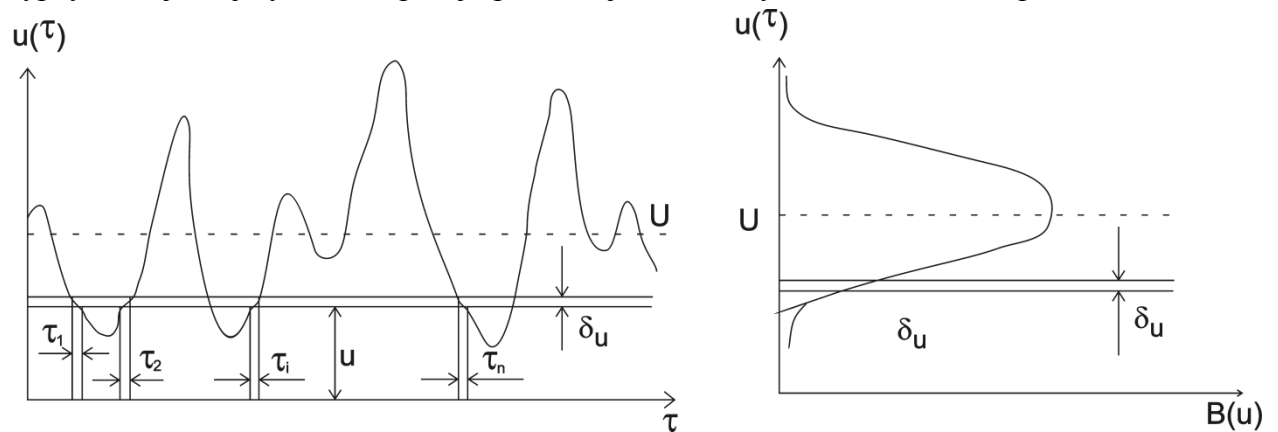
Слика 51. Приказ експеримента са бојом [45]

Силе инерције су пропорционалне производу квадрата карактеристичне димензије и брзине, док су вискозне силе производ карактеристичне димензије и кинематске вискозности. Њихов однос представља Рејнолдсов број.

При вредностима Рејнолдсовог броја изнад критичног, поред примарног главног тока јавља се и секундарно хаотично кретање флуида, које се назива турбуленцијом и има следећа основна својства: нерегуларност, нестационарност у времену и простору, дифузивност и дисипативност. У турбулентном току се мењају све величине (u , p , ρ , t) током времена, при чему се не може дефинисати периодичност. За појаву турбуленције флуид мора да буде вискозан и у току мора да постоји поремећај (промена геометрије, пораст градијента брзине). Сваки вртлог, сам за себе, може формално да посматра као ламинарно струјање. За инжењера није од великог значаја шта се дешава у вртлозима, него су значајне осредњене вредности и укупан ефекат хаотичног турбулентног кретања.

Описати, а самим тим и предвидети турбулентни пренос количине кретања, топлоте и масе је у принципу могућ, али је из низа разлога за сада нерационалан. Да би се у анализу укључили најмањи вртлози који су последњи корак у енергетској

каскади, нумеричка мрежа морала би да буде реда величине 100 μm . [87] Да би се то избегло, мора да се нађе начин како да се ови феномени опишу на начин да се што више од суштинских информација сачува, а да са друге стране прорачун буде изводљив имајући у виду рачунарске капацитете, меморију и брзину процесора. Као приступ који се усталио у инжењерским прорачунима је онај у којем се укључује статистичко осредњавање, приказано на слици 52, при чему се ова осредњена својства турбулентног тока далеко умереније мењају у простору од детаља турбуленције, који у инжењерској пракси најчешће нису од посебног интереса.



Слика 52. Осцилограм брзине флуида у функцији времена (лево) и у зависности од функције густине вероватноће (десно)

Вероватноћа појаве величине у посматраном опсегу приказана у диференцијалном облику (једн. 98):

$$B(u) = \lim_{\delta u} \frac{\delta P}{\delta u} = \frac{dP}{du} \quad \text{Једн. 98}$$

$B(u)$ се назива функција густине вероватноће и једнака је суми временских интервала у којем се посматрана величина (у овом случају брзина) налази у том опсегу и представља расподелу фреквенције посматране величине.

Средња вредност брзине се изражава преко првог статистичког момента функције густине вероватноће (једн. 99):

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} u B(u) du \quad \text{Једн. 99}$$

Други статистички момент одређује дисперзију око средње вредности (једн. 100):

$$\sigma = \sqrt{u'^2} = \left[\int_0^{\infty} (u-U)^2 B(u) du \right]^{0.5} = u^* \quad \text{Једн. 100}$$

Величина σ^2 одређује средње квадратно одступање или варијансу. Са u^* у јед. 100 је означен интензитет турбуленције. Средња брзина је основна карактеристика средњег тока, док σ одређује интензитет турбуленције и основна је карактеристика флукутирајућег тока. Интензитет турбуленције се данас поуздано експериментално одређује оптичким анемометром, као и анемометром са топлим жицом. Средње

квадратно одступање може да буде исто за два различита тока. Зато се као права мера интензитета турбуленције користи његова релативна вредност: σ / U , која се често назива и ниво турбуленције.

Одређивање размера турбуленције укључује мање или више емпиријске претпоставке о статистичким везама турбулентних карактеристика у времену и простору. Ови параметри се називају корелације или корелационе функције, а њихове релативне вредности коефицијентима корелације. Уколико постоје корелације, параметри припадају истом вртлогу и на основу тога је могуће дефинисати величину вртлога. Здружена густина вероватноће $\mathbf{B}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ је пропорционална фракцији времена у којем флуидни делић има компоненте брзине између \mathbf{u} и $\mathbf{u} + d\mathbf{u}$ и \mathbf{v} и $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$. Корелација $\overline{u'v'}$ може да се одредити из (једн. 101):

$$\overline{u'v'} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u'v' B(u'v') du' dv' \quad \text{Једн. 101}$$

Турбулентни ток при високим Рејнолдсовим бројевима се састоји од широког спектра вртлога различите величине. Велики вртлози могу да буду реда величине дужинског размера релевантног за анализу интеракције турбуленције са главним током (на пример, ширина тока). Они су носиоци највећег дела турбулентне кинетичке енергије. Највећи део продукције турбулентне кинетичке енергије настаје интеракцијом главног тока и крупних вртлога. При високим Рејнолдсовим бројевима код ових вртлога је релативни утицај вискозности флуида мали са тенденцијом да нестане. Нелинеарни чланови у једначини кретања сузбијају ову тенденцију генерисањем ситнијих вртлога на које вискозност флуида може да делује значајније. На тај начин се остварује каскадни процес трансфера енергије.

За брзине [87] до на пример 100 m s^{-1} , вртлози нису мањи од 1 mm , док је слободна путања молекула гаса реда величине 10^{-4} mm . У једном mm^3 гаса при притиску 1 бар има око 2,7 милиона молекула. Средња брзина молекула је реда 500 m s^{-1} , док брзина турбулентних флукуација од 0,01 до 10 m s^{-1} . Турбулентне флукуације варирају од 1 до 10.000 s^{-1} . То указује да је домен турбулентних величина довољно далеко од домена молекуларних величина. За затварање система транспортних једначина у моделима турбуленције, информација о размерама турбулентних структура је увек потребна.

У физикалном аспекту проблема доминантну улогу имају турбулентни напони. Главни губитак енергије није на зиду, него у флуиду, мада је најчешће последица зида. Математичко моделирање турбуленције је првенствено усмерено ка одређивању, односно апроксимацији турбулентних напона и турбулентних флукуација скаларних варијабли.

Заменом тренутних вредности збиром осредњене по времену вредности и флукуирајуће у Навије Стоксовим једначинама добијају се Рејнолдсове осредњене Навије Стоксове једначине (једн. 102-105):

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W) = 0 \quad \text{Једн. 102}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UU) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho UW) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) + \rho g_x \quad \text{Једн. 103}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VV) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho VW) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) + \rho g_y \quad \text{Једн. 104}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UW) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VW) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho WW) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w'w'}) + \rho g_z \quad \text{Једн. 105}$$

Може се сматрати [46] да су Рејнолдсови напони последица промене протока количине кретања секундарног (флукуирајућег) тока $((\rho \overline{u'_i})u'_j)$ кроз површину A_j . У случају да је брзина главног тока у том правцу константна, овај проток је у равнотежи са напонам на посматраној површини контролне запремине и одатле и назив „напон“ за Рејнолдсове напоне, мада они то у суштини нису, јер потичу од инерционог члана у једначини кретања. Рејнолдсови напони директно не доприносе трансформацији кинетичке енергије у топлотну, него учествују у једном другом процесу каскадне предаје кинетичке енергије од великих ка мањим вртлозима све док вискозне силе не постану доминантне.

Сва специфичност једначина кретања турбулентних токова у вези је са појавом Рејнолдсових напона, као последице турбулентних флукуација. Међутим, Рејнолдсови напони су међусобно, и са другим параметрима тока, директно или индиректно повезани. Они проузрокују флукуације скаларних варијабли (притиска, температуре, концентрације). Мењају природу пратећих феномена (хемијске реакције и др.). Чине ток нестационарним у времену и простору и увек тродимензионалним.

У моделима турбуленције који данас превладавају у примени при моделовању уобичајено је да се турбуленција прикаже коришћењем Бусинескове хипотезе за моделовање Рејнолдсових напона. Куриозитет ове хипотезе јесте да је публикована 1877, оригинално изложена 1872, а односи се на Рејнолдсове напоне који су публиковани 1895. [47] Овај приступ полази од претпоставке да су Рејнолдсови напони аналогни вискозним дисипативним напонима. Увео је поставку да ефективни турбулентни смицајни напони, који потичу од унакрсних корелација флукуирајућих брзина, могу да буду представљени преко производа градијента средње брзине, и величине која карактерише турбулентно мешање – турбулентне вискозности. За нестишљиво струјање ова хипотеза је приказана следећом релацијом (једн.106):

$$[\mu(\overline{U}_{i,j} + \overline{U}_{j,i}) - \rho \overline{u'_i u'_j}]_j = [(\mu + \mu_t)(\overline{U}_{i,j} + \overline{U}_{j,i})]_j \quad \text{Једн. 106}$$

Рејнолдсови напони се изражавају преко (једн. 107):

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t(\overline{U}_{i,j} + \overline{U}_{j,i}) \quad \text{Једн. 107}$$

За случај контракције, када је $i=j$ по дефиницији је једнак (једн. 108):

$$\overline{u_i u_i} = 2k \quad \text{Једн. 108}$$

За исти случај је десна страна једнака нули према осредњеној једначини одржања масе, тако да је неопходно да се за овај случај уведе корекција помоћу Кронекеровог оператора δ_{ij} (једн. 109):

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{ако је } i \neq j \\ 1 & \text{ако је } i = j \end{cases} \quad \text{Једн. 109}$$

И добија се (једн. 110):

$$\rho \overline{u_i u_j} = -\mu_t (\overline{U_{i,j}} + \overline{U_{j,i}}) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad \text{Једн. 110}$$

Случај $i=j$, даје следећу вредност Кронекеровом оператору (једн. 111):

$$\delta_{ij} = \delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33} = 1 + 1 + 1 = 3 \quad \text{Једн. 111}$$

Рејнолдсови напони су приказани у следећим једначинама (једн. 112-119):

$$\rho \overline{u' u'} = -2\mu_T \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{2}{3} \rho k \quad \text{Једн. 112}$$

$$\rho \overline{v' v'} = -2\mu_T \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{2}{3} \rho k \quad \text{Једн. 113}$$

$$\rho \overline{w' w'} = -2\mu_T \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} + \frac{2}{3} \rho k \quad \text{Једн. 114}$$

$$\rho \overline{u' v'} = -\mu_T \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) \quad \text{Једн. 115}$$

$$\rho \overline{u' w'} = -\mu_T \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial x} \right) \quad \text{Једн. 116}$$

$$\rho \overline{v' w'} = -\mu_T \left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \right) \quad \text{Једн. 117}$$

$$-\rho \overline{u' T'} = \Gamma_T \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \quad \text{Једн. 118}$$

$$-\rho \overline{v' T'} = \Gamma_T \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \quad \text{Једн. 119}$$

Двадесетак година након појаве Прантлове теорије дужине мешања, Колмогоров (1942) и Прантл (1945) су предложили да се превазилажење наведених недостатака изведе тако што ће, уместо повезивања турбулентних флукутирајућих брзина са градијентима средње брзине, бити узето директно неко карактеристично својство турбуленције. Као најпогоднија, изабрана је турбулентна кинетичка енергија.

Димензија турбулентне кинематске вискозности је идентична са димензијом кинематске вискозности. Димензиона анализа наводи на закључак да производ брзинске и дужинске скале представља решење, и то је приказано у (једн. 120):

$$v_e = C_k l k^{1/2}, \quad \text{Једн. 120}$$

где је $k = (1/2)\overline{(u_i' u_i')}$ кинетичка енергија турбулентних флукуација, C_k је константа пропорционалности.

Увођење k доводи до "једно-једначинских" турбулентних модела. Реч је о парцијалној диференцијалној једначини за пренос/одржање k , која се изводи кроз прво формулисање укупне кинетичке енергије из једначине кретања и затим њеног одузимања од једначине кинетичке енергије за усредњени ток. Резултат је следећа једначина за турбулентну кинетичку енергију (једн. 121):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho \tilde{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \varepsilon \quad \text{Једн. 121}$$

У овој једначини је σ_k Шмитов број који представља однос између турбулентне вискозности, која се користи у једначинама кретања и турбулентне дифузивности у једначини преноса турбулентне кинетичке енергије. Величина ε је позната као дисипација кинетичке енергије. Величина G је дата кроз израз (једн. 122):

$$G = \mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \text{Једн. 122}$$

који представља стварање турбулентне кинетичке енергије.

Следећи ниво у унапређењу модела турбулентне вискозности елиминација потребе за спецификацијом релације за дужинску размеру. То се постиже увођењем још једне парцијалне диференцијалне једначине.

Друга диференцијална једначина је потребна ради узимања у обзир развоја l и непознавања l у комплексним токовима. Данас се сматра да је минималан захтев за адекватно описивање нелокалног и нестационарног карактера турбуленције постављање транспортних једначина за два, временског и просторног, параметра турбуленције. За карактеристичну брзину скоро се увек узима турбулентна кинетичка енергија k . Избор другог карактеристичног размера турбуленције је разноврснији.

Општи облик може да се представи преко варијабле $z=k^m l^n$. Тако Rotta предлаже $k l$, Spalding k/l^2 , Колмогоров $k^{0.5}/l$, Chou и Давидов $\varepsilon = k^{0.5}/l$ –дисипација турбулентне кинетичке енергије и др.

Harlow и Nakayama први пут предлажу К-епсилон модел. У овом приступу је турбулентна кинетичка енергија k , преко релације Прантл-Колмогоров повезана са брзином своје дисипације, ε (једн. 123):

$$v_e = \frac{f_\mu C_\mu k^2}{\varepsilon}, \quad \text{Једн. 123}$$

где су f_μ и C_μ константе пропорционалности.

Једначина преноса/одржања за дисипацију турбулентне кинетичке енергије се изражава следећим изразом (једн. 124):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \tilde{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + f_1 C_1 G \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) - f_2 C_2 \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right), \quad \text{Једн. 124}$$

где су:

k турбулентна кинетичка енергија

\tilde{u}_i осцилујућа вредност брзине у x_i правцу

Ова једначина је по структури слична осталим једначинама кретања.

Други термин на десној страни једнакости представља продукцију дисипације турбулентне кинетичке енергије, док трећи термин представља њену деструкцију. Као и у једначини за турбулентну кинетичку енергију присутан је Шмитов број, σ_ε , који представља однос ефективне вискозности из једначине одржања количине кретања и ефективне турбулентне дифузивности ε .

К- ε формулација се данас највише користи при моделовању реалних струјања, услед њене опште применљивости. Она није коначни одговор [87] на питање моделовања турбуленције, услед својих недостатака. Један од недостатака је претпоставка да је турбуленција изотропна, тј. да су сви нормални напони идентични. С овим ограничењем утицаји секундарног тока флуида не могу прецизно да се опишу. Ово је посебно проблем код веома вртложних (енг. Swirl flow) токова.

У двоједначинском к- ε моделу фигуришу три константе: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ и C_μ , прве две су у једначини дисипације, а трећа у изразу за турбулентну вискозност. Додатно је потребно обавити процену Прантл- Шмитових бројева: σ_k и σ_ε .

Константа C_μ се одређује из следеће једнакости (једн. 125):

$$\mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 = C_\mu \rho^2 \frac{k^2}{\mu_t}, \quad \text{Једн. 125}$$

која важи у логаритамској зони тока, у којој је прихватљива тврдња да је продукција једнака дисипацији, а да се конвекција и дифузија турбулентне кинетичке енергије могу да занемаре. Низом експеримената је одређен однос између напона и кинетичке енергије на месту близу зида, тако да се за C_μ добија 0,09.

Константа $C_{\varepsilon 1}$ одређује се кроз посматрање једначине дисипације развијеног турбулентног тока у близини зида. У овом случају дифузија не може да се занемари, што је исказано у (једн. 126).

$$0 = \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial y}{\partial x} + C_{\varepsilon 1} \frac{\mu_t}{k} \frac{\varepsilon}{\rho} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \quad \text{Једн. 126}$$

Константа $C_{\varepsilon 2}$ се одређује посматрањем одумирања изотропне турбуленције иза фине мреже при високим Re_t када се једначине за k и ε свде на (једн. 127 и 128):

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\rho \varepsilon \quad \text{Једн. 127}$$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Једн. 128}$$

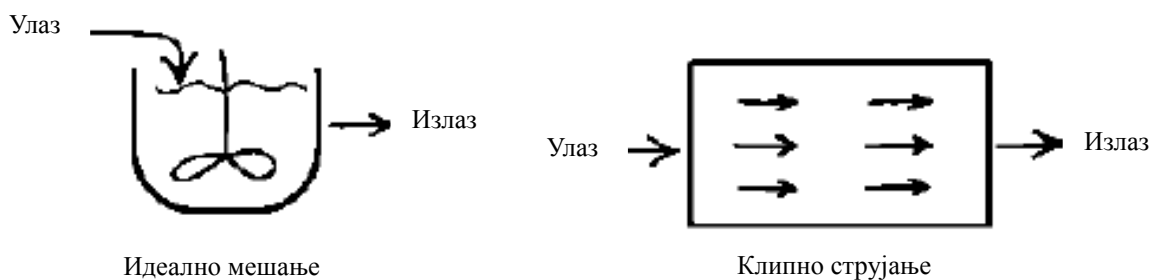
1.2.3 Време задржавања и ефикасност

Ложиште котла је један специфичан хемијски реактор. Поред брзине реакције и брзине мешања неопходан параметар за проучавање и пројектовање хемијских реактора је време задржавања. Као први време задржавања проучава Dankwerts. [49] Уочено је да се време задржавања у индустријским реакторима разликује од идеализованих случајева. Као гранични случајеви се узимају, са једне стране клипно струјање, а са друге струјање с идеалним мешањем. Ова два гранична случаја могу да се опишу на следећи начин:

А) Флуид у суду је потпуно измешан, тако да су својства идентична и униформна с онима које одговарају излазној струји. Ова претпоставка се користи када је реч о прорачунима у којима су присутни мешачи.

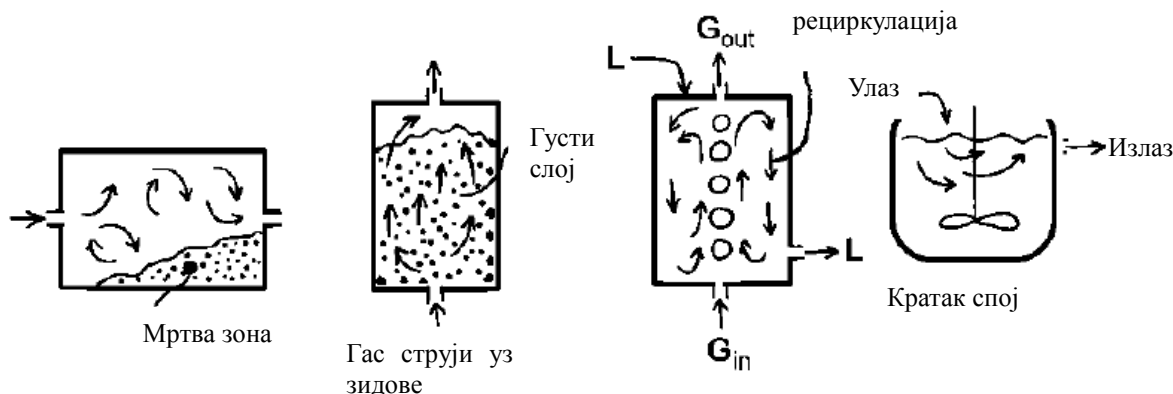
Б) Делићи флуида који улазе у суд у истом временском тренутку, струје кроз суд константном и једнаком брзином са паралелним путањама, и напуштају суд у исто време. Овакво струјање се назива клипно струјање и узима се у обзир када се посматра струјање кроз размењиваче топлоте и каталитичке реакторе, колонама са пуњењем на пример.

На слици 53 лево је шематски приказан случај идеалног мешања, а десно случај клипног струјања.



Слика 53. Два екстремна случаја струјања флуида [48]

Ефекти који карактеришу реално струјање и разликују га од идеалног су између осталих рециркулације, мртве зоне и обилазни токови. Наведени ефекти су приказани на слици 54.



Слика 54. Проблеми стварних струјања [48]

Dankwerts у раду [49] поставља математичке методе за оцену времена задржавања у реактору. У основи приступа је запажање да се на бази расподеле времена задржавања може проценити карактер струјања, односно колико одступа од основна два идеална типа.

Време задржавања може да се посматра као случајни процес, и да се третира методама теорије вероватноће. Оно може да узима вредности од 0 до бесконачности, при чему се свакој вредности додељује одређена вероватноћа појављивања.

Проучавање експерименталних података [50] показује значајно одступање реалног струјања од уобичајених претпоставки савршеног мешања или клипног струјања. Део обележених супстанци може да се прикаже изразом (једн. 129 и 130).

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\eta \left(\frac{t-\varepsilon}{\theta} \right) \right] \text{ за } t \geq \varepsilon \quad \text{Једн. 129}$$

$$F(t) = 0 \text{ за } 0 < t \leq \varepsilon, \quad \text{Једн. 130}$$

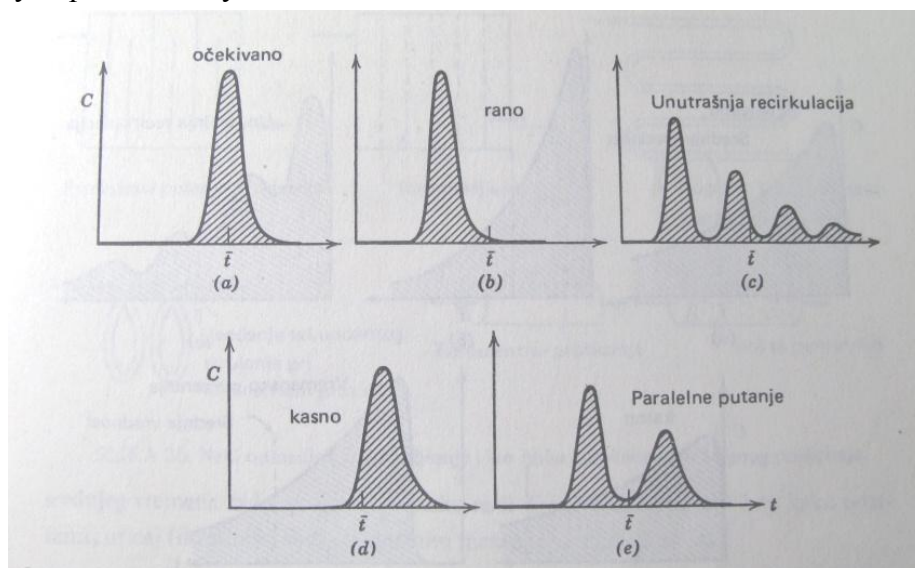
где су вредности за η и $\frac{\varepsilon}{\theta}$ дате за карактеристичне типове струјања у табели 6.

Овде η представља параметар који означава ефикасност мешања, где овај параметар добија вредност 1 када је присутно потпуно мешање, а тежи ка бесконачности при клипном струјању. Када су присутне мртве зоне овај параметар поприма вредност већу од 1. Уколико су присутни „кратки спојеви“, односно када флуид струји „пречицом“, тада овај параметар поприма вредност мању од 1. Параметар ε представља фазно кашњење система. При вредностима односа $\frac{\varepsilon}{\theta}$ већим од нуле, одзив система заостаје за оним одзивом који одговара када је присутно потпуно мешање. „Кратким спојевима“ одговарају негативне вредности параметра ε .

Табела 5. Параметри за различите моделе струјања[50]

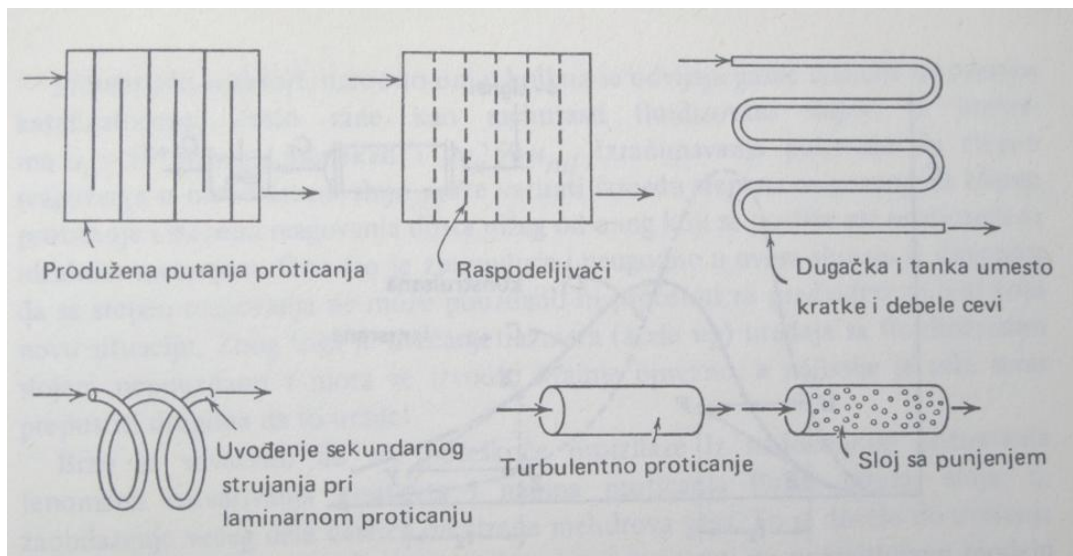
Модел	η	$\frac{\varepsilon}{\theta}$
Савршено мешање	1	0
... са клипним струјањем	>1	>0
... са мртвим зонама	>1	0
... са „кратким спојем“	<1	<0
... са грешком у θ (бездимензионо време протицања)	< >1	0
... са системским кашњењем	1	>0

На слици 55 приказане су одзивне криве обележене супстанце за карактеристичне случајеве. Слика 55 а) настаје за случај када је струјање флуида у уређају правилно, а самим тим и уређај исправно ради. На слици 55 б) је приказан изглед за случај прераног напуштања флуида. Слика 55 ц) је последица присутности унутрашње рецикулације, док слика 55 д) настаје при каснијем од очекиваног напуштања флуида суда. Под е) је приказан случај који настаје при постојању паралелних путања.



Слика 55. Одзивне криве обележене супстанце указују на неправилности у протицању за судове за које се предпоставља клипно протицање [51]

На слици 56 приказани су начини како да се у једном суду, реактору постигне струјање које највише личи клипном струјању. Приказано је шест приступа. Прва два су: уградња преграда и расподељивача у суд (слика 56 горњи ред, прва и друга слика са лева). Трећи начин је модификација димензија цеви, и то дужине и пречника, тако да се уместо кратке користи дугачка цев, а уместо цеви великог пречника, цев мањег пречника. Четврти начин постизања клипног струјања је помоћу увођења секундарног струјања, при ламинарном протицању. Пети начин подразумева турбулизацију струјања, а шести последњи приказан, укључује уградњу слоја са пуњењем.



Слика 56. Неки од начина за побољшање и што ближе апроксимацију клипног протицања [51]

Време задржавања је једно од 3 т-а квалитетног сагоревања. Реч о температури, турбуленцији и времену задржавања (на енглеском *residence time*) и ова три параметра су кључна када се пројектује ефикасно ложиште котла.

Повећање времена задржавања доводи до бољег сагоревања, сагоревања које је ближе потпуном, при чему се омогућава снижавање коефицијента вишка ваздуха. Низ мерења је показао да котлови на биомасу раде са недозвољено високим вредностима коефицијента вишка ваздуха које уствари претвара котао од уређаја за продукцију топле, вреле воде или паре у загрејач ваздуха. У индустрији која производи спалионице отпада је време задржавања повећавано методом индуковања спиралног струјања, помоћу одговарајућег распореда и оријентације горионика. У овом раду се истражују утицаји угла секундарног ваздуха, његова брзина и преграде на време задржавања. Секундарни ваздух је уобичајен у апаратима за сагоревање и његови главни задаци су да иницира или интензификује турбуленцију или да утиче на температурски ниво, као и да побољша мешање кроз линеарни и угаони моменат. Гумц је написао у [52]: “Број млазница, њихова локација и смер су једне од најупитнијих фактора при коришћењу млазница секундарног ваздуха”. Овде треба напоменути да је истраживање система за сагоревање са секундарним ваздухом застало пошто је пробој технолошки успео спрашеном угљу, као и гасовитим и чврстим горивима током II светског рата. [53]

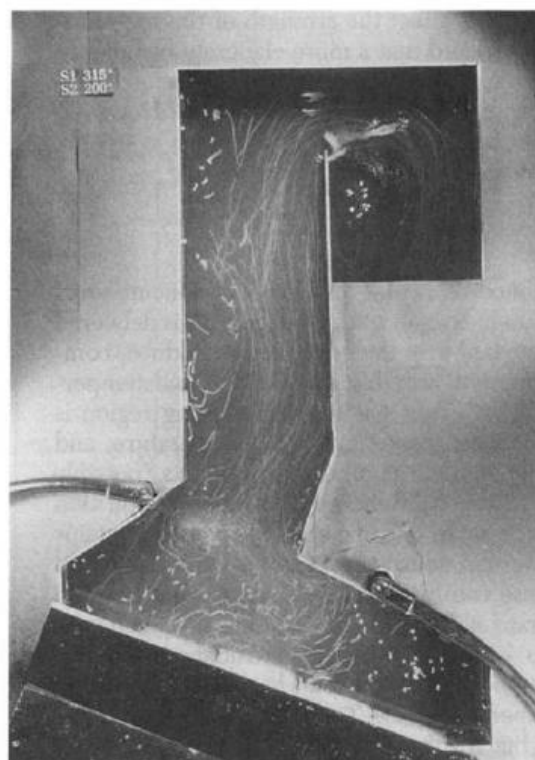
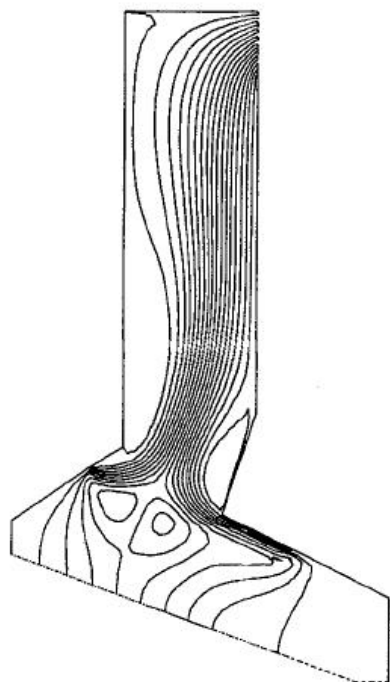
1.2.4 Управљање струјањем

Управљање струјањем представља остварење жељеног циља кроз обављање утицаја на струјање. У овом случају је реч о повећању времена задржавања гасова у ложишту котла. Управљање струјањем се остварује помоћу две врсте мера, активних и пасивних. Утицај секундарног ваздуха се сврстава у активне, док утицај преграда се сврстава у пасивне. Низ примера из историје као што су копља обликована да изазову најмањи отпор, бумеранзи специфичне форме и стреле које су стабилизване перима показује примену ове гране примењеног инжењерства. Зачетник ове гране је

Лудвиг Прантл, који је овладао овом тематиком почетком двадесетог века. У области сагоревања су присутни такође бројни примери као што су мере за повећање стабилности пламена, повећање брзине конверзије реактаната, побољшање температурског профила на издуву или минимизација нивоа полутаната. Детаљно су ове теме обрађене у [54].

1.2.5 Приступ методологијом изотермног струјања

Изотермно струјање је познато под другим именима: хладан ток, нереагујући ток и сви ови појмови означавају моделовање струјања, при којем се не разматра утицај реакција. Са циљем да се утврди утицај пројектних варијабли истраживачи из области сагоревања су се често ослањали на симулације типа хладног тока. Примери су референцирани у [55], и реч је о низу радова из области спаљивања отпада [56, 57, 58, 59 анд 60]. Модели изотермног тока су изузетно корисни, јер они дају значајну количину информација, при чему се минимизирају и сложеност и трошкови. [55] На слици 57 је приказана примена приступа моделовањем изотермним током у области инсинератора. Слика 57 лево приказује резултат нумеричке симулације, док слика 57 десно означава снимак експеримента.



Слика 57. Примена приступа моделовања изотермним током у области инсинератора [57]

Наравно, треба имати у виду да стварно понашање неког уређаја за сагоревање не може у потпуности да буде описан на овај начин. Главни проблеми који се јављају је варијација густине продуката сагоревања, која је функција температуре, стехиометрије и кинетике хемијских реакција, ослобађање топлоте као ефекат хемијских реакција, као и хлађење, односно размена топлоте између гасова, слоја горива и зидова ложишта. [55]

Увођење температурске зависности густине гасова од висине је укључивано током овог истраживања на препоруку [61], али без успеха, услед проблема са конвергенцијом решења.

Битно је навести и пример из праксе, индустрије, где Steinmueller, познати произвођач уређаја за спаљивање је развој својих производа значајно ослонио и на моделовање хладним током, поред мерења унутар самог ложишта са циљем да омогући довољно високе температуре и равномерне услове мешања. [62]

Примери примене су бројни. У [57] се обављају нумеричка и експериментална анализа, при чему се експерименти базирају на методи “водених табли”. У раду се испитује утицај геометрије и секундарног ваздуха на степен мешања и на време задржавања честица. У инсинераторима, као ограничавајући фактор, се не јавља хемизам. У раду се наглашава да изузимање предаје топлоте и хемијских реакција не значи да ови феномени нису значајни за учинак инсинератора, али да се на овај начин, хладним током добија довољно адекватна слика када је реч о мешању и струјном пољу. Овакав приступ се подржава и у [63].

Турбулентно дифузионо сагоревање одликује чињеница да се при њему хемијске реакције одвијају изузетно брзо тако да је процес у потпуности условљен коначним брзинама мешања реактаната. На брзину мешања реактаната на првом месту утичу аеродинамика и турбулентни процеси преноса масе, момента и топлоте. Директна мерења у пламену пружају обиље података као што су просторне расподеле брзине, притиска, температуре, концентрације гасова и параметара турбуленције. Недостатак ових података је у проблематичности и сложености које претходе њиховом долажењу, односно мерењима у пламену. Због тога низ научника је студије изводио на изотермним моделима. Изотермни модели могу да пруже квантитативне резултате који могу бити од велике користи за опис процеса струјања и мешања, а такође могу да дају оцену утицаја промене појединих експерименталних варијабли, као што су на пример геометријске модификације. Разлика између мешања са хемијским реакцијама и мешања без је у томе да су у случају са хемијским реакцијама присутни велики градијенти густине и температуре у ложишту, и они могу да утичу до извесног нивоа на мешање.

Као прилог наведеном ће се дати бројчана анализа Damkoehler-ovог броја: Damkoehler-ov број Да се дефинише као (једн. 131):

$$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c}, \quad \text{Једн. 131}$$

где су временски размер тока τ_t , а τ_c хемијске реакције. Пошто у волатилима најзначајнији удео има угљен-моноксид [64], а угљен-моноксид карактерише релативно спора кинетика у поређењу са H_2 и CH_4 , процена хемијског временског реда величине може да се одреди преко механизма CO оксидације. Овај механизам је приказан у једначинама (једн. 132-135).



Прва реакција је веома спора, и она не доприноси значајно CO_2 концентрацији, њен значај је у томе што представља иницијалну реакцију овог низа ланчаних реакција. Са друге стране трећа реакција је прави произвођач CO_2 , при чему она представља реакцију која продукује водоникове атоме одговорне за даље настављање ланчане реакције. [65]

Кинетика ове треће реакције се изражава као (једн. 136 и 137):

$$\frac{d \text{CO}}{dt} = k \cdot \text{CO} \quad \text{Једн. 136}$$

$$k = 1.3 \cdot 10^{14} \cdot O_2^{0.5} \cdot H_2O^{0.5} \cdot \exp\left(\frac{-125500}{R \cdot T}\right), \quad \text{Једн. 137}$$

где су CO , CO и CO концентрације изражене у mol/cm^3 .

Процена временске размере тока може да се оствари на различите начине. Са једне стране може да се посматра као Колмогоровљев временски микроразмер. У случају када се посматра степен оксидације минимално време задржавања гасова у ложишту може да послужи као добра процена (једн. 138).

$$\tau_t = \frac{L_{tot}}{u}, \quad \text{Једн. 138}$$

где је L_{tot} најкраће растојање између места ослобађања волатила и излаза из ложишта, а u представља средњу брзину гасова у ложишту.

Подаци из рада [28] дају вредност од 2.977, што говори о томе да је хемијска реакција брза и да је процес контролисан брзином турбулентног мешања.

1.2.6 Метод израчунавања времена задржавања

Струјање може да се проучава на два начина. У проблемима механике флуида је потребно одредити у сваком тренутку где се сваки од флуидних делића налази, колику брзину и убрзање поседује, какав притисак трпи, итд. Познате вредности су својства флуида, силе које делују на флуид и почетно стање. Овакви проблеми могу да се реше на два начина. У првом Лагранжевом сваки делић се прати на свом путу кроз простор, док у другом Ојлеровом се уочи тачка у простору, па се у њој одређују брзине, притисци и друге величине. Карактеристика Лагранжевог приступа је његова непогодност за теоријску анализу, ако се изузме неколико специјалних случајева. Иначе, Лагранжов приступ се примењује при експериментима. [66]

У оквиру прорачунске динамике флуида (CFD) Лагранжов приступ се примењује у моделовању вишефазних средина. И то тако што се тада користи Ојлеров-Лагранжов приступ где се флуидна фаза третира као континуум, уз решавање Навије Стоксових једначина, док се диспергована фаза решава праћењем великог броја честица, мехурова или капљица како пролазе кроз струјно поље. Диспергована фаза може да размењује масу, моменат и енергију са флуидном фазом.

Када се узме честица без масе, такозвана виртуелна честица, тада је брзина честице једнака брзини континуалне фазе, тако да је потребно само решавање путање из једначине (једн. 139).

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad \text{Једн. 139}$$

Нова позиција честице дуж путање се израчунава помоћу једначина (једн. 140 и 141):

$$u_p^* = \frac{1}{2}(u_p^n + u_p^{n+1}) \quad \text{Једн. 140}$$

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \frac{1}{2}\Delta t(u_p^n + u_p^{n+1}) \quad \text{Једн. 141}$$

Време задржавања је један од најважнијих фактора при пројектовању реактора.[67] У области спаљивања отпада су донесене и регулативе које прописују да се гасови након места последњег удубавања ваздуха морају минимално две секунде да налазе на температури преко 850 °С. Реч је о регулативи Европске комисије 2000/76/ЕС. Оно што није одређено је процедура мерења времена, што указује на сложеност проблема. У области пећи је такође од великог значаја време задржавања, јер ефекат се одмах види у квалитету производа. Код котлова ова величина неће утицати на продукцију паре или на њене параметре, него на потрошњу горива. Експерименти у области сагоревања су ретки, тако да се верификација приступа обавља помоћу експеримената из других области. Тако се и у [67] провера обавља у односу на експерименте из области продукције пијаће воде. [68 , 69]

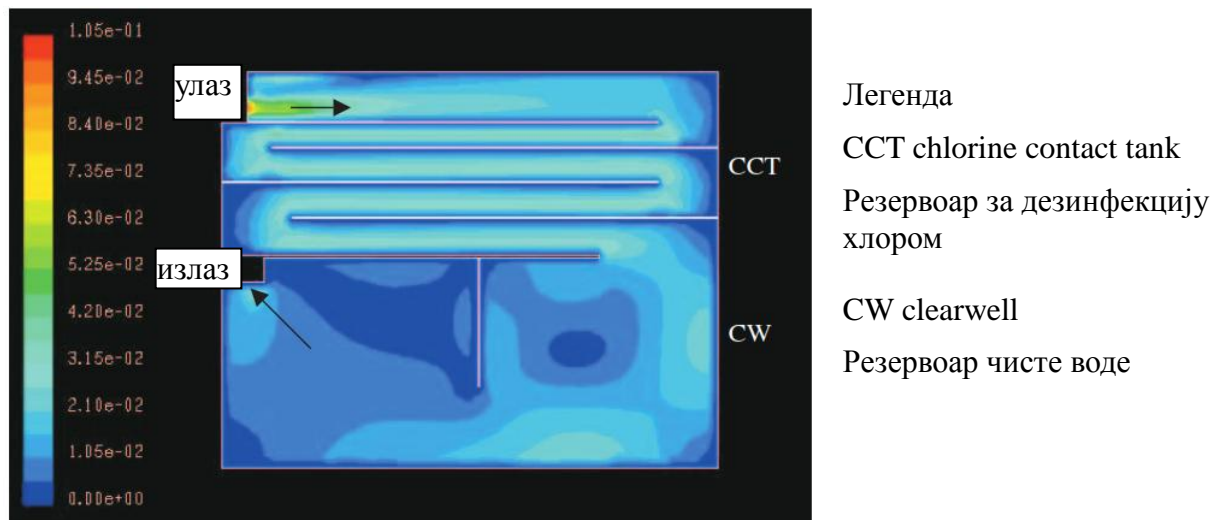
Приступ помоћу виртуелних честица који се примењује у овом раду је такође нашао потврду у експериментима из области продукције пијаће воде и то на примеру базена за дезинфекцију воде. [70]. Код ових система је од значаја време контакта између воде и дезинфекционог средства. Правилна оцена времена задржавања омогућава мању количину дезинфекционог средства.

Са величином t_{10} се означава време у којем 10 % воде напушта резервоар за дезинфекцију. θ_{sr} је хидрауличко време задржавања. Средње хидрауличко време представља количник запремине резервоара и запреминског протока на улазу у резервоар.

Фактор преграде (Енг. Baffle factor) је индикатор униформности струјања. Фактор преграде код резервоара без преграда износи 0.1, док за случај идеалног реактора са клипним струјањем је 1. Фактор преграде се израчунава као однос $\frac{t_{10}}{\theta_{sr}}$.

Традиционалан метод је да се за потребе израчунавања t_{10} кратко време дозира хемикалија и да се њена концентрација на излазу прати. Идеални маркер струјања је онај који се лако детектује, који није присутан у медијуму, са којим се лако понављају експерименти, да не утиче на хидрауличне карактеристике резервоара. Уобичајени маркер струјања су натријум-хлорид, натријум-флуорид и литијум-хлорид.

Симулације су урађене за различите протоке воде од 35,2 до 80 изражено у карактеристичним јединицама за ову област МЛД – милионима литара по дану. Експерименти су обављени на постројењима, и то на два у Otavi и Ontariju и на једном у Peterborough-у. Контуре брзине су дате на слици 58 са припадајућом табелом 7 у којој је дато поређење фактора преграде измереног експериментом и израчунавог помоћу дводимензионалног модела струјања и коришћењем методе виртуелних честица.



Слика 58. Контуре брзине – резултат нумеричке симулације резервоара у Peterborough-у. [70]

Резултати из табеле 7 показују да су разлике вредности фактора преграде измереног експериментално и израчунаог у опсегу до 10 %, где чак у три случаја ова разлика је на нивоу од 1 %.

Табела 6. Поређење израчунаних и измерених вредности фактора преграде [70]

Постројење	Проток MLD (10^6 l/dan)	t_{10}/θ експер.	t_{10}/θ CFD	разлика [%]
Peterborough WTP CCT	35,2	0,77	0,76	1
Peterborough WTP CCT	55,5	0,77	0,76	1
Peterborough WTP CCT	80,0	0,80	0,76	5
Peterborough WTP CCT&CW	35,2	0,67	0,61	10
Peterborough WTP CCT&CW	55,5	0,68	0,67	1
Peterborough WTP CCT&CW	80,0	0,65	0,64	2

1.2.7 Преграде

1.2.7.1 Увод

На три цитата се темељи овај изабрани потциљ ове тезе. Први потиче из једне од значајних књига из области ложишта, други је из области пројектовања инсинератора и трећи је из истраживања у области побољшања пећи.

–“Дужина путање којом струје гасови се понекад сматра временом задржавања, али овај појам је често погрешно коришћен, јер време задржавања гасова у ложишту није само функција дужине путање гаса, него и брзине гаса”. [71]

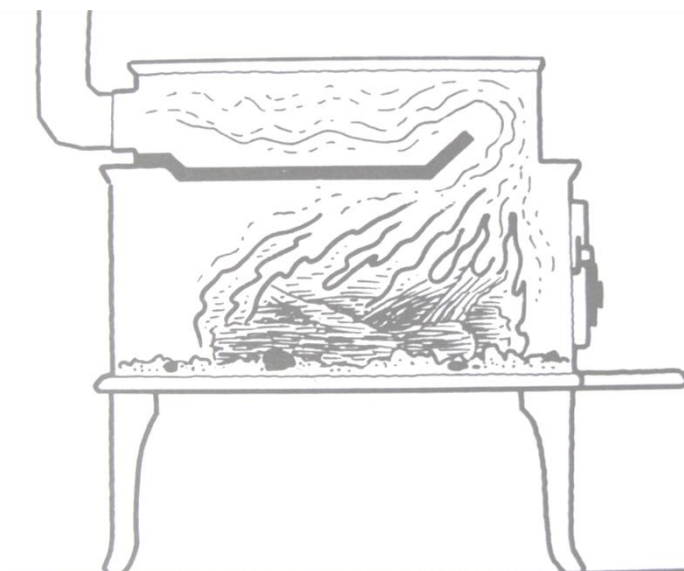
–“Вредност познавања времена задржавања гасова у великим градским спалионицама са једне стране и озбиљна грешка када се то време израчунава на традиционални начин преко запреминског протока гаса је идентификована” [72]

-“Утицај преграда је непредвидив”. [73]

1.2.7.2 Преграде

Преграде су металне плоче које се постављају у ложиште на одређеној висини у чврстом контакту са предњим зидом, при чему је дужина мања од ложишне. Сврха преграда јесте да се продужи путања струјања, пре него што напусте ложиште продукти сагоревања. Ово повећање дужине путање је евидентно и неспорно, али је под знаком питања да ли се и време задржавања гасова повећава. Формирање канала у горњем делу ложишта доводи до смањења попречног слободног пресека за струјање, тако да се самим тим брзине гасова повећавају и самим тим негативно утичу на време задржавања гасова.

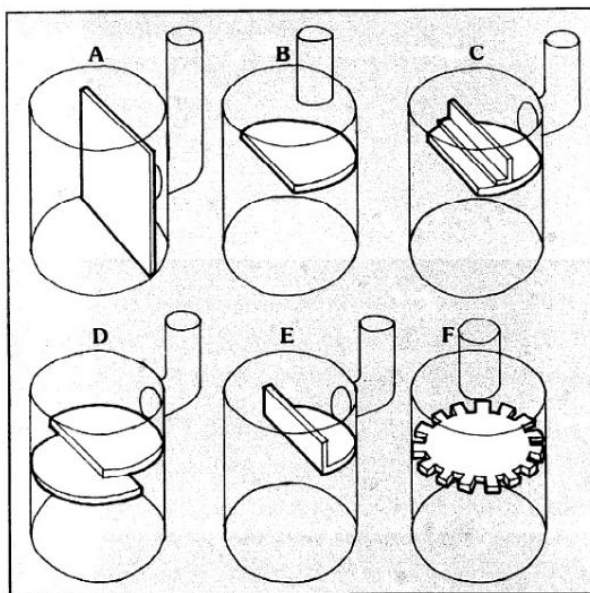
Време задржавања гасова се израчунава у ложишту без преграда деобом запремине са запреминским протоком. Преграда је танка плоча од ватроотпорног метала (слика 59). Сама по себи не мења значајно запремину ложишта, а ни запремински проток се не мења, али мења путању гаса, тако да се горе поменути формула не може да примени.



Слика 59. Преграда у ложишту

Поред утицаја на дужину путање гасова и време задржавања преграде могу да побољшају процес сагоревања кроз побољшано мешање, јер при промени правца реактанти долазе у бољи контакт, а утичу и на турбуленцију. Такође, потребно је указати на то да ове преграде могу да служе и као једна врста топлотног штита при чему смањују хлађење зоне сагоревања значајно хладнијим зидовима изнад преграде. Коришћење преграда у пројектовању пећи је увела норвешка компанија „Јотул“ у 70-тим годинама у време нафтне кризе. Ефикасност ових пећи такозване скандинавске конструкције са преградама је довела до значајног повећања ефикасности. Произвођач је публиковао вредност ефикасности пећи типа „Јотул“ 118 на 76 процената.

На слици 60 је приказано колико је различитих варијација у конструкцији пећи могуће код једноставног уређаја за сагоревање – вертикалне бубњаре.



Слика 60. Различити приступи постављања преграда у вертикалним бубњарама [74]

1.2.7.3 Тестирање преграда

Поставља се питање колико су ефикасне преграде. Доступни подаци мерења су ретки. Изузетак који потврђује правило јесте истраживање Џеја Шелтона, који је обавио низ експеримената на различитим пећима. Резултати су публиковани у [73].

Закључци из ових експеримената могу да се сведу у једну реченицу: “Ефекат преграда је непредвидив и да постоји веома много могућих конфигурација”. Међу резултатима су и експерименти са две скандинавске пећи и то две значајно различитих топлотних снага. Експерименти су извођени са и без преграда, при различитим степенима топлотног оптерећења. Резултати су следећи: У већој пећи преграде су имале мали ефекат на било коју од енергетских ефикасности – ефикасност сагоревања, предаје топлоте и укупну. У случају мање укупна енергетска ефикасност је повећана за два процента.

1.2.7.4 Употреба преграде данас

Преграде су присутне у савременом приступу конструисању, што може да се види у низу студија где је овај конструктивни детаљ присутан [75, 76 и 77], као и у модерним котловима на биомасу. Радови у којима се њихов утицај валоризује су ретки [78]. У студијама [79, 80] проблем који је централни је дефинисан као “изналажење максимума времена задржавања гасова у секундарној комори сагоревања кроз унапређење конструкције и положаја преграда”. У [81] струјање у пећима са преградама се означава под термином S- струјање. Време задржавања је проучавано посебно у 60-тим и 70-тим годинама [82, 83]. Од значаја је и да се у литератури наводи примена метода хладног тока, при проучавању овог феномена [82].

1.3 ЦИЉ, ХИПОТЕЗА

1.3.1.1 Проблем

Приликом пројектовања инжењери користе прорачуне који се базирају или на општим законима физике или на њиховој комбинацији с емпиријом. Истраживања су посебно у областима које укључују високотемпературске процесе скупа, тако да се обично користе препоруке светских водећих институција. Тако на пример прорачун излазне температуре у ложишту обавља се на бази прорачуна ЦКТИ. Историјски посматрано и ASME, америчко удружење машинских инжењера је основано са циљем да реши, односно да увођењем правила/прорачуна спречи експлозије котлова, и то све крајем 19 века.

Прорачун који је на располагању не даје детаљан опис феномена који се дешавају у ложишту. На више питања стандардизовани прорачуни не дају одговоре. Неки од њих су емисија NOx и CO. Ситуација се компликује тиме што се уводе све строжији прописи по питању емисија. Ови прописи наравно прате развој технике у индустријски водећим земљама света. Поставља се питање да ли наша техника може да одговори изазову. А посебан проблем је тај што се усвајају прописи из земаља Европске уније, и у појединим случајевима уводе се још строжији прописи по питању емисија. Табела 7 то и документује. У раду [84] се наводи да у ЕУ за мала постројења нису прописане вредности за емисију азотних оксида, тако да је уредба у републици Србији строжија од оних у Европској унији. Познавајући сложеност проблематике генерисања азотних оксида, поставља се питање зашто је поштрена регулатива у републици Србији.

Табела 7. Дозвољена емисија из постројења мале топлотне снаге на чврста горива [85]

Димни број	≤ 1
Термичка снага [kW]	Угљен-моноксид [mg/m ³]
50-150	4.000
150-500	2.000
500-1.000	1.000
Топлотна снага [kW]	Азотни-оксид [mg/m ³]
100-1.000	250

Сагоревање чврстог горива је умногоме сложеније од сагоревања течног и гасовитог горива или сагоревања угљене прашине. Разлог је у томе што се паралелно одвија и хомогено сагоревање у простору и хетерогено у слоју, а свему претходе сложени термохемијски процеси деволатилизације, који се надовезују на процесе загревања и сушења горива.

Процеси који се одвијају у ложишту котла су веома сложени, и као такви представљају велики изазов како за рачунарску технику, тако и за њихово одвојено и спрегнуто моделовање. Задатак спрегнутог моделовања је да дефинише међусобне утицаје различитих феномена. Број параметара који су потребни да се задају као улазне величине приликом дефинисања проблема је велик. Њихова верификација експериментима је скупа са значајном неизвесношћу. Поставља се питање да ли усложњавање модела доводи и до прецизнијих резултата.

Процеси у ложишним просторима котлова и великих и малих снага ложених чврстим горивом имају недостатака и предмет су сталних усавршавања.

Процеси у ложиштима котлова на чврсто гориво малих снага нису довољно испитивани и проучавани. Разлог је чињеница да су истраживања усмерена на котлове великих снага, тако да када је реч о котловима великих снага који користе чврста горива, онда је то искључиво угљена прашина, а она се понаша значајно другачије од сагоревања чврстог горива веће гранулације.

Време задржавања гасова у ложишту, које припада као величина хомогеном делу сагоревања чврстог горива је битна величина. Осим времена задржавања гасова, турбуленција / мешање и температура су три т-а квалитетног сагоревања (треће т је из енглеског израза за време задржавања, Residence time).

Задржавање гасова може да се процени дељењем запреминског протока и запремине ложишта. Али, колико износе рецикулационе зоне, колико износе мртве зоне у којима долази до стагнације, то не може да се процени. Да ли је мешање квалитетно? Уколико су у ложишту идеални услови по два фактора од 3 т-а, то није довољно. На пример ако је присутно квалитетно мешање/турбуленција и температура, а време прекратко доћи до непотпуног сагоревања, и то важи за све комбинације случајева.

Мерења у условима високих температура су веома скупа. Неопходна је примена или изузетно скупих система, као што је на пример ултразвучни, или примена и даље веома скупих у нашим условима уисних мерних система, којима би се узорковали гасови и мерила њихова температура и састав. Али, чак и то нам обезбеђује само податке у одређеној тачки, а поље и температурско и концентрацијско је далеко од хомогеног.

Из изложеног се види да постоји низ проблема у вези са квалитетом сагоревања. У оквиру ове дисертације ће се посматрати један од путева побољшања сагоревања, а то је продужење времена задржавања гасова.

1.3.2 Циљ

CFD применити као алат за побољшање процеса сагоревања. Да би се тај циљ остварио неопходно је да се обави моделовање процеса. Резултати CFD анализа с једне стране омогућавају боље разумевање сложених процеса, а са друге дају конкретне смернице у области пројектовања.

Ниво познавања процеса сагоревања у ложишту је од великог интереса, поготово ако се има у виду да економија горива добија све више на значају, а паралелно су и прописи о питањима емисије штетних гасова све строжији. Савладавање моделовања помоћу CFD-а може да допринесе и уштеди горива и / или смањењу емисије.

1.3.3 Хипотеза

CFD може значајно да приближи сложену проблематику у ложишту кроз визуелизацију проблема, као и могућност виртуелних мерења на неприступачним местима. CFD омогућава израчунавање брзинских, температурских, концентрацијских и других поља. Њихова мерења су у пракси или скупа или практично неизводљива. Да би се нека од поменутих детаљних мерења стварно и применила, морала би да буде примењена у процесима који за резултат имају скупе производе, који би могли да оправдају мерења. Котлови малих снага не спадају у ту категорију, а упитно је и за котлове већих снага, уколико исти нису у серијској производњи.

Коришћењем CFD софтвера може да се развије метод којим омогућава израчунавање расподела времена задржавања гасова у ложишту произвољне форме и граничних услова.

Пошто је расподела времена задржавања гасова један од показатеља квалитета сагоревања, развојем једног оваквог метода се индиректно добија и информација о квалитету процеса сагоревања. Наиме, овим методом утврдиће се колико времена ће се гасови задржавати у ложишту при датим условима сагоревања биомасе.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДИ

2.0 НАЧИН РЕШАВАЊА ПРОБЛЕМА

Поставља се питање како решити горе постављени проблем?

Експериментално мерење времена задржавања гасова је веома захтеван поступак. Методе које су развијене су методе са маркерима (на енглеском језику трејсерима). Проблем усложњава чињеница да је време задржавања изузетно кратко, реда величине до неколико секунди, при чему је за добијање дистрибуције времена задржавања неопходно већи број мерења у ионако кратком интервалу тако да је изузетно осетљива и скупа самим тим техника. Тако нешто у нашим условима је немогуће.

Једна могућност је да се развије сопствени софтвер, такозвани „ин хоусе“ софтвер, али за такав развој је потребан читав тим, који би укључивао програмера, математичара и стручњака како из области моделовања феномена, тако и стручњака из области пројектовања датог уређаја. Неизоставан део развоја једног таквог софтвера је и део који би се односио на валидацију развијеног кода који захтева или располагање експерименталним резултатима или обављање сопствених мерења.

Претходно наведена могућност је нереална.

Друга опција је да се користе готова софтверска решења. Комерцијалне верзије истих су изузетно скупе и цена им се мери у десетинама хиљада евра, академске верзије су пак много доступније. Цена академских верзија је прихватљива, јер је то истовремено и могућност неформалног заједничког рада произвођача софтвера и представника академије, где се кроз синергију долази до резултата који са једне стране научнику омогућавају бољи увид у сложену природу проблема који проучава, а са друге стране произвођачу софтвера ствара изузетну референцу, додатно исти софтвери се презентују млађим колегама и студентима, тако да постоји могућност проширења круга будућих корисника софтвера, а увек постоји могућност да баш неки од будућих корисника постане и сам део тима који за циљ

имају даљи развој софтвера, било кроз побољшање самих модела, било кроз повећање ефикасности израчунавања софтвера, до предлога нових интерфејса којима би се још више олакшао рад инжењерима корисницима. У сваком случају и једна и друга страна су на добитку. Комерцијални корисници са друге стране у већини случајева не публикују своје резултате из разлога што би то онда представљало кршење потписаних уговора о тајности података. Једино у случајевима када би се неко решење и патентирало, тада би CFD анализе биле доступне академској и стручној јавности, али све то са значајним временским кашњењем.

2.1 МЕТОД

У оквиру ове дисертације је коришћен нумерички приступ. Софтвер који је коришћен је комерцијална верзија програма STAR CCM+. STAR CCM+ припада групи CFD софтвера (енгл. Computational fluid dynamics). У раду ће бити изложене основе које објашњавају начин на који се изводи моделовање у овом софтверском пакету, као и начин решавања добијених система једначина.

Примењен ће бити изотермни приступ моделовања, односно научни приступ декомпозиције проблема у којем се сложен проблем разлаже на више потпроблема. Увођење сложеног описа процеса, који подразумева да је модел сваког од тих процеса потврђен експериментално/валидиран је нереално.

Примена изотермног приступа биће документована литературним примерима.

Следећи корак је развој, документација и примена метода за мерење времена задржавања гасова у котловском ложишту.

Његова верификација биће демонстрирана на примерима из литературе.

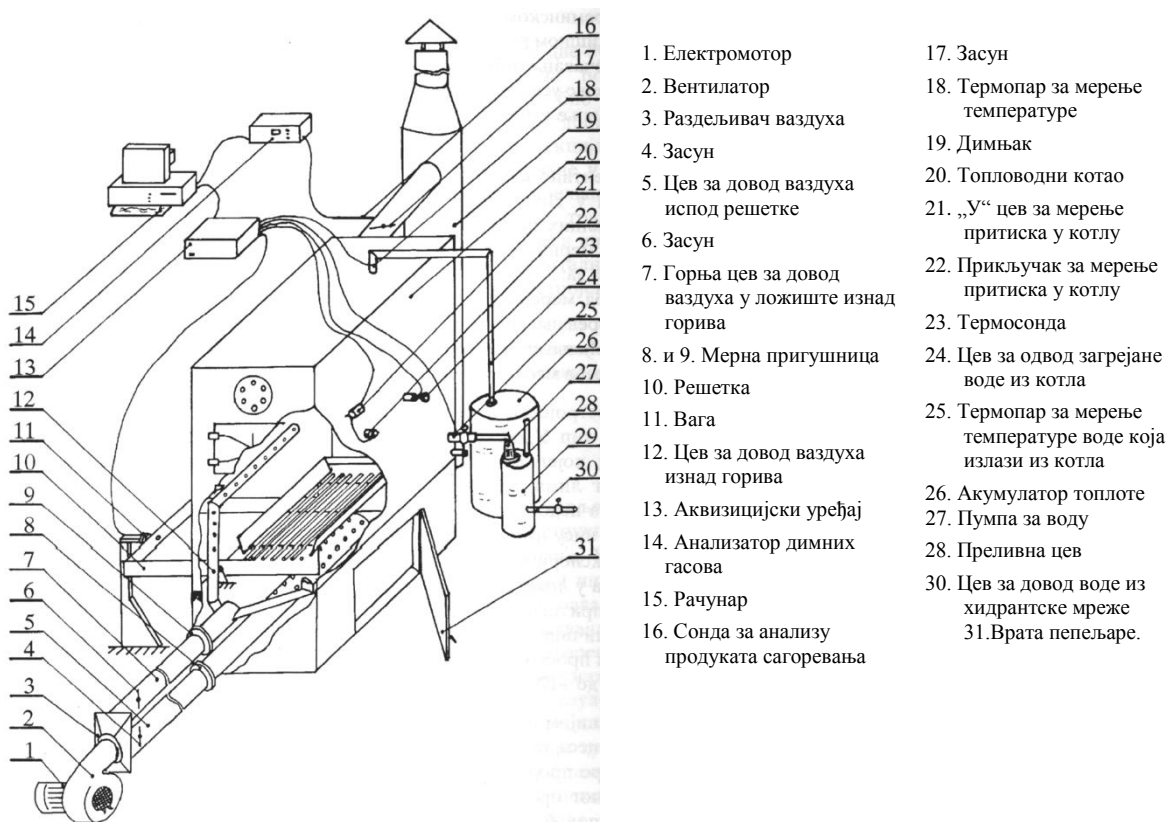
Како на квалитет процеса сагоревања са једне стране утичу конструктивни захвати као што су преграде и смер довођења секундарног ваздуха, а са друге стране оперативне променљиве као што су брзина и притисак секундарног ваздуха, развијени метод биће примењен на израчунавању расподеле времена задржавања гасова на сету изабраних примера. Нумерички експерименти биће обављени.

2.2 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експерименти у овом раду су нумерички. Од њих четири за први постоји корелација са реалним експериментом, који је детаљно описан у [86]. Резултати овог првог експеримента су преусмерили истраживање са првобитног циља изналажења модела процеса који се одвијају у ложишту на један други циљ, који није толико био присутан у литератури и радовима, а то је анализа утицаја геометрије и експлоатационих услова на време задржавања гасова. Промењена је и карактеристика модела, тако да код првог експеримента је реч о неизотермном моделу, док су други, трећи и четврти модел изотермни, што је утемељено у литератури. (детаљи су приказани у прегледу савремене литературе – секција под називом: „Примена изотермног приступа моделовања“, као и у теоријским основама – секција под називом: „Приступ методологијом изотермног струјања“)

2.2.1 Експеримент 1

Настојање овог експеримента јесте да се што верније опише модел једног реалног ложишта, за који су били на располагању мерења. Реално ложиште се налази на Пољопривредном факултету у Новом Саду и његова сврха је да се омогући проучавање кинетике сагоревања бала сламе. Шема експерименталног постројења је приказана на слици 61. Детаљније о постројењу може да се прочита у дисертацији [86], а у даљњем тексту ће бити дат приказ модела који се базира на савременим сазнањима из области сагоревања.



Слика 61. Шематски приказ експерименталног постројења [86]

2.2.1.1 Опис неизотермног модела

Турбуленција се описује К-ε моделом, који се данас према [87] највише користи при моделовању реалних струјања, услед њене опште применљивости.

Процес сагоревања се описује моделом дисипације вртлога Магнуссена и Хјертјагера [88]. Овај приступ је прихваћен у литератури [89, 90].

Хемизам се описује једноступеном глобалном реакцијом. Не улази се у сложеније механизме према [87], избегавајући описивање компликованих механизма сагоревања угљоводоника и угљен-моноксида. У [87] се наводи да "С обзиром на то да је временски размер одумирања турбуленције у свим практичним ситуацијама много дужи од карактеристичног временског размера хемијске кинетике сагоревања, разматрање детаљног хемизма сагоревања најчешће није потребно и то представља основни корак ка поједностављењу модела".

Моделовање у раду је такође обављано праћењем смерница из [91], где се тврди да је нерационално при моделовању сложених процеса један модел усложњавати, док се неки други аспект проблема описује мање једноставнијим моделом. Преведно на конкретан случај проблема из овог рада, мисли се на поједностављен начин моделовања порозне структуре сламе.

Доња топлотна моћ килограма биогорива – сламе се израчунава на основу познавања елементарног састава и следеће VDI формуле (једн. 142):

$$H_d = 340 \cdot C + 1200 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105 \cdot S - 25 \cdot W \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$H_d = 14829,2 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Једн. 142

Доња топлотна моћ кубног метра чистог метана износи $35.797 \frac{kJ}{m^3}$.

У модел се уводи претпоставка да волатиле чине метан и угљен-диоксид, и да од укупне масе бале сламе 80 % се током деволатилизације ослобађа и сагорева у простору, док преосталих 20 % у слоју. (једн. 143) Базирано на наведеној претпоставци количина ослобођеног метана се израчунава кроз изједначавање количине топлоте, која се ослобађа сагоревањем 80 % масе бале и топлоте ослобођене сагоревањем метана. Пошто се одреди количина метана, количина угљен-диоксида која се ослобађа у јединици времена, се израчунава из масеног биланса.

Маса бале износи 5.14 кг.

$$\left[\begin{array}{l} \text{топлота која се ослободи} \\ \text{сагоревањем} \\ V_{CH_4} \text{ кубних метара метана} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} 80 \text{ посто топлоте која се ослобађа} \\ \text{приликом сагоревања бале сламе} \\ \text{месе 5,14 килограма} \end{array} \right]$$

$$V_{CH_4} \cdot 35797 = 5,14 \cdot 0,8 \cdot 14829,2$$

$$V_{CH_4} = 1,7034 \left[m^3 \right],$$

Једн. 143

V_{CH_4} је укупна количина метана која се ослободи приликом сагоревања једне бале масе 5,14 kg

Претпоставка је да метан чини сагорљиви део волатила, док несагорљиви чини угљен-диоксид. Густине метана и угљен-диоксида су: $0,71 \text{ kg m}^{-3}$ и $1,976 \text{ kg m}^{-3}$. Постављањем једнакости између 80 посто масе горива и масе волатила се добија количина угљен-диоксида.

$$0,71 \text{ kg m}^{-3} \cdot 1,7034 \text{ m}^3 + 1,976 \text{ kg m}^{-3} \cdot x \text{ m}^3 = 0,80 \cdot 5,14 \text{ kg} = 4,112 \text{ kg}$$

$$x \text{ m}^3 = \frac{4,112 - 1,2094}{1,976} = 1,4689 \text{ m}^3,$$

$$\text{укупна количина волатила износи: } 1,4689 + 1,7034 = 3,1723 \text{ m}^3,$$

изражено у процентима: 46% CO_2 и 54% CH_4 .

Пошто је потребно време да сагори бала 650 с, према експерименту [86], количина угљен-диоксида и метана која се ослобађа у јединици времена, уколико се за репрезентативну вредност узме средња изнесе:

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = 1,4689/650 = 0,002260 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ CO}_2$$

$$\dot{V}_{\text{CH}_4} = 1,7034/650 = 0,002621 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ CH}_4$$

Количина потребног ваздуха за сагоревање гасовитог горива елементарног састава 46% CO_2 и 54% CH_4 износи (једн. 144):

$$V_{L\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{1}{0,21} \cdot \frac{1}{100} \cdot \left[0,5 \cdot (\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right]$$

$$V_{L\min} = \frac{1}{0,21} \cdot \frac{1}{100} \cdot 2 \cdot 54 = 5,1426 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$

Једн. 144

Пошто је при експерименту који се моделује коефицијент ваздуха био 2,9, стварна количина ваздуха је 2,9 пута већа, а пошто је потребно за граничне услове да се изрази у јединици времена:

$$\dot{V}_L = V_{L\min} \cdot 2,9 \cdot 0,002260 + 0,002621$$

$$\dot{V}_L = 0,07279 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1},$$

ова количина ваздуха се дели на примарни и секундарни ваздух у односу 80 према 20. Тако да се добија:

$$\dot{V}_{L\text{ prim}} = 0,07279 \cdot 0,80 = 0,05823 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{V}_{L\text{ sek}} = 0,07279 \cdot 0,20 = 0,01456 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Зрачење се описује моделом П1 сферних хармоника базирано на препорукама из литературе. У [87] се препоручују флуksни модели, речима да „Уколико се изузму грубља поједностављења (алгебарски модели и др.), која се у комплексним проблемима ипак најчешће срећу, за проблеме у термоенергетици и процесној

техници се као најпогоднији бирају флуksни модели“, али у [92, 93] се користе сферни хармоници.

За анализу је изабрана бала мале сабијености, чије су димензије следеће:

-висина $a=0,37$ m

-ширина $b=0,50$ m

-дужина $c=0,71$ m

Анализа се без потешкоћа може да обави на исти начин и за гушће сабијене бале, при чему се у ствари тада прати котао веће снаге.

Димензије ложишта су следеће:

-висина $a=0,85$ m

-ширина $b=0,60$ m

-дужина $c=0,85$ m

У експерименту се примарни ваздух доводи 0,20 m испод бале централно путем перфориране цеви. Овај начин довода ваздуха је у моделу замењен једноставнијим путем три правоугаона отвора, једног већег централног, и два мања бочна. Отвори нису постављени на реални ниво, на дно котла, већ 0,20 m испод најнижег реда квадрара, при чему ово поједностављење се оправдава тиме што се порозна структура бале сламе не приказује у целости. Ово неприказивање значајно смањује локалне губитке струјања. У експерименту кроз перфориране отворе ваздух струји знатно вишом брзином, али до горње површине бале губи значајан део брзине, услед локалних отпора.

Секундарни ваздух се доводи у горњем левом и десном углу ложишта. У експерименту се доводи кроз перфорирану цев, док се и овде као што је био случај са примарним ваздухом обавља апроксимација у моделу и отвор за улаз ваздуха је правоугаоног пресека дужине 0,70 m.

Излазни отвор из ложишта је димензије 0,15 x 0,30 m, и постављен је асиметрично у десном делу горње стране ложишта.

Порозна структура бале сламе се моделује низом квадрара са чијих горњих површина се ослобађају волатили. Број редова квадрара се мења, при чему се они постављају у шаховском распореду са циљем омогућавања струјања ваздуху. Разлог за разматрање различитог броја редова је у томе што је од интереса утицај брзине ослобађања волатилна на процес сагоревања. Уколико је реч о више редова, тада ће брзина бити мања и обратно.

2.2.2 Експеримент 2

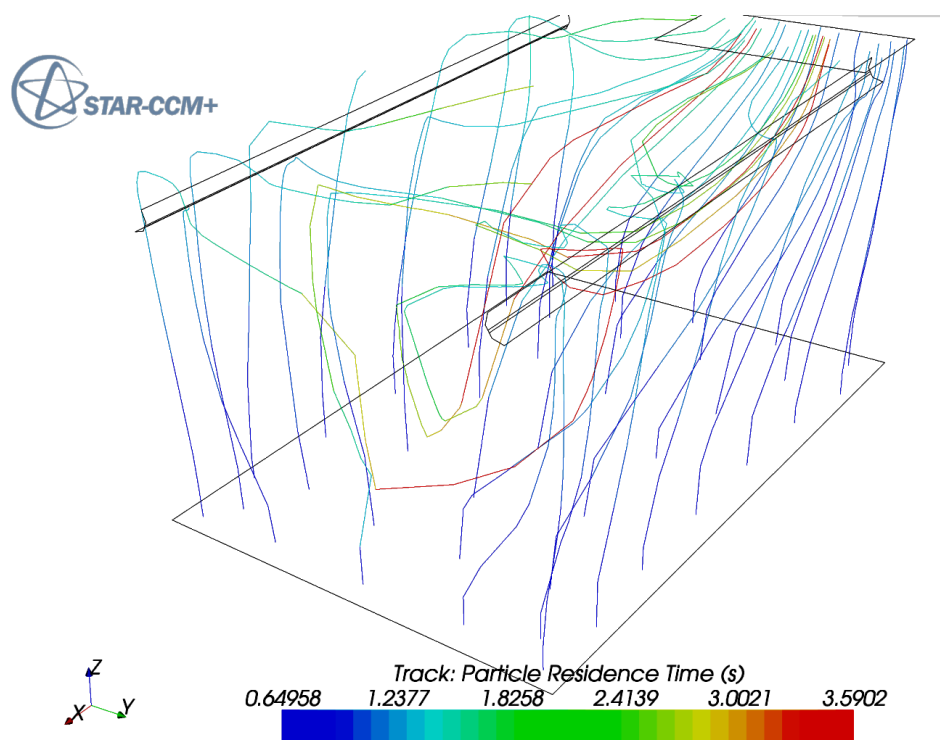
Експерименти 2 и 3 се базирају на експерименту 1, при чему се варира код експеримента 2 смер довођења секундарног ваздуха, а код експеримента 3 брзина довођења секундарног ваздуха.

2.2.2.1 Опис геометријског и физичког модела

Геометрија ложишта је проста, као и она која је најчешће присутна у пракси. У горњем десном углу ложишта је смештен излаз, а у горњем делу ложишта са леве и десне стране су постављени ињектори секундарног ваздуха правоугаоне форме. Тип процепа је изабран, да би се постигао већи утицај на струјање флуида. У пракси су уобичајене перфориране цеви, али је њихов утицај на струјање флуида значајно мањи. Волатили се ослобађају са дна ложишта, при чему је за “дно” узета горња страна бале сламе. Ваздух је медијум у симулацији. Задати протоци за сваки од ињектора су $0,017 \text{ kg s}^{-1}$, док за волатиле он износи $0,155 \text{ kg s}^{-1}$.

Турбулентно струјање се описује Рејнолдсовим једначинама струјања, које представљају осредњене Навије Стоксове једначине. Осредњавање Навије Стоксових једначина доводи до појаве нових чланова у њима које се називају “привидним” градијентима напона и топлотног флукса, који потичу од турбулентног кретања. Ове нове величине морају да се доведу у везу са средњим величинама струјања за шта су неопходни модели турбуленције.

Систем је затворен кроз модел „Realizable two layer K-epsilon“. Примењен је „Coupled Flow“ модел у којем се једначине одржања масе и момента симултано решавају коришћењем „Time - (pseudotime-) marching approach“. [94]



Слика 62. Струјнице које започињу на местима где су лоцирани маркери струјања на волатилној површини – за случај 02

Четири случаја је проучавано, сваки од њих је одређен углом ињектора мерен од вертикале. У случају 01 је угао 45° , случај 02 60° , случај 03 75° и случај 04 90° . На слици 62 у горњем десном углу приказан је излаз, ињектори ваздуха на обе стране и површина са које се ослобађају волатили, као доња површина. Линије које полазе са волатилне површине су струјнице волатиле. Број и локација се одређују

подешавањем маркера струјања. Укупно је присутно 40 маркера. Легенда показује време задржавања честица. Свака струјница мења боје како се честица приближава излазном пресеку. За потребе анализе у следећем делу је потребно познавање последње вредности за једну струјницу, и то оне када се честица налази на излазном пресеку или у тачки стагнације. На слици 62 приказане су струјнице које започињу на местима где су лоцирани маркери струјања на волатилној површини – за случај 02.

2.2.2.2 Коришћен софтвер

Овај експеримент је урађен коришћењем STAR CCM+ кода, програма CD Adarco групе. CFD солвер се користи за решавање проблема који укључују струјање, пренос топлоте и анализу напонских стања у материјалу. У могућности је да реши проблеме који укључују интердисциплинарност и сложене геометрије. Процесор компјутера на којем су обављане ове симулације је Intel Pentium E2140 1M Cache, 1.60 GHz, 800 MHz FSB двојезгрени процесор.

2.2.2.3 Анализа грешке

Анализа грешке је обављена. Параметар који је мењан је “base value” величина у односу на коју се задају остале величине. Веће вредности воде ка грубљој мрежи. Резултати приказани на слици 63 показују да су разлике између “base value” 1m и 0,25m готово безначајни, за симулације је изабрана вредност 1m.

Карактеристике мреже су следеће:

- За “base value” 1m, број ћелија је 38.062, број лица 244.275 и број чворова 221.521,
- За “base value” 0,5 m, број ћелија је 67.684, број лица 443.012 и број чворова 398.471,
- За “base value” 0,25 m, број ћелија је 215.085, број лица 1,451.561 и број чворова 1,291.989.



Слика 63. Анализа грешке



Слика 63-наставак. Анализа грешке

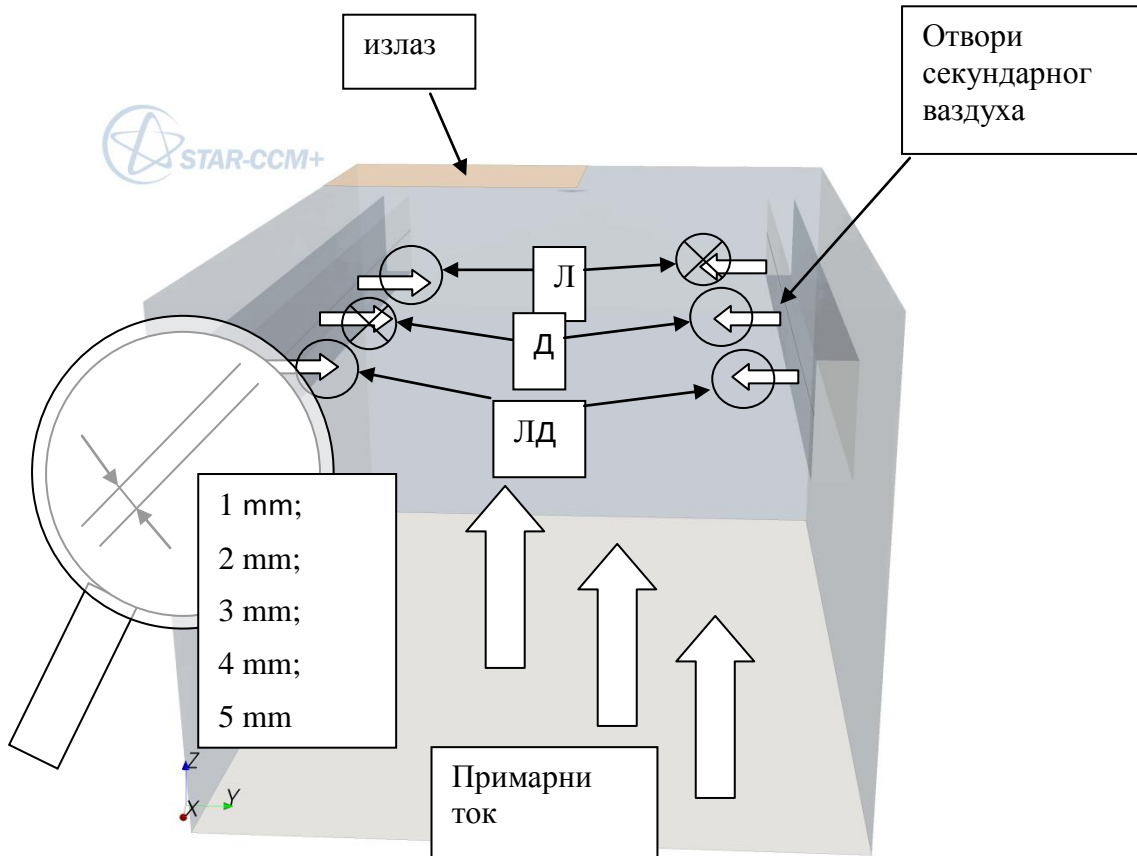
2.2.3 Експеримент 3

2.2.3.1 Опис геометрије и физика проблема

Геометрија ложишта је идентична оној из Експеримента 2. У горњем десном углу ложишта је смештен излаз, а у горњем делу ложишта са леве и десне стране су постављени ињектори секундарног ваздуха правоугаоне форме. Тип процепа је изабран, да би се постигао већи утицај на струјање флуида. У пракси су уобичајене перфориране цеви, али је њихов утицај на струјање флуида значајно мањи. Волатили се ослобађају са дна ложишта, при чему је за “дно” узета горња страна бале сламе. Пет ширина процепа је изабрано: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm и 5 mm. За сваки је постављен исти масени проток, тако да се резултујућа брзина разликује. Мешавина гасова се ослобађа са горње стране бале сламе. Димензије ложишта су 0,85 (висина) x 0,6 (ширина) x 0,85 (дужина) у метрима. Димензије бале су 0,37 (висина) x 0,5 (ширина) x 0,71 (дужина) у метрима. Ваздух је коришћен као медијум у симулацији. Протоци су израчунати према вредности препоручених вредности запреминског топлотног оптерећења ложишта за случај ручног ложења. (400 kW/m^3). Однос секундарни / примарни ваздух је постављен 20-80%. Укупни секундарни ваздух износи $0,02 \text{ kg/s}$, док примарни ток износи $0,08 \text{ kg/s}$. Задата температура волатила износи 1.073 K , где је температура секундарног ваздуха 300 K . За сваку ширину

процепа постоје три случаја. Први у којем сав секундарни ваздух се доводи са леве стране, други када сав долази са десне и трећи, где подједнако и са леве и са десне стране се доводи ваздух. Укупно је урађено 15 нумеричких експеримената.

На слици 64 је дат шематски приказ експеримента 3.



Слика 64. Опис геометрије

Приступ моделовању турбулентног струјања је идентичан као у другом експерименту.

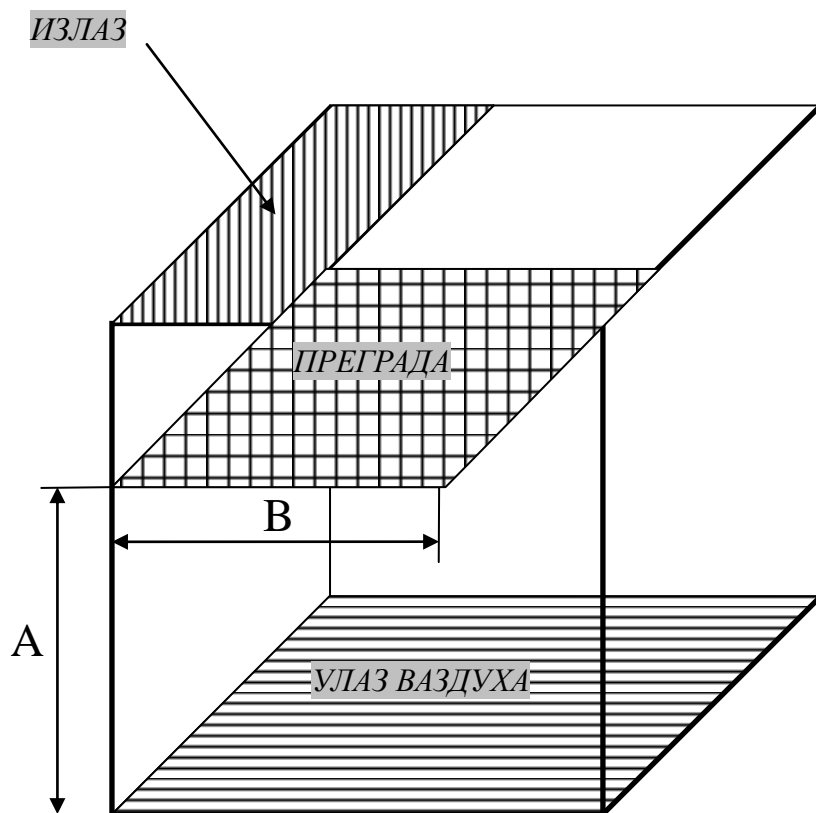
2.2.4 Експеримент 4

Експеримент 4 је иновација по том што се настоји на пасиван начин да се утиче на струјање. У другом и трећем експерименту су утицајни фактори били смер или брзина довођења секундарног ваздуха, овде се испитује утицај увођења преграде у ложиште и утицај њеног позиционирања и димензија на струјање.

2.2.4.1 Опис геометрије

На слици 65 је шематски приказан експеримент 4. Девет различитих геометрија је проучавано, свака од њих одређена вертикалним положајем и ширином преграде. У сваком случају је преграда спојена са левом страном ложишта. Усвојене димензије ложишта су: 1 x 1 x 1 m (висина x ширина x дужина). Препоручено топлотно оптерећење јединице запремине ложишта је преузето из литературе [94] за

ручно ложене котлове. За дато топлотно оптерећење су израчунати потребни протоци ваздуха за различите вредности коефицијента вишка ваздуха. Различите количине ваздуха су: 0,16; 0,24; 0,32; 0,40 и 0,48 kg/s.



Слика 65. Геометрија проблема

Два главна параметра одређују геометрију проблема. То је А који представља висину на којој је преграда у ложишту постављена и Б која представља ширину преграде. А параметар у симулацијама узима следеће вредности: А1: 0,7m; А2: 0,8m; А3: 0,9m, и Б параметар узима: Б= Б1: 0,7m; Б2: 0,8m; Б3: 0,9m. Комбинацијом ових вредности долази се до следећих случајева: Случај 1: А1 & Б1; Случај 2: А1 & Б2; Случај 3: А1 & Б3; Случај 4: А2 & Б1; Случај 5: А2 & Б2; Случај 6: А2 & Б3; Случај 7: А3 & Б1; Случај 8: А3 & Б2; Случај 9: А3 & Б3.

Основни случај је назван Случај 0 и у том случају нема преграда. Десет случајева од Случаја 0 до Случаја 9 је прорачунато за сваки задати масени проток што је резултирало у 50 симулација.

Моделовање турбулентног струјања је учињено као у претходна два експеримента.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

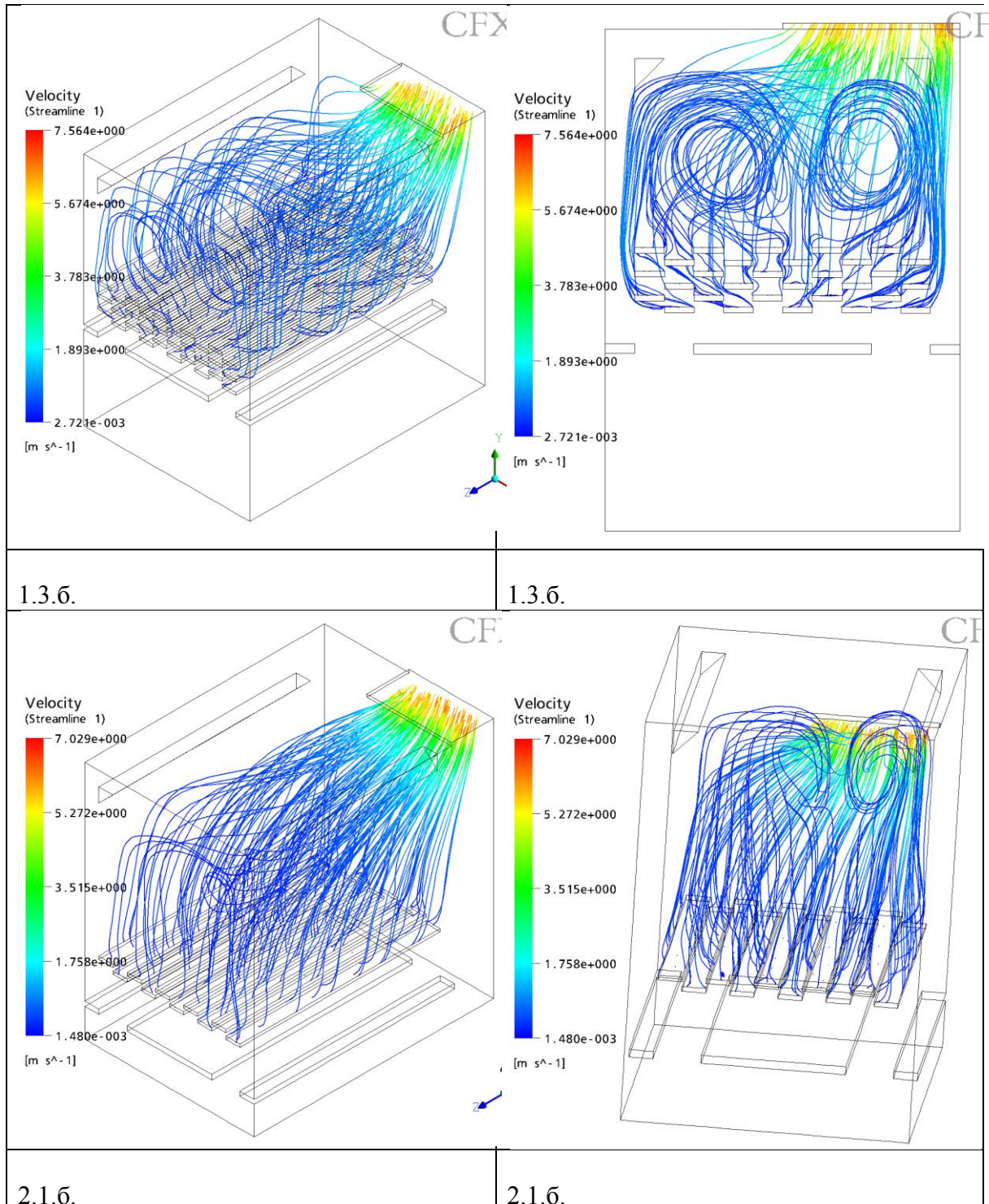
3.0 ЕКСПЕРИМЕНТ 1: РЕЗУЛТАТИ НЕИЗОТЕРМНОГ ЕКСПЕРИМЕНТА

Као што је већ наглашено резултати експеримента 1 су иницирали остале експерименте.

Посебан куриозитет је изазвала визуелизација струјница волатила која је приказана у табели 8. На њој се јасно разазнају два вртлога. Постојање вртлога би у сваком случају било повољно из разлога што се на тај начин дозвољава дуже време за сагоревање, што узрокује потпуније, односно боље сагоревање, као и последичан прелаз топлоте.

Посебно експериметни 2 и 3 су изведени из претходних тврдњи. Експеримент 4 је индиректно повезан за првим експериментом.

Табела 8. Приказ два вртлога



3.1 ЕКСПЕРИМЕНТ 2: УТИЦАЈ УГЛА МЛАЗНИЦЕ СЕКУНДАРНОГ ВАЗДУХА

3.1.1 Резултати

У табели 9 је приказана расподела времена задржавања за маркере струјања за четири проучавана случаја.

Табела 9. Расподела маркера струјања по брзинским интервалима

Интервал времена задржавања [s]	Случај 01	Случај 02	Случај 03	Случај 04
Мање од 0,5	0	0	0	0
0,5-1	9	8	8	9
1-1,5	9	12	14	12
1,5-2	10	7	8	11
2-2,5	7	5	3	4
2,5-3	0	3	1	2
3-3,5	2	1	2	1
3,5-4	1	1	2	1
4-4,5	0	1	1	0
4,5-5	1	1	0	0

Табела 10 приказује средња, минимална и максимална времена задржавања маркера струјања. Ови подаци показују утицај угла секундарног ваздуха на средње време. Најбољи случај је 02 са припадајућим углом од 60°. Најгори случај је онај са углом 90°. Релативна разлика између најбољег и најлошијег случаја средњег времена задржавања износи 20 %

Табела 10. Средње, минималне и максималне вредности времена задржавања маркера струјања

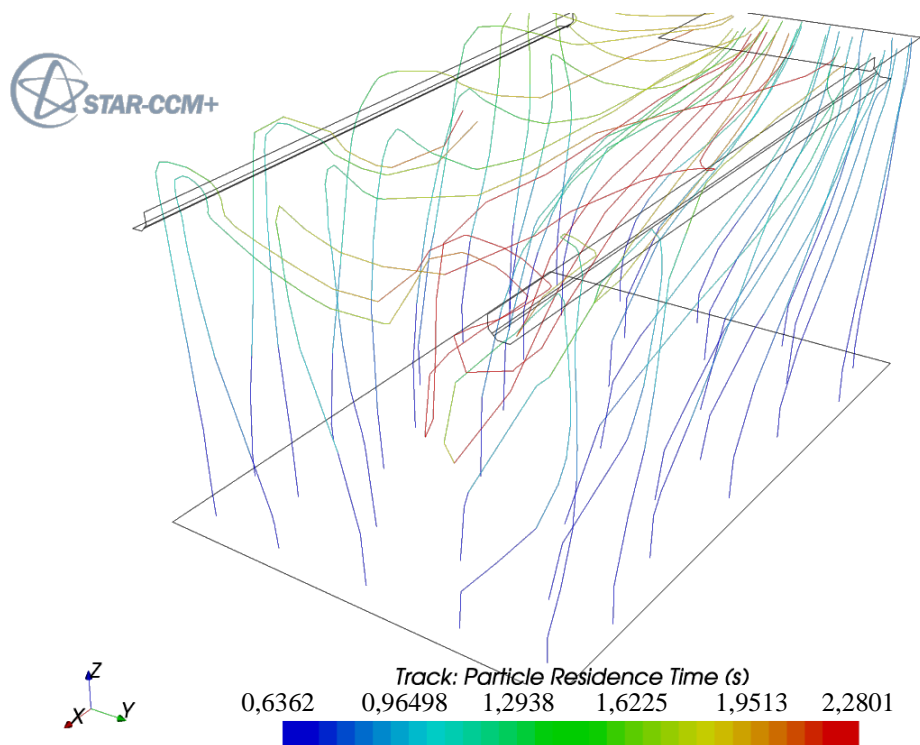
	Случај 01	Случај 02	Случај 03	Случај 04
Средње време задржавања [s]	1,8	1,87	1,7	1,56
Минимално време задржавања [s]	0,77	0,81	0,799	0,8
Максимално време задржавања [s]	5,05	6,16	4,33	4,64

Табела 11 даје делимично објашњење за резултате из табеле 10. Резултати показују да је поставка случаја 04 довела до бржег струјања, што се читава из прва два реда који заједно чине и највећи део запремине ложишта. (односно брзине у ложишту су према овим резултатима мање од $1,5 \text{ m s}^{-1}$) Подаци за брзине мање од $0,5 \text{ m/s}$ су за случај 04 мања, а за опсег брзина од $0,5$ до $1,5$ су већа него за одговарајуће вредности за случај 02.

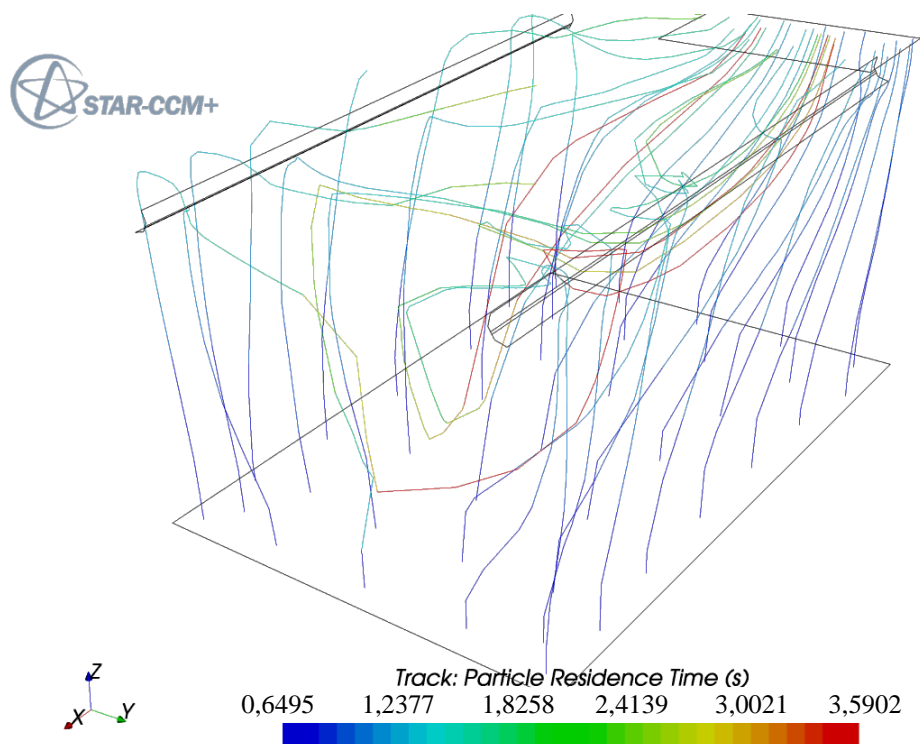
Табела 11. Запремина у ложишту у кубним метрима, где се брзина налази у одговарајућем опсегу

Брзина у опсегу [m s^{-1}]	Случај 01	Случај 02	Случај 03	Случај 04
Мање од 0,5	0,178	0,178	0,169	0,158
0,5-1,5	0,057	0,057	0,067	0,077
1,5-2,5	0,005	0,005	0,005	0,005
2,5-3,5	0,002	0,002	0,002	0,002
3,5-4,5	0,001	0,0009	0,001	0,001
4,5-5,5	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005
5,5-6,5	0,000002	0,000004	0,000002	0,000002

На следеће две слике 66 и 67 су приказане маркиране струјнице за случајеве 01 и 02. Простим посматрањем не може да се примети разлика и нађе објашњење за нумеричке резултате из табела 10 и 11.

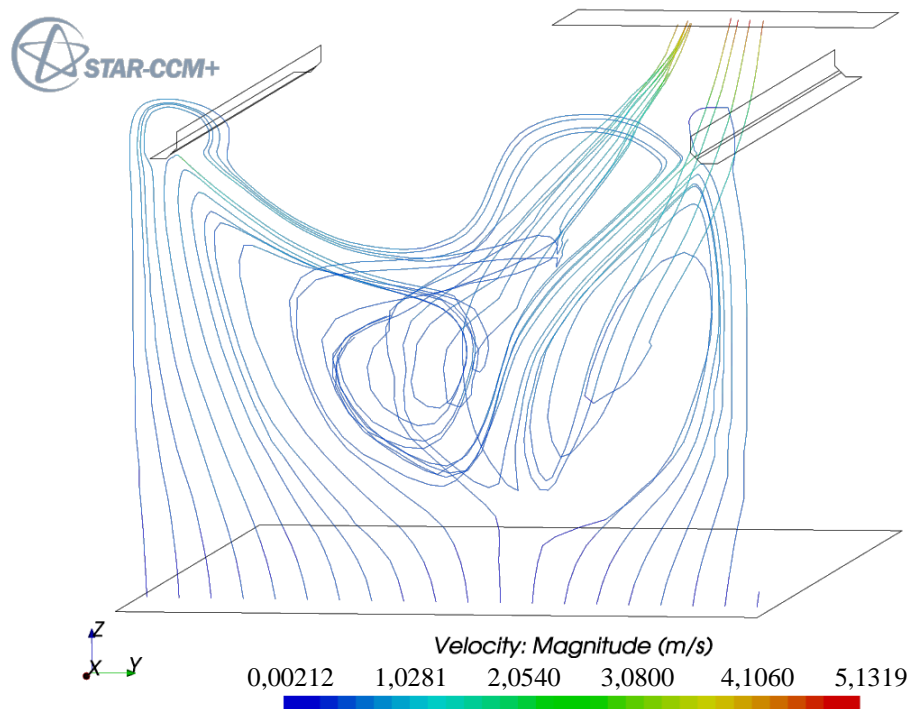


Слика 66. Струјнице маркера струјања за случај 01

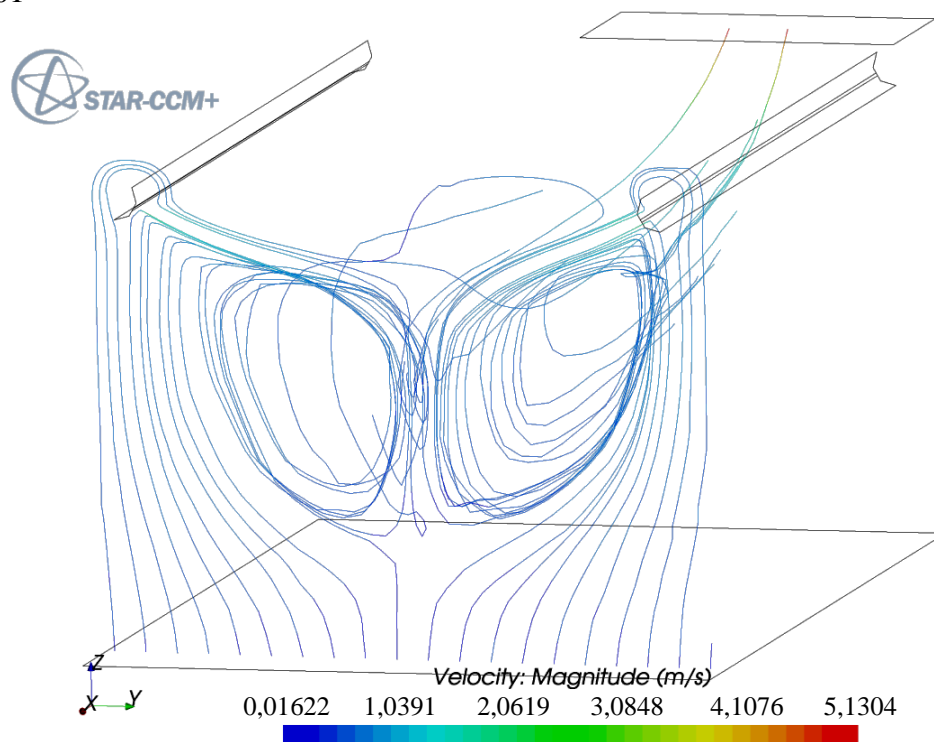


Слика 67. Струјнице за случај маркера струјања 02

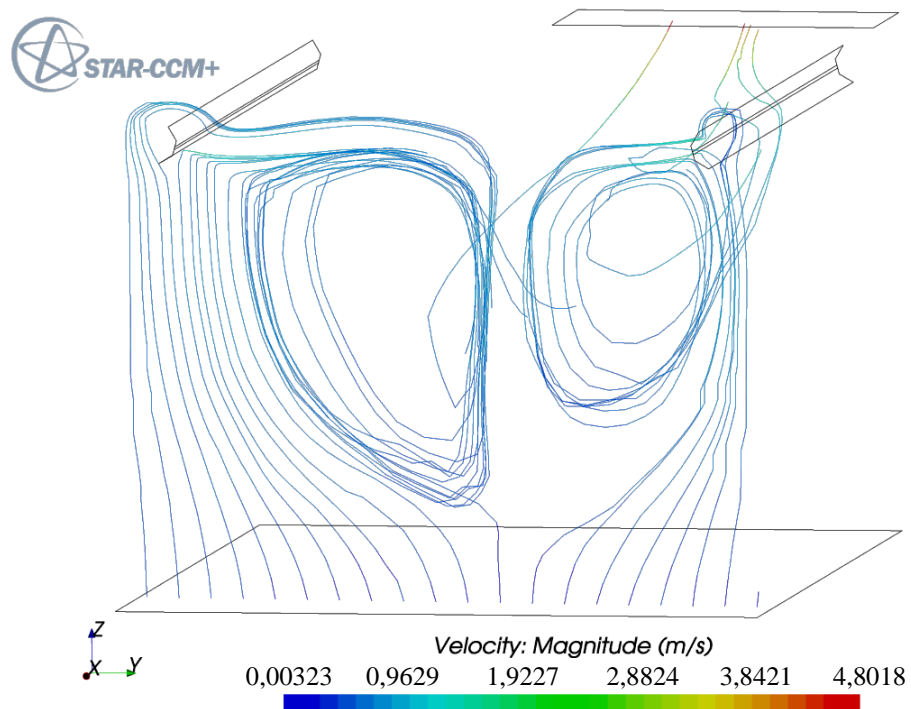
Ситуација се значајно мења променом графичког приказа резултата и то када се за референтну не узме читава волатилна површина, него само једна линија на њој. На сликама 68, 69, 70 и 71 је приметна значајна разлика у струјном пољу, као последица разлике у граничним погонским условима.



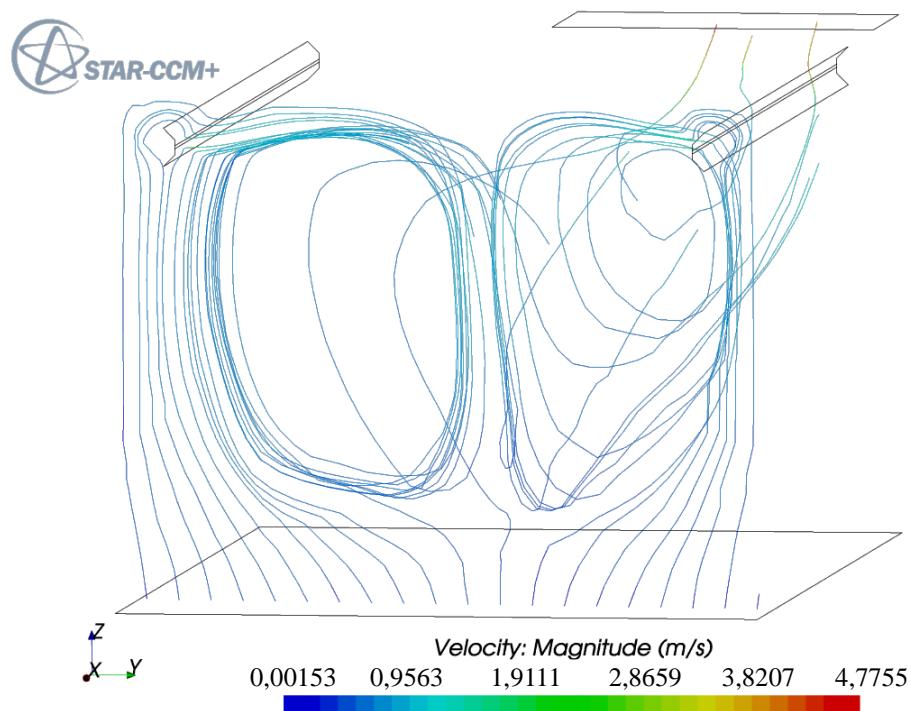
Слика 68. Струјнице са почетком на линији при ивици волатилне површине – Случај 01



Слика 69. Струјнице са почетком на линији при ивици волатилне површине – Случај 02



Слика 70. Струјнице са почетком на линији при ивици волатилне површине – Случај 03



Слика 71. Струјнице са почетком на линији при ивици волатилне површине – Случај 04

3.2 ЕКСПЕРИМЕНТ 3: УТИЦАЈ БРЗИНЕ СЕКУНДАРНОГ ВАЗДУХА

3.2.1 Резултати

У табелама 12, 13 и 14 су приказане вредности за времена задржавања маркера струјања за 15 студираних случајева. Средња, максимална и минимална вредност је приказана. У свим табелама су случајеви означени са два симбола. Први представља ширину процепа секундарног ваздуха, а други дефинише која страна је у функцији, Л значи да се ваздух доводи кроз леву страну, Д десну, а ЛД подједнако и са леве и са десне стране.

Табела 12. Средња, минимална и максимална вредност времена задржавања маркера струјања (у секундама изражено)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
t_{SR}	1,00	0,96	1,00	1,06	1,15	1,12	1,02	0,95	1,03	1,01	1,00	1,00	1,00	0,98	1,02
t_{MAKS}	3,22	2,76	2,76	3,15	3,02	2,97	2,46	2,81	2,61	3,21	3,03	2,60	2,60	2,95	2,90
t_{MIN}	0,45	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47	0,46	0,44	0,45	0,45	0,44	0,44	0,46	0,45	0,45

Табела 13. Средња, минимална и максимална вредност времена задржавања маркера струјања (у процентима максималне вредности за дати ред)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
t_{SR}	87,0	83,5	87,0	92,2	100,0	97,4	88,7	82,6	89,6	87,8	87,0	87,0	87,0	85,2	88,7
t_{MAKS}	100,0	85,7	85,7	97,8	93,8	92,2	76,4	87,3	81,1	99,7	94,1	80,7	80,7	91,6	90,1
t_{MIN}	95,7	93,6	95,7	97,9	97,9	100,0	97,9	93,6	95,7	95,7	93,6	93,6	97,9	95,7	95,7

Табела 14. Средња, минимална и максимална вредност времена задржавања маркера струјања (рангиране вредности у редовима)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
t_{SR}	8	14	8	3	1	2	5	15	4	7	8	8	8	13	5
t_{MAKS}	1	10	10	3	5	6	15	9	12	2	4	13	13	7	8
t_{MIN}	6	12	6	2	2	1	2	12	6	6	12	12	2	6	6

Резултати показују да је најбољи случај 2Л, док је најлошији 3Л у погледу средњег времена задржавања. Разлика износи 0,2 s.

Релативно у односу на максималну вредност изражено у процентима износи 17 %, а ако се изрази према минималној вредности добија се вредност 21 %. Најбоља три резултата су за случај 2 мм процеп, тако да је овај случај доминантан за ову геометрију, ове протоке и односе између секундарног и примарног ваздуха. Најгора три случаја су Л случајеви у којима читава количина секундарног ваздуха долази са леве стране. Најлошији је случај 3Л праћен случајевима 1Л и 5Л.

У табелама 15, 16 и 17 запремине су приказане у којима су присутне брзине у одговарајућим опсезима. Брзински интервали су: 0-1, 1-2, 2-3 и изнад 3 m s^{-1} . Резултати су приказани на три начина: као проценти максималне вредности за дати ред, односно за дати интервал брзина, затим као проценти запремине ложишта и ранжирани.

Табела 15. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (изражено у процентима у односу на највећу вредност у датом опсегу)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0-1	93,8	94,2	99,2	91,8	92,7	98,9	95,4	96,2	99,4	96,4	97,0	99,7	96,8	97,3	100,0
1-2	87,4	87,9	62,9	100,0	96,6	66,0	79,9	77,6	62,6	75,3	72,9	60,8	74,0	73,2	59,3
2-3	100,0	88,9	84,1	88,9	82,5	68,3	95,2	84,1	74,6	84,1	79,4	68,3	85,7	77,8	76,2
3	93,8	90,8	84,6	95,4	92,3	93,8	95,4	93,8	89,2	100,0	98,5	98,5	93,8	89,2	89,2

Табела 16. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (изражено у процентима укупне запремине ложишта)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0-1	80,6	80,9	85,3	78,9	79,7	85,0	82,0	82,6	85,4	82,9	83,4	85,7	83,2	83,6	85,9
1-2	14,2	14,3	10,2	16,2	15,7	10,7	13,0	12,6	10,2	12,2	11,8	9,9	12,0	11,9	9,6
2-3	2,6	2,3	2,2	2,3	2,2	1,8	2,5	2,2	2,0	2,2	2,1	1,8	2,3	2,0	2,0
3	2,6	2,5	2,3	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2,4	2,72	2,7	2,7	2,6	2,4	2,4

Табела 17. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (ранжиране вредности по опсезима)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0-1	13	12	4	15	14	5	11	10	3	9	7	2	8	6	1
1-2	4	3	12	1	2	11	5	6	13	7	10	14	8	9	15
2-3	1	3	6	3	9	14	2	6	13	6	10	14	5	11	12
3	6	11	15	4	10	6	4	6	12	1	3	2	6	12	12

Резултати из горе приказаних табела потврђују чињеницу да су случајеви 2Л и 2Д најбољи. 2Л случај има најмању запремину у интервалу 0-1 m/s, што прати случај 2Д.

У табелама 18, 19 и 20 су приказани резултати израчунавања запремина у којима су брзине мање од задате брзине, при чему су разматране брзине до $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Брзински интервали су: 0-0,1; 0-0,2; 0-0,3; 0-0,4 и 0-0,5. Пошто не постоји правило које дефинише испод које брзине су мртве и рецикулационе зоне овде је због тога узет сет од датих 5 брзина. Начин презентације резултата одговара оним за табеле под ознаком 2.

Табела 18. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (изражено у процентима у односу на највећу вредност у датом опсегу)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0,1	35,7	50,0	42,9	14,3	42,9	50,0	28,6	78,6	64,3	28,6	57,1	71,4	50,0	71,4	100,0
0,2	25,4	42,4	96,6	25,4	40,7	62,7	32,2	50,8	71,2	32,2	47,5	88,1	40,7	59,3	100,0
0,3	30,6	43,7	69,9	24,6	31,7	58,5	26,8	42,6	76,0	33,3	46,4	77,6	38,8	50,8	100,0
0,4	34,3	49,7	77,7	31,3	42,0	74,2	40,4	52,2	89,3	39,0	54,7	97,8	45,6	60,4	100,0
0,5	53,9	63,9	86,1	53,1	56,1	84,5	65,2	68,1	92,8	61,7	73,2	92,2	72,7	80,1	100,0

Табела 19. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (изражено у процентима укупне запремине ложишта)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0,1	0,21	0,30	0,27	0,09	0,26	0,30	0,17	0,44	0,37	0,18	0,33	0,41	0,30	0,42	0,60
0,2	0,65	1,03	2,37	0,63	1,00	1,55	0,81	1,26	1,78	0,80	1,19	2,18	1,02	1,47	2,48
0,3	2,32	3,35	5,36	1,88	2,41	4,46	2,04	3,28	5,83	2,55	3,56	5,95	2,95	3,88	7,67
0,4	5,21	7,59	11,85	4,75	6,40	11,30	6,13	7,94	13,58	5,95	8,31	14,88	6,95	9,19	15,23
0,5	25,17	29,84	40,22	24,79	26,20	39,49	30,43	31,83	43,38	28,81	34,21	43,08	33,98	37,43	46,71

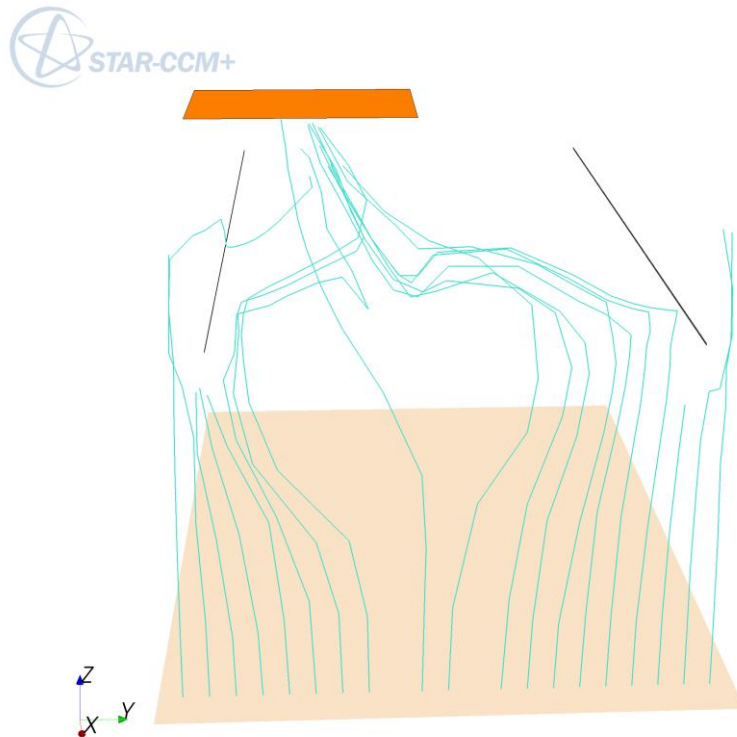
Табела 20. Део запремине ложишта у којем су брзине у датим опсезима (рангиране вредности по опсезима)

	1Д	1Л	1ЛД	2Д	2Л	2ЛД	3Д	3Л	3ЛД	4Д	4Л	4ЛД	5Д	5Л	5ЛД
0,1	12	9	10	15	11	7	14	2	5	13	6	4	8	3	1
0,2	14	9	2	15	11	5	12	7	4	13	8	3	10	6	1
0,3	13	8	4	15	12	5	14	9	3	11	7	2	10	6	1
0,4	14	9	4	15	11	5	12	8	3	13	7	2	10	6	1
0,5	14	11	4	15	13	5	10	9	2	12	7	3	8	6	1

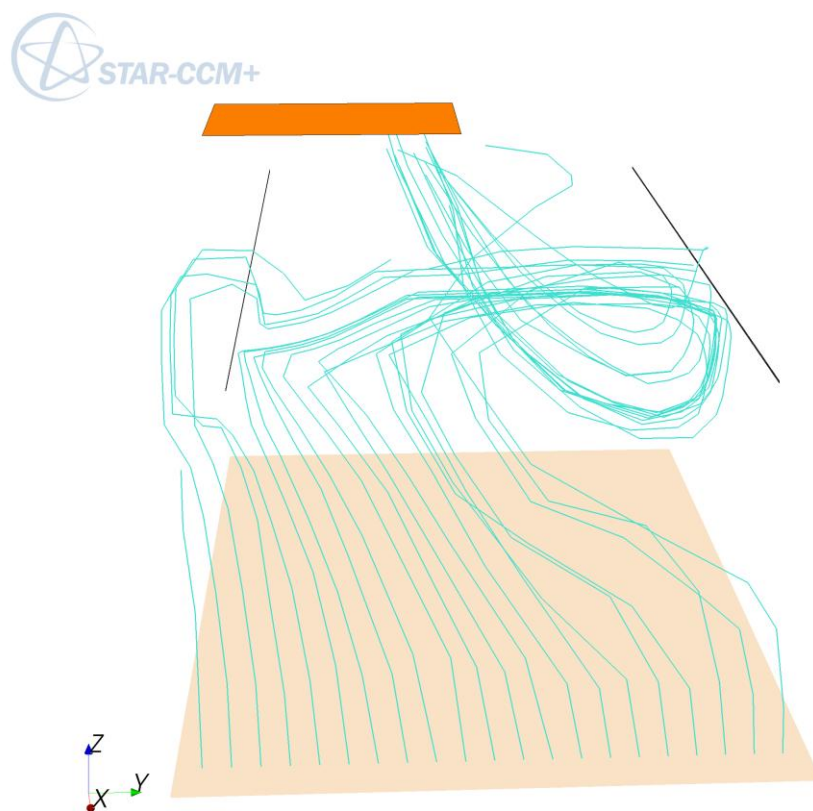
У приказаним табелама сви најбољи резултати припадају случају 2Д. Ови резултати подразумевају да су у овом случају присутне минималне мртве и рецикулационе зоне, тако да је за очекивати је да овај случај предњачи и у погледу средњег времена задржавања. Али резултати показују да је овај случај тек трећи.

Међу најбоље резултате поред 2Д припадају и случајеви 1Д, 3Д и 4Д, тако да је за очекивати, такође, да се и у овим случајевима, где је лева страна процепа затворена и укупна количина долази са десне стране, по питању времена задржавања постигну високи резултати. Али они изостају. 1Д је 8^{ми}, 3Д је 5^{ми}, 4Д је 7^{ми}.

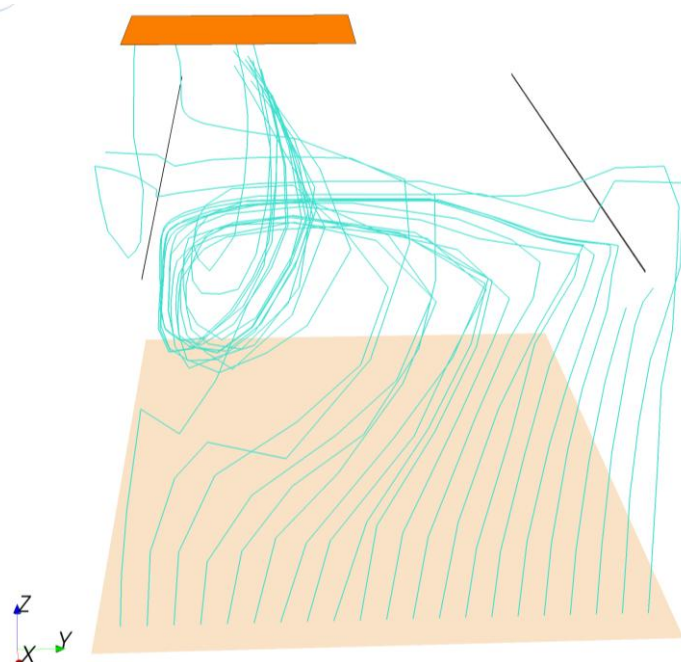
Графички приказ струјница за ЛД случај (слика 72) показује да се формира мртва зона срцоликог облика, која заузима знатно већу запремину од оне коју заузимају мртве зоне у случајевима 2Л и 2Д (прикази редом на сликама 73 и 74). Ове визуелне разлике потврђују и нумерички резултати. Највеће мртве зоне су у случају 5ЛД, који је праћен случајевима редом 4ЛД, 3ЛД, 1ЛД и 2ЛД.



Слика 72. Струјнице које полазе са линије близу предње ивице – 2ЛД случај



Слика 73. Струјнице које полазе са линије близу предње ивице - 2 Л случај



Слика 74. Струјнице које полазе са линије близу предње ивице - 2 Д случај

3.3 ЕКСПЕРИМЕНТ 4: ПРЕГРАДЕ

3.3.1 Резултати

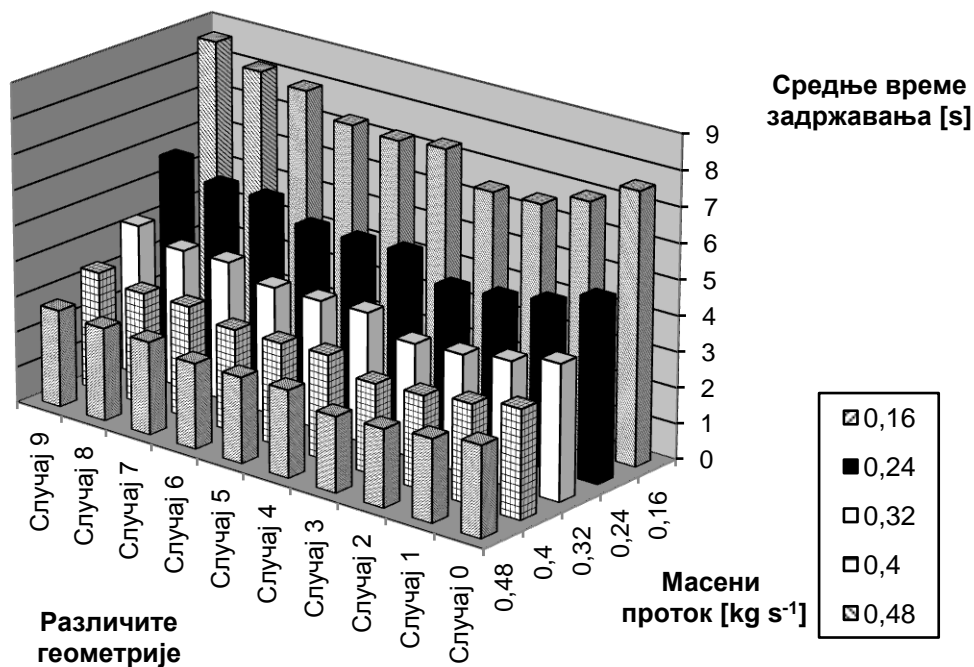
У табели 21 и на слици 75 су приказани резултати за калкулацију средњег времена задржавања гасова. Случај 0 означава случај без преграде, док су случајеви 1 до 9 случајеви са преградама. Детаљан опис случајева од 1 до 9 је дат у претходном поглављу, уз слику 65.

Табела 21. Средње време задржавања за различите геометрије и масене протоке

Средње време задржавања [s] t_{CFD}		Масени проток [kg s ⁻¹]				
		0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
Случај	0	7,62	5,08	3,81	3,05	2,55
Случај	1	6,97	4,61	3,49	2,79	2,32
Случај	2	6,54	4,37	3,28	2,62	2,18
Случај	3	6,51	4,26	3,19	2,55	2,12
Случај	4	7,35	4,88	3,67	2,95	2,45
Случај	5	7,23	4,82	3,62	2,89	2,41
Случај	6	7,32	4,83	3,61	2,88	2,4
Случај	7	7,94	5,28	3,95	3,15	2,61
Случај	8	8,14	5,29	3,91	3,14	2,61
Случај	9	8,65	5,7	4,25	3,35	2,73
$t_{calc. Case 0}^*$		7,4	4,93	3,7	2,96	2,47
$(t_{calc. Case 0} - t_{CFD Case 0}) / t_{CFD Case 0}^{**}$		-0,03	-0,03	-0,029	-0,031	-0,035

* $t_{calc. Case 0} = \frac{V}{\dot{m} / \rho_{Air}}$, ** разлике су резултат утицаја на средње време задржавања оних

струјница које завршавају рецикулационим зонама



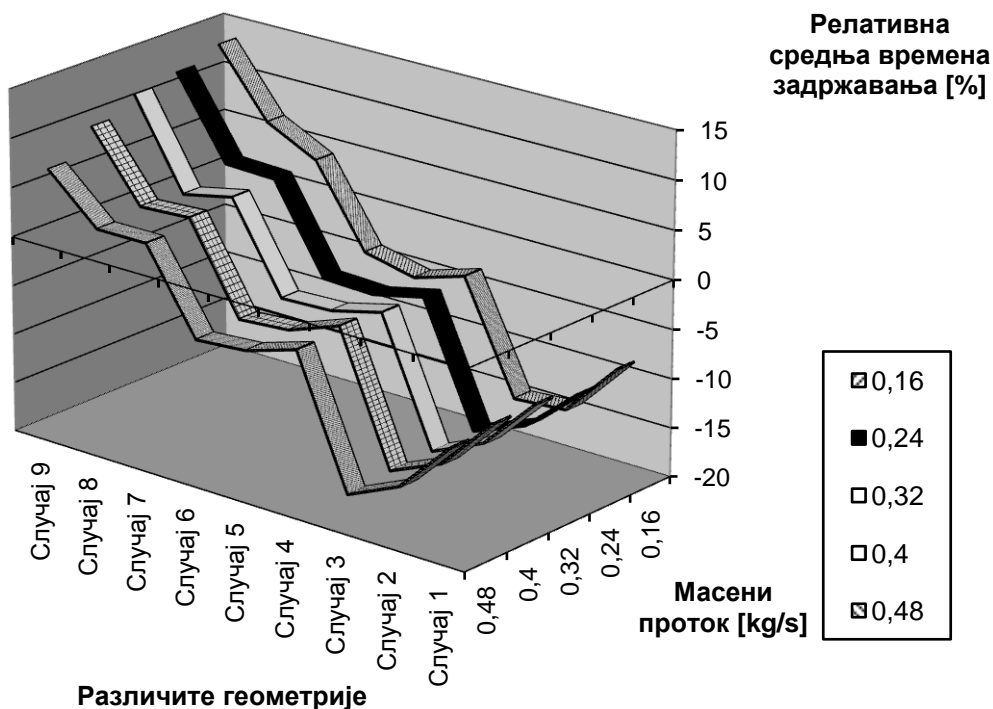
Слика 75. Средње време задржавања за различите геометрије и масене протоке

Табела 22 и слика 76 приказују исте резултате као изнад, само у релативним вредностима. Основна вредност у односу на коју се израчунавају релативне вредности је време задржавања за Случај 0.

Табела 22. Средње време задржавања за различите геометрије и масене протоке приказано у релативним јединицама

t_{rel}^*		Масени проток [kg s ⁻¹]				
		0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
Случај	1	-8,5	-9,3	-8,4	-8,5	-9
Случај	2	-14,2	-14	-13,9	-14,1	-14,5
Случај	3	-14,6	-16,1	-16,3	-16,4	-16,9
Случај	4	-3,5	-3,9	-3,7	-3,3	-3,9
Случај	5	-5,1	-5,1	-5	-5,2	-5,5
Случај	6	-3,9	-4,9	-5,2	-5,6	-5,9
Случај	7	4,2	3,9	3,7	3,3	2,4
Случај	8	6,8	4,1	2,6	3	2,4
Случај	9	13,5	12,2	11,5	9,8	7,1

* Релативно време задржавања $t_{rel} = (t_{CFD Case i} - t_{CFD Case 0}) / t_{CFD Case 0}$



Слика 76.

Средње време задржавања за различите геометрије и масене протоке приказано у релативним јединицама

Табела 23 приказује утицај дужине преграде при различитим позицијама. За случај преграде на најнижој позицији је присутан нагли пад у времену задржавања са повећањем дужине, при средњим висинама вредности се разликују незнатно, док је на највишој позицији присутан нагли раст.

Табела 23. Утицај дужине преграде на средње време задржавања *

Преграда ..	Средње време задржавања [s]	Позиција	Масени проток [kg s ⁻¹]				
			0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
.. Позиција 1	Случај 1	1	0	0	0	0	0
	Случај 2	2	-6,2	-5,2	-6,1	-6,1	-6
	Случај 3	3	-6,6	-7,4	-8,4	-8,6	-8,7
.. Позиција 2	Случај 4	4	0	0	0	0	0
	Случај 5	5	-1,6	-1,2	-1,5	-1,9	-1,7
	Случај 6	6	-0,3	-1,1	-1,7	-2,2	-2,1
.. Позиција 3	Случај 7	7	0	0	0	0	0
	Случај 8	8	2,5	0,4	-1	-0,3	0
	Случај 9	9	9	8	7,5	6,6	4,7

*Основни случај је увек први случај на датој вертикалној позицији,., Случај 1, Случај 4 и Случај 7, $((t_{calc.case} - t_{calc.base case}) / t_{calc.base case})$

Табела 24 показује утицај позиције преграде на време задржавања за различите дужине преграда. При свим дужинама је тренд повећања времена

задржавања када су преграде уграђене на вишим позицијама. Код случаја дужих преграда је повећање веће.

Табела 24. Утицај позиције преграде на средње време задржавања **

Преграда ..	Средње време задржавања [с] = t_{CFD}		Масени проток [kg s ⁻¹]				
			0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
.. Дужина 1	Случај	1	0	0	0	0	0
	Случај	4	5,4	6	5,3	5,7	5,5
	Случај	7	13,8	14,5	13,3	12,8	12,2
.. Дужина 2	Случај	2	0	0	0	0	0
	Случај	5	10,6	10,5	10,4	10,4	10,3
	Случај	8	24,5	21,3	19,4	19,8	19,3
.. Дужина 3	Случај	3	0	0	0	0	0
	Случај	6	12,4	13,2	13	13	13,1
	Случај	9	32,8	33,6	33,1	31,5	28,6

основни случај је увек први случај дате дужине, тј. Случај 1, Случај 2 и Случај 3 (($t_{calc.case} - t_{calc.base case} / t_{calc.base case}$))

3.4 ДИСКУСИЈА

Прва три експеримента демонстрирају утицај секундарног ваздуха на струјно поље у ложишту, а са њим и на време задржавања гасова. Време задржавања гасова не може да се израчуна применом класичних метода и прорачуна, једино може да се процени. Примена експерименталног приступа за решавање овог проблема је упитна. Визуелизације су такође нешто што је од великог значаја за пројектанте и научнике. Оне могу да буду покретачи, иницијалне каписле, за нове правце развоја или пак за постављање нових проблема чије изучавање и решавање је потребно. Слика увек говори више од хиљаду речи или бројева. Наравно, и овде је присутан у малом проблем дрвета и шуме, где неадекватним графичким приказом се може доћи у позицију да се из гомиле података/ линија не може извести ни један користан закључак. У овим експериментима је осим визуелног приказа/приступа коришћен и конкретан нумерички, где је развијен метод којим се израчунава средње време задржавања гасова. Заједно коришћени, ова два приступа дају најбоље резултате. А ни један ни други не би били могући, или тешко би били изводиви без коришћења CFD-а.

Резултати експеримента 4 показују да преграде могу да изазову како смањења времена задржавања гасова, тако и повећање. Вредности се крећу од – 17 процената до + 13 процената изражено релативно у односу на случај без преграда.

Као најутицајнији фактор се показује вертикална позиција преграде, коју прати дужина исте. Дужина може да доведе и до негативних и позитивних промена у зависности од позиције, виша позиција увек доводи до позитивних промена. Масени

проток не утиче значајно на тренд повећања или смањења времена задржавања гасова.

Пракса у Србији показује да произвођачи малих котлова не преферирају ка коришћењу ове мере. Претпоставка је да након испитивања резултати истих су резултирали неповољно. Први разлог за ово је повећање у паду притиска. Преграде могу да се представе и као специфична врста пригушног органа за вреле гасове. Тако да ако се намерава остварити или задржати исти проток гасова, тада је потребна доградња димњака или уградња вентилатора. Без ових мера се ситуација у котлу погоршава по питању топлотне снаге. Други резон је у вези са температуром димних гасова. Постизање продужења времена задржавања може да доведе и до хлађења гасова испод температуре паљења. У том случају и савршено мешање несагорелих гасова са кисеоником из ваздуха неће довести до сагоревања. Овај случај је реалистичнији са повећањем коефицијента вишка ваздуха, које за последицу има снижавање адиабатне температуре пламена. Још један аспект је присутан, водом хлађени зидови ложишта убрзавају хлађење гасова. Препорука за овај случај је да се уведе нека врста озида, која ће служити као инхибитор хлађења гасова испод температуре паљења. Озид не би требало да покрије читаво ложиште.

Уколико би се ова мера коректно применила она би омогућила и снижавање коефицијента вишка ваздуха, без негативног утицаја на топлотну снагу котла.

Прорачуни који су на располагању (термички прорачун парних котлова) не дају одговоре на сва питања. Постоји потреба за развојем нових алата и детаљним моделовањем сложених процеса, који се одвијају у комори за сагоревање једног котла. Као један од могућих одговора се јавља примена CFD метода, јер је ова метода развијана последњих 40 година. Све оне „дечије болести“ су иза ове методе. Заинтересовани за развој котлова су пред одлуком да ли да развијају свој софтвер, или да користе комерцијални софтвер, или да користе open source софтвер. Овај тип софтвера је резултат некомерцијалног удруживања стручњака – волонтера. Изворни код ове класе софтвера је отворен, тако да свако заинтересован може даље да га развија. У случају комерцијалног софтвера још постоји и могућност академског лиценцирања. За прву опцију је потребан тим стручњака из више дисциплина, од нумерике, програмирања и саме котловске струке, и пуно времена, и пуно средстава. Овај пут су изабрале велике фирме, које су тако нешто могле и да изфинансирају, и институти који су тако нешто ставили као приоритет, при чему почетак рада на том пољу је морао бити пре барем 30 година да би дао резултате. Трећи пут помоћу коришћења бесплатног софтвера има предност да не укључује трошкове, али крива учења ових софтвера, као што је, на пример, OpenFOAM има изузетно спор раст. Подршка за ове софтвере не постоји, јер нико није плаћен за тако нешто, а доступна упутства и туторијали се не могу поредити по обиму с истима, који су на располагању у комерцијалним варијантама софтвера. Додатно постоји низ верзија, које нису компатибилне. Принцип да новије верзије отварају симулације из старијих верзија није присутан. Средњи пут, други, је према аутору ове тезе прави, и то кроз коришћење академских лиценци, јер се у том случају трошкови лиценцирања смањују неколико десетина пута, ако не и више од тога. Постоји преклапање у интересима софтверске компаније и истраживача. Истраживач добија моћан алат, који је тестиран на низу примера, кроз које је обављена валидација нумеричке машине/ поступка иза лаког за коришћење корисничког интерфејса. У овим софтверима су уграђена најновија сазнања из нумерике, програмирања и моделовања. Са друге стране истраживач нуди своје идеје, дефинише проблеме који су интересантни за решавање коришћењем овог софтвера, и на тај начин прави референцу како себи тако и софтверској компанији.

У раду је демонстриран CFD метод моделовања и симулације струјног поља, при различитим геометријама ложишног простора са циљем одређивања средњег времена задржавања гасова у ложишту. Овде је потребно напоменути да је поменуто време задржавања гасова у ложишту једна од три битне величине за квалитетан процес сагоревања. Друге две су: температура у ложишту и турбуленција, односно степен мешања. Такође, квалитетнији процес сагоревања, који се постиже кроз дуже време задржавања гасова има као последицу мању потрошњу горива, самим тим и новчану уштеду, а додатно и постизање мање емисије.

У овом раду је проучавано средње време задржавања гасова у ложишту, али то није једини проблем где се овај метод може да се примени. Помоћу CFD метода може да се проучава и степен мешања који је изузетно важан за процесе сагоревања, може да се уведе детаљан модел како слоја тако и процеса у ложишту који укључују и процесе сагоревања и процесе предаје топлоте зрачењем. Даље, може да се применом одговарајућих потмодела израчуна емисија, као и динамика стварања и лепљења наслага за загревне површине. Наведени примери су само избор из још ширег спектра проблема.

Правац који је одабран у овом раду има и директан наставак, кроз проширење анализе времена задржавања и на чврсте честице које мењају масу, као последицу процеса сагоревања те чврсте честице. Овај проблем је присутан у области циклона за сагоревање и веома мало је испитан. Постоје препоруке, емпиријски подаци за одређена горива и одређене конфигурације, али не постоје прорачуни који би могли да послуже као веза између конструктивних и погонских са карактеристикама емисије и ефикасности. У овој области је аутор већ завршио прву фазу истраживања које подразумева литературни преглед и анализу да ли је CFD метод и сам софтвер на располагању у могућности да такав један сложен случај и прорачуна.

Аутор рада је разматрао и опцију валидације експерименталних резултата. Примена CFD метода је обично, када могућности то дозвољавају, праћена експерименталном верификацијом, односно валидацијом. Током израде рада су уложени напори да се проанализира могућност једне такве валидације. Проблем је представљала чињеница да се процеси сагоревања одвијају веома брзо, односно да је средње време задржавања реда величине секунде, или неколико секунди. Да би се добила расподела времена задржавања гасова неопходно је да се измери неколико тачака, што више тачака, то би функција расподеле била тачнија. Тако нешто је могуће ако је време трајања процеса у сатима или барем минутима. Али када су секунде у питању техника мерења која треба да да резултат мора бити изузетно брзог одзива, а брзина одзива је директно, ако не и експоненцијално пропорционална са ценом те методе. У лабораторијама које се баве искључиво проучавањем процеса сагоревања постоје такве методе. Развијене су и алтернативне методе у којима се примењују радиоактивне материје као маркери струјања. Након контакта са колегама са Департмана за физику аутор је дошао до сазнања да се ова метода код нас још не примењује. Један од разлога је тај што не постоји комерцијалан моменат, разлог за улагање у једну такву методу. Класичне приступачне нискобуџетске методе са физичким маркерима струјања су неадекватне.

4. ЗАКЉУЧЦИ

Данас се од котловских јединица очекује флексибилност када је реч о избору горива, високој ефикасности и поузданости, као и поштовању све строжијих прописа у вези са емисијом гасова. Да би се ови циљеви постигли неопходно је савладавање CFD метода, који спрегнут са класичним прорачунима и експериментима може да одговори на нове изазове постављене пред инжењера пројектанта или научника.

Хипотеза овог рада је потврђена. На питање да ли CFD може да постане трећи стуб при развоју и пројектовању котловских постројења поред класичних прорачуна и експеримената, одговор је потврдан. Потврда је обављена кроз навођење и објашњавање примене на низу литературних примера. На питање да ли CFD приступ може да да одговор на проблем одређивања времена задржавања гасова, одговор је такође потврдан. Такав један метод прорачунавања задржавања гасова у ложишту помоћу CFD-а је развијен. Примена развијеног метода је демонстрирана у нумеричким експериментима. Кроз решавање овог проблема CFD приступ индиректно води ка побољшању услова сагоревања у ложишту. Потребно је нагласити флексибилност овог метода. Број проучаваних параметара може да се повећа без проблема, једино ограничење су рачунарски ресурси.

Кроз нумеричке експерименте у овом раду су разматрана четири фактора и њихов утицај на време задржавања гасова. То су: правац и брзина секундарног ваздуха и положај и димензије преграда. Оно што је потребно овде нагласити јесте да не постоји прорачун који би могао да пружи тражене резултате, односно зависности времена задржавања од поменутих параметара. Додатно, визуелизације струјног поља је могућа експерименталним методама, али су и оне наука за себе и за сада мало поуздане, и такође долазе са високом ценом. CFD метод и овде, у области визуелизације се поставља као нискобуџетна алтернатива.

Први експеримент представља везу између магистарске тезе и доктората аутора. Резултати из првог експеримента су подстакли на размишљања у правцу који је довео до анализа приказаних у овом докторату. Прецизније речено, визуелизација струјног поља је довела до постављања следећег питања: „Да ли може да се боље искористи запремина ложишта, односно, да ли може да се смање мртве и рециркулационе зоне, а све са циљем да се постигне продужење времена задржавања гасова, а самим тим и квалитетније сагоревање“.

Подаци из другог експеримента, који је разматрао утицај правца секундарног ваздуха, су показали следеће: угао млазница од 60° се показао као најбољи од изабраних вредности углова, тако што он доводи до најдужих времена задржавања. Са друге стране најкраћа времена задржавања су била у случају с углом млазница од 90° . Релативна разлика између најбољег и најлошијег случаја средњег времена задржавања износи 20 %.

Код трећег експеримента, где је брзина секундарног ваздуха варирана, присутно је 21- процентно повећање времена задржавања, ако се упореде најбољи и најлошији случај.

Код четвртог експеримента је ситуација таква да резултати показују да преграде могу да изазову како смањења времена задржавања гасова, тако и повећање. Вредности се крећу од -17 процената до $+13$ процената изражено релативно у односу на случај без преграда.

Разлике између најбољег и најлошијег случаја у другом, трећем и четвртном експерименту нису уопште занемарљиве. Овде се мисли на средња времена задржавања гасова. Ове разлике се крећу од 20-30 %. То је показатељ да постављени

проблем има тежину, у смислу да постоји потреба за даље и детаљније његово проучавање.

Са становишта трошкова, ако се посматрају котлови мале снаге, највећи потенцијал има приступ са преградама. За случај котлова велике снаге, сва предложена решења су интересантна за даљу разраду и примену, пошто инвестиционо посматрано у односу на цену једног котловског постројења, ниједна од ових мера не доводи до значајног поскупљења.

У раду је оправдан примењени изотермни приступ кроз позивање на бројне примере из литературе. Рад може да се развија без потешкоћа и у област неизотермног приступа, само што у том случају су времена потребна за прорачун вишеструко виша. Такође, сваки од модела који би се додао у математички опис система би захтевао одређивање или литературно преузимање низа константи. Била би неопходна провера осетљивости коначног решења на варирање сваке од тих констаната. Аутор овог рада се одлучио да примени научни принцип декомпозиције проблема, тако што је ова проширења модела, оставио за будући рад.

У раду су постављене основе за решење проблема одређивања времена задржавања чврстих честица горива у циклонском претложишту. До сада се овај проблем једино решавао експерименталним методама. Резултати тих експериментата су доступни само за један ограничен број конфигурација циклонског претложишта и за ограничен број горива.

Када је реч о избору софтвера закључак и препорука јесте коришћење академски лиценцираних верзија софтвера. Кроз коришћење Open Source програма може да се постигне боље разумевање CFD метода. Уколико време дозвољава идеална је употреба оба софтвера.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wikipedia article: Price of petroleum, Internet:
http://en.wikipedia.org/wiki/Price_of_petroleum, приступљено: 10.4.2014.
- [2] US energy information administration: Monthly spot prices on Brent oil for the period 1987.-2014., Internet:
<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=rbrte&f=a>,
приступљено: 10.4.2014.
- [3] The Wall street Journal: How Denmark Paved Way To Energy Independence,
Internet: <http://online.wsj.com/news/articles/SB117649781152169507>, приступљено:
10.4.2014.
- [4] Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine: Energetski bilans AP
Vojvodine / plan za 2011, internet:
http://www.psemr.vojvodina.gov.rs/files_for_download/energetski%20bilans/Energetski_bilans_2011.pdf, приступљено: 13.05.2014.
- [5] Martinov, M.: Топлотна моћ сламе жита узгајаних на подручју САП Војводине,
часопис: „Савремене пољопривредна техника“, ВДПТ, Нови Сад, 9 (1983), 1-2,
с. 9-13.
- [6] Перуновић, П., Пешењански, И., Тимотић, У.: Истраживање процеса сагоревања
пољопривредних отпадака у вертикалном слоју. Извештај за СИЗ Војводине,
ФТН, Нови Сад, (1985.), с.83.
- [7] Преведен, З.: Алтернативно гориво и пољопривредни отпади, Зборник радова:
„Актуални проблеми механизације пољопривреде“, Југословенско друштво за
пољопривредну технику, Факултет пољопривредних знаности, Загреб-Шибеник,
(1989.), с. 579-591.
- [8] Бркић, М., Јанић, Т., Сомер, Д.: Термотехника у пољопривреди –II део;
Процесна техника и енергетика, Пољопривредни факултет Нови Сад, (2006).
- [9] Бркић, М., Тешић, М., Фурман, Т., Мартинов, М., Јанић, Т.: Студија: Потенцијали
и могућности брикетања и пелетирања отпадне биомасе на територији
покрајине Војводине, Нови Сад, (2007).
- [10] Kaltschmitt, M., Hartmann, H, Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse, Grundlagen,
Techniken und Verfahren, 2. Auflage, Springer, (2009).
- [11] Бркић, М., Мартинов, М. : Енергетска ефикасност и емисија гасова термичких
постројења на биомасу, Савремена пољопривредна техника, 4(2006), 1-6
- [12] Пешењански, И., Степанов, Б.:Резултати испитивања котла за сагоревање
биомасе 250 kW и предлог техничко-организационих мера за повећање
енергетске ефикасности постојећих котловских постројења, Савремена
пољопривредна техника, Vol. 31, No. 4, стр. 197-203, Нови Сад, (јануар 2005).
- [13] Quaak P. et al: Energy from biomass, A review of combustion and gasification
technologies, World Bank technical paper, (1999).

-
- [14] Lasselsberger, L.: Holzfeuerungen mit Zukunft, Bundesanstalt fuer Landtechnik, интернет:
http://www.blm.bmlfuw.gv.at/vero/veroeff/0666_Holzfeuerungen_mit_Zukunft.pdf,
приступљено: 13.05.2014.
- [15] Thellesen, HZ: Firing with straw on farms. National Institute of Agricultural Engineering. Bulletin No. 48. (1991).
- [16] Anonymous: Energy 2000. Action plan for sustainable development. Denmark, Ministry of Environment and Energy, Energy 2000, (1990).
- [17] Kristensen, E. F., Kristensen, J. K.: Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in Denmark, Biomass and Bioenergy 26 (2004) 561 – 569.
- [18] O Lucca-Negro, T O'Doherty: Vortex breakdown: a review, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 27, Issue 4, (2001), Pages 431–481
- [19] Beer M. J., Chigier N. A.: Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers, London, (1972).
- [20] Beer S.: Kleine Biomassekessel – Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen Biomasse & Abfall – Regionale Brennstoffe Richtig Nutzen (June 2008)
- [21] ECOMB презентација: интернет: <http://www.ecomb.se/Products/The-Ecotube-system/>, приступљено 13.04.2014.
- [22] Dong, W.: Design of Advanced Industrial Furnaces Using Numerical Modeling Method, Phd thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, (2000).
- [23] Beer, J.M., Lee, K. B.: The effect of the residence time distribution on the performance and efficiency of combustors, Symposium (International) on Combustion, Volume 10, Issue 1, (1965.), Pages 1187-1202.
- [24] W. Blasiak, W. H. Yang i W. Dong: Combustion performance improvement of grate fired furnaces using Ecotube system, Journal of the Energy Institute, (2006), VOL 79, NO 2, 71.
- [25] ECOMB AB: „NO_x Reduction opportunities“, internet:
<http://www.ecomb.se/Products/The-Ecotube-system/NOx-reduction/>; приступљено 13.04.2014.
- [26] Kundu P., Cohen I, Dowling D: Fluid Mechanics, Academic press, (2012).
- [27] Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss (Eds.): Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer, (2007).
- [28] Baillifard M-A., Casartelli E., Nussbaumer T.: Experimental investigation of the fluid dynamics in wood combustion processes, 16th European Biomass Conference and Exhibition, (2–6 June 2008.), Valencia, Spain

-
- [29] F. M. El-Mahallawy, K. H. Khalil, and Y. H. El-Banhawy, "Heat and Mass Transfer" Series, (B. Spalding, K. H. Khalil, F. M. El-Mahallawy, and E. E. Khalil. Eds.), Pergamon Press, (1978).
- [30] K. H. Khalil, F. M. El-Mahallawy, and Y. H. El-Banhawy, The Bulletin of the Faculty of Engineering, Cairo University, (1975).
- [31] Cogoli, J., Gray, D. & Essenhigh, R.: Flame stabilization of low volatile fuels, Combustion science and technology, (1977.), v. 16, p. 165-176.
- [32] F. M. El-Mahallawy, M. A. Hassan, M. A. Ismail, and H. Zafan: Aerodynamic Behavior of Asymmetric Jets in 3-D Furnaces, ASME, 94-GT-441.
- [33] El-Mahallawy F. M., Hassan M. A., Ismail M. A., and Zafan H.: Influence of the number of secondary jets on the strength of the recirculation zone, Engineering Research Journal, Faculty of Engineering of El-Matara, University of Helwan, Egypt, (1994).
- [34] El-Mahallawy F. M., Habib M. A.: Study of mixing of two coaxial swirling jets in a cold model furnace u Khalil K. H., El-Mahallawy F. M., Spalding D. B.: Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces, Pergamon Press, (1978).
- [35] El-Mahallawy F. M., Hassan A. A.: The effect of the exit section geometry and furnace length on mixing in a cold model industrial furnace in Khalil K. H., El-Mahallawy F. M., Spalding D. B.: Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces, Pergamon Press, (1978).
- [36] Госмен А.Д., Пан В. М. И др: Численные методы исследования течений вязкой жидкости, Мир Москва, (1972).
- [37] Serag-Eldin M. A., Spalding D. B.: Validation of three-dimensional cold-flow predictions inside a can combustor, u Khalil K. H., El-Mahallawy F. M., Spalding D. B.: Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces, Pergamon Press, (1978).
- [38] Ikeda Y., Yanagisawa Y., Hosokawa S., Nakajima T.: Influence of inlet conditions on the flowfield in a model gas turbine combustor, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 5, Issue 3, (May 1992).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0894177792900841>
- [39] Cohan. L. J. (1975). Flow studies by water table technique for incinerator furnaces. Incineration and Solid Waste Technology (J. W. Stephenson et al., Eds.). New York: ASME, (1975).
- [40] Thunman, H.: Lecture notes from Combustion of Biomass – Nordic Course Lyngby, Danmark, (19-23 August 2002).
- [41] Patankar, S.V.: Numerical heat transfer and fluid flow. McGraw-Hill, New York, (1980).
- [42] Ferziger, J.H., Peric, M.: Numerische Strömungsmechanik. Springer, Berlin, (2008).

-
- [43] Schaefer, M.: Computational Engineering- Introduction to numerical methods, Springer, Berlin, (2006).
- [44] Цијан, И.: Рачунална механика флуида, Факултет за стројарство и бродоградњу, Загреб, (2010).
- [45] MIT Lectures: Basics of turbulent flow, интернет: <http://www.mit.edu/course/1/1.061/www/dream/SEVEN/SEVENTHEORY.PDF>, приступљено: 13.05.2014.
- [46] Sijerčić, M.: Matematičko modelovanje kompleksnih tubulentnih transportnih procesa, Jugoslovensko društvo termičara, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, (1998).
- [47] Schmitt, F.: About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity, *Comptes Rendus Mecanique* 335, 9-10 (2007) 617-627.
- [48] Levenspiel, O.: Tracer technology, modeling the flow of fluids, Springer, (2011).
- [49] Danckwerts P.V.: Continuous flow systems. Distribution of Residence times, *Chemical Engineering Science* 2, 1-13, (1953).
- [50] Wolf, D., Resnick, W.: Residence time distribution in real systems, *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 2 (4), pp 287–293, (1963).
- [51] Levenspiel, O.: Osnovi teorije i projektovanja hemijskih reaktora, ICS i TMF, Beograd, (1979).
- [52] Gumz W. Overfire Air Jets in European Practice. *Combustion* (1951); 22: 39–48.
- [53] Niessen W. Combustion and incineration processes. New York, US: Marcel Dekker Inc.; (2002).
- [54] Gad-El-Hak M, Pollard A, Bonnet J-P. Flow Control Fundamentals and Practices. Berlin, Germany: Springer; (1998).
- [55] Han J-H, Jeong K, Choi J H, Choi S. A hot-flow model analysis of the msw incinerator. *International journal of energy research*, (1997); 21: 899-910.
- [56] Fehr M, Vaclavinek, J. A cold model analysis of solid waste incineration. *International journal of energy research*, (1992); 16: 277-283.
- [57] Choi S, Lee J S, Kim S K, Shin D H. Cold flow simulation of municipal waste incinerators. In *Proceedings of 25th Int. Symp. On Combustion*; (1994) The Combustion Insitute, Irvine, California, U.S.A.
- [58] Ravichandran M, Gouldin F C. Numerical Simulation of Incinerator Overfire Mixing. *Combustion Science & technology*, (1992); 85: 165-185.
- [59] Nasserzadeh V, Swithenbank, J . Design optimization of a large municipal solid waste incinerator, *Waste Management*, (1991); 11: 249-261.

-
- [60] Nasserzadeh V, Swithenbank J, Schofield G, Scott D W, Loader, A. Effects of high speed jets and internal baffles on the gas residence times in large municipal incinerators, *Environmental Progress*, (1994);13 (2): 124-133.
- [61] Лична комуникација са ментором рада проф. др Иваном Пешењанским.
- [62] Seeker W R, Lanier W S, Heap M P. Municipal waste combustion study: Combustion control of MSW combustors to minimize emission of trace organics. New York, US; EPA, (1987) May. Technical report: EPA/530-SW-87-021x.
- [63] Ravichandran, M. and Gouldin, F. C. : Residence Time Calculations Using the Numerical Simulation of Incinerator Flows, *Combustion Science and Technology*, Volume 91, Issue 4-6, (1993).
- [64] Solar energy research institute: Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems, интернет:: [http://taylor.ifas.ufl.edu/documents/Handbook_of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems.pdf](http://taylor.ifas.ufl.edu/documents/Handbook_of_Biomass_Downdraft_Gasifier_Engine_Systems.pdf), приступљено: 13.05.2014.
- [65] Guelder, Oemer: Lectures on combustion, интернет: <http://utias.utoronto.ca/~ogulder/ClassNotes3.pdf>, приступљено: 13.05.2014.
- [66] Вороњец, К. , Обрадовић, Н.: Механика флуида, Грађевинска књига, Београд, (1976).
- [67] Ghirelli, F., Leckner, B.: Transport equation for the local residence time of a fluid, *Chemical engineering science*, 59(2004), 513-523.
- [68] Balteo, J.N., Le Cloirec, P.: Validating a prediction method of mean residence time spatial distributions. *A.I.C.h.E. Journal* 46, 675–683, (2000).
- [69] Balteo, J.N., Humeau, P., Le Cloirec, P.. Numerical and experimental hydrodynamic studies of a lagoon pilot. *Water Research* 35, 2268–2276, (2001).
- [70] Templeton, M.R. , Hofmann, R. i Andrews, R.C.:Case study comparisons of computational fluid dynamics (CFD) modeling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment, *J. Environ. Eng. Sci.* 5: 529–536 (2006).
- [71] W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, R. J. Reed and J. R. Garvey, Saving energy in industrial furnace systems. In: W. Trinks et al.. *Industrial Furnaces*, Sixth edition. Hoboken, N.J., USA: John Wiley & Sons, Inc. (2004) p. 175-242.
- [72] Nasserzadeh V, Swithenbank J, Schofield G, Scott D W, Loader, A. Effects of high speed jets and internal baffles on the gas residence times in large municipal incinerators, *Environmental Progress*, (1994);13 (2): 124-133.

-
- [73] Shelton J., Jay Shelton's solid fuels encyclopedia. Garden Way Publishing, Charlotte, Vt, USA; (1983).
- [74] Wick O., Wik M., Wood stoves : how to make and use them. Northwest Pub. Co. Anchorage, Alaska, USA; (1977).
- [75] Hartmann H., Reisinger K., Thuncke K., Hoeldrich A., Rossmann P., Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), интернет: www.tfz.bayern.de/sonstiges/17745/handbuch_komplett.pdf, приступљено 30.1.2012.
- [76] Dimaczek G., Quicker P., Mocker M., Kleinfeuerungsanlage für Getreide und Stroh abschlussbericht für Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow. ATZ Entwicklungszentrum, интернет: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22019303.pdf>, приступљено 30.1.2012.
- [77] Eltrop L., Raab K., Schneider S., Schroeder G., Kaltschmitt M., Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, интернет: http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/leitfaden_bioenergie.pdf, приступљено 30.1.2012.
- [78] Nasserzadeh V, Swithenbank, J . Design optimization of a large municipal solid waste incinerator, Waste Management, (1991); 11: 249-261.
- [79] Scott A. J., Real-life emissions from residential wood burning appliances in New Zealand, интернет: <http://ecan.govt.nz/publications/Reports/air-report-emissions-residential-wood-burning-appliances-nz-000805.pdf>, приступљено 30.1.2012.
- [80] Todd J. J., Research relating to regulatory measures for improving the operation of solid fuel heaters. Eco-energy options, Prepared for the New South Wales Department of Environment and Conservation, интернет: http://www.environment.nsw.gov.au/resources/woodsmoke/execsummary_toddreport.pdf, приступљено 30.1.2012.
- [81] Van Loo S., Koppejan J. (eds.), Handbook of biomass combustion and co-firing. Twente, the Netherlands: Twente university press; 2002.
- [82] Beer J. M., Lee K. B., The Effect of the Residence Time Distribution on the Performance and Efficiency of Combustors. Symposium (International) on Combustion (1965); 10 (1): 1187-1202.
- [83] Swithenbank J., Poll I., et al., Combustion design fundamentals. Symposium (International) on Combustion (1973); 14(1): 627-638.
- [84] Hrdelička J., Šulc B., International journal of Energy, Advanced Features of a Small-Scale Biomass Boiler Control for Emission Reduction, Issue 3, Vol. 5, (2011).

-
- [85] Уредба о граничним вредностима емисија загађујућих материја у ваздух,
Службени гласник републике Србије, бр. 71/2010. и 6/2011. – исправка.
- [86] Јанић, Т: Кинетика сагоревања балиране пшеничне сламе, докторска теза,
Пољопривредни факултет Нови Сад, (2000).
- [87] Сијерчић, М.: Математичко моделовање комплексних тубулентних
транспортних процеса, Југословенско друштво термичара, Институт за
нуклеарне науке "Винча", Београд, (1998).
- [88] Magnussen, B.F. Hjertager B.H.: On Mathematical Modeling of Turbulent
Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion. *16th Symp.
(Int.) on Combustion* (1976). Comb. Inst., Pittsburg, Pennsylvania, pp.719-729, 1976.
- [89] Scharler, R., Fleckl, T., Obernberger, I.: Modification of a Magnussen Constant of the
Eddy Dissipation Model for biomass grate furnaces by means of hot gas in-situ FT-IR
absorption spectroscopy, *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International
Journal*, Volume 3, Number 2-4 / 2003., 102 – 111.
- [90] Scharler, R. , Obernberger, I.: Numerical modeling of biomass grate furnaces, 5th
European conference of Industrial Furnaces and Boilers, (April 2000), Porto, Portugal.
- [91] Spalding, B.: Radiative heat transfer in PHOENICS, интернет:
http://www.simuserve.com/phoenics/d_polis/d_enc/enc_rad0.htm, приступљено:
13.05.2014.
- [92] Klasen, T.: Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells für die
heterogene Verbrennung auf dem Müllrost und dessen Anwendung bei CFD-
Simulationen hinsichtlich einer optimierten Feuerungstechnik, *Doktorska disertacija*,
(2003), Univerzitet Duisburg-Essen, Nemačka.
- [93] Goerner, K. ET AL.: Modeling, simulation and validation of the solid biomass
combustion in different plants, *Progress in computational fluid dynamics*,
(2006), vol. 6, n 4-5, pp. 225-234.
- [94] Бркић Љ., Живановић Т., Термички прорачун парних котлова. Београд, Србија.
Машински факултет; (1984).