

UNI VERZI TET U BEOGRADU
MA[I NSKI FAKULTET

Mi I an R. Radovanovi }

GORI VA

У Н И В Е Р З И Т Е Т У Б Е О Г Р А Д У

Милан Р. Радовановић

ГОРИВА

Машински факултет
Београд, 1994.

Универзитет у Београду

Милан Р. Радовановић

Горива

IV прерађено и допуњено издање

Рецензенти

др Љубиша Бркић, редовни професор

др Мирољуб Адић, редовни професор

Издавач

Машински факултет

Универзитета у Београду

27. марта 80, Београд

Штампање одобрила

Комисија за издавачку делатност

Машинског факултета у Београду

20.05.1993.

Главни и одговорни уредник

др Мартин Богнер, дипл. инж.

За издавача

Милена Лукић, дипл. филозоф

Тираж: 1100 примерака



Компјутерски слог: Драгана&Влада

Штампа: Графички атеље „Галеб“, Кеј ослобођења 73, Земун

ISBN 86-7083-246-1

Препштампавање и умножавање књиге није дозвољено

ПРЕДГОВОР

Више од 90% енергије у свету се добија сагоревањем горива. Познавање састава и особина горива је предуслов за рационално коришћење енергије, што је данас један од основних захтева у целом свету па и у нас. Смањењем потрошње горива постижу се значајни економски ефекти, а истовремено се снижавају емисије и токсичних садржака и гасова „стаклене баште“ у производњи сагоревања горива.

Књига је потпуно прерађена, допуњена и постојеће грешке су исправљене. У I поглављу су дати најновији подаци о резервама, производњи, потрошњи горива за свет и СР Југославију. Четврто, пето, шесто и седмо поглавље су обожени низом новијих података из нашег и иностраног научно-истраживачког дома, при чему је тежиште било на домаћим и сопственим резултатима.

Проф. Предражу Миловићу дуžујем захвалности за допринос у тексту и илустрацијама које се односе на рударске машине. Проф. Мирољубу Ацићу за корисне сугестије приликом писања књиге. Посебно желим да нагласим допринос проф. Љубише Бркића који је крајње пажљиво, савесно и детаљно анализирао текст и својим предлозима и сугестијама побољшао јасноћу излагања, ускладио терминологију па и језички допринео квалитету дела за које је био компетенцијан.

Асистентима Драгослови Стојиљковић и Владимиру Јовановићу дуžујем признање за њихову савесну, уорну, брижљиву и естетску припрему текста.

Књига је намењена широком кругу инжењера, последипломаца и студентима, као и свима онима које ова значајна област интересује.

Београд, мај 1994.

Милан Радовановић

САДРЖАЈ

1	УВОД.....	1
1.1	Опште о енергији	1
1.2	Историјат коришћења енергетских извора	3
1.3	Потрошња енергије	8
1.4	Резерве примарне енергије	12
1.5	Краткорочна предвиђања потрошње и резерви носилаца енергије	14
1.6	Дугорочна предвиђања носилаца енергије.....	16
1.6.1	Геотермална енергија	17
1.6.2	Енергија плиме и осеке	19
1.6.3	Соларна енергија	19
1.6.4	Временска предвиђања	23
1.7	Потрошња, резерве и производња енергије у СРЈ	26
	Литература	30
2	ГОРИВЕ МАТЕРИЈЕ	33
2.1	Појам горива.....	33
2.2	Врсте горива	34
2.3	Састав горива	36
2.3.1	Елементарни састав	36
2.3.1.1	Угљеник	37
2.3.1.2	Водоник	37
2.3.1.3	Кисеоник.....	37
2.3.1.4	Азот.....	39
2.3.1.5	Сумпор.....	39
2.3.1.6	Минералне примесе и пепео.....	39
2.3.1.7	Влага	41
2.4	Условне масе и прерачунавање са једне масе на другу	43
2.5	Општа својства.....	46
2.5.1	Топлотна моћ.....	46
2.5.1.1	Значај и дефиниција	46
2.5.1.2	Одређивање топлотне моћи	49
	Литература	56
3	ОСНОВИ САГОРЕВАЊА	57
3.1	Стехиометријске једначине сагоревања	59
3.1.1	Стехиометријска једначина сагоревања угљеника.....	60
3.1.2	Стехиометријска једначина сагоревања водоника	61

3.1.3	Стехиометријска једначина сагоревања сумпора	62
3.1.4	Стехиометријска једначина непотпуног сагоревања угљеника	62
3.1.5	Стехиометријска једначина сагоревања угљенмоноксида	63
3.1.6	Хесов закон	64
3.2	Основи прорачуна процеса сагоревања	65
3.2.1	Основи прорачуна сагоревања на бази познатог састава горива	65
3.2.1.1	Одређивање теоријске количине кисеоника за потпуно сагоревање	65
3.2.1.2	Одређивање теоријске количине ваздуха	69
3.2.1.3	Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха	71
3.2.1.4	Количина и састав продуката сагоревања	72
3.2.2	Основи прорачуна процеса сагоревања на бази познатог састава продуката сагоревања	80
3.2.2.1	Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања	81
3.2.3	Температура сагоревања	83
	Литература	90
4	ЧВРСТА ГОРИВА	91
4.1	Техничка анализа чврстих горива	91
4.1.1	Пепео	93
4.1.2	Гориве испарљиве материје	98
4.1.3	Спицање угља	103
4.1.4	Коксни остатак	104
4.1.5	Значај података техничке анализе	104
4.2	Природна чврста горива	111
4.2.1	Биогорива	111
4.2.1.1	Алге као горива	111
4.2.1.2	Дрво	112
4.2.1.3	Пољопривредни остаци	113
4.2.2	Тресет	118
4.2.3	Угаљ	118
4.2.3.1	Порекло, састав и особине	118
4.2.3.2	Међународна подела угљева	121
4.2.3.3	Мрки угљеви	124
4.2.3.4	Камени угљеви	124
4.2.3.5	Антрацити	125
4.2.4	Гориви шкриљци	125
4.2.5	Домаћи угљеви	126
4.2.5.1	Домаћи лигнити	127
4.2.5.2	Домаћи мрки угљеви	128
4.2.5.3	Домаћи камени угљеви	131
4.2.6	Гориви шкриљци у СР Југославији	131

4.3 Поступци припреме чврстих горива	132
4.3.1 Уситњавање угља	132
4.3.2 Ослобађање од грубих механичких нечистоћа - флотација	135
4.3.3 Просејавање и раздвајање по величини	136
4.3.4 Одстрањивање влаге	138
4.4 Области примене угља	140
4.4.1 Млевење угља и сагоревање угљеног праха	140
4.4.1.1 Припрема угљеног праха	141
4.4.1.2 Сагоревање угљеног праха	144
4.4.2 Брикетирање	149
4.5 Произведена чврста горива	149
4.5.1 Поступци суве дестилације	149
4.5.1.1 Примарна сува дестилација мрко и каменог угља („швеловање“)	151
4.5.1.2 Високотемпературска дестилација каменог угља	151
4.5.2 Поступак дубоког сушења	153
4.6 Понашање угљева на складишту	154
Литература	156
5 ТЕЧНА ГОРИВА	159
5.1 Природна течна горива - нафта	159
5.1.1 Особине и порекло	159
5.1.2 Састав нафте	160
5.1.3 Добијање нафте	163
5.1.4 Налазишта нафте у нашој земљи	166
5.2 Прерађена и синтетичка течна горива	167
5.2.1 Прерађена горива из нафте	167
5.2.1.1 Прерада нафте	167
5.2.1.2 Прерада продуката прераде нафте	169
5.2.1.3 Дорада горива	176
5.2.1.4 Синтетичка течна горива	177
5.3 Моторни бензини	179
5.3.1 Образовање смеше	179
5.3.2 Испарљивост горива	183
5.3.2.1 Утицај испарљивости бензина на ниским температурама	187
5.3.2.2 Утицај испарљивости бензина на повишеним температурама	195
5.3.3 Сагоревање у Ото мотору	200
5.3.4 Отпорност према детонативном сагоревању бензина	204
5.3.4.1 Одређивање истраживачког и моторског октанског броја	205
5.3.4.2 Осетљивост бензина	207
5.3.4.3 Одређивање путног октанског броја	207

5.3.4.4	Дистрибуциони октански број и ΔR	212
5.3.4.5	Могућности повећања отпорности према детонатвином сагоревању бензина.....	213
5.3.5	Остале карактеристике бензина.....	219
5.3.6	Моторни бензини наше земље	222
5.4	Горива за Дизел моторе	224
5.4.1	Својства горива која утичу на образовање смеше.....	228
5.4.1.1	Испарљивост.....	228
5.4.1.2	Вискозност.....	229
5.4.2	Упаљивост дизел горива	230
5.4.3	Остале карактеристике горива за Дизел моторе.....	236
5.4.3.1	Густина горива.....	236
5.4.3.2	Нискотемпературске карактеристике дизел горива	237
5.4.3.3	Механичке примесе и вода	240
5.4.3.4	Склоност ка образовању кокса	241
5.4.3.5	Садржај сумпора	242
5.4.3.6	Температура паљења	242
5.4.4	Додаци дизел горивима	242
5.4.5	Дизел горива СР Југославије	244
5.5	Горива за млазне моторе	245
5.5.1	Услови које једно гориво за млазне моторе треба да задовољи.....	245
5.5.2	Врсте горива за млазне моторе	246
5.5.3	Утицај неких карактеристика на рад мотора.....	247
5.6	Уља за ложење.....	248
5.6.1	Основи образовања смеше и сагоревања	248
5.6.2	Садржај воде	252
5.6.3	Садржај минералних примеса.....	254
5.6.4	Садржај сумпора	255
5.6.5	Уља за ложење СР Југославије	255
	Литература	257
6	ГАСОВИТА ГОРИВА	259
6.1	Природна гасовита горива	259
6.2	Произведена гасовита горива.....	265
6.2.1	Прерађена гасовита горива из нафте или прераде продуката нафте.....	265
6.2.1.1	Рафинеријски гасови.....	265
6.2.1.2	Течни гасови.....	266
6.2.2	Произведена гасовита горива из чврстих горива.....	269
6.2.2.1	Генераторски гасови	269
6.2.2.2	Дестилациони гасови.....	274
6.2.3	Биогас.....	276
	Литература	279

7	ПЕРСПЕКТИВНА ГОРИВА	281
7.1	Водоник.....	287
7.2	Алкохоли.....	289
7.2.1	Могућност примене метанола као моторског горива.....	290
7.2.2	Могућност примене етанола као моторског горива	291
7.3	Билна уља.....	292
	Литература	297

1 УВОД

1.1 ОПШТЕ О ЕНЕРГИЈИ

Све појаве и процеси у природи представљају различите облике кретања материје. Сваки облик кретања материје испољава се одговарајућим видом енергије, односно различитим видовима кретања материје одговарају различити видови енергије: кретање тела представља механичку енергију, кретање молекула у телу - топлотну енергију, кретање електрона - електричну енергију, прерасподела атома у молекулима у хемијским процесима настајања или разлагања материје - хемијску енергију и сл.

У процесима и појавама у природи енергија прелази из једног облика у други. Сагоревањем горива, хемијска енергија прелази у топлотну, у парном котлу та топлотна енергија се посредством продуката сагоревања предаје води, која прелази у парно стање, топлотна енергија паре, у парној турбини, трансформише се у механичку енергију, а у генератору електричне струје, механичка енергија прелази у електричну. Електрична енергија се даље може трансформисати на више начина: у електромоторима се претвара у механичку, у осветним телима у светлосну (енергију зрачења), у електро-грејачима - у топлотну и др.

За превођење енергије из једног облика у други на располагању су различити процеси, којима је човечанство више или мање овладало. На Слици 1.1 дати су важнији облици енергије и неке могућности превођења једног облика у други /1/.

Посматрајући могуће трансформације једног облика енергије у друге може се уочити да су неке од ових трансформација повратне: енергија зрачења се може претворити у електричну (соларним батеријама, на пример), а електрична енергија у енергију зрачења (ласером или сијалицом, на пример). С друге стране, неке од ових трансформација су неповратне: врло је лако хемијску енергију горива сагоревањем превести у топлотну, али је веома тешко, директним путем, извести обрнут процес. За превођење топлотне енергије у хемијску, потребно је да се прво преведе у механичку (покретање парне турбине), а затим механичка у електричну (генератором), којом могу да се пуне батерије.

Сви видови енергије имају огроман значај у животу људи па се зато законима њихове трансформације поклања посебна пажња: једино познавање тих закона омогућава човечанству коришћење енергије са највећим степеном корисности.

Слика 1.1: Важнији облици енергије и неки од путева преношења једног облика у други /1/

1.2 ИСТОРИЈАТ КОРИШЋЕЊА ЕНЕРГЕТСКИХ ИЗВОРА

Првобитни човек, који се појавио пре око милион година (према новијим подацима пре око $2,5 \cdot 10^6$ год.) располагао је само снагом сопствених мишића. Вршећи физички рад, човек је развијао снагу од 0,05-0,06 kW, чему је одговарао рад од око 600-700 kWh годишње. У току палеолита човек је почео да се користи примитивним каменим оруђем, хранио се биљном и животињском храном у сировом стању и штитио од хладноће одећом, трошећи дневно $2-3 \cdot 10^{-3}$ kWh топлоте. (У неолиту, човек је почео да се користи снагом мишића домаћих животиња. Снага коња, на пример, износи 0,6-0,7 kW). Овакво повећање коришћења енергије омогућило је развој заната и духовног живота човека. Коришћењем ватре за грејање и заштиту од грабљивица, које је човек научио пре око 500.000 година, дневна потрошња топлотне енергије нарасла је на око $11 \cdot 10^{-3}$ kWh (укључујући сагоревање и исхрану домаћим животињама) /2/.

Ако се дрветом као горивом човек почео користити када је упознао и почео да употребљава ватру, угаљ и нафту је почео користити знатно касније. Познато је да се угаљ у Кини добијао још 1.000 година пре наше ере, а у Италији и Грчкој - око 400 година пре наше ере.

Грчки филозоф Аристотел помиње у свом делу „Метеорологија“ угаљ и пореди га са дрвеним угљем, а његов ученик Теофраст назива угаљ „горућим каменом“. Он описује његова својства и даје попис налазишта угља. У средњем веку енглески краљ Edvard I (Едвард I) законски је чак забранио коришћење угља за грејање због „лошег мириса“, који је настајао његовим сагоревањем.

У Месопотамији нафта се почела добијати још 6-8.000 година пре наше ере.

Почетак коришћења енергије водених и ваздушних токова (река и ветра) припадају периоду прве хиљаде година наше ере, при чему је снага тих постројења достигала у то време 2-3 kW. Енергија водених и ваздушних токова заједно са снагом мишића људи и животиња представљала је енергетску базу човечанства у току дугог временског периода почињући са робовласничким и феудалним друштвом и завршавајући у време мануфактурне производње. Укупна снага по глави корисника била је незнатна - стоти део киловата.

Водени точак и ветрењача били су познати у Индији, Вавилону, Египту и Кини још пре наше ере, али у условима робовласничког друштва нису нашли ширу примену, јер је ручни рад робова обезбеђивао неопходну количину рада. Тек са развојем заната, а затим и мануфактурне производње почео је да се користи водени точак за погон различитих машина - оруђа. У периоду мануфактурне производње енергија водених токова - хидроенергија, постала је основа индус-

трије. Снага уређаја износила је 20-30 kW. Ветрењаче се користе на истоку од VII века, а у Европи од XII века, при чему је њихова снага достигала 10 kW.

Прво „топлоотно“ погонско средство било је парна машина. Пронађена у XVII веку од стране Savery-а (Саверија) 1698. године и Papin-а (Палена) 1690. године, парна машина је почела да се примењује у XVIII веку од стране Newcomen-а (Њукомена) 1712. године, Watt-а (Вата) 1765. године и Ползунов-а (Ползунов) 1764-1766. године са степеном корисности од 0,1-1,0%. Ватова парна машина почела је да се примењује у свим производним областима: 1880. године у Енглеској је у рудницима угља било 30 парних машина, у рудницима бакра - 22, а у текстилној индустрији - 84, при чему је укупна снага износила 52.000 kW. Крајем XIX века снага стационарних и транспортних парних машина у свету износила је $90 \cdot 10^6$ kW. Јединична снага парних машина двадесетих година нашег столећа порасла је од ранијих 3-5 kW на 10-15.000 kW, а степен корисности од 3 на 16-18%.

Почеци индустријске примене нафте датирају из XVII века, када су становници Алзаса, Шкотске, Галиције, Румуније и на Кавказу вршили примитивну дестила-

Слика 1.2: Добијање и прерада нафте у 16. веку /3/

цију нафте у циљу добијања уља за осветљење, док неки подаци указују да је нафта, на овај начин коришћења и у XVI веку (Слика 1.2).

Ипак, стварним почетком индустријског коришћења нафте сматра се она година када је извесни Drake (Дрејк) у Пенсилванији 1859. године извршио прво бушење и добио нафту (Слика 1.3) и поред тога што се читавих двадесет година користила искључиво за осветљавање у облику петролеја добијеног из нафте. Од 1900. године потрошња нафте нагло расте захваљајујући брзом развоју моторних возила, ваздухопловства и бродоградње.

Железница се појавила проналаском парне локомотиве Vivian и Trevithik (Вивијан и Тревитик), 1802. године; Blenikson (Блениксон) 1811. године; Seguin (Сеген) и Stephenson (Стивенсон) 1829. године. Парна вуча коришћена је више од једног века. Електрична вуча јавља се почетком XX века, а од 1930. године почиње и примена дизел мотора на железници /4/.

Парну турбину пронашли су независно један од другог Parsons (Парсонс) 1886. године и Laval (Лавал) 1887. године. Идеја коришћења водене паре на овај начин јавила се пре 2.000 година: 120 пре наше ере Херон Александријски остварио је уређај који се може сматрати претечом парне турбине, а 1629. године римски механичар Branca (Бранка) је предложио сличан уређај. Према совјетским изворима Залесов (Залесов) још 1807. године разрадио је конструкцију парне турбине, а исте године је и направио. Снага парне турбине у поређењу са парном машином практично није била ограничена /5/.

У другој половини XIX века настаје конструкција још једне топлотне машине - мотора са унутрашњим сагоревањем. Први гасни мотор конструисан је у Француској од стране Lenoire-a (Леноар) 1860. године, а Otto (Ото) и Langen (Ланген) у Немачкој су направили савршенију конструкцију 1867. године.

1897. године Diesel (Дизел) је створио мотор код кога се гориво није палило спољним извором енергије - свећицом, већ спонтано, у условима повишеног притиска и температуре.

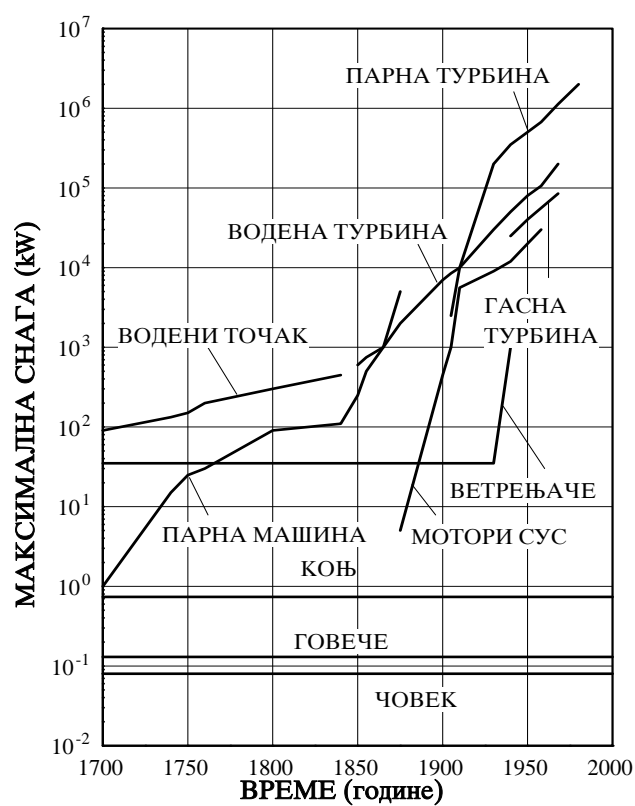
Прве термоелектране појавиле су се осамдесетих година прошлог века. У САД прва електрана за градско осветљење снаге 1 kW почела је са радом 1881. године у држави Висконсин, а у Њујорку - 1882. године снаге 90 kW. У Русији прва електрана била је направљена у Петрограду, а у Србији - 1893. године.

У XIX веку, у различитим индустријама примењиване су парне машине или мотори са унутрашњим сагоревањем са гломазним преносом ка машинама радилицама. Почетком XX века овакав погон постепено се замењује економичнијим и погоднијим за руковање - електропогоном. Електромотор је ударио темеље масовном градском саобраћају - трамвају, а касније метроу и електрифицираним железницама.

Слика 1.3 Налазиште нафте - бушотина у Пенсилванији 1864.год. /6/

Усавршавањем мотора са унутрашњим сагоревањем за ваздухоплов браћа Wright (Рајт) 1903. године чине први моторизовани лет, а први млазни мотор уградио је у авион 1939. године Heinkel (Хајнкел). Основе за млазни погон патентирао је 1930. године Whittle (Вајтл) /7/.

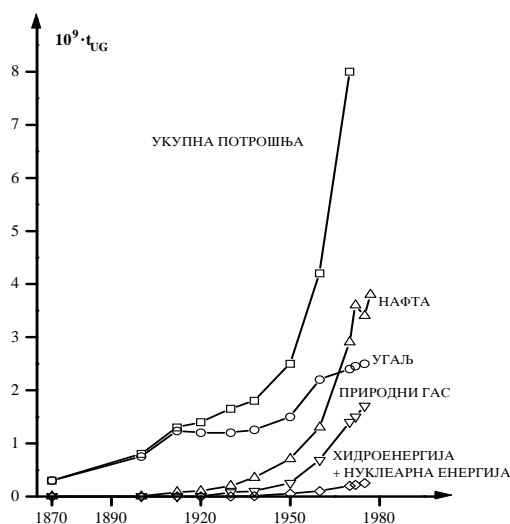
На Слици 1.4 дат је развој снага коришћених уређаја током периода од 1.700 до 2.000 године.



Слика 1.4: Излазна снага основних уређаја /8/

1.3 ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ

Већ стотину година потрошња енергије експоненцијално расте не рачунајући прекиде за време I и II светског рата. Светска потрошња порасла је у том периоду више од 30 пута: 1870. године укупна светска потрошња свих видова енергије (угља и нафте, углавном) износила је $218 \cdot 10^6$ тона условног горива*. Развој потрошње енергије током овог периода дат је на Слици 1.5.



Слика 1.5: Потрошња угља, нафте, природног гаса, хидроенергије и нуклеарне енергије у досадашњем периоду у свету /9, 10, 11/

* У циљу поређења и израчунавања количине енергије која се може добити постојећим сагоревањем горива, уводи се појам такозвано "условно гориво". Условно гориво при сагоревању ослобађа 29.300 kJ/kg . Прерачунавање горива на условно гориво врши се према обрасцу:

$$G_{UG} = G \frac{H}{29.300} \quad t_{UG}$$

где су: G_{UG} (t_{UG}) - маса условног горива, G (t) - маса горива које се прерачунава на условно, H (kJ/kg) - топлотна моћ горива које се прерачунава на условно.

Само у периоду од 1960. до 1974. године укупна светска потрошња енергије порасла је скоро два пута: укупна светска потрошња енергије 1960. године износила је $4.228 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{UG}}$, а 1974. године - $7.971 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{она условног горива}}$.

У периоду између 1960-1970. године потрошња свих носилаца енергије није равномерно расла: потреба за чврстим горивом порасла је за 24%, док је потрошња нафте порасла за 100%, а природног гаса чак за 117%.

Истовремено са порастом потрошње, међутим, мењала се и њена структура. Док је 1870. године учешће угља у светској потрошњи енергије износило 95%, а нафте свега 5%, сто година касније угаљ учествује са свега 35,3%, нафта са читавих 41,7%, 20,7% енергије се добија из природног гаса, а остатак од 2,3% представља хидро и нуклеарна енергија. Предност је, очигледно добила, у то време још јефтинија енергија из нафте и природног гаса.

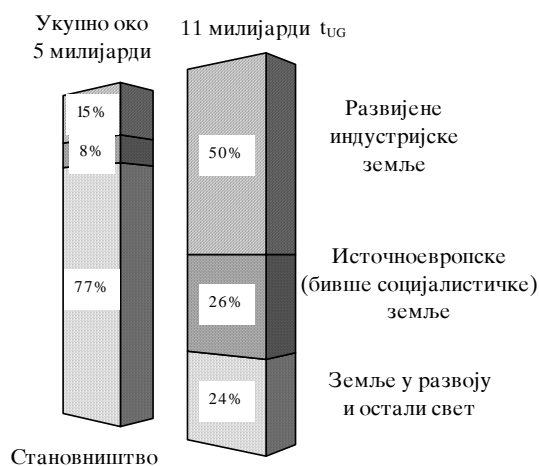
Детаљнија структура потрошње енергије у свету за последњих петнаестак година представљена је на Слици 1.6.

Слика 1.6: Структура потрошње енергије у свету за последњих 15-ак година /12/

Светска потрошња енергије у 1991. години износила је око $12,3 \cdot 10^9$ t_{UG} . Конвенционална горива учествују у њој са око 85% односно са $10,5 \cdot 10^9$ t_{UG} . Нафта представља главни извор енергије учествујући у укупној потрошњи са око 40%, на угаљ отпада око 26%, а на гас око 21%.

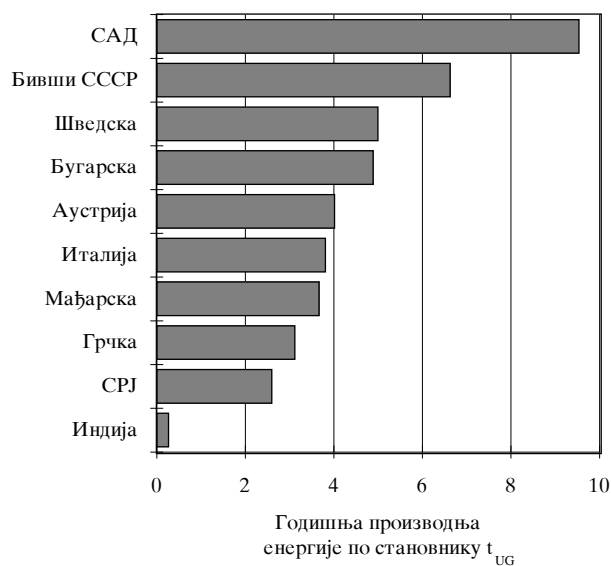
Почетком седамдесетих година удео гаса све више расте да би 1991. године износио $2,5 \cdot 10^9$ t_{UG} . Потрошња гаса је у 1991. години била за 65% већа него 1974. године, док одговарајући проценти повећања потрошње за угаљ и нафту износе 50%, односно 16%.

Према подацима из 1990. године високо развијене индустријске земље, које у светском становништву учествују са око 15%, троше око 50% целокупне светске потрошње. Бивше социјалистичке земље, у којима живи око 8% становништва света учествују са око 26%, док земље у развоју (77% светског становништва) троше само 24% енергије (Слика 1.7 /13/)



Слика 1.7

До сличних закључака се може доћи и поредећи потрошњу енергије по глави становника за годину дана. Иако је просечна потрошња примарне енергије износила око $2,5 \text{ t}_{\text{UG}}$ по глави становника, детаљнија анализа указује на огромне постојеће разлике између развијеног и неразвијеног дела света (Слика 1.8).



Слика 1.8: Потрошња енергије у њонама условног горива по становнику /14/

Табела 1.1: Потрошња енергије у њонама условног горива по становнику /14/

Земља	1979	1982	1989
САД	11,12	9,43	9,54*
Канада			9,91
Бивши СССР	5,52	5,77	6,63*
Индија	0,18	0,20	0,27*
Шведска			5,0
СФРЈ	2,08	2,33	
СРЈ			2,603
Аустрија	4,28	3,71	4,018
Бугарска	2,93	5,59	4,890
Грчка	2,13	2,06	3,121
Мађарска	3,71	3,84	3,667
Румунија	4,47	4,63	
Италија	3,47	2,89	3,813

* Подаци дати за 1987. годину.

1.4 РЕЗЕРВЕ ПРИМАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Угаљ, нафта, природни гас представљају такозване необновљиве или исцрпљиве носиоце енергије, за чије су настајање биле потребне стотине милиона година. Неопходан податак за прорачуне и предвиђања колико ће још времена моћи да се користе су свакако постојеће резерве нафте, угља и природног гаса.

При разматрању њихових резерви мора се водити рачуна о томе да је њихово тачно представљање отежано како због сталне потрошње, тако и због откривања нових налазишта, одакле вероватно и потичу разлике у бројним вредностима, које се у стручној литератури јављају.

Такође, приликом тумачења појединих резерви, потребно је знати и основну поделу врста резерви. Резерве се разврставају према степену истражености и према степену искористивости*.

Светске резерве нафте на дан 1.1.1992. године процењене су на $134,6 \cdot 10^9$ t/12/. Око три четвртине ових резерви налазе се у такозваним ОПЕЦ земљама (Organisation of Petroleum Exporting Countries) а половина у свега четири од њих: Саудијској Арабији, Ирану, Ираку и Кувајту. Последњих 20 година су процењене светске резерве нафте повећане за 157% захваљујући појачаним истраживањима и савременим поступцима и техникама.

* Према сљедећем исцртавању резерве су, Међународним геолошким конгресом, 1937. године, подељене у три категорије:

Категорија А - обухвата резерве чије су количине и изражавање тачно изражене и изражене (подгрупа А₁ - резерве у експлоатацији; подгрупа А₂ - резерве спремане за експлоатацију);

Категорија В - обухвата релативно изражене резерве, изражене са 80-95% сигурношћу;

Категорија С - односи се на вероватне али не и доказане резерве (подгрупа С₁ - могуће резерве; подгрупа С₂ - резерве чије се постојање претпоставља).

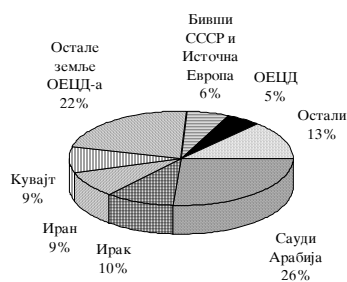
Према сљедећем искористљивости резерве се могу поделити на:

геолошке, које обухватају доказане и вероватне резерве, али без одговарајућих анализа о могућностима, условима и економичности њихове експлоатације;

билансне, које обухватају све резерве чија је експлоатација економски оправдана,

ванбилансне, резерве чија експлоатација није економски оправдана, на данашњем нивоу сазнања и технике експлоатације.

Што се тиче природног гаса утврђене и спремне за експлоатацију резерве износе $119,49 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$. Више од 2/3 ових резерви налази се у бившем Совјетском Савезу и земљама Блиског Истока /12/.



Слика 1.10: Резерве природног гаса у свету /12/

Слика 1.9: Резерве нафте у свету /12/

Резерве каменог угља цене се на $720 \cdot 10^9$ тона, укључујући и антрацит (Слика 1.11). Узимајући у обзир и резерве мрког угља чије се резерве процењују на $133 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG}}$, добијају се укупне резерве угља у износу од $853 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG}}$ /12/.

Укупне резерве угља, укључујући и оне које на данашњем нивоу, а ни у догледно време, нису економски исплативе износе чак $8.330 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG}}$.



Слика 1.11: Резерве угља у свету /12/

У индустријски развијеним земљама енергија водених токова - хидроенергија је најшире искоришћена; у земљама у развоју она представља још велики потенцијал. Потенцијал водених токова земље реда величине је 45.000 TWh/год. ($5,5 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG/год.}}$). Чини се да је технички искористљиво само око 13.000 TWh/год. ($1,6 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG/год.}}$) од чега економски оправдано око 10.000 TWh/год. ($1,23 \cdot 10^9 \text{ t}_{\text{UG}}$). Стварно се користи широм света само око 1.300 TWh/год. ($1,6 \cdot 10^8 \text{ t}_{\text{UG}}$). У Европи је ситуација другачија: од економски искористивог потенцијала од око 723 TWh/год. ($8,9 \cdot 10^7 \text{ t}_{\text{UG/год.}}$), користи се само половина /15/.

1.5 КРАТКОРОЧНА ПРЕДВИЂАЊА ПОТРОШЊЕ И РЕЗЕРВИ НОСИЛАЦА ЕНЕРГИЈЕ

Време могућег коришћења примарних носилаца енергије могло би се, у принципу, релативно лако израчунати на основу годишњег прираштаја потрошње енергије и постојећих резерви, под претпоставком да се резерве битно не промене. Овакве анализе су већ више пута вршене и добијени резултати могућег времена коришћења постојећих резерви се крећу од крајње песимистичких до оптимистичких. На основу досадашњих налазишта нафте ове процене се крећу:

- за нафту: 40 до 60 година. Потрошња нафте у 1991. години износила је $3,3 \cdot 10^9$ тона. Под претпоставком да се не нађу нова налазишта и без горивих шкриљаца и уљних пешчара, долази се једноставном рачуницом да нафте има још за око 30 година. Чак да се, у најповољнијем случају, остваре процењене резерве и да се побољша степен искоришћења лежишта нафте, слика се не би битно изменила.

Релативно мањи раст производње нафте може се објаснити следећим разлозима:

- појачане примене других носилаца енергије - природног гаса и нуклеарне енергије,
- заменом нафте угљем где год је то могуће, и
- развојем поступака и мера за потпуније и рационалније коришћење енергије уопште, па тиме и нафте.

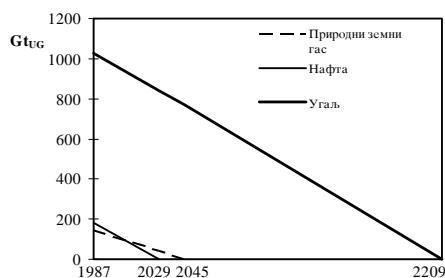
Задржавајући постојеће односе укупне резерве нафте биле би искоришћене до 2029. године (Слика 1.12).;

- за природни гас: 60 година. Полазећи од резерви гаса од $119,49 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ и стално растуће потрошње, може се уочити да се за природни гас могу извући слични закључци као и за нафту (Слика 1.12).;

- за угљ: од 200 до 1000 година. Узимајући у обзир укупне резерве угља од $8,53 \cdot 10^{11} \text{ t}_{\text{UG}}$ и потрошњу из 1991. године од $3,421 \cdot 10^9$ тона условног горива, долази се до закључка да се од угља може добити довољно енергије за дужи период времена. Одавде проистиче да ће свакако доћи до преоријентације низа постројења на погон са угљем, и поред проблема загађења и баласта, па и до његове веће и брже потрошње. Резерве угља неће се користити само за директно сагоревање и добијање топлоте, већ ће се процесима, који су добрим делом на данашњем степену сазнања већ решени, преводити у гасовита и течна горива (Слика 1.12).

У данашњим разматрањима о потрошњи енергије и примарним носиоцима енергије гориви шкриљци и уљни пешчар се нису појавили, јер поред изванредних горива, као што су нафта и гас, нису били ни економични, ни конкуретни по количини топлоте, а изазивали су проблеме везане за садржај минералних

материја у себи. Данас, на помолу стварне енергетске кризе, они почињу да се користе било у процесима директног сагоревања, било прерађени у облику гасовитих или течних горива. Рачуна се, према грубим проценама да би се прерадом горивих шкриљаца и уљних пешчара добила количина нафте три пута већа од садашњих расположивих резерви нафте /13/.



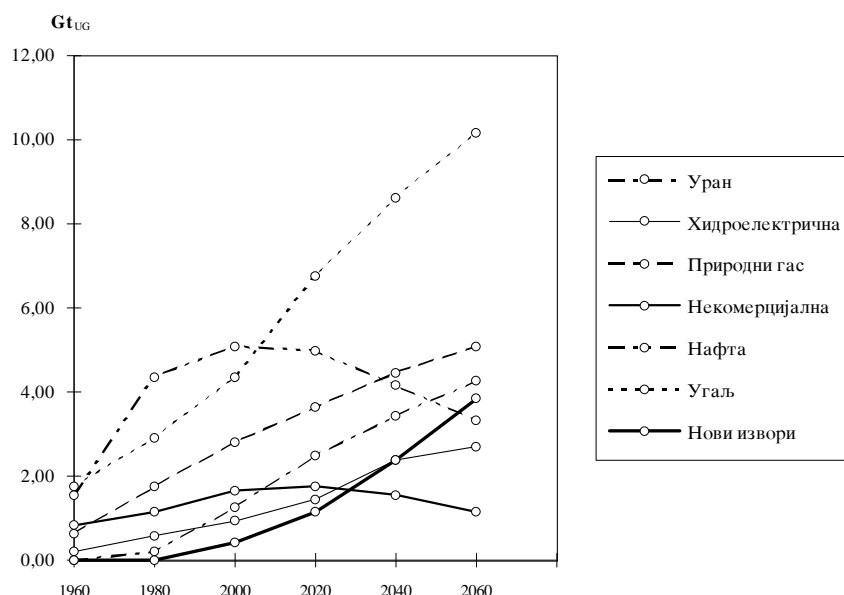
Слика 1.12: Резерве нафте, гаса и угља /12/

Што се тиче енергије водених токова, осетан хидропотенцијал постоји у земљама у развоју, али ипак не толики, да би се његовим увођењем у употребу, битније изменила енергетска ситуација света.

Приликом прављења планова за будућност треба водити рачуна о још два фактора, који у досадашњим плановима развоја потрошње енергије нису узимани у довољној мери или уопште у обзир:

1. Земље у развоју учествовале су до сада у светској потрошњи енергије са веома малим делом (свега 24%), па је нормално очекивати да се ова разлика, која постоји између индустријски развијених земаља и њих смањи.
2. Становништво света сваке године повећа за 90 милиона људи, од чега 80 милиона у земљама у развоју. У следећих 35 година, дакле само за једну генерацију, у Кини ће бити више 300 милиона људи, у Индији - 600 милиона људи. Према подацима Римског клуба /17/ у 2020. години предвиђа се да на земљи буде 8 милијарди, а већ 2050. - десет милијарди људи.

Насупрот будућој високој потрошњи стоје ограничене резерве примарних носилаца енергије. Видљиво је да ће и нафта и природни гас бити веома брзо исцрпљени, а да угаљ даје нешто више могућности за коришћење. То значи да ће потрошња енергије и даље расти, али ће се однос између појединих носилаца мењати. Краткорочне прогнозе (до средине 21 века) према WEC Conservation Commision 1986., дате су на Слици 1.13 /18/.



Слика 1.13

1.6 ДУГОРОЧНА ПРЕДВИЂАЊА НОСИЛАЦА ЕНЕРГИЈЕ

Дугорочне прогнозе развоја потреба за енергијом заснивају се на одређеним претпоставкама. Степен тачности тих прогноза зависи да ли се, и колико, дефинисане претпоставке на данашњем степену развоја науке и сазнања могу са сигурношћу утврдити. Због одређене мере несигурности потребно је, поред предвиђеног плана развоја могућих нових извора енергије, предвидети и алтернативна решења. Такође је јасно да су за обезбеђивање енергетских потреба човечанства у будућности потребне нове технологије. За решавање оваквих проблема потребна су и знатна финансијска улагања уз дуготрајан рад на истраживању свих научних и истраживачких потенцијала света.

Без обзира, на процену времена трајања резерви нафте, природног гаса, угља, па и нуклеарног горива, чињеница је да њихово исцрпљивање предстоји и да се човечанство мора са њиме суочити. У том смислу енергетска криза 1973. године добро је дошла да укаже на крхкост постојећег система. Ова криза покренула је низ истраживачких радова и тема, било у циљу потпунијег и рационалнијег коришћења класичних извора енергије, било у правцу изналажења и коришћења нових видова енергије.

Дугорочно посматрано, избор који је човечанству на располагању је ограничен, али му је потенцијал огроман.

Трајни* енергетски извори, расположиви за коришћење су :

- термонуклеарне трансформације на Сунцу - соларна енергија,
- распад изотопа у унутрашњости земље - геотермална енергија, и
- кретање планета.

1.6.1 ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА

Са садржајем топлотне енергије унутар Земље могао би се проблем обезбеђивања Земље енергијом решити за било који предвиђен временски период. Као што је познато, испод земљине коре лежи растопљен слој - магма. Основа земљине коре налази се на дубини од 25-50 km испод површине Земље на температури од 200 до 1000°C. Претпостављајући да се топлота може добити само из слоја дебљине 100 km (почев на испод 32 km од површине земље) може се израчунати укупна количина топлотне енергије која би могла бити на располагању. Полазећи од података да је средњи специфични топлотни капацитет земље 600 J/kgK), да је у посматраном слоју дебљине 100 km средња температура 1000°C, да је густина 1500 kg/m³, као и од познатих података о величини Земље, количина топлоте која се може добити ако се ова маса охлади до температуре која влада на површини земље износи око $50 \cdot 10^{21}$ MJ.

Ако би се ова енергија користила хиљаду година, добијена количина енергије била би 10.000 пута већа од светске потрошње енергије данас /19/. На данашњем нивоу знања не постоји решење коришћења ове енергије, али би употреба и дела ове енергије била значајна. Слични прорачуни извршени у СР Немачкој за дубину до 5.000 метара показују да би се добила енергија 3.000 пута већа од годишње потрошње /20/. Реалне прогнозе односе се на дубине 4-6 km: геотермална енергија на овој дубини могла би се користити принудним увођењем воде на ту дубину под условом да се створи довољна површина контакта, која би омогућила задовољавајућу размену топлоте (Слика 1.14).

До сада су економски значајне количине енергије остварене само у областима, где постоји одговарајућа вулканска активност, која се манифестује изворима вреле воде или паре. Поред добијања електричне енергије, геотермална енергија се може користити за грејање станова, индустријских просторија, у пољопривреди и др. Коришћење топлх извора воде или паре у циљу добијања електричне

* И поред тога што ефикасно посматрано у физичком смислу назив трајан није коректан, може се прихватити с обзиром на људске размере времена.

енергије почиње 1904. године, када је у Италији, Lardarello (Лардарело), саграђен први експериментални уређај. Године 1913. снага уређаја износила је 250 kW, а данас, 390 MW. Највећа геотермална постројења за добијање електричне енергије налазе се у САД (The Geysers – 502 MW), Италији и Новом Зеланду (Wairakei – 290 MW), а укупна снага ових постројења у свету износи 1351,2 MW [15]. Са неелектричним коришћењем ових постројења широм света овај потенцијал је за 5500 MW виши, али је у поређењу са укупним потенцијалом овог енергетског извора ипак још занемарљиво мали. У САД се предвиђа да ће крајем овог столећа бити произведено коришћењем геотермалне енергије 100.000 MWe [1].

Слика 1.14: Коришћење геотермалне енергије: 1-вода за хлађење, 2-кондензатор, 3-електрогенератор, 4-прегрејана пара, 5-нуклеарном експлозијом направљена шупљина, 6-поновно увођење кондензата воде, 7-непропусљива стена температуре око 350° C /15/

1.6.2 ЕНЕРГИЈА ПЛИМЕ И ОСЕКЕ

Извор ове енергије је гравитациона енергија система Земља - Месец - Сунце. Услед обртања Месеца око Земље и истовременог обртања Земље око Сунца, долази до плиме и осеке мора у периодима од по 12 h. Коришћење плиме и осеке могуће је само ако је висинска разлика нивоа мора између плиме и осеке већа од два метра. Највећа висинска разлика је у заливу Fundy (Канада) и северозападној Аустралији - 11 m. Прво изграђено постројење у La Rance-у (Француска) снаге је 240 MW, уз могућност повећања на 350 MW. У Канади се испитује могућност изградње постројења од 2176 MW у поменутом заливу /11/.

И поред тога што представља важан извор енергије у одређеним областима, енергија плиме и осеке у светским оквирима нема значаја.

1.6.3 СОЛАРНА ЕНЕРГИЈА

Праизвор свих врста енергија које ми данас користимо је енергија зрачења, која долази од Сунца. Сва наша хемијска горива - дрво, угљ, нафта и природни земни гас, настала су од биљних и животињских организама, који су расли и живели под дејством Сунчеве светлости. Водена енергија која покреће хидроелектране је настала испаравањем воде и њеним кондензовањем на вишем нивоу, што је опет резултат Сунчевог зрачења.

Енергија зрачења Сунца је гигантска. Она је 22.000 већа од садашње потрошње човечанства. Ако се претпостави да се само 2 промила површине земље може користити за коришћење енергије Сунца са степеном искоришћења од 20%, добија се снага од $14,2 \cdot 10^{12}$ W, дакле више од садашње снаге примарних носилаца енергије. Може се очекивати да се годишње потребе од $15 - 20 \cdot 10^9$ t_{UG} обезбеде соларном енергијом /21/.

Нажалост, и поред веома привлачних карактеристика, соларна енергија у директном коришћењу има одређене недостатке. То су:

- мала количина енергије по површини, па је због тога потребно за њено коришћење велика површина,
- циклична променљивост, изазвана даноноћним појавама, и
- зависност од метеоролошких услова.

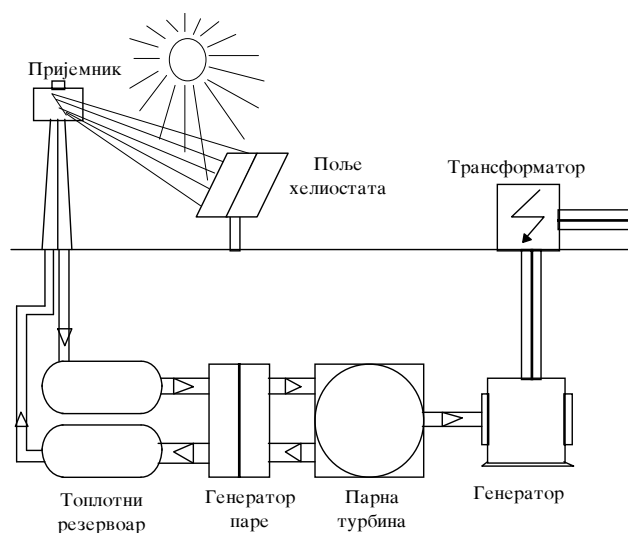
Сунчева енергија приспела на Земљу може се користити директно или индиректно (Слика 1.15).

Соларне електране са централним примаоцем (CRS – Central Receiver System) су у експерименталној фази у САД, Шпанији и Француској. Низ покретних огледала (хелиостата) усмерава одбијене сунчеве зраке ка централној јединици - примаоцу.

Слика 1.15: Могућности коришћења Сунчеве енергије

Ово значи да је Сунчево зрачење ($\max 1 \text{ kW/m}^2$) веома концентрисано, тако да се прималац може конструисати веома малим. У примаоцу тамних површина Сунчево зрачење се преноси на погодан медијум. Овај загрејани флуид, погодан за пренос топлоте, користи се за загревање у генератору паре. Помоћу парне турбине и електрогенератора производи се електрична енергија и укључује у класичан електро систем (Слика 1.16).

Између 1984. и 1988. године у Калифорнији је изграђено више соларних електрана укупне снаге од 275 MW. Са развојем ове технологије смањила се и



Слика 1.16

цена једног киловата: од почетне цене од 0,23 USD/kWh на 0,10 USD /22/.

Хидроенергија је најчешће и највише коришћен облик соларне енергије. Године 1987. хидроенергија је учествовала у производњи електричне енергије са 17% у развијеним, а са 31% у неразвијеним земљама /21/. Према новим проценама Светске енергетске конференције количина хидроенергије која се, економски прихватљиво, може искористити је чак 5 пута већа од данашње.

Ако се изврши детаљнија анализа могућих видова коришћења, не разматрајући хидропотенцијал, о коме је већ било речи, може се одмах уочити да неки од приказаних видова - потенцијалних енергетских извора морају бити искључени из

даљих разматрања. Ово се може закључити за коришћење енергије глечера или струјање мора, који поседују мале потенцијале, а захтевају решавање низа проблема везаних за трансформацију у погодније видове енергије, транспорт и складиштење.

Годишњи теоријски потенцијал ветра износи за цео свет $3 \cdot 10^3$ kWh ($3,6 \cdot 10^{12}$ t_{UG}). Реално, овај потенцијал се још веома мало користи. Капацитети израчунати теоријским путем у СР Немачкој, указују да би количина енергије која би се добила могла да покрије 75% потрошње из 1973. године, али би било потребно изградити 30.000 појединачних постројења реда величине MW.

Према истраживањима извршеним у Великој Британији по сваком квадратном километру може да се оствари ветрогенераторима 4 MW (16 ветрогенератора по 250 kW). Ово значи да би Велика Британија са својих 250.000 km², када би по целој површини поставила ветрогенераторе (WIND FARM), добила енергију 20 пута већу од данашње производње /23/. Европска економска заједница предвиђа да ће за 20 година 5% произведене електричне енергије у њиховом окружењу бити добијено „солском“ енергијом. Током осамдесетих година у свету су инсталирани ветрогенератори укупне снаге 1.660 MW, од чега 85% у Калифорнији (7.500 ветрогенератора) /23/.

Данас је већина конструктивних проблема разрешена, а значајан корак учињен је и на пољу економичности. Од 1981. године цена електричне енергије добијена на овај начин, смањена је за читав ред величина тако да износи мање од 0,07 USD/kWh (поређења ради, цена kWh добијеног из нових термоелектрана на угаљ у САД износи око 0,05 USD. Применом лаких композитних матријала и микропроцесорски контролираних турбина, Америчко министарство за енергију очекује да ће у следећих 20 година цена kWh бити око 0,035 USD.

Енергија морских таласа, која директно потиче из енергије ветра има у односу на претходне нешто већу концентрацију енергије. Потенцијал, који је зависан од висине таласа и њихове фреквенције, отвара могућност за коришћење овог вида енергије у земљама са великим бројем ветровитих дана и довољно дугим обалама (В. Британија, Скандинавија и др.).

Коришћење топлоте настале загревањем хидросфере Сунчевим зрачењем није свуда могуће: ограничено је на мали део климатски повољних области, али тек онда када знатни технички и економски проблеми буду превазиђени.

Фотосинтетички процеси, који су, милионима година доприносили стварању фосилних горива и која се данас користе дају годишње енергетски потенцијал од 10^{11} t_{UG}. Са гледишта прехране света и утrophка енергије за сакупљање и припрему биомасе, биолошко добијање енергије добија све већи значај.

Соларне батерије производе електричну енергију директно из сунчеве, када се фотони апсорбују у полупроводницима. Поседују низ предности производећи електричну енергију без загађења, буке, а често нема ни покретних делова. Према америчким прорачунима /22/ укупна потрошња електричне енергије САД могла би се остварити на површини од 37.000 km^2 или мање од 0,37% површине САД. Комерцијална решења на тржишту већ сада обезбеђују електране максималне снаге од 40 MW. Док 1970. године 1 kWh износи 60 USD, 1980. - 1 USD, данас је реда величине од 0,20-0,30 USD. Ово је још увек 4-6 пута више од цене енергије добијене на конвенционалан начин из угља. Развој ове технологије је веома брз, па се у скорој будућности очекује њена конкурентност.

И поред тога што данашње сунчане ћелије раде са малим степеном корисности око 10% (максимални степен корисности који се може остварити је 30%), директно претварање електромагнетног зрачења у електричну енергију је перспективно. Проблем акумулисања енергије и захтев за великом површином води ка такозваним енергетским сателитима, који би се инсталирали у орбити. Овде се јављају још проблеми стабилизације, транспорта у космос, регулисања пута и места сателита и др. Директна конверзија соларне енергије, било на Земљи, било у орбити, може се очекивати (Слика 1.17 /19/).

1.6.4 ВРЕМЕНСКА ПРЕДВИЂАЊА

На основу сопствених разматрања разни истраживачи су направили одговарајуће временске прогнозе. Оне иду од сасвим уопштених (Слика 1.18 /23/) до конкретних (Слика 1.19 /24/ и Слика 1.20 /25/) и служе за илустрацију, па се неће ближе разматрати.

На основу разматрања проблема и могућих решења, могу се извести следећи закључци:

- индустријски високо развијене земље морају да ограниче пораст потрошње енергије, да би мање развијеним земљама дале прилику да постигну задовољавајући животни стандард;
- могућности да се при растућој потрошњи енергије обезбеде одговарајуће количине нафте и природног гаса су ограничене; потребно је зато предузимање свих могућих мера за рационално и штедљиво коришћење енергије;
- побољшавати и даље развијати технологију коришћења угља. За угљем постоје интересантне могућности, али поред производње даљи развој ограничавају проблеми загађења околине;
- проблем могућности апсорпције топлоте и CO_2 околином мора се ближе проучити;

Слика 1.17: Сунчани колектор у орбити, постављен на растојању од 44000 km од Земље /9/ величине приближно $10 \times 10\text{ km}$, са степеном корисности од око 18% скупио би $1,5 \cdot 10^7\text{ kW}$ што би се микроваласним зрачењем довело на Земљу.

1-сунчани колектор, 2-електрични проводник (дужине 4 km), 3-обртна веза, 4-микроваласна антена, 5-контролна станица, 6-појачавајући трансформатор, 7-опрема за хлађење, 9-сунце

Слика 1.18: Пошрошња енерџије: I - крајкорочни период у коме ће се прејезно користијии класична фосилна ђорива; II - прелазни период, у коме се удео фосилних ђорива, прво релативно а затим и апсолутно смањује, а све више се користе друџи извори за добијање енерџије; III - период, у коме друџи извори енерџије имају доминантну улогу - дуџорочни период. /23/

Слика 1.19: Периоди пошрошње енерџије:

1-прединдустријски, 2-прелазни, 3-период експоненцијалног пораста пошрошње, 4-прелазни, 5-период коришћења нуклеарне енерџије и трајних извора енерџије /25/

- форсирање истраживања сигурности на пољу примене нуклеарне фисије, а нарочито на истраживању процеса нуклеарне фузије чијим би овладавањем вероватно сви проблеми енергије били за далеку будућност решени;
- посебну пажњу треба поклонити развоју технологија за коришћење соларне енергије, геотермалне енергије и енергије ветра.

Слика 1.20: Предвиђања потрошње енергије. \underline{f} представља удео одређеног енергетског извора у односу на укупну потрошњу /26/ (соларна + фусиона енергија)

1.7 ПОТРОШЊА, РЕЗЕРВЕ И ПРОИЗВОДЊА ЕНЕРГИЈЕ У СРЈ

Производња угља у СР Југославији последњих година, као и структура дата је Табелама 1.2 и 1.3.

Према подацима из 1989. године структура учешћа појединих врста угља у укупној производњи износи:

- | | |
|----------|---------|
| - камени | 0,30% |
| - мрки | 1,72% |
| - лигнит | 97,98%. |

Производња нафте и природног гаса у Србији дата је у Табели 1.4 /27/.

Табела 1.2 Производња угља и учешће Србије и Црне Горе у СФРЈ и СРЈ за 1989. годину /26/

Врста угља	СФРЈ	Србија		Црна Гора		СРЈ	
	10 ⁶ t	10 ⁶ t	%	10 ⁶ t	%	10 ⁶ t	%
Камени	292	132	45,20	-	0	132	45,20
Мрки	12.063	726	6,00	42	0,35	768	6,35
Лигнит	62.276	41.834	66,95	1.769	2,84	43.603	70,00
Укупно	74.631	42.692	57,20	1.811	2,40	44.503	59,63

Табела 1.3: Производња угља у СРЈ (10⁶ t) /26/

	1989.	1990.	1991.
Лигнит	43.603	44.718	39.426
Мрки+камени	900	813	812
Укупно	44.503	45.531	40.238

Табела 1.4

Сирова нафта (t)	1.063.153
Природни гас из нафтних лежишта (10 ³ m ³)	214.686
Природни гас из гасних лежишта (10 ³ m ³)	431.299
Сирови газолин (t)	14.052
Пропан (t)	9.389
Бутан (t)	5.636
Изобутан (t)	5.018

Производња електричне енергије (хидро и термо) током последњих двадесетак година дата је на Слици 1.21 /28/. Укупна производња електричне енергије у 1992. години износила је 31.411,4 GWh, од чега је у хидроелектранама произведено 9.836,9 GWh, а у термоелектранама - 21.574,4 GWh. Ближа структура произвођача електричне енергије дата је на Слици 1.22 /28/.



Слика 1.21

Слика 1.22: Структура произвођача електричне енергије (производња је изражена у GWh)

Резерве угља и структура резерви угља дати су у Табели 1.5 (Југославија) и у Табели 1.6 (Србија).

Табела 1.5: Резерве угља у Југославији /29/

Врста угља	Резерве у 10 ⁶ t			
	Билансне	Ванбилансне	Потенцијалне	Укупно
Камени	35	14	27	76
Мрки	1.000	1.063	960	3.023
Мрко-лигнитски	663	91	155	909
Лигнитски	7.884	2.882	10.500	21.266
Укупно	9.582	4.050	11.642	25.274

Табела 1.6: Резерве угља у Србији /29/

Врста угља	Резерве у 10 ⁶ t			
	Билансне	Ванбилансне	Потенцијалне	Геолошке
Камени	28,711	0,985	42,714	72,410
Мрки	43,650	19,983	62,895	126,528
Мрко-лигнитски	430,642	69,937	145,923	646,502
Лигнит	12.942,090	3.262,236	1.206,020	17.410,346
Укупно	13.445,093	3.353,141	1.457,552	18.255,786

Резерве нафте и гаса у Србији дате су у Табели 1.7 /29/.

Табела 1.7

Налазиште	Потенц. резерве	Геолошке резерве		
		Нафта	Природни земни гас	
	10 ⁶ t		Нафтни 10 ⁹ m ³	Суви 10 ⁹ m ³
Банат	195,4	91,8	7,0	37,8
Бачка	54,6	28,8	1,8	5,9
Срем	5,0			
Уже подручје	15,0			

Укупни теоријски хидропотенцијал свих водотокова на територији Републике Србије (рачунајући да се дуж заједничких водотокова са другим републикама потенцијал дели у односу 50% према 50%) по појединим главним водотоковима износи /30/:

Дунав	-	7.520 GWh/год.
Дрина	-	2.915 GWh/год.
Лим	-	1.640 GWh/год.
Увац	-	940 GWh/год.
Морава	-	6.266 GWh/год.
Бели Дрим	-	517 GWh/год.
Остали	-	1.424 GWh/год.
Укупно	-	21.222 GWh/год.

На основу поређења теоријског и коришћеног хидроенергетског потенцијала по водотоковима види се да је досадашња оријентација била на коришћењу водотокова са великим природним потенцијалом. Тако је Дунав искоришћен скоро потпуно, изузев на делу узводно од Новог Сада са 75%, а Увац 53% /30/.

Док производња угља задовољава потребе и грубо се може поистоветити са потрошњом, производња нафте покрива свега око 25% потреба односно потрошње СР Југославије. Слична је ситуација и са земним гасом. У 1989. години потрошња земног гаса износила је $2,97 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, при чему је домаћи удео био $0,89 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ односно 30%.

Литература

1. J.B. Marion: "Energy in perspective", Academic Press, New York, 1974.
2. А.А. Канајев: „Развитие техники тепловых электростанций", Енергија, Лењинград, 1976.
3. W.S. Scheel: "Technische Betriebsstoffe", VEB Verlag, Лајпциг, 1968.
4. P. Patin: Општа енциклопедија Larousse, Вук Караџић, Београд, 1973.
5. J. Bonet: Општа енциклопедија Larousse, Вук Караџић, Београд, 1973.
6. K. Ludvig и др.: "Die Gewinnung der Rohstoffe", O. Spamer, Лајпциг, Берлин, 1964.
7. J. Pellandini: Општа енциклопедија Larousse, Вук Караџић, Београд, 1973.
8. Ch. Starr: "Energy and Power", Scientific American, Вол. 225, 1971.

9. С. Бошковић: „Дугорочни развој енергетике у Југославији“, Нафта, Вол. 28, 1977.
10. Љ. Новаковић: „Угљена материја и њена меливост“, Рударски институт, Београд, 1976.
11. В. Боранић: „Од фосилних горива према новим изворима енергије“, Информативни билтен Нафта, Загреб
12. Schell: Weltenergie – Daten und Fakten, SBS Nummer 3, 1993.
13. G. Ott: "Die Entwicklung des Globale Energie", VGB, No. 5, 1990.
14. G.R. Davis: "Energy for Planet Earth", Scientific American, Vol. 263, No. 3, 1990.
15. M. Meliss: "Regenerative Energiequellen", BWK, Vol. 29, No. 4, 1977.
16. G. Denster: "Rationellere Energieverwendung durh ...", VGB, Vol. 70, 1990.
17. A. King, B. Schneider: "Die Globale Revolution, ein Bericht des Rates des Club of Rome", Spiegel Spezial 2/91, Hamburg, 1991.
18. E.K. Yeager: "Coal in the 21st Century", Energy World, No. 179, 1990.
19. W.J. Jones, R. Wilson: "Energy, Ecology and Environment", Academic Press, New York, 1974.
20. T. Bohn, S. Rath-Nagel: "Entwicklung des Energiebedarfes und Problemen der Energiebedarfsdeckung", Erdol und Kohle, Vol. 29, 1976.
21. ***: "Wasserstof als energiedrager", TNO", Xar, 1975.
22. J.C. Weinberg, H.R. Williams: "Energy from the Sun", Scientific American, Vol. 263, No. 3, 1990.
23. T.D. Swift-Hook: "Prospects for Wind Powers", Energy world, No. 181, 1990.
24. Ј. Булат, Т. Брозовић, Ј. Михаиловић: „Класични извори у СФРЈ и оцена могућности њиховог развоја, Постојеће резерве и оцена могућег развоја производње угљена у Југославији“, Јединствени програм истраживања у енергетици СФРЈ, ЈАЗУ, Загреб, 1977.
25. C. Marchetti: "On Strategies and Fate", Second Status Report of the IASA, Аустрија, 1975.
26. ***: „СРЈ у бројкама“, Статистички завод Југославије, Београд, 1992.
27. ***: Статистички годишњак Србије, Статистички завод Југославије, Београд, 1992.

-
28. ***: Подаци Електропривреде Србије, Београд, 1993.
 29. Х. Пожар: „Класични извори у СФРЈ и оцена могућности њихова развоја, Хидроенергија, Јединствени програм истраживања у енергетици СФРЈ“, ЈАЗУ, Загреб, 1977.
 30. А. Дамњановић, Д. Јевтић: „Хидроенергетски потенцијал Србије“, Саветовање енергетичара, Будва.

2 ГОРИВЕ МАТЕРИЈЕ

2.1 ПОЈАМ ГОРИВА

Гориве материје представљају такве супстанце које сагоревањем - процесом бурног сједињавања са кисеоником, поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађају одређену количину топлоте. За разлику од других материја, које одређеним процесом могу дати неку количину топлоте, горивима у ужем смислу сматрају се само оне које се сагоревају у циљу произвођења топлоте (према Менделејеву). Као таква, горива данас представљају основни извор за добијање топлотне енергије и ушла су у све поре нашег живота. Горива се користе почев од домаћинства преко термоенергетских и термотехничких постројења свих врста (котлова, индустријских и металуршких пећи), клипних мотора са унутрашњим сагоревањем, до млазних и ракетних мотора.

Дефиниција која је дата, на данашњем степену развоја, допуњена је низом захтева, које гориво мора да испуни. Да би једна горива материја могла да се користи као индустријско гориво потребно је /1/:

- да процесом сагоревања производи знатну количину топлоте у кратком временском размаку;
- да се у природи налази у довољним количинама;
- да је експлоатација релативно лака и економична, ако се ради о природним горивима, односно, да је производни поступак технички остварљив и рентабилан, ако је реч о произведеним горивима;
- да у себи не садржи неприхватљиво велику количину негоривих материја - баласта;
- да битно не мења свој састав и особине при складиштењу, транспорту и руковању;
- да је безбедна с обзиром на појаву пожара и експлозије у условима складиштења, транспорта и руковања;
- да је цена произведене количине топлоте економична и прихватљива; и
- да су настали продукти сагоревања безопасни по жива бића и примењене материје.

Идеално гориво, које би задовољило све ове захтеве, нажалост, не постоји: најбоље је оно гориво које у специфичним условима примене даје најбоље резултате испуњавајући више или мање све наведене услове.

2.2 ВРСТЕ ГОРИВА

Данашњи велики број врста горива јавља се као последица чињенице да се природна горива, каква се добијају непосредно по вађењу из земље, прерађују сложеним процесима у циљу добијања квалитетнијих горива, погоднијих и ефикаснијих за специфичне намене коришћења. Као пример може се навести нафта. Она је првобитно прерађивана и коришћена само за добијање петролеја за осветљење. Бензин и мазут, добијени приликом прераде, нису имали примену и сматрани су крајње непотребним и опасним баластом производње. Са конструисањем горјоника, мазут је постао цењено и тражено гориво за индустријске пећи и котлове. Са појавом и развојем клипних мотора, моторних возила и ваздухоплова, почео је да се користи и бензин. Петролеј се користи данас за погон млазних мотора. Тако из нафте добијамо низ драгоцених горива: гориве гасове, гориво за ото моторе (бензин), горива за млазне моторе (петролеј), горива за дизел моторе, горива за ракетне моторе (специјалне фракције) и горива за индустријске пећи и котлове.

Број данас коришћених горива је већи и зато што доскора занемаривана горива могу бити искоришћена, уз већу цену добијања, с обзиром на растућу несташицу енергетских извора.

Табела 2.1

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	ПРИРОДНА ГОРИВА	ПРЕРАЂЕНА ГОРИВА
Чврсто	дрво, тресет, угљеви (лигнит, мрки, камени, антрацит), гориви шкриљци, уљани песак	дрвени угаљ, брикети, полукокс, кокс и др.
Течно	нафта	бензин, петролеум, дизел-моторско гориво, мазут, алкохоли, тер и др.
Гасовито	природни земни гас	рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогас и др.

Општа подела врши се најчешће према њиховом агрегатном стању и према начину добијања. Према агрегатном стању горива се деле на чврста, течна и гасовита, а према начину добијања - на природна и прерађена. Под природним горивима подразумевамо она горива која се налазе у природи и која се могу користити већ после одстрањивања грубих примеса. Прерађена горива добијају се или прерадом природних или процесом у коме учествују и природна и вештачка горива. Општа подела дата је у Табели 2.1.

Код прерађених горива ближа подела обухватила би примарна и секундарна прерађена горива добијена примарним односно секундарним процесима прераде. Тако би бензин, добијен основним процесом прераде нафте, којим се врши само физичко раздвајање нафте на низ продуката, био производ примарне прераде, а бензин добијен поступком крековања (разлагања тежих нафтних деривата на лакше) био би производ секундарне прераде. Бензин добијен из угља, поступком синтезе, био би, аналогно претходном, синтетички бензин.

Течни гасови (бутан) би били продукти примарне прераде, док би синтетички гас, настао деловањем водене паре и ужаленог кокса (састављен из угљенмоноксида и водоника) био синтетички гас.

Поред ове опште поделе, горива се могу разврстати:

- према постојаности на топлоту (топлостостојана и топлонепостојана);
- према карактеру коришћења (енергетска и технолошка горива);
- према запаљивости (самозапаљива и несамозапаљива);
- према примени.

Подела горива према примени је свакако најзначајнија. Док је још пре неколико деценија њихов број био скроман, са развојем науке и технике данас их имамо велики број. Чак и у подручју релативно уске примене разликујемо по неколико врста. Тако, на пример, нашим стандардима предвиђено је седам врста уља за ложење која се користе у пећима (индустријским, металуршким, у домаћинству) и котловима: екстра лако (ЕЛ), лако (Л), средње (СР), тешко (Т), лако специјално (ЛС), тешко металуршко, чак две врсте (ТМ1 и ТМ2). Чак и овако извршена подела има релативан значај: нека наведена горива се на пример могу користити за погон за дизел мотора различите брзоходности.

2.3 САСТАВ ГОРИВА

У циљу упознавања и оцене могућности примене једног горива потребно је испитати и детаљно упознати његов састав и особине, као и количину топлоте која се његовим сагоревањем ослободи. Истовремено, на основу познатог састава и осталих карактеристика горива врши се провера и контрола постројења или уређаја у коме се гориво користи. Испитивања горива врше се зато у правцу истраживања његовог елементарног састава и одређивања битних својстава за његово рационално коришћење у одговарајућем постројењу. Састав горива одређује се такозваном елементарном анализом, а особине, важне за примену - техничком анализом. Састав чврстих и течних горива изражава се у масеним, а гасовитих у запреминским процентима. У општем случају горива се састоје из горивог дела и баласта - негоривог дела.

2.3.1 ЕЛЕМЕНТАРНИ САСТАВ

Елементарни састав једног горива не омогућава да се о њему донесе потпун суд без осталих карактеристика - података техничке анализе. Међутим, на основу познатог елементарног састава може се прорачунати низ података: потребна количина ваздуха за потпуно сагоревање, топлотна моћ горива, количина и састав продуката сагоревања и температура сагоревања.

У састав било ког горива, у општем случају, улазе три горива елемента - угљеник, водоник и сумпор, као примесе кисеоник и азот, и баласт: минералне примесе и вода. Минералне примесе и вода нису елементи, али се условно узимају у елементарној анализи и чине такозвани спољни баласт. На основу овога, може се написати састав горива у општем облику:

$$g_C + g_H + g_S + g_O + g_N + g_W + g_A = 1$$

где са g обележавамо масено учешће појединих елемената у гориву, а C , H , S , O , N , W , A представљају симболе за угљеник, водоник, сумпор, кисеоник, азот, воду и минералне примесе); или у облику:

$$C + H + S + O + N + W + A = 100, \quad \%$$

где са истим симболима изражавамо процентуални састав*.

* Напомена: Симбол W потиче из енглеског, немачког језика (*Wasser*, *water*), а A - из енглеског, немачког језика (*Asche*, *ash*).

Овакав елементарни састав је општи и важи за сва горива. Зависно од врсте горива он се мења: у гасовитим горивима не постоје минералне примесе, а и у већини течних горива, минералних примеса практично нема, док их код чврстих горива увек има. У даљем тексту биће изложене основне особине појединих састојака горива.

2.3.1.1 Угљеник

Угљеник чини најважнију компоненту горива с једне стране што га у гориву има највише, а с друге стране што његовим сагоревањем настаје и највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа. Угљеник се у горивима налази и у слободном стању и везан; он улази у састав сложених органских једињења везан са водоником, кисеоником, азотом и сумпором (Слика 2.1 /2/). Сагоревањем једног килограма угљеника ослобађа се количина топлоте од 33,829 MJ. Максимална температура сагоревања угљеника из горива рачуната без топлотних губитака износи 2240°C.

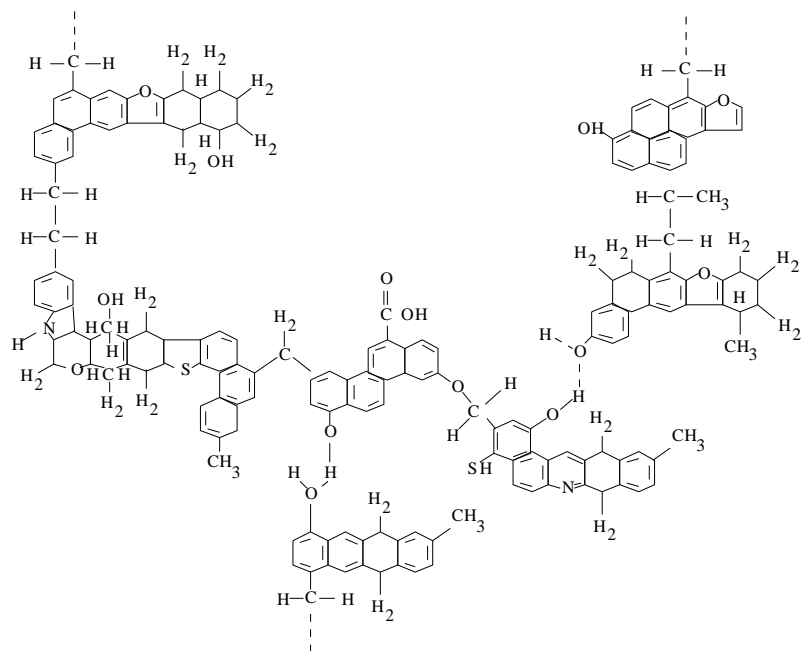
Просечне заокружене вредности садржаја угљеника у различитим горивима дате су у Табели 2.2.

2.3.1.2 Водоник

Водоник представља другу по важности гориву компоненту. Као и угљеник, потиче из праматерије, из које је гориво настало. Водоник се у горивима јавља везан код чврстих, течних и гасовитих, и чист, у мешавини са другим горивим компонентама, у гасовитим горивима. При сагоревању једног килограма водоника развија се чак 142,014 MJ или 4,2 пута више од одговарајуће количине топлоте код угљеника. Зато количина топлоте, која се ослобађа потпуним сагоревањем јединице масе горива расте са повећањем садржаја водоника у њему. Максимална температура сагоревања водоника, рачуната без топлотних губитака, износи 2235°C.

2.3.1.3 Кисеоник

Кисеоник није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање. У горивима се јавља везан са другим елементима, сем у гасовитим, где га налазимо у слободном стању (у мањим количинама). Количина кисеоника у гориву смањује потребну количину кисеоника из ваздуха неопходну за његово сагоревање (код алкохола, на пример). Улази у такозвани унутрашњи баласт, јер заузима место горивим елементима и што у оксидованом стању са угљеником и водоником смањује количину топлоте која се ослобађа сагоревањем. Висок садржај кисеоника налази се у дрвету, тресету и младим мрким угљевима; знатно мањи је код старијих угљева. Код течних горива га практично нема (Табела 2.2).



Слика 2.1: Хийоїейіички модел молекула уҗла

Табела 2.2

ГОРИВО	Садржај		
	C (%)	H (%)	O (%)
дрво	50	6	42
тресет	54-63	6	33
гориви шкриљци	60-70	7-10	12-18
мрки угаљ	60-80	4-6	19-27
камени угаљ	75-90	4-6	2-12
антрацит	92-98	1-3	-
дрвени угаљ	89-95	2-4	-
кокс	96	0,3-1	1-3
полукокс	95-98	2-3	-
бензин	85	15	0
гориво за млазне моторе	86	14	0
дизел гориво	87	13	0
мазут	87-88	11-12	0-0,2
природни земни гас	75	25	0

(проценти се односе на чисту гориву масу - без баласта)

2.3.1.4 Азот

Азот се у горивима јавља у саставу сложених органских једињења. У чврстим и течним горивима га има веома мало (0-2%), док га код гасовитих горива може бити далеко више (нарочито код произведених). У процесу сагоревања горива азот се највећим делом понаша као инертан. Заједно са кисеоником чини такозвани унутрашњи баласт.

2.3.1.5 Сумпор

Сумпор се у горивима јавља у виду горивог и негоривог. Негориви сумпор (у облику сулфата гвожђа, калцијума и др.) током сагоревања прелази у пепео и не утиче на својства горива. Гориви сумпор се јавља као органски (у оквиру сложених органских једињења, меркаптана) и пиритни (сједињен са гвожђем, FeS_2). И поред тога што сагоревањем сумпора настаје одређена количина топлоте ($9,295 \text{ MJ/kg}$) присуство сумпора у горивима је крајње непожељно. И у елементарном стању и у облику једињења, сумпор делује кородивно, а продукти његовог сагоревања су штетни за живи свет. При сагоревању сумпора са вишком ваздуха (већом количином ваздуха од неопходно потребне за потпуно сагоревање) долази до настајања сумпордиоксида и сумпортриоксида (SO_2 и SO_3) који у присуству воде образују сумпорасту и сумпорну киселину (узрок настајања киселих киша).

Количина сумпора у чврстим горивима иде и преко 8%, док је његов садржај код течних до 5%. У гасовитим горивима сумпор је јавља у облику сумпорводоника и сумпордиоксида (H_2S и SO_2).

2.3.1.6 Минералне примесе и пепео

Све врсте горива, осим гасовитих и најлакших фракција прераде нафте, садрже у себи минералне примесе. Оне су штетне из више разлога:

- смањују удео горивих материја у гориву, па на тај начин и количину топлоте која се добија сагоревањем,
- отежавају сагоревање и изазивају губитак горива па тиме и топлоте,
- повећавају трошкове одржавања постројења и смањују његов век трајања, и
- повећавају трошкове транспорта горива.

Садржај минералних материја у горивима се мења у широким границама: од неколико процената код тежих течних горива, до неколико десетина процената код чврстих горива (дрво - 1-2%, угљеви - око 30%, гориви шкриљци - до 90%). Даљи ток излагања односиће се на минералне примесе у чврстим горивима.

Минералне примесе састоје се из:

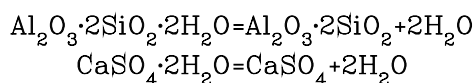
- примарних, образованих још у праматерији, од које је гориво настало (углавном соли алкалних и земноалкалних метала - калијума, калцијума, натријума и магнезијума) - и нанесених водом или ветром, које су се таложиле заједно са растињем. Ове минералне материје су мање - више равномерно распоређене у гориву и не могу се процесима оплемењивања одстранити. Често се зато називају и везане минералне материје.;
- секундарних; које су у гориво доспеле током његовог настајања;
- терцијарних, грубих механичких нечистоћа, које су у гориво доспеле у условима његовог вађења и у транспорту.

Испитивањима је утврђено да се 95-98% свих минералних материја састоји из:

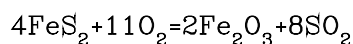
- силиката, у основи из алуминосиликата (глине и шкриљци);
- сулфида, од којих преовлађује сулфид гвожђа - пирит (FeS_2); и
- карбоната калцијума, магнезијума и донекле гвожђа.

У процесу сагоревања минералне примесе трпе низ сложених промена - разлажу се и делимично оксидишу стварајући остатак, који се и квалитативно и квантитативно разликује од полазне материје - пепео. Основне промене могу се представити на следећи начин:

- алуминосиликати и гипс губе кристалну воду:

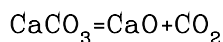


- пирит сагорева према:



При овом процесу у пепелу остаје само оксид гвожђа, чија је маса приближно једнака 2/3 првобитне количине пирита.;

- карбонати се потпуно разлажу, на температурама изнад 600°C , уз издајање угљендиоксида:



Тако у саставу пепела налазимо низ оксида: калцијума (CaO), магнезијума (MgO), натријума (Na_2O), калијума (K_2O), силицијума (SiO_2), гвожђа (FeO , Fe_2O_3), алуминијума (Al_2O_3) и других.

Пепео, значи, представља смешу оксида минералних материја, који остају после потпуног процеса сагоревања свих горивих материја из горива и после завршетка свих трансформација минералних материја, које се дешавају на повишеним температурама.

За примену једног горива, поред количине минералних материја односно пепела, битан је и његов састав. На повишеним температурама пепео омекшава, а у извесним случајевима се, зависно од састава, и топи. У оваквом стању пепео се лепи на грејне површине ложигта и котла ометајући предвиђену размену топлоте. С те стране гледишта, на повишеним температурама су отпорни оксиди алуминијума и силицијума (Al_2O_3 и SiO_2), док оксиди гвожђа, магнезијума, калцијума (FeO , Fe_2O_3 , CaO , MgO) и др. - нису.

Даље разматрање погодности, испитивања и оцене понашања пепела на повишеним температурама разматраће се у одељку о чврстим горивима.

2.3.1.7 Влага

Заједно са минералним материјама влага чини тзв. спољни баласт или баласт уопште, и као таква је непожељна. Она умањује топлотну моћ горива, јер се на њено испаравање троши се део топлоте настао сагоревањем горивих компоненти горива. Снижава температуру продуката сагоревања, а повећава трошкове транспорта. Она може бити и пожељна: при брикетирању омогућава, у одређеној количини лакше слепљивање комадића угља. Потиче из праматерије али ипак највећим делом доспева у гориво квашењем. Влага се јавља углавном у чврстим горивима - до 80% је има код тресета, до 60% код угљева. У течним горивима се јавља само у тежим фракцијама добијеним прерадом нафте - мазуту, где се дозвољава садржај, заједно са минералним примесама, до 2%.

Влага се у чврстим горивима јавља у три вида: као груба, хигроскопска и конституциона.

Груба влага (спољашња, површинска, слободна) резултат је квашења горива влагом из спољне средине при добијању, транспорту и складиштењу горива (Слика 2.2). Хигроскопска влага (унутрашња, капиларна) налази се у порама чврстог горива. Конституциона влага представља воду у саставу самог горива хемијски везану (минералне материје) - најчешће у облику кристалне воде.

У техничким прорачунима занемарује се садржај конституционе влаге, тако да укупну влагу можемо представити збиром грубе и хигроскопске, сведено на исту масу горива:

$$W_u = W_G + W_H \quad \%$$

где су:

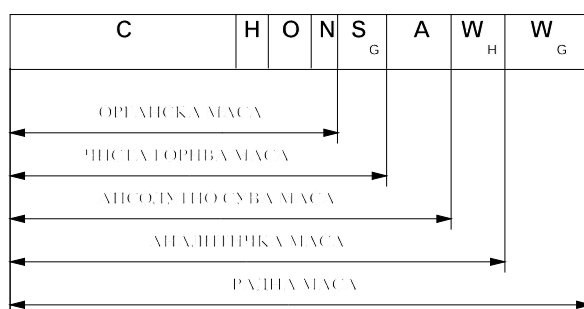
- W_u (%) - укупна влага,
- W_G (%) - груба влага,
- W_H (%) - хигроскопска влага.

Између грубе и хигроскопске влаге нема оштре границе - обе су тачније дефинисане условима свог одређивања.

Слика 2.2: Шематски приказ грубе, хигроскопске и конституционе влаге

2.4 УСЛОВНЕ МАСЕ И ПРЕРАЧУНАВАЊЕ СА ЈЕДНЕ МАСЕ НА ДРУГУ

У зависности од елементарног састава, гориво (углавном чврста горива и тежа уља за ложење) се условно дефинише различитим масама: радном, аналитичком, апсолутно сувом, чистом горивом и органском (Слика 2.3).



Слика 2.3: Шематски приказ условних маса горива

Састав горива, после вађења горива из земље и пречишћавања од грубих механичких нечистоћа одређује радну масу горива. Састав радне масе горива изражен у масеним процентима, може се написати у облику:

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_{Gr} + A_r + W_r = 100, \quad \%$$

$$W_r = W_G + W_{Hr}, \quad \%$$

где W_r (%) представља укупну влагу, једнаку збиру грубе и хигроскопске; а индекс „r“ означава да се састав односи на радну масу горива.

Испитивања састава и других особина чврстих горива не могу се вршити на узорку радне масе горива због променљивог садржаја грубе влаге у зависности од температуре, притиска и влажности ваздуха. Груба влага се зато одстрањује и добијени узорак служи за анализе, па се маса горива без грубе влаге назива аналитичка маса горива, а обележава се индексом „a“. Састав аналитичке масе горива одређен је изразом:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_a + A_a + W_{Ha} = 100, \quad \%$$

Сушењем горива изнад 100°C (обично 105°C) може се у потпуности одстранити влагу из горива. Маса горива из које је одстрањена и груба и хигроскопска влага назива се „апсолутно сува маса горива“ и састав обележава се са индексом „ s “. Састав апсолутно суве масе горива представљен је изразом:

$$C'_s + H'_s + O'_s + N'_s + S'_{Gs} + A'_s = 100, \quad \%$$

Чисту гориву масу чине, као што је познато, угљеник, водоник и сумпор. Познато је такође да је азот инертан а да кисеоник само потпомаже и омогућава процес сагоревања. Како се кисеоник и азот у гориву налазе везани са осталим елементима, укључују се, условно, у чисту гориву масу горива. Састав условне чисте гориве масе дат је једначином:

$$C'_g + H'_g + O'_g + N'_g + S'_{Gg} = 100, \quad \%$$

где индекс „ g “ означава састав чисте гориве масе.

Искључујући сву влагу, минералне примесе и сумпор, добија се „органска маса горива“. Овај састав је такође услован, јер се сумпор налази у гориву и у виду органских једињења. Састав органске масе дат је изразом:

$$C'_o + H'_o + O'_o + N'_o = 100, \quad \%$$

где се индекс „ o “ односи на поменути састав.

У термотехничким и термоенергетским прорачунима користи се састав који се односи на радну масу горива. Прерачунавање састава са једне масе на другу и обрнуто врши се одговарајућим изразима.

За добијање ових израза могу се написати састави горива који се односе на радну и аналитичку масу у облику:

$$C'_a + H'_a + O'_a + N'_a + S'_{Ga} + A'_a + W_{Ha} = 100 \quad (\text{I})$$

$$C'_r + H'_r + O'_r + N'_r + S'_{Gr} + A'_r + W_{Hr} = 100 - W_G \quad (\text{II})$$

Однос збира чланова леве стране једначине I и II, а истовремено и однос било којих одговарајућих чланова леве стране, једнак је односу десних страна једначина I и II. Ако са X_r означи се било која компонента леве стране једначине

I, и са X_a било која компонента једначине II и нађе се њихов однос, добија се израз за прерачунавање састава горива са аналитичке на радну масу:

$$\frac{X_a}{X_r} = \frac{100}{100 - W_G}$$

односно

$$X_r = X_a \frac{100 - W_G}{100}$$

На сличан начин добијају се изрази за прерачунавање састава са аналитичке на апсолутно суву масу :

$$\begin{aligned} C'_a + H'_a + O'_a + N'_a + S'_{Ga} + A'_a &= 100 - W_{Ha} \\ C'_s + H'_s + O'_s + N'_s + S'_{Gs} + A'_s &= 100 \end{aligned}$$

односно

$$\frac{X_a}{X_s} = \frac{100 - W_{Ha}}{100}$$

или коначно

$$X_s = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

Аналогно претходним извођењима добијају се изрази за прерачунавање чисте гориве масе са аналитичке масе и органске масе са аналитичке масе:

$$X'_s = X'_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A'_a}, \quad X'_o = X'_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A'_a - S'_{Ga}}$$

као и међусобни односи између апсолутно суве масе и чисте гориве масе, апсолутно суве масе и органске масе, и органске масе и чисте гориве масе.

2.5 ОПШТА СВОЈСТВА

Особине горива, заједно са елементарним саставом, дефинишу квалитет горива и сврсисходност и ваљаност његове употребе. Неке од ових особина су заједничке за све врсте горива - називају се општим својствима или општим особинама, неке од њих су специфичне за одређену врсту и намену горива.

Од низа специфичних особина разматраће се детаљније код горива само оне, које су од интереса за његову примену. Специфичне особине, као и све остале могу се разврстати на физичке, хемијске и радне или експлоатационе. Радне особине су свакако најважније, али треба водити рачуна да све заједно, укључујући и елементарни састав, омогућују употпуњавање слике о једном гориву. У даљем, ове специфичне особине разматраће се у делу материје која се односи на одговарајућу врсту горива.

Опште особине чине особине заступљене код свих врста горива. То су густина, специфична топлота, коефицијент топлотне проводљивости, количина топлоте која настаје сагоревањем горива - топлотна моћ и друге. Као далеко најважнијој општој особини свих горива - топлотној моћи, биће посвећена посебна пажња.

2.5.1 ТОПЛОТНА МОЋ

2.5.1.1 Значај и дефиниција

Количина топлоте која се ослобађа сагоревањем неког горива и која представља ону неопходну полазну величину за низ прорачуна, представља једну од најзначајнијих карактеристика горива. Ова величина, дефинисана односом настале количине топлоте при потпуном сагоревању и јединице количине горива, од које је топлота добијена, назива се топлотна моћ.

С обзиром на услове у којима се процес сагоревања одвија, разликује се :

- топлотна моћ при константном притиску, и
- топлотна моћ при константној запремини,

а с обзиром на топлотни ниво продуката сагоревања насталих приликом одређивања топлотне моћи:

- горња, и
- доња топлотна моћ.

Топлотна моћ једног горива при константној запремини представља ону количину топлоте коју јединица количине горива ослободи потпуним сагоревањем при константној запремини у прописаним условима испитивања, за разлику од количине топлоте која се ослободи при непромењеном притиску и која се назива топлотном моћи при константном притиску.

Како је разлика између топлотних моћи одеђених при константној запремини и при константном притиску врло мала - мања од грешке која се чини приликом експерименталног одређивања, у техничким прорачунима она се занемарује и не наглашава се под којим је условима одређена.

Стриктна дефиниција горње и доње топлотне моћи гласи:

Горња топлотна моћ је количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- угљеник и сумпор из гориве материје налазе се у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на почетку (20°C); и
- вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и од сагорелог водоника, преведена је у течно стање, што је условљено и претходним условом - хлађењем продуката сагоревања до 20°C .

Доња топлотна моћ представља количину топлоте која се ослободи потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- угљеник и сумпор из горива налазе се у облику својих диоксида (CO_2 и SO_2), док до оксидације азота не долази;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на улазу у процес сагоревања - 20°C ; и
- вода у продуктима сагоревања остаје у парном стању.

Топлотна моћ се обележава словом „ H “: горња са H_g , а доња са H_d , при чему се индекси „ g “ и „ d “ односе на горњу и доњу топлотну моћ. Димензија топлотне моћи проистиче из њене дефиниције - односа количине топлоте и количине материје из које је сагоревањем топлота настала. Топлотна моћ се изражава у kJ/kg или MJ/kg за чврста и течна горива и у kJ/m^3 за гасовита горива. Код течних горива користи се kJ/dm^3 или MJ/dm^3 . Прерачунавање „запреминске“ на „масену“ топлотну моћ врши се помоћу израза:

$$H = \frac{H(\text{kJ/m}^3)}{\rho(\text{kg/m}^3)}, \quad \text{kJ/kg}$$

где је ρ густина течног или гасовитог горива.

За случај сагоревања гориве смеше, која се састоји из више чврстих или течних горива, топлотна моћ смеше израчунава се из суме производа масеног учешћа одговарајуће компоненте из смеше (g_i) и одговарајуће топлотне моћи (H_i)

$$H = \sum_{i=1}^{I=n} g_i H_i$$

изразом:

Поред изражавања топлотне моћи по јединици количине материје горива, у прорачунима се користи и топлотна моћ смеше горива и ваздуха, која се дефинише односом топлотне моћи горива и количине ваздуха и горива:

$$H_g = \frac{H_d}{L}, \quad \text{kJ/kg}$$

где је:

H_g - топлотна моћ смеше горива и ваздуха,

H - топлотна моћ горива,

L - количина ваздуха потребна за сагоревање горива.

Из разлике између горње и доње топлотне моћи, разлике у количини топлоте која се добија ако се вода, настала сагоревањем водоника и испаравањем влаге, преведе из парног у течено стање, односно, која се губи, ако вода, која се налази у продуктима сагоревања остане у парном стању, добија се општа веза између горње и доње топлотне моћи:

$$H_g = H_d + 25(9H + W), \quad \text{kJ/kg}$$

где су:

H - масени проценат водоника у гориву,

W - масени проценат влаге у гориву,

$9H$ - масени проценат воде, настао сагоревањем H процената водоника из горива (Из стехиометријске једначине сагоревања водоника следи да сагоревањем 1 kg водоника са 8 kg кисеоника настаје 9 kg воде. Сагоревањем H процената водоника добија се $9H$ процената воде.),

25 - стоти део топлоте испаравања воде (За испаравање једног килограма воде температуре 20°C и њено превођење у парно стање на атмосферском притиску потребно је око 2450 kJ/kg, а стоти део - 25).

Материје које у себи не садрже водоник и влагу (чист угљеник, на пример) немају горњу и доњу топлотну моћ - обе вредности су међусобно једнаке: $H_g = H_d$.

2.5.1.2 Одређивање топлотне моћи

Топлотна моћ се може одредити експериментално - сагоревањем припремљеног узорка, и рачунски - на основу података елементарне или техничке анализе горива.

2.5.1.2.1 Експериментално одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи експерименталним путем омогућава добијање најтачнијих резултата. За одређивање топлотних моћи користе се специјални уређаји - калориметри. Одређивање топлотних моћи чврстих и течних горива врши се у такозваним калориметрима са бомбом, а гасовитих - у проточним калориметрима. Суштинска разлика између ова два калориметра је, што се у калориметру са бомбом процес сагоревања одвија при константној запремини, па се добија топлотна моћ при константној запремини, а код проточног калориметра - при константном притиску.

Одређивање топлотне моћи у калориметру са бомбом (Слике 2.4 и 2.5) заснива се на потпуном сагоревању одмерене количине горива у атмосфери чистог кисеоника, при повишеном притиску. Количина топлоте настала сагоревањем предаје се околној води. Мерећи масу воде и њен пораст температуре, знајући специфични топлотни капацитет воде, може се, уз одговарајуће поправке због топлотних губитака, одредити настала количина топлоте. Делењем ове количине топлоте са количином горива, од које је ова топлота сагоревањем настала, добија се горња топлотна моћ. Доња топлотна моћ одређује се на основу познате горње топлотне моћи и садржаја водоника и влаге у испитиваном узорку горива.

Одређивање топлотне моћи гасовитих, а ређе и течних горива проточним калориметром, заснива се на истом принципу, с том разликом, што се процес сагоревања одвија са ваздухом и на атмосферском притиску.

2.5.1.2.2 Рачунско одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи рачунским путем врши се из низа познатих података: елементарног састава, техничке анализе, статистичке обраде резултата великог броја мерења, састава горивих компонената у гориву, густине и др.

Одређивање топлотне моћи на бази познатог елементарног састава

Одређивање топлотне моћи на основу података елементарне анализе заснива се на познавању елементарног састава горива и топлотних моћи сваког горивог

елемента. Приликом израде образаца за израчунавање топлотне моћи учињено је неколико претпоставки:

- да је горива материја састављена од елемената - C, H, S, O, N, док је она, најчешће скуп различитих елемената и једињења, и да је њена топлотна моћ једнака збиру количина топлота које се добијају сагоревањем појединих елемената иа састава горива;
- да је сав везани водоник у фосилним чврстим горивима спојен са кисеоником (што није тачно, јер је део кисеоника везан и са угљеником, односно, азотом, а део је и у слободном стању);
- угљеник и сумпор су једини гориви елементи који у састав угља улазе делимично и у слободном стању. Угљеник може бити у различитим видовима (аморфни, графит) чије су топлотне моћи различите, а образац узима једну вредност ове карактеристике. Сумпор, пак, може бити у саставу пирита и сагоревати у SO_2 и SO_3 при чему се добијају различите топлоте;
- угљеник и водоник налазе се, делом, и везани у угљоводоничним једињењима у угљевима, а топлотне моћи су тих једињења различите од количине топлоте које се добијају појединачним сагоревањем ових елемената у слободном стању.

Први израз за израчунавање топлотне моћи дао је француски научник Dulong (Дилон), објављен 1843. године - пет година по његовој смрти /3/, који гласи:

$$H_g = 338,29C + 1444,45\left(H - \frac{O}{8}\right) + 104,67S_g \quad \text{kJ/kg}$$

док се у Русији за израчунавање топлотних моћи користе обрасци Менделјејева (1897. година) /4/:

- за горњу топлотну моћ

$$H_g = 339,13C + 1256H - 108,86(O - S_g), \quad \text{kJ/kg}$$

- за доњу топлотну моћ

$$H_d = 339,13C + 1256H - 108,86(O - S_g) - 25,12(9H + W), \quad \text{kJ/kg}$$

У Европи се углавном користе обрасци Савеза немачких инжењера (Verein Deutsche Ingenieure – VDI образац - 1899. година), који гласе:

- за горњу топлотну моћ

$$H_g = 340C + 1420\left(H - \frac{O}{8}\right) + 93S_g \quad \text{kJ/kg}$$

Слика 2.4: Калориметар са бомбом: 1-калориметарска бомба, 2-водено кувачило, 3-поклоње бомбе, 4-уређај за паљење, 5-термометри, 6-мешалица, 7-водени омивач са двоструким зидовима

Слика 2.5: Калориметарска бомба: 1-посуда за узорак горива, 2-држач посуде за гориво, 3-довод кисеоника, 4-поклопац, 5-извод продуката сагоревања, 6-шело бомбе, 7-поклопац бомбе

- за доњу топлотну моћ

$$H_d = 340C + 1190\left(H - \frac{O}{8}\right) + 93S - 25W, \quad \text{kJ/kg}$$

У свим обрасцима слова представљају састав појединих елемената изражен у масеним процентима. У обрасцу Савеза немачких инжењера цифре представљају заокружене вредности стотих делова топлотне моћи горивих елемената (C, H и S). Обрасци Дилона и Менделејева су емпиријски. У задње време се све више користи образац Воје-а (Боа), добијен статистичком обрадом великог броја резултата експерименталних испитивања. Он гласи, за доњу топлотну моћ:

$$H_d = 350C + 940H + 63N + 100S - 100O - 25W, \quad \text{kJ/kg}$$

За одређене угљеве постоје и изрази за израчунавање топлотне моћи у зависности од удела балоаста - воде и пепела, облика:

$$H = K - K_1(A + W)$$

где су K и K_1 величине (константе) добијене статистичком обрадом великог броја узорака.

Одређивање топлотне моћи угљоводоничних горива на основу познате густине

Топлотна моћ угљоводоничних течних горива може се одредити на основу познате вредности густине горива. Првобитно најчешћи образац:

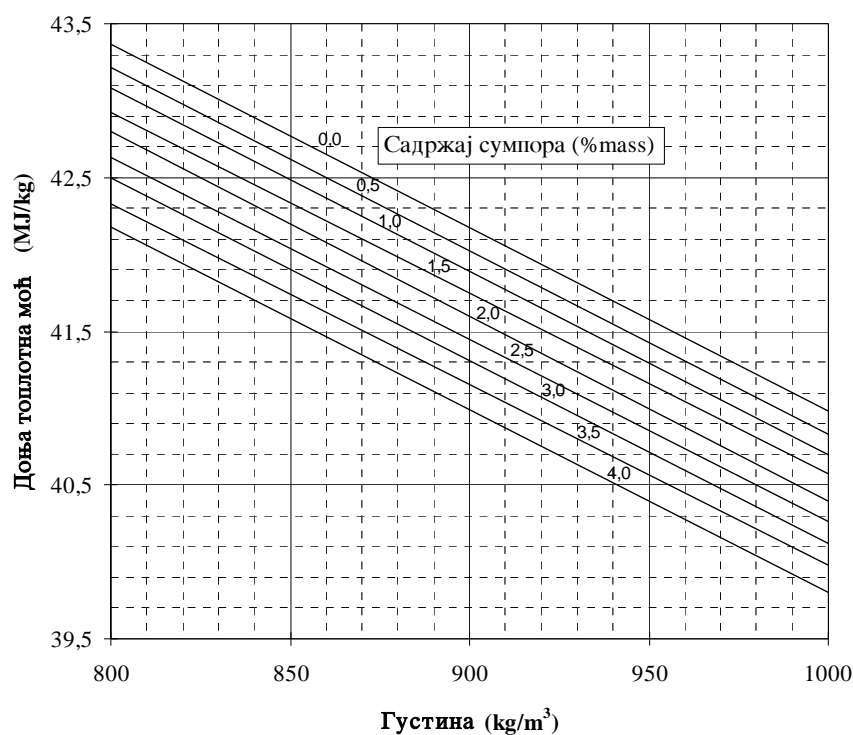
$$H_d = 52,92 - 11,93\rho_{15}, \quad \text{MJ/kg}$$

последњих година коригован је, тако да гласи:

$$H_d = 52,92 - 11,93\rho_{15} - 0,29S \quad \text{MJ/kg}$$

што захтева, да поред познавања густине течног горива (што се релативно лако може одредити) и додатно садржај сумпора. Како је садржај сумпора у моторним бензинима занемарљив, а тенденција у развијеним земљама да се и код дизел горива смањи на 0,05%, може се са задовољавајућом тачношћу користити и први образац. Чак и са 1% сумпора у дизел гориву, колико је максимално дозвољено нашим стандардима, грешка је мала.

У практичној примени користи се дијаграм зависности доње топлотне моћи од густине (Слика 2.6 /5/).



Слика 2.6

Одређивање топлотне моћи на основу познатог састава по горивим компонентама

Овакви обрасци користе се углавном код гасовитих горива, код којих се не одређује елементарни састав већ састав горивих компонента. У општем случају топлотна моћ гасовитих горива одређује се сумом производа запреминског учешћа појединих компонента r_i и одговарајућих топлотних моћи (H_i):

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_i \quad \text{kJ/m}^3$$

или, примењено

- за доњу топлотну моћ

$$107,8H_2+126,2CO+358,7CH_4+594,8C_2H_4+565,1C_2H_2+644,2C_2H_6+928,9C_3H_8+1236,5C_4H_{10}+877,0C_3H_6+1155,8C_4H_8+234,6H_2S, \quad \text{kJ/}$$

- за горњу топлотну моћ

$$H_g=127,5H_2+126,2CO+398,1CH_4+634,2C_2H_4+584,8C_2H_2+\dots, \quad \text{kJ/m}^3$$

Садржај горивих компонената дат је у запреминским процентима, а цифре представљају стоте делове одговарајућих топлотних моћи.

Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу

Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу врши се на основу познатих вредности топлотних моћи (добитијених експериментално или рачунски) и елементарног састава горива. Користећи већ познате изразе за прерачунавање састава горива са једне условне масе на другу, добијају се одговарајући изрази за топлотне моћи. Они ће бити изражени у зависности од топлотних моћи аналитичке масе горива, јер се на овој маси врши анализа горива и експериментално одређивање топлотне моћи:

- за радну масу горива

$$H_{gr}=H_{ga}\frac{100-W_g}{100}, \quad H_{dr}=H_{da}\frac{100-W_g}{100}-25W_g$$

- за апсолутно суву масу горива

$$H_{gs}=H_{ga}\frac{100}{100-W_{Ha}}, \quad H_{ds}=(H_{da}+25W_{Ha})\frac{100}{100-W_{Ha}}$$

- за чисту гориву масу

$$H_{gg}=H_{ga}\frac{100}{100-(W_{Ha}+A_a)}, \quad H_{dg}=(H_{da}+25W_{Ha})\frac{100}{100-(W_{Ha}+A_a)}$$

- за органску масу горива

$$H_{do}=(H_{da}+25W_{Ha})\frac{100}{100-(W_{Ha}+A_a+S_{Ga})}, \quad H_{go}=H_{ga}\frac{100}{100-(W_{Ha}+A_a+S_{Ga})}$$

Топлотне моћи горива

Оријентационе и тачне вредности топлотних моћи важнијих врста горива дате су у Табелама 2.3 и 2.4.

Табела 2.3

Гориво	Ознака	Горња топлотна моћ		Доња топлотна моћ	
		MJ/kg	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/m ³
Водоник	H ₂	141,76	12,75	119,95	10,78
Метан	CH ₄	55,49	39,81	50,00	35,87
Ацетилен	C ₂ H ₂	49,90	58,48	48,22	56,51
Етилен	C ₂ H ₄	50,29	63,42	47,16	59,48
Етан	C ₂ H ₆	51,86	70,37	47,49	64,42
Пропилен	C ₃ H ₆	48,91	93,72	45,77	87,70
Пропан	C ₃ H ₈	50,34	100,88	46,36	92,89
Бутилен	C ₄ H ₈	48,45	123,53	45,31	115,58
n-бутан	C ₄ H ₁₀	49,52	133,87	45,73	123,65
Бензол	C ₆ H ₆	42,26	150,02	40,56	144,04

Табела 2.4

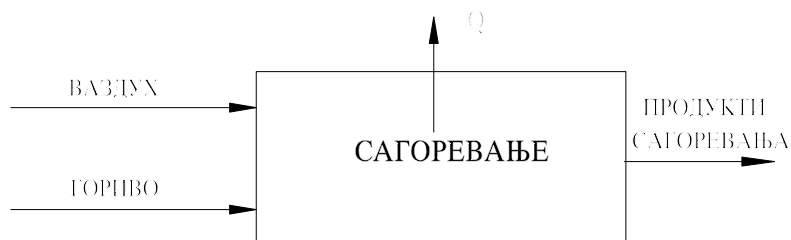
ГОРИВО	Топлотна моћ (MJ/kg)	
	Горња, H_{ga}	Доња, H_{da}
лигнит (домаћи)	13,5-20,0	12,0-18,5
мрки (домаћи)	18,0-22,0	16,0-20,0
камени (домаћи)	20,0-31,0	19,0-30,0
бензин (сред.вред.)	46,05	42,7
дизел гориво (сред.вр.)	44,7	41,8
уља за ложење	42,3-44,8	39,8-42,7

Литература

1. Д. Величковић: „Погонске материје - I део - Термогене материје“, Машински факултет, Београд, 1972.
2. K.G. Saunders: "Microstructural Studies of Chlorine in some British Coals", Journal of the Institute of Energy, Vol. 53, No. 416, pp 109-115, 1980.
3. Б.М.Равич: „Топливо и ефикасност его исполјзованија“, Наука, Москва, 1971.
4. Д.И.Менделејев: „ин Топливо и ефикасност его исполјзованија“, Б.М.Равич, Наука, Москва, 1971.
5. ***: "Techische Arbeitsblätter", Weishaupt, Schwendi

3 ОСНОВИ САГОРЕВАЊА

Као што је познато, сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте. У даљем ће процес сагоревања бити разматран крајње упрошћено: шта улази у процес и шта из њега излази (Слика 3.1). Низ сложених физичко-хемијских процеса у оквиру образовања смеше и сагоревања (распршивање горива, испаравање капи горива, односно, термичко разлагање чврстих горива на гориве испарљиве материје и коксни остатак, мешање са ваздухом и сагоревање) за различита горива (чврста, течна, гасовита) и различите потрошаче (мотор, котло, пећ,...) предмет је изучавања предмета Сагоревање и даље у предметима који се односе на котлове, пећи, моторе и др.

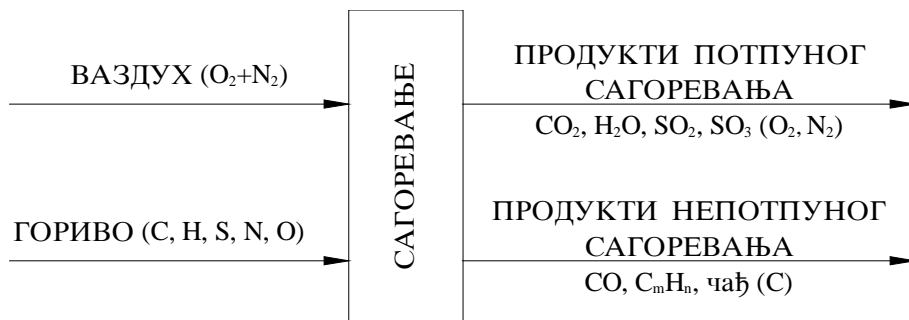


Слика 3.1

За одвијање процеса сагоревања, поред одређеног степена загрејаности горива неопходно је потребна и одређена количина кисеоника. Зависно од количине кисеоника доведене у процес, сагоревање може бити потпуно или непотпуно (Слика 3.2). При потпуном сагоревању, у општем случају, продукте сагоревања чине:

- CO_2 - настао сагоревањем угљеника из горива,
- H_2O - настала сагоревањем водоника из горива,
- SO_2 - настао сагоревањем сумпора из горива,
- N_2 - из ваздуха који се користи за остварење процеса сагоревања и из горива,
- O_2 - кисеоник из ваздуха који се користи за остварење процеса сагоревања.

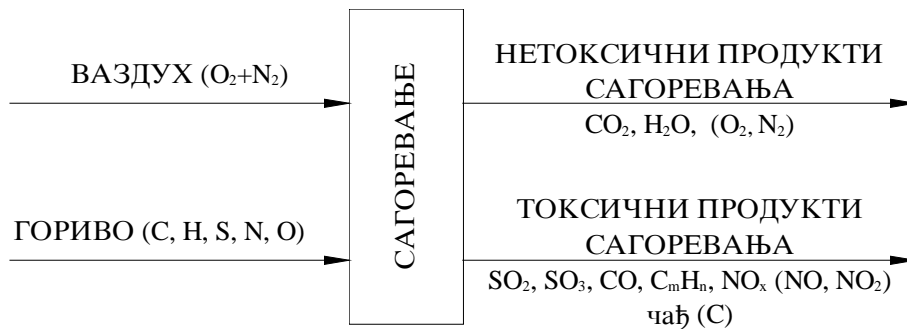
Док угљендиоксид*, водена пара односно вода и сумпордиоксид представљају праве продукте сагоревања, азот и кисеоник чине условне продукте сагоревања.



Слика 3.2

При непотпуном сагоревању, поред продуката потпуног сагоревања налазе се и гориве компоненте, које би, да је сагоревање било потпуно, одале количину топлоте коју садрже. Продукти непотпуног сагоревања су:

- CO - настао непотпуним сагоревањем угљеника из горива,
- C_mH_n - несагорели угљоводоници,
- H_2 - водоник, и
- C - угљеник у чађи, пепелу и др.



Слика 3.3

* Напомена: И поред тога што је CO_2 нетоксичан гас, треба водити рачуна да је он један од главних узрочника настајања ефекта „стаклене башије“ - загревања планете Земље.

Теоријски посматрано сагоревање ће бити увек потпуно, ако је количина кисеоника, доведена у процес већа или најмање једнака теоријској количини кисеоника за потпуно сагоревање и обрнуто: сагоревање ће бити увек непотпуно, ако је количина кисеоника која учествује у процесу сагоревања мања од теоријске. Потпуним сагоревањем ослобађа се укупна, максимална количина топлоте, садржана у гориву, док при непотпуном постоје увек одређени губици.

Процес сагоревања може бити савршен и несавршен. И поред обезбеђивања довољне количине кисеоника за потпуно сагоревање и веће од теоријске, у продуктима сагоревања налазе се несгореле компоненте горива - услед несавршености процеса.

Зависно од агрегатног стања компонената које учествују у процесу (горива и оксидатора - најчешће ваздух) сагоревање може бити хомогено, ако су гориво и ваздух у истом агрегатном стању (пример сагоревања гасовитих горива) и хетерогено, ако су гориво и ваздух у различитим агрегатним стањима (пример сагоревања чврстог горива - угаљ).

3.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ САГОРЕВАЊА

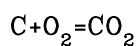
Једначине које дају:

- у којим се међусобним односима једине угљеник, водоник и сумпор са кисеоником,
- колика је теоријска количина кисеоника, односно, ваздуха потребна за потпуно сагоревање,
- која количина продуката сагоревања настаје, као и
- која количина топлоте се том приликом ослобађа,

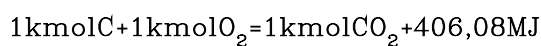
називају се стехиометријске једначине сагоревања. Ове једначине, написане за све гориве елементе, истовремено омогућавају одговарајући прорачун за било које реално гориво. Приликом даљег разматрања, треба водити рачуна да је процес сагоревања крајње сложен и да, како даље следи, стехиометријске једначине сагоревања дају само почетне и крајње компоненте не улазећи у компликовани механизам реакција које се одвијају између компонената између почетног и крајњег стања.

3.1.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

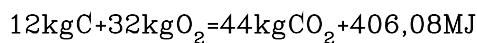
Реакција потпуног сагоревања угљеника може се изразити једначином:



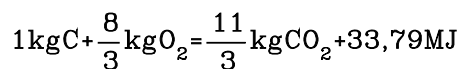
Узимајући за јединицу количине 1 kmol, добија се:



односно

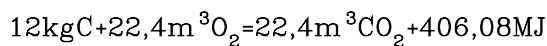


или

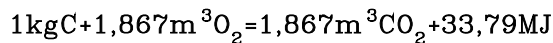


Горња једначина представља класичну стехиометријску једначину: за потпуно сагоревање једног килограма угљеника неопходно је потребна количина од 8/3 kg кисеоника, при том настаје 11/3 kg угљендиоксида и развија се количина топлоте од 33,79 MJ.

Она се може, зависно од начина изражавања представити и на следећи начин:



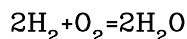
или



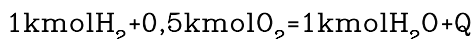
То значи да, аналогно претходном ставу, један килограм угљеника при потпуном сагоревању троши 1,867 кубних метара кисеоника, као резултат процеса настаје 1,867 кубних метара угљендиоксида и количина топлоте од 33,79 MJ.

3.1.2 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА ВОДОНИКА

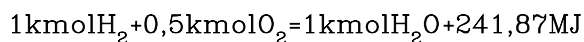
Реакцију потпуног сагоревања водоника изражава се једначином:



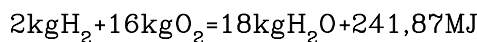
Узимајући, као и раније, за јединицу количине 1 kmol добија се:



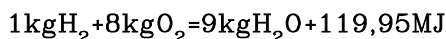
Количина топлоте Q која настаје сагоревањем једног килограма водоника може имати две вредности, зависно од тога да ли је вода охлађена на околну температуру или остаје у парном стању. За случај када се водена пара налази у парном стању добија се нешто мања количина топлоте која износи 241,87 MJ/kmol, па горња једначина гласи:



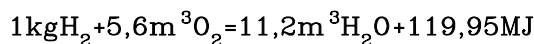
или



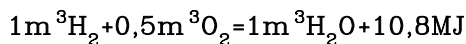
Напомена: Количина топлоте настала сагоревањем 1 kg водоника није једнака половини вредности 241,87 MJ, јер је тачна вредност молекулске масе водоника 2,016, а не 2, како је у једначинама, због једноставности писано. Стехиометријска једначина сагоревања водоника гласиће, онда:



Стехиометријска једначина сагоревања водоника може се написати и на следећи начин:

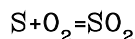


или

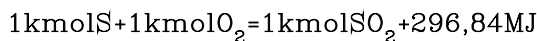


3.1.3 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА СУМПОРА

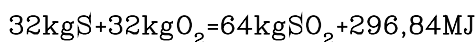
Реакција потпуног сагоревања сумпора гласи:



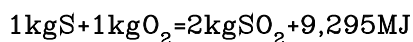
односно



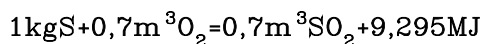
или



Стехиометријска једначина сагоревања јединице масе сумпора, коначно, гласи:

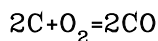


или

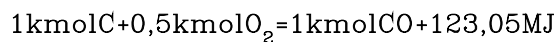


3.1.4 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА НЕПОТПУНОГ САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

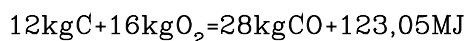
У случају када је количина кисеоника, која се налази у простору у коме се процес сагоревања одвија, недовољна за потпуно остварење процеса, настаје непотпуно сагоревање, којом приликом, код реалних горива, настаје увек угљенмоноксид. Том приликом део топлоте се губи, па је утврђивање услова у којима до ове појаве долази и њено спречавање изузетно важно. Непотпуно сагоревање угљеника може се представити једначином:



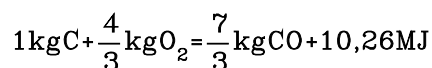
односно, даљим развијањем горњег израза,



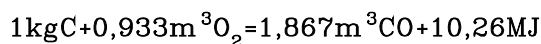
или



За јединицу масе добија се коначно:



или

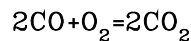


Поређењем количина топлота насталих при потпуном и непотпуном сагоревању угљеника (33,79 MJ при потпуном и 10,26 MJ при непотпуном) уочава се важност остваривања што потпунијег сагоревања - губитак при непотпуном сагоревању угљеника у угљенмоноксид уместо у угљендиоксид износи више од две трећине количине топлоте настале потпуним сагоревањем.

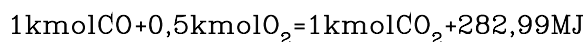
Угљенмоноксид, као токсична компонента, представља један од састојака који загађују атмосферу, па и по овом критеријуму његово настајање је крајње непожељно и треба га свести на минимум. Количина угљенмоноксида, која се јавља код различитих трошила (мотора, на пример) је ограничена и прописима за заштиту околине.

3.1.5 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНМОНОКСИДА

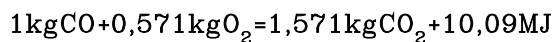
Сагоревање угљенмоноксида може се представити реакцијом:



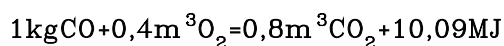
односно



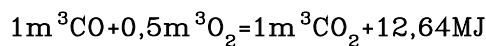
Даљим сређивањем добија се, аналогно претходним извођењима:



или



или



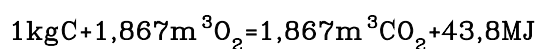
3.1.6 ХЕСОВ ЗАКОН

Количина топлоте која се добије или утроши током одређене термехемијске реакције не зависи од пута одвијања реакције, већ само од почетног и крајњег стања.

Hess-ов (Хес) закон може се доказати на примеру сагоревања угљеника: то значи да ће се приликом сагоревања угљеника у угљенмоноксид, а затим догоревања угљенмоноксида у угљендиоксид добити иста количина топлоте, као и при непосредном сагоревању угљеника у угљендиоксид.

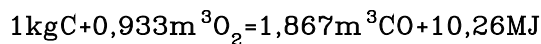
Доказ

Директним сагоревањем угљеника (C) у угљендиоксид (CO₂) према :

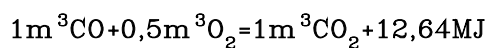


добија се 43,8 MJ.

Из одељка 3.1.4 следи да:



а из 3.1.5:



Како сагоревањем 1 kg угљеника настаје 1,867 m³ угљенмоноксида, следи:

$$10,26 + 1,867 \cdot 12,64 = 33,8 \text{ MJ}$$

чиме је Хесов закон доказан.

3.2 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА

Приликом пројектовања било ког топлотног уређаја, избора опреме за њега, његовог испитивања, контроле и оцене, потребно је извршити одговарајући прорачун. Величине које се том приликом користе су потребна количина ваздуха односно кисеоника за потпуно сагоревање, количина и састав продуката сагоревања и температуре сагоревања.

При пројектовању и избору опреме прорачун процеса сагоревања врши се на основу познатих података о гориву - података елементарне и техничке анализе горива и података из стехиометријских једначина сагоревања, уз коришћење постојећих сазнања и искустава.

При испитивању, оцени и контроли уређаја прорачун процеса сагоревања врши се на основу измереног састава продуката сагоревања.

3.2.1 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА САГОРЕВАЊА НА БАЗИ ПОЗНАТОГ САСТАВА ГОРИВА

На бази познатог састава горива израчунавају се теоријска количина кисеоника односно ваздуха, стварна количина ваздуха, количина и састав продуката сагоревања и температура сагоревања.

3.2.1.1 Одређивање теоријске количине кисеоника за потпуно сагоревање

Теоријска количина кисеоника представља најмању неопходну количину кисеоника за потпуно сагоревање свих горивих елемената горива. Теоријска количина кисеоника обележава се са O_{\min} и изражава се у (kg/kg) или (m³/kg) за чврста и течна горива, а у (m³/m³) за гасовита горива.

Теоријска количина кисеоника једног реалног горива израчунава се на основу познатог елементарног састава горива и теоријских количина кисеоника за потпуно сагоревање свих горивих елемената. Ове теоријске количине кисеоника за све гориве елементе: угљеник, водоник и сумпор дате су другим члановима изведених стехиометријских једначина сагоревања и износе:

- за угљеник

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 8/3 \quad \text{kg/kg} \\ O_{\min} &= 1,867 \quad \text{m}^3/\text{kg}, \end{aligned}$$

- за водоник

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 8 \quad \text{kg/kg} \\ O_{\min} &= 5,6 \quad \text{m}^3/\text{kg} \\ O_{\min} &= 0,5 \quad \text{m}^3/\text{m}^3, \end{aligned}$$

- за сумпор

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 1 \quad \text{kg/kg} \\ O_{\min} &= 0,7 \quad \text{m}^3/\text{kg}, \end{aligned}$$

3.2.1.1.1 Одређивање теоријске количине кисеоника за чврста горива

Ако се елементарни састав горива обележи са:

$$\begin{aligned} g_C &= C/100 & - & \text{ масено учешће угљеника,} \\ g_H &= H/100 & - & \text{ масено учешће водоника,} \\ g_S &= S/100 & - & \text{ масено учешће сумпора,} \\ g_O &= O/100 & - & \text{ масено учешће кисеоника,} \\ g_N &= N/100 & - & \text{ масено учешће азота,} \\ g_W &= W/100 & - & \text{ масено учешће влаге,} \\ g_A &= A/100 & - & \text{ масено учешће пепела (минералних примеса),} \end{aligned}$$

при чему је:

$$g_C + g_H + g_S + g_O + g_N + g_W + g_A = 1,0$$

односно

$$C + H + S + O + N + W + A = 100\%$$

онда се теоријска количина кисеоника израчунава према обрасцу:

$$O_{\min} = O_{\min_C} g_C + O_{\min_H} g_H + O_{\min_S} g_S - g_O$$

Као што се може уочити теоријска количина кисеоника добија се из збира производа теоријских количина кисеоника за сваки гориви елемент и масеног учешћа истог елемента у гориву, умањеног за количину кисеоника у самом гориву, која се може искористити у процесу сагоревања.

После замене одговарајућих вредности O_{\min} добија се:

$$O_{\min} = \frac{8}{3} g_C + 8 g_H + g_S - g_O, \quad \text{kg/kg}$$

односно:

$$V_1 = 1,867 g_C + 5,6 g_H + 0,7 g_S - 0,7 g_O = 1,867 g_C + 5,6 \left(g_H - \frac{g_O}{8} \right) + 0,7 g_S \quad \text{m}^3,$$

3.2.1.1.2 Одређивање теоријске количине кисеоника за течна горива

Одређивање теоријске количине кисеоника врши се на исти начин, истим обрасцима као и за чврста горива, ако је познат њихов елементарни састав. Уколико је, међутим, течна гориво дефинисано општим изразом за угљоводонична горива облика $C_m H_n$, онда постоје две могућности:

- или да се из односа угљеникових и водоникових атома одреди елементарни састав, па да се рачуна према обрасцима за чврста горива,
- или да се користе одговарајући обрасци за овај тип горива.

При сагоревању било ког угљоводоника, облика $C_m H_n$, долази до сједињавања сваког атома угљеника са једним молекулом кисеоника и свака два молекула водоника са молекулом кисеоника, стварајући један молекул CO_2 и два молекула H_2O . То значи да ће при сагоревању

m атома угљеника бити потребно m молекула кисеоника, и

n атома водоника бити потребно $(n/2 * 2)$ молекула кисеоника.

Укупна потребна количина кисеоника биће:

$$\begin{aligned} O_{\min} &= m + \frac{n}{4} && \text{kmol/kmol} \\ O_{\min} &= \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) 22,4}{12m + n} && \text{m}^3/\text{kg} \\ O_{\min} &= \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) 32}{12m + n} && \text{kg/kg}, \end{aligned}$$

где су:

m - број атома угљеника, а

n - број атома водоника у гориву типа C_mH_n .

За течно гориво састављено из више угљоводоника израчунава се или просечна вредност m и n , или се O_{\min} израчунава према

$$O_{\min} = 22,4 \sum_{i=1}^k \frac{\left(m_i + \frac{n_i}{4}\right)}{12m_i + n_i}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

За течна горива облика $C_mH_nO_o$ (алкохоли, на пример) теоријска количина кисеоника се израчунава према сличним обрасцима:

$$O_{\min} = \frac{\left(m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}\right) 22,4}{12m + n + 16o}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

односно

$$O_{\min} = \frac{\left(m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}\right) 32}{12m + n + 16o}, \quad \text{kg/kg}$$

где је:

o - број атома кисеоника у изразу за гориво типа $C_mH_nO_o$.

3.2.1.1.3 Одређивање теоријске количине кисеоника за гасовита горива

Теоријска количина кисеоника одређује се на основу познатог састава по компонентама. Узимајући да се гасовита горива састоје у општем случају из угљенмоноксида, водоника и гасовитих угљоводоника (метана CH_4 , етана C_2H_6 , пропана C_3H_8 , бутана C_4H_{10} и др.) и обележавајући запреминско учешће појединих компонената са r , теоријска количина кисеоника израчунава се према изразу:

$$O_{\min} = 0,5(r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2}) + \sum_{i=1}^k \left(m_i + \frac{n_i}{4} \right) r_i - r_{\text{O}_2}, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

где су:

- m_i - број атома угљеника у угљоводоничним компонентама
 n_i - број атома водоника у угљоводоничним компонената.

3.2.1.2 Одређивање теоријске количине ваздуха

Како се готово у свим постројењима за сагоревање користи кисеоник из ваздуха од интереса је, свакако, да се одреди теоријска количина ваздуха у којој ће се садржавати теоријска количина кисеоника. Поред значаја ове величине за остварење потпуног процеса сагоревања, она је полазна величина за избор одговарајуће опреме: вентилатора, предгрејача ваздуха и др.

Теоријска количина ваздуха израчунава се на основу познате теоријске количине кисеоника и учешћа кисеоника у ваздуху. Ова величина обележава се са L_{\min} и одређује се према:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}(\text{kg/kg})}{0,232} \quad \text{kg/kg}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}(\text{m}^3/\text{kg})}{0,21} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}(\text{m}^3/\text{m}^3)}{0,21} \quad \text{m}^3/\text{m}^3,$$

где су 0,232 и 0,21 заокружене вредности масеног и запреминског учешћа кисеоника у ваздуху.

Како се у ваздуху налази увек већа или мања количина влаге (водене паре) потребно је, у циљу тачнијег прорачуна, добијену вредност за теоријску количину ваздуха за потпуно сагоревање умножити фактором:

$$l = \frac{\varphi p_s}{p - p_s} + 1$$

где су:

- φ (%) - релативна влажност ваздуха
- p - апсолутни притисак ваздуха
- p_s - апсолутни притисак засићене паре на температури влажног ваздуха.

Често се за приближно израчунавање теоријске количине ваздуха користе обрасци Rosin-а (Розина) и Fehling-а (Фелинга) /38/ који, зависно од врсте горива, гласе:

- за чврста природна горива

$$L_{\min} = \frac{0,241 H_d (\text{kJ/kg})}{1000} + 0,5, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за течна горива

$$L_{\min} = \frac{0,203 H_d (\text{kJ/kg})}{1000} + 2,0, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за слабе гасове ($H_d < 12.500 \text{ kJ/m}^3$)

$$L_{\min} = \frac{0,209 H_d (\text{kJ/m}^3)}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

- за јаке гасове ($H_d > 12.500 \text{ kJ/m}^3$)

$$L_{\min} = \frac{0,260 H_d (\text{kJ/m}^3)}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

3.2.1.3 Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха

Како одвијање и потпуност процеса сагоревања у знатној мери зависе од услова и квалитета образовања смеше горива и ваздуха, теоријска количина кисеоника односно ваздуха није у стању да обезбеди потпуност сагоревања. Ова теоријска количина ваздуха може бити довољна за обезбеђивање потпуног сагоревања гасовитих горива само при идеалним условима. При сагоревању чврстих и течних горива, а не ретко и гасовитих, услови образовања смеше су далеко од идеалних. Због тога се у простор у коме се процес сагоревања одвија доводи нешто већа количина ваздуха у односу на прорачунату, теоријску. Ова величина назива се стварна количина ваздуха и обележава се са L . Између стварне и теоријске количине ваздуха може се, зависно од начина изражавања, успоставити веза:

$$L = \lambda L_{\min}, \quad \text{kg/kg, m}^3/\text{kg, m}^3/\text{m}^3$$

Константа сразмерности λ назива се коефицијент вишка ваздуха. Из горњег израза се и дефинише коефицијент вишка ваздуха:

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}}$$

Ако се са G обележи јединична маса горива, онда ће концентрација горива у горивој смеси $(G + L)$ за вредност коефицијента вишка ваздуха једнаким 1, бити:

$$c_G = \frac{G}{G + L_{\min}} 100, \quad \%$$

а за случај $\lambda \neq 1$, биће:

$$c_G = \frac{G}{G + \lambda L_{\min}} 100, \quad \%$$

За случај када коефицијент вишка ваздуха има вредност 1, стварна количина ваздуха једнака је теоријској количини: ова смеша горива и ваздуха назива се стехиометријска смеша. Када је коефицијент вишка ваздуха већи од 1, концентрација горива у смеси биће мања у односу на стехиометријску, па се зато ова смеша назива „сиромашна“. Када је пак коефицијент вишка ваздуха мањи од 1, концентрација горива у смеси биће већа у односу на стехиометријску, па је смеша „богата“.

Економично сагоревање постиже се при оптималним вредностима коефицијента вишка ваздуха, које су одређене врстом горива, начином његовог сагоревања и

врстом ложишта. Оптималне вредности коефицијента вишка ваздуха за ложишта крећу се у границама 1,05-1,5. Економично сагоревање природних гасовитих горива и мазута могуће је при малим вредностима коефицијента вишка ваздуха ($\Pi = 1,05 - 1,15$), јер се може успешно организовати добро образовање смеше. Насупрот овом, нарочито тешко је обезбедити сагоревање чврстог горива - угља у слоју, којом приликом коефицијент вишка ваздуха достиже вредност 1,4-1,5. При сагоревању угља у лету, када је угаљ фино самлевен на величину од неколико десетина до неколико стотина микрометара, вредност коефицијента вишка ваздуха креће се у границама 1,2-1,25. И поред тога што се сагоревањем са коефицијентом вишка ваздуха мањим од 1 губи део топлоте, код ото мотора са унутрашњим сагоревањем је при $\lambda = 0,85 - 0,9$ највећа брзина сагоревања, па према томе и највећа снага. При раду са коефицијентом вишка ваздуха 1,05-1,10 (сиромашна смеша) брзина сагоревања је мања, смањује се и снага мотора, али расте економичност.

Стварна количина ваздуха може се, на основу статистичке обраде великог броја података, утврдити и приближним путем. Према Боа [1] зависно од врсте горива, изрази за стварну количину ваздуха гласе:

- за чврста горива

$$L = 241,2\lambda \frac{H_d + 2,45(1 - g_d)}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за уља за ложење

$$L = 2957\lambda \frac{H_d - 4,60}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за природни земни гас

$$L = 261\lambda \frac{H_d - 0,63}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

У обрасцима Боа треба вредности топлотне моћи заменити у MJ/kg за чврста и течна горива, а у MJ/m^3 за гасовита горива.

3.2.1.4 Количина и састава продуката сагоревања

Подаци о количини и саставу продуката сагоревања заједно са теоријском количином ваздуха дају низ података како за избор опреме, тако и за одређивање температуре сагоревања, топлотних губитака са димним или издувним гасовима, потпуности процеса сагоревања, за састављање термичког прорачуна и др.

У условима потпуног сагоревања када је $\lambda \geq 1$ у општем случају у продуктима сагоревања налазе се CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 и чврст несагориви остатак - пепео.

3.2.1.4.1 Продукти сагоревања чврстих горива при $\lambda > 1$

Израчунавање продуката сагоревања врши се на основу познатог елементарног састава горива и стехиометријских једначина сагоревања. За чврста горива биће:

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= 1,867 g_C & \text{m}^3/\text{kg} \\ V_{\text{H}_2\text{O}} &= 11,2 g_H + 1,24 (g_W + g_{WI}) & \text{m}^3/\text{kg}, \end{aligned}$$

јер се у продуктима сагоревања поред воде настале сагоревањем водоника налази и вода која потиче из горива (влага) - g_W и вода из ваздуха (услед његове влажности) - g_{WI} .

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 g_S \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

или

$$\begin{aligned} G_{\text{CO}_2} &= \frac{11}{3} g_C & \text{kg/kg} \\ G_{\text{H}_2\text{O}} &= 9 g_H + g_W + g_{WI} & \text{kg/kg} \\ G_{\text{SO}_2} &= 2 g_S & \text{kg/kg}, \end{aligned}$$

Поред „правих“ продуката сагоревања CO_2 , H_2O и SO_2 у продуктима сагоревања налази се и азот, из ваздуха који је учествовао у процесу, и кисеоник, ако је коефицијент вишка ваздуха већи од 1.

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2} &= 0,79L + 0,8 g_N, & \text{m}^3/\text{kg} \\ V_{\text{O}_2} &= 0,21(L - L_{\min}) = 0,21(\lambda - 1)L_{\min}, & \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

где други члан представља азот из састава горива, односно

$$\begin{aligned} G_{\text{N}_2} &= 0,77L + g_N, & \text{kg/kg} \\ G_{\text{O}_2} &= 0,23(L - L_{\min}) = 0,23(\lambda - 1)L_{\min}, & \text{kg/kg} \end{aligned}$$

3.2.1.4.2 Продукти сагоревања течних горива при $\lambda > 1$

Одређивање продуката сагоревања течних горива врши се:

- или на исти начин као код чврстих горива, ако је познат елементарни састав, или
- на начин који ће се изложити, ако је састав горива дат општим изразом за угљоводонична горива - $C_m H_n$.

Како сагоревањем једног атома угљеника настаје један молекул угљендиоксида, то ће сагоревањем m атома угљеника настати m молекула угљендиоксида, па ће бити

$$V_{CO_2} = \frac{22,4m}{12m+n}, \quad m^3/kg$$

односно

$$G_{CO_2} = \frac{44m}{12m+n}, \quad kg/kg$$

На сличан начин се добија количина водене паре настале сагоревањем водоника

$$V_{H_2O} = \frac{11,2n}{12m+n}, \quad m^3/kg$$

$$G_{H_2O} = \frac{9n}{12m+n}, \quad kg/kg$$

Садржај азота и кисеоника одређује се на начин који је већ био изложен.

3.2.1.4.3 Продукти сагоревања гасовитих горива при $\lambda > 1$

Како се у гасовитим горивима, у општем случају, могу наћи CO , CO_2 , H_2 , H_2O , угљоводоници и друге компоненте, и како

- сагоревањем $1 \text{ m}^3 CO$ настаје $1 \text{ m}^3 CO_2$, а
- сагоревањем $1 \text{ m}^3 H_2$ настаје $1 \text{ m}^3 H_2O$,

настала количина угљендиоксида израчунава се према изразу:

$$V_{CO_2} = r_{CO} + r_{CO_2} + \sum_{i=1}^k r_i m_i, \quad m^3/m^3$$

Количина угљендиоксида потиче делом од сагоревања угљенмоноксида и угљеника из угљоводоника, а делом из угљендиоксида, који се налазио у гасовитом гориву. При томе су:

- Γ_{CO} - запреминско учешће угљенмоноксида у горивом гасу чијим сагоревањем настаје иста запремина угљендиоксида,
- Γ_{CO_2} - запреминско учешће угљендиоксида у горивом гасу,
- Γ_i - запреминско учешће i -те угљоводоничне компоненте у гасовитом гориву, а
- Π_i - одговарајући број атома угљеника у i -том гасовитом угљоводонику.

Аналогно претходном, израз за израчунавање количине водене паре, биће:

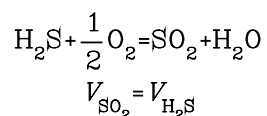
$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \Gamma_{\text{H}_2} + \Gamma_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \Gamma_i \Pi_i, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

где су:

- Γ_{H_2} - запреминско учешће водоника у горивом гасу,
- $\Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ - запреминско учешће водене паре у горивом гасу,
- Γ_i - запреминско учешће i -те угљоводоничне компоненте у гасовитом гориву, а
- Π_i - одговарајући број атома водоника у i -том угљоводонику.

Количина азота и кисеоника одређују се према раније наведеним обрасцима, а на основу израчунатих вредности L_{min} , односно L .

За случај да у гасовитом гориву постоји и водоник сулфид у продуктима сагоревања добијају се и SO_2 и H_2O према једначини:



3.2.1.4.4 Количине продуката сагоревања

Израчунавање количине продуката сагоревања врши се на основу познатих вредности појединих компонената продуката сагоревања. У општем случају количина продуката сагоревања изражава се збиром количина појединих продуката сагоревања. При томе разликују се влажни и суви продукти сагоревања, зависно да ли се у саставу налази вода или не. У условима потпуног сагоревања количина влажних продуката сагоревања једнака је

$$V_v = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

а сувих

$$V_s = V_v - V_{H_2O} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad m^3/kg$$

Одговарајући изрази, зависно од врсте горива, гласе:

- за чврста горива

$$V_v = 1,867 g_C + 11,2 g_H + 1,24 g_W + 0,7 g_S + 0,79 L + 0,8 g_N + 0,21 (\lambda - 1) L_{\min}, \quad m^3/kg$$

- за течна горива

$$V_v = \frac{22,4m}{12m+n} + \frac{11,2n}{12m+n} + 0,79 L + 0,21 (\lambda - 1) L_{\min}, \quad m^3/kg$$

- за гасовита горива

$$\begin{aligned} V_v = & r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} + \sum_{i=1}^k r_i m_i + \\ & + r_{H_2} + 2r_{CH_4} + r_{H_2S} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k r_i n_i + \\ & + 0,79 L + r_{N_2} + 0,21 (\lambda - 1) L_{\min} + r_{H_2S}, \quad m^3/m^3 \end{aligned}$$

Количина продуката сагоревања изражена масом гласиће:

$$G_v = G_{CO_2} + G_{H_2O} + G_{SO_2} + G_{N_2} + G_{O_2}, \quad kg/kg$$

$$G_s = G_v - G_{H_2O}, \quad kg/kg$$

Количина продуката сагоревања изражена масом може се израчунати и без прорачуна продуката сагоревања, из материјалног биланса:

$$G_v = 1 + \lambda L_{\min} - g_A, \quad kg/kg$$

Код горива са малим садржајем минералних примеса (g_A), као што су течна горива, или код горива која уопште не садрже минералне примесе (гасовита горива) последњи члан се може занемарити, па се добија:

$$G_v = 1 + \lambda L_{\min}, \quad kg/kg$$

Обрасцима Боа /1/ добијених на основу обраде великог броја мерења, количина продуката сагоревања може се израчунати и приближним путем:

- за чврста горива

$$V_v = (241,2 \lambda - 25,3) \frac{H_d + 2,45 (1 - g_A)}{1000} + 1,24 (1 - g_A), \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_s = (239,3 \lambda - 5,5) \frac{H_d + 2,45 (1 - g_A)}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за уља за ложење

$$V_v = (2957 \lambda + 805) \frac{H_d - 4,60}{10000} - 2,18, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_s = (2931 \lambda - 805) \frac{H_d - 4,60}{10000} + 2,30, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за природни земни гас

$$V_v = (261 \lambda + 2,9) \frac{H_d - 0,63}{1000} + 0,88, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

$$V_s = (261 \lambda - 53,8) \frac{H_d - 0,63}{1000} + 0,88, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

У обрасцима Боа треба вредност топлотне моћи заменити у MJ/kg за чврста и течна горива, а у MJ/m³ за гасовита горива.

Минимална количина продуката сагоревања или теоријска количина продуката сагоревања представља количину продуката сагоревања за стехиометријски коефицијент вишка ваздуха ($\Pi = 1$). Веза између стварне количине продуката сагоревања (за било који коефицијент вишка ваздуха) и теоријске, гласи

$$V_v = V_{\min} + (\lambda - 1) L_{\min}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

Ова веза важи и за суве за влажне продукте сагоревања.

Минимална количина продуката сагоревања одређује се и приближним обрасцима Розина и Фелинга [2] на основу познате топлотне моћи:

- за чврста горива

$$V_{\min} = \frac{0,212H_d}{1000} + 1,65, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за течна горива

$$V_{\min} = \frac{0,265H_d}{1000}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

- за слабе гасове ($H_d < 12.500 \text{ kJ/m}^3$)

$$V_{\min} = \frac{0,173H_d}{1000} + 1,0, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

- за јаке гасове ($H_d > 12.500 \text{ kJ/m}^3$)

$$V_{\min} = \frac{0,272H_d}{1000} + 0,25, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

У овим обрасцима вредности топлотних моћи треба заменити у kJ/kg за чврста и течна, а у kJ/m^3 за гасовита горива.

3.2.1.4.5 Састав продуката сагоревања

Учешће појединих компонената у укупној количини продуката сагоревања израчунава се једноставно: односом количине одговарајуће компоненте и укупне количине продуката сагоревања. С обзиром на претходни став састав продуката сагоревања може се израчунати с обзиром на влажне и суве продукте сагоревања. Састав влажних продуката сагоревања биће:

$$CO_{2v} = \frac{V_{CO_2}}{V_v} 100, \quad \%Vol$$

$$H_2O_v = \frac{V_{H_2O}}{V_v} 100, \quad \%Vol$$

$$SO_{2v} = \frac{V_{SO_2}}{V_v} 100, \quad \%Vol$$

$$N_{2v} = \frac{V_{N_2}}{V_v} 100, \quad \%Vol$$

$$O_{2v} = \frac{V_{O_2}}{V_v} 100, \quad \%Vol$$

Састав сувих продуката сагоревања:

$$CO_{2s} = \frac{V_{CO_2}}{V_s} 100, \quad \%Vol$$

$$SO_{2s} = \frac{V_{SO_2}}{V_s} 100, \quad \%Vol$$

$$N_{2s} = \frac{V_{N_2}}{V_s} 100, \quad \%Vol$$

$$O_{2s} = \frac{V_{O_2}}{V_s} 100, \quad \%Vol$$

Вредност процентуалног садржаја угљендиоксида у сувим продуктима сагоревања при стехиометријском коефицијенту вишка ваздуха ($\Pi = 1$) представља макси-

Слика 3.4: Састав теоријских и стварних продуката сагоревања

малну вредност CO_2 за одређено гориво и обележава се са CO_{2max} (Слика 3.4).

У прорачунима се такође често користи збир троатомних сувих продуката сагоревања - угљендиоксида и сумпордиоксида, који се обележава са RO_2 .

$$RO_2 = CO_2 + SO_2$$

Аналогно претходном ставу биће онда и

$$RO_{2max} = CO_{2max} + SO_{2max}$$

Оријентационе вредности минимално потребних количина ваздуха за потпуно сагоревање (m^3/kg), минималних количина влажних продуката сагоревања (V_{min}) и вредности CO_{2max} зависно од врсте горива дати су у Табели 3.1 [2].

Табела 3.1:

Гориво	L_{min}	V_{min}	CO_{2max}
	(m^3/kg)	(m^3/kg)	(%Vol)
камени угаљ	7,5-8,3	7,9-8,6	18,3-18,9
мрки угаљ	2,4-6,5	2,4-7,0	17,8-19,8
тресет (сув на ваз.)	4,1	5,0	18,9
кокс	7,7	7,7	20,7
бензин	11,5	12,3	15,0
дизел гориво	11,2	11,9	15,5
уље за ложење ЕЛ	11,2	11,8	15,5
уље за ложење М	10,8	11,7	15,7
уље за ложење С	10,6	11,4	15,9
бутан	11,5	11,8	14,1
пропан	12,0	13,0	13,8
метан	13,31	14,7	11,7
природни гас *	8,90	9,91	11,8

Вредности за природни гас се односе на јединицу количине од $1 m^3$, а не на масу од $1 kg$ — $L_{min}(m^3/m^3)$, $V_{min}(m^3/m^3)$.

3.2.2 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА НА БАЗИ ПОЗНАТОГ САСТАВА ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА

Као што је познато састав продуката сагоревања одређује се уређајима којима се врши анализа продуката сагоревања - гасним анализаторима. Савремени гасни анализатори омогућавају веома тачно одређивање низа продуката потпуног и непотпуног сагоревања, коначних и међу продуката реакције сагоревања.

Састав сувих продуката потпуног сагоревања биће једнак

$$CO_2 + SO_2 + O_2 + N_2 = 100\%$$

или

$$RO_2 + O_2 + N_2 = 100\%$$

У случају непотпуног сагоревања услед несавршености одвијања самог процеса поред продуката потпуног, јављају се и продукти непотпуног сагоревања: CO, H₂, CH₄ и други видови несагорелог горива. Како данашња постројења раде са високим степеном потпуности сагоревања, допушта се упрошћен прорачун, при чему ће се сматрати да је једини продукт непотпуног сагоревања угљенмоноксид. У том случају горње једначине прелазе у

$$RO_2 + O_2 + N_2 + CO = 100 \%$$

Из састава продуката сагоревања може се оценити квалитет процеса сагоревања, а и одредити стварни коефицијент вишка ваздуха са којим се процес сагоревања одвија.

3.2.2.1 Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања

Теоријски минимално потребна количина ваздуха за потпуно сагоревање може се представити разликом стварно потребне количине ваздуха и вишка ваздуха (ΔL):

$$L_{\min} = L - \Delta L$$

Заменом овог израза у израз којим је коефицијент вишка ваздуха дефинисан, добија се

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L}{L - \Delta L} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$

Запремина вишка ваздуха може се израчунати из вишка кисеоника, одређеног анализом продуката сагоревања

$$V_o = \frac{O_2}{100} V_s$$

односно

$$\Delta L = \frac{O_2}{100} V_s \frac{100}{21} = \frac{O_2}{21} V_s$$

Како азот, уведен ваздухом у процес сагоревања, остаје непромењен (занемарујући настајање оксида азота), може се помоћу њега одредити стварна запреминска количина ваздуха. Овакав начин је оправдан само код чврстих и течних горива код којих је садржај азота у гориву незнатан. Запремина азота у продуктима сагоревања биће

$$V_N = \frac{N_2}{100} V_s$$

а стварна количина ваздуха,

$$L = \frac{V_{N_2}}{0,79} = \frac{N_2}{100} V_s \frac{1}{0,79} = \frac{N_2}{79} V_s$$

Заменом израза за ΔL и L у израз за коефицијент вишка ваздуха, добија се коначан образац за израчунавање коефицијента вишка ваздуха на основу познатог састава продуката сагоревања:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{\frac{O_2}{21} V_s}{1 - \frac{\frac{N_2}{79} V_s}} = \frac{1}{1 - \frac{79 O_2}{21 N_2}}$$

или

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{100 - (R O_2 + O_2)}} = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}} \approx \frac{21}{21 - O_2}$$

пошто је

$$N_2 = 100 - (R O_2 + O_2)$$

У условима када се поред продуката потпуног сагоревања јављају и продукти непотпуног сагоревања CO , H_2 , CH_4 и други, коефицијент вишка ваздуха се одређује према

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5(\text{CO} + \text{H}_2) - 2\text{CH}_4}{100 - (RO_2 + O_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)}}$$

Како је CO највероватнији продукт непотпуног сагоревања горњи израз се може упростити тако да гласи:

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5\text{CO}}{100 - (RO_2 + O_2 + \text{CO})}}$$

3.2.3 ТЕМПЕРАТУРА САГОРЕВАЊА

Температура сагоревања представља температуру коју имају гасовити продукти, као резултат загревања топлотом која је настала сагоревањем горива. Температура сагоревања управно је пропорционална топлотној моћи горива, а обрнуто пропорционалан топлоти потребној за загревање продуката сагоревања до температуре сагоревања, односно обрнуто је пропорционална производу запремина продуката сагоревања и њихових средњих специфичних топлотних капацитета - топлотном капацитету.

Разликују се калориметарска, теоријска и стварна температура сагоревања.

Под калориметарском температуром сагоревања подразумева се температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, којом приликом не долази до топлотних губитака насталих дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином.

Теоријска температура сагоревања узима у обзир дисоцијацију продуката сагоревања, а не и размену топлоте са околином.

Стварна температура сагоревања одређује се узимајући у обзир и дисоцијацију продуката сагоревања и топлотне губитке услед размене топлоте са околином.

Максимална вредност температуре сагоревања добија се за случај калориметарске температуре сагоревања када се процес одвија са стехиометријским коефицијентом вишка ваздуха ($\Pi = 1$).

У општем случају, температура сагоревања се одређује из енергетског биланса

$$h_G + L_s h_v + H_d = t_s \sum_{i=1}^k V_i c_{pm_i}$$

где су:

- h_G - енталпија горива,
- h_v - енталпија ваздуха,
- V_i - запремина i -те компоненте продуката сагоревања,
- c_{pm_i} - средњи специфични топлотни капацитет i -те компоненте продуката сагоревања у температурском интервалу $t_o - t_s$.

У изразу (3.1) занемарена је количина топлоте која се троши на загревање пепела до температуре t_s . Ова претпоставка је коректна за гасовита и течна горива. За израчунавање температуре сагоревања чврстих горива потребно је узети у обзир и количину пепела и одговарајући специфични топлотни капацитет.

Из израза (3.1) следи да се температура сагоревања t_s може израчунати на следећи начин:

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pm_i}}, \quad ^\circ C$$

или развијено

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d}{V_{CO_2} c_{pm_{CO_2}} + V_{H_2O} c_{pm_{H_2O}} + V_{N_2} c_{pm_{N_2}} + \dots}, \quad ^\circ C$$

Израз за израчунавање теоријске температуре сагоревања биће једнак горњем изразу допуњен губицима услед дисоцијације Q_d :

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - Q_d}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pm_i}}, \quad ^\circ C$$

Стварна температура сагоревања израчунаваће се према изразу:

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - Q_d - Q_{tg}}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pm_i}}, \quad ^\circ C$$

где је:

Q_{tg} - количина топлоте изгубљена услед размене топлоте са околином.

За случај да се у продуктима сагоревања налазе и гориве компоненте, као последица несавршеног и непотпуног сагоревања, потребно је, у бројиоцу израза за израчунавање температуре сагоревања, умањити вредност топлотне моћи за количину топлоте која се налази у овим горивим компонентама продуката сагоревања.

У том случају, најопштији израз за израчунавање температуре сагоревања би гласио:

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - H_{ps} - Q_d - Q_{tg}}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pm_i}}, \quad ^\circ C$$

где је:

H_{ps} - губитак услед непотпуног сагоревања.

Одређивање температуре сагоревања усложено је непознавањем средњих специфичних топлотних капацитета у интервалу $t_o - t_s$, јер није позната температура сагоревања која се тражи, па се не може из таблица узети. Од низа итеративних метода за одређивање температуре сагоревања биће изложена графичка метода која омогућава да се већ после два „корака“ прорачуна одреди температура сагоревања, са довољном тачношћу, за техничке сврхе.

Да би се одредила температура сагоревања, на овај начин, потребно је да се за гориво, чија се температура сагоревања одређује, претпостави температура сагоревања (t_{sp1}). За ову претпостављену температуру сагоревања могуће је сада одредити вредности средњих специфичних топлотних капацитета, па онда и израчунати температуру сагоревања (t_{siz1}). Израчуната температура сагоревања на овај начин више или мање ће се разликовати од претпостављене. У следећем кораку, користи се ова израчуната температура сагоревања, као полазна, претпостављена ($t_{sp2} = t_{siz1}$) и за њену вредност се узимају вредности средњих специфичних топлотних капацитета из таблица. Температура сагоревања се израчунава

поново(t_{siz2}). Добијене вредности температура сагоревања наносе се у дијаграм (Слика 3.5) на чијој се апсиси наносе претпостављене вредности температура сагоревања, а на ординати - израчунате вредности температура сагоревања. У дијаграм се уцртава права $t_{siz} = t_{sp}$ (t_{siz} - израчуната температура сагоревања, t_{sp} - претпостављена температура сагоревања), на којој се, у п-том кораку мора налазити тачна вредност температуре сагоревања. Повлачећи дуж која спаја две добијене тачке из прва два корака за температуру сагоревања, добија се пресек са правом $t_{siz} = t_{sp}$. Овај пресек одређује приближно температуру сагоревања.

Слика 3.5

Температура сагоревања може да се израчуна и на следећи начин [3]: како је специфични топлотни капацитет једнак

$$c_{pm}|_{t_o}^{t_s} = \int_{t_o}^{t_s} \frac{c_p dT}{t_s - t_o}$$

може се одредити температура сагоревања директним путем узимајући за зависност промене специфичног топлотног капацитета од температуре

$$c_p = a + bt$$

После замене, интеграције и сређивања добија се

$$c_{pm} = a + \frac{b}{2}(t_s + t_o)$$

Заменом у израз за израчунавање температуре сагоревања добија се

$$t_s = \frac{h_g + L_s h_v + H_d}{\sum_{i=1}^n V_i \left[a_i + \frac{b_i}{2}(t_s + t_o) \right]} + t_o$$

Уводећи ознаке

$$\sum V_i a_i = A, \quad \sum V_i \frac{b_i}{2} = B, \quad h_g + L_s h_v + H_d = C_1$$

добија се квадратна једначина по t_s

$$B t_s^2 + A t_s - [(A + B t_o) t_o + C_1] = 0$$

чијим решавањем директно, без итеративних поступака, добија се температура сагоревања.

Тачније решење за температуру сагоревања може се добити ако се специфични топлотни капацитет компонената продуката сагоревања замени квадратном зависношћу специфичног топлотног капацитета од температуре, уместо линеарном

$$c_p = a + bt + ct^2$$

али компликованије за решавање, с обзиром да је једначина по t_s трећег степена

$$c t_s^3 + B t_s^2 + (A - 2B t_o) t_s + (B t_o^2 - A t_o - C t_o^3 - C_1) = 0$$

Температура сагоревања може се одредити и такозваним $H-t$ дијаграмом. При пројектовању је често потребно вршити велики број прорачуна процеса сагоревања за различите коефицијенте вишка ваздуха и израчунавати одговарајућу температуру сагоревања за различите температуре предгревања ваздуха и горива и др. Ови прорачуни се битно могу упростити коришћењем дијаграма сагоревања за типична горива. У одређеним случајевима, када се састав горива битно разликује од уобичајеног, потребно је овакав дијаграм конструисати.

Слика 3.6

На Слици 3.6 приказан је $H-t$ дијаграм где низ кривих одговара различитим коефицијентима вишка ваздуха. $H-t$ дијаграм се образује тако што се за различите вредности температуре израчунава израз $t \Delta V_i c_{pmi}$ (за један коефицијент вишка ваздуха). Температура сагоревања се одређује повлачењем линије паралелно апциси на растојању које је једнако збиру топлотне моћи и енталпија горива и ваздуха. Пресек ове праве са одговарајућим кривама одређује температуру сагоревања.

За случај када се врши предгревање ваздуха за сагоревање израчунава се енталпија за различите коефицијенте вишка ваздуха и добијају криве приближно паралелне апциси (Слика 3.7). Утицај предгревања се уочава при истом коефицијенту вишка ваздуха.

Слика 3.7

За одређено гориво максимална вредност температуре сагоревања одређена је коефицијентом вишка ваздуха једнаким 1: за вредности коефицијента вишка ваздуха мање од 1 (у области богате смеше), количина топлоте услед непотпуног сагоревања је мања, па ће и температура сагоревања бити нижа. За вредности коефицијента вишка ваздуха веће од 1, већа је количина продуката сагоревања у односу на $\Pi = 1$ (услед вишка ваздуха) па ће и поред потпуности сагоревања, температура сагоревања бити мања (Слика 3.8).

Слика 3.8

Литература

1. Thomas: "Thermische Kraftanlagen", Springer Verlag, Берлин, 1975.
2. P.Rosin, R.Fehling: "in Heizung + Klimatechnik", Springer Verlag, E., R.Oldenbourg, Минхен - Беч, 1974.
3. М. Радовановић: „Могућност директног одређивања температуре сагоревања", Термотехника, број 4, година IV, Београд, 1978.

4 ЧВРСТА ГОРИВА

Чврста горива се могу, као и остала разврстати на више начина. Уобичајена њихова подела је ипак на природна и прерађена, па ће у даљем оваква подела бити узета за основу излагања (како је то дато у Табели 2.1). Пре тога ће бити изложена материја која се односи на кључне карактеристике чврстих горива, на основу којих се врши њихова оцена и могућност оптималног коришћења.

4.1 ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА ЧВРСТИХ ГОРИВА

Поред елементарне анализе, која је неопходна за низ топлотних прорачуна, за оцену могућности адекватне примене једног горива, а нарочито чврстих, користи се такозвана техничка анализа. Техничка анализа се заснива на термичком разлагању масе горива (процесу који прати све видове коришћења угља) при чему се добијају испарљиве и неиспарљиве материје. С обзиром на сложеност материје чврстих горива, и у испарљивом и у неиспарљивом делу горива налазимо гориве и негориве компоненте. Ова четири критеријума узимају се за основу техничке анализе, а одговарајућа подела дата је на Слици 4.1.

Као што се анализом може закључити основни подаци техничке анализе су:

- садржај грубе влаге и садржај хигроскопске влаге - садржај негоривих испарљивих материја,
- садржај горивих испарљивих материја (волатили), у чијем се саставу налазе испарљиви угљеник и водоник (најчешће везани међусобно у оквиру угљоводоника) и условно кисеоник и азот,
- садржај негоривих неиспарљивих материја - садржај минералних материја (пепела),
- садржај коксног остатка - горивих и негоривих неиспарљивих материја.

Поред ових карактеристика, подаци техничке анализе су још топлотна моћ, понашање пепела на повишеним температурама (топливост пепела), дужина и боја пламена, изглед и структура коксног остатка и др.

Слика 4.1: Техничка анализа угља

4.1.1 ПЕПЕО

Не понављајући у потпуности материју о пепелу, изложену у II глави, може се још констатовати да присуство пепела у већој количини, води:

- погоршању преноса топлоте на грејне површине, а тиме погоршању процеса загревања и испаравања воде, прегревања паре и загревања ваздуха,
- повећању хабања радних елемената млинова за млевење угља,
- повећању трошкова транспорта пепела, и
- повећању отпора у димњацима.

Изузетно важна карактеристика је зато понашање пепела на повишеним температурама, када долази до топљења пепела и његовог лепљења по озиду и грејним површинама. Образовање наслага пепела на грејним површинама котла, огледа се у знатном смањењу коефицијента пролаза топлоте.

Ако се посматра чиста цев дебљине δ , познатог коефицијента провођења топлоте λ , која се са једне стране загрева топлотом димних гасова, а са друге хлади водом или воденом паром, онда се коефицијент пролаза топлоте може представити изразом:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где су:

- k - коефицијент пролаза топлоте,
- α_1 (W/m²K) - коефицијент прелаза топлоте од димних гасова на чисту цев која се налази у струји димних гасова,
- α_2 (W/m²K) - коефицијент прелаза топлоте од зида цеви на пријемник топлоте,
- δ/λ (m²K/W) - отпор провођењу топлоте кроз зид цеви.

Промена температуре представљена је на Слици 4.2а.

Ако са стране димних гасова дође до стварања наслага пепела промениће се и коефицијент прелаза топлоте α_1 , а јавиће се слој пепела, чврсто прионулог за цев, дебљине δ_n , и коефицијента проводљивости топлоте λ_n .

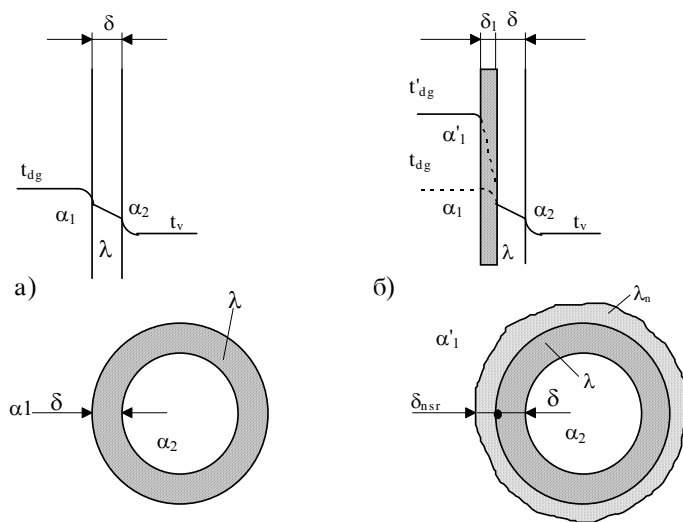
Коефицијент пролаза топлоте погоршаће се тако да ће његова вредност бити:

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1'} + \frac{\delta_{nsr}}{\lambda_n} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где је:

- α_1' (W/m^2K) - коефицијент прелаза топлоте од димних гасова на спољашњу површину наслага пепела. Како су облик и храпавост чисте и задрљане цеви различити, α_1' разликоваће се од α_1 .

Промена температуре биће као на Слици 4.2б. Као што се из слике може закључити, да би се остварила иста температура воде или водене паре, потребно је повећати потрошњу горива, односно довести већу количину топлоте, што погоршава степен корисности постројења (котла), а истовремено, посматрано у дужем временском интервалу, води механичком преоптерећењу материјала цеви. Такође, ово води повишењу температуре димних гасова на излазу из ложишта и на крају котла.



Слика 4.2: Пролаз топлоте кроз чисту цев (а) и цев са наслагама пепела (б)

Присуство слоја пепела на грејним површинама утиче и на размену топлоте зрачењем. При стварању наслага око чисте цеви долази до повећања температуре спољне површине слоја у односу на температуру зида чисте цеви, тј. до смањења разлике температура која у изразу за размену топлоту фигурише на четвртном степену.

Према температури топљења, пепео се може разврстати у неколико група. Пепео је:

- лако топљив, уколико му је температура топљења нижа од 1200°C ,
- средње топљив, ако му је температура топљења од 1200 до 1350°C ,
- тешко топљив, ако му је температура топљења од 1350 - 1500°C , и
- практично нетопљив, ако му је температура топљења пепела већа од 1500°C .

Оваква подела, и поред тога што се често користи, није коректна: пепео, као мешавина више компонената нема једну одређену температуру топљења. Појава топљења се јавља у одређеном температурском интервалу, чији су положај и опсег од изузетног значаја за примену.

Примена такозваног "индекса топливости" има више значаја. Индекс топливости се дефинише односом тешко и лако топливих оксида:

$$F = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \dots}$$

Према индексу топливости, пепео може бити:

- лако топљив, уколико је $F = 0,2 - 1,5$
- средње топљив, ако је $F = 1,5 - 2,5$
- тешко топљив, ако је $F = 2,5$

За оцену понашања пепела на повишеним температурама, коју је у лабораторијским условима тешко у потпуности симулирати, најчешће се у Европи користи метода којом се, током загревања, посматра промена геометрије узорка пепела. Ова метода је прописана и нашим стандардима (ЈУС Б.Х8.325). Карактеристичне температуре су:

- температура омекшавања (деформације),
- температура полулопте, и
- температура разливања или течења.

На основу изнетог може се констатовати да:

- одређено гориво примењено у различитим ложиштима може дати сасвим различиту слику понашања пепела на повишеним температурама,
- у истом ложишту примењена различита горива или мешавине горива понашају се такође различито.

Анализа ложичног пепела из термоелектрана Колубара и Косово дата је у Табелама 4.1 и 4.2 (Слике 4.3 и 4.4), а анализа наслага у Табели 4.3 (као илустрација).

Табела 4.1: Ситљовна анализа ложичног пепела из термоелектрана „Колубара“ и „Косово“ /1/

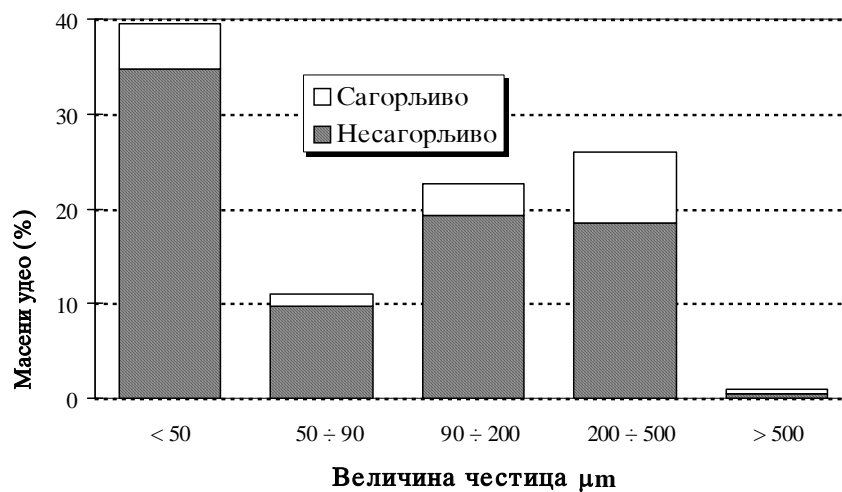
Димензија честица	Колубара - $\lambda = 1,45$			Косово - $\lambda = 1,50$		
	Масени удео	Кумулативни про- центи	Сагор- љиво	Масени удео	Кумула- тивни процен- ти	Сагор- љиво
μm	%	%	%	%	%	%
$d > 500$	0,97	0,97	51,53	6,63	6,63	53,98
$200 < d -$ < 500	25,97	26,94	28,67	15,93	22,56	31,82
$90 < d < 200$	22,58	49,52	14,27	22,40	44,96	14,07

Табела 4.2: Хемијска анализа пепела из термоелектрана „Колубара“ и „Косово“ /1/

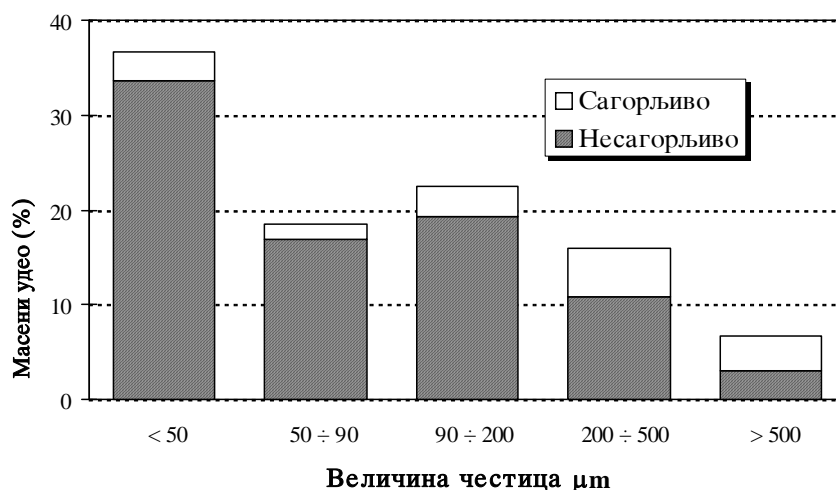
	Колубара	Косово
SiO_2 (%)	55,11	33,22
Al_2O_3 (%)	21,39	8,53
Fe_2O_3 (%)	9,93	9,70
CaO (%)	5,65	33,88
MgO (%)	3,20	4,74
Na_2O (%)	0,32	0,75
K_2O (%)	1,09	0,33
SO_3 (%)	3,23	9,03

Табела 4.3: Хемијске анализе наслађа из ѿермоелектрирана „Колубара“ и „Косово“ [1/

Једињење	Колубара		Косово	
	$t_s=550^{\circ}\text{C}$	$t_s=640-770^{\circ}\text{C}$	$t_s=450^{\circ}\text{C}$	$t_s=550^{\circ}\text{C}$
	после 8h	после 8h	после 9h	после 8,5h
SiO ₂	7,00	7,32	14,34	17,30
Al ₂ O ₃			2,99	4,55
Fe ₂ O ₃	83,20	83,40	6,13	8,94
CaO	2,00	1,87	33,45	36,67
MgO	0,67	0,82	2,92	3,59
Na ₂ O	0,23	0,41	1,19	0,92
K ₂ O	0,13	0,17	0,41	0,42



Слика 4.3: Сиповна анализа ложичног ѿејела Колубара [1/



Слика 4.4: Ситњовна анализа ложичног пепела Косово /1/

4.1.2 ГОРИВЕ ИСПАРЉИВЕ МАТЕРИЈЕ

Садржај горивих испарљивих материја директно утиче на процес сагоревања угља. У тренутку када честица угља бива унесена у ложнице, долази, као последица наглог загревања честице, до издвајања из ње горивих и негоривих испарљивих материја. Настале гориве испарљиве материје образују са околиним кисеоником смешу, која је, зависно од степена загрејаности, способна да се упали. Сагоревањем горивих испарљивих материја почиње обично процес сагоревања честица угља.

Термичко разлагање угља, при чему се издвајају гориве испарљиве материје (волатили) и настаје коксни остатак, није карактеристично само за процесе сагоревања, већ и све остале процесе трансформације угља - било у квалитетнија чврста горива (кокс), било у течна или гасовита горива.

Састав горивих испарљивих материја у подацима техничке анализе, преко елемената ($C_{isp} + H + O + N$) не даје довољно података. Наведени елементи су углавном међусобно сједињени, сем водоника који може бити и елементаран и у оквиру осталих виших угљоводоника. CH_4 , CO и CO_2 чине 80-90% свих волатила (Табела 4.4).

Табела 4.4: Сасїав жоривих испарљивих маїерија угља Колубара /2/

Садржај (%Vol)	Температура (°C)			
	500	700	800	900
H ₂	7,94	26,30	31,72	31,29
CH ₄	20,00	24,59	22,27	20,30
CO	35,97	28,66	33,11	39,79
CO ₂	31,00	14,86	9,03	5,98
C ₂ H ₆	0,57	1,74	2,11	1,86
C ₂ H ₄	0,62	0,75	0,20	0,02
H ₂ S	2,04	0,56	0,82	0,42
C ₃ H ₈	0,96	2,03	0,67	0,22
C ₃ H ₆	0,35	0,37	-	0,026
C ₄ H ₁₀	0,01	0,05	0,06	0,014
C ₄ H ₈	0,52	0,07	0,015	0,003

Количина и састав горивих испарљивих материја зависе од низа утицајних величина: врсте угља, брзине загревања, температуре, времена и др. Како са старошћу угља (степеном угљенисања) опада садржај кисеоника у угљу, тако се и учешће CO и CO₂ у горивим испарљивим материјама смањује, а расте удео угљоводоника. Што је садржај горивих испарљивих материја у угљу већи, то је лакше паљење и утолико брже сагоревање. Истовремено, што је садржај горивих испарљивих материја већи, њиховим сагоревањем развиће се већа количина топлоте, па ће се процес сагоревања лакше одвијати. На Слици 4.5 дата је зависност промене температуре паљења од садржаја горивих испарљивих материја у полазној маси горива /3, 4/.

Доња топлотна моћ горивих испарљивих материја може да се одреди на бази података о њиховом саставу коришћењем уобичајеног обрасца за топлотну моћ гасовитих горива:

$$H_{\text{vold}} = 119,98H_2 + 10,11CO + 50,01CH_4 + 47,5(C_2H_6 + C_2H_4) + 46,39C_3H_8 + H_{dC_mH_n}C_mH_n, \quad \text{MJ/kg}$$

Проблем је, међутим, што подаци о саставу горивих испарљивих материја већине угљева нису познати и захтевају дуготрајна и специфична истраживања.

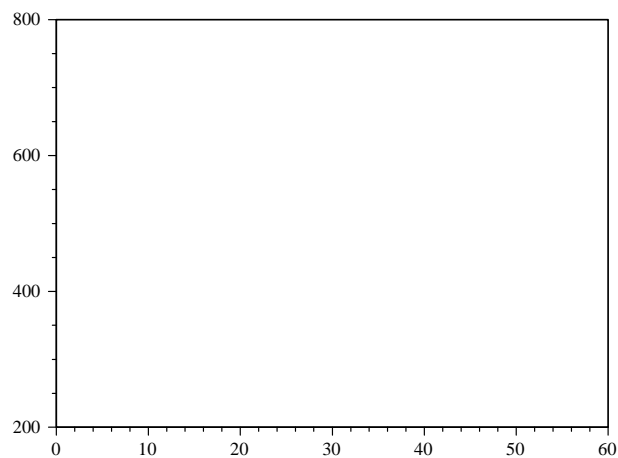
Топлотна моћ горивих испарљивих материја може се једноставно израчунати на основу познатих вредности: топлотне моћи угља, садржаја фиксног угљеника и његове топлотне моћи, односно:

$$H_{vol} = \left(H_{ug} - \frac{H_{c_{fix}}}{100} \right) \left(\frac{V_g}{100} \right), \quad \text{MJ/kg}$$

Резултати прорачуна горње и доње топлотне моћи горивих испарљивих материја за наше угљеве, као и односи H_{volg}/H_g и H_{vold}/H_d изнесени су као просечне вредности (Табела 4.5) у функцији индекса реактивности K дефинисаног односом:

$$K = \frac{V_g}{C_{fix}}$$

као општом карактеристиком горива која не зависи од начина представљања састава угља [5].



Слика 4.5: Температура паљења угљеног праха у зависности од садржаја волашила

Табела 4.5

Рудник	Чиста горива маса				
	K	H_{volg}	H_{vold}	H_{volg}/H_g	H_{vold}/H_d
	/	MJ/kg	MJ/kg	%	%
Колубара	1,64	20,84	18,66	81,64	76,81
Косово	1,73	19,01	17,04	78,38	73,98
Метохија	1,59	19,83	17,86	79,49	75,21
Боговина	0,98	23,50	21,14	82,88	77,86
Јарандо	0,66	37,35	34,04	107,56	101,89

Добијени резултати су представљени у облику зависности $H_{vold}=f(K)$ преко просечних вредности ових величина (Слика 4.6) /5/. Аналитички израз ове везе гласи:

$$H_{vold}=23,98K^{-0,627}, \quad \text{MJ/kg}$$

Количина топлоте настала сагоревањем горивих испарљивих материја Q_{vol} је врло значајна величина и дефинише се као:

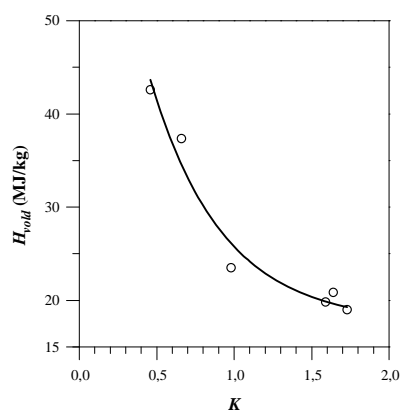
$$Q_{vold}=H_{vol}\frac{V_g}{100}$$

Добијене вредности израза $Q_{vol}/H_d=f(K)$ преко просечних (средњих) вредности дате су на Слици 4.7 /5/. Математички израз ове зависности дат је у облику:

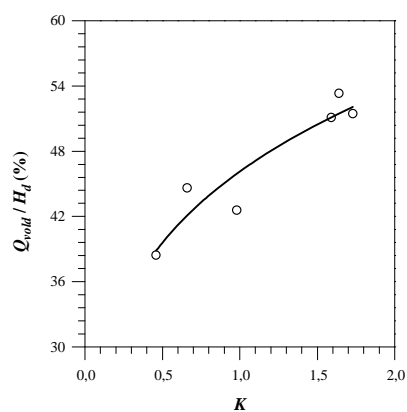
$$\frac{Q_{vold}}{H_d}=41,34K^{0,2}, \quad \%$$

При великим брзинама загревања и високим температурама, као што се то дешава у горионцима и ложиштима за спрашени угаљ, садржај волатила може бити знатно већи од вредности добијених стандардном методом (Слика 4.8) /6/.

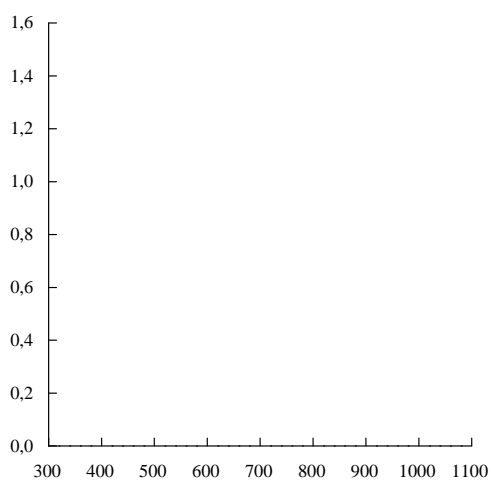
Већи садржај горивих испарљивих материја даје при сагоревању дужи пламен.



Слика 4.6



Слика 4.7



Слика 4.8: Могућа количина издвојених волајила (V_g') у односу на стандардну (V_g) зависно од температуре, брзине загревања и врсте угља (цифровени бројеви представљају ознаке угља према међународној подели угља видаићи 4.1.3.3)

4.1.3 СПИЦАЊЕ УГЉА

Као последица преласка угља при загревању у пластично стање долази до повезивања зрна угља и настајања компактних комада. Неки угљеви поседују особину не само да сами прелазе у пластично стање, већ при томе обухватају и везују се и са инертним материјама, образујући спечену, компактну масу. Ова способност угља назива се спицање.

Спицање представља суштинску и важну карактеристику угља при сувој дестилацији (добивању кокса), а користи се и у процесима гасификације чврстих горива у термоенергетици.

Слика 4.9:

За оцену спицања угља користе се методе броја надимања и индекса Рога. Метода такозваног броја надимања састоји се у загревању узорка аналитичке пробе у затвореном суду до температуре од 820°C при чему се прати промена запремине: добијени узорак коксног остатка пореди се са низом стандардних профила (Слика 4.9) и даје му одговарајући број (ЈУС Б.Х8.328).

Спицањем по методи Рога одређује се механичка отпорност (чврстоћа) тако што се помеша 1 грам испитиваног узорка и 5 грама антрацита и добије, по прописаним условима, коксни остатак. Механичка отпорност одређује се три пута у опитном добошу специјалног уређаја (ЈУС Б.Х8.329).

4.1.4 КОКСНИ ОСТАТАК

Од структуре коксног остатка - да ли је прашинаст, стопљен, спечен, мање или више надувен - зависи структура слоја ватре у ложипту, ако се ради о сагоревању у слоју, а тиме и брзина и квалитет процеса сагоревања. Не мање утиче његова структура приликом сагоревања угља у спрашеном стању, али је у условима стандардних испитивања такву структуру тешко одредити, па се под структуром коксног остатка увек подразумевају изглед и структура који се добијају прописаним лабораторијским методама. Такође, на основу ове карактеристике оцењује се да ли се одређена врста угља може користити за производњу кокса.

За оцену понашања угља при коксовању користе се углавном две методе: дилатометријска мерења уређајем Audibert–Arnu (Одибер-Арну) и метода Gray–King-a (Греј-Кинг).

Према методологији Одибер-Арну /38/ брикет, припремљен од праха узорка угља ставља се у уску цев и одозго на њега постави покретни челични клип, чије се померање током промена материје угља услед загревања прати. Изражавајући померања у процентима висине, добија се дилатометријска крива (ЈУС Б.Х8.330). Треба подвући да се угаљ не топи: прелазак у пластично стање са повишењем температуре јавља се као резултат термичког разлагања угљене материје уз добијање нових једињења, која образују течну, пластичну фазу.

Према методи Греј-Кинга коксни остатак, добијен при коксовању самлевоног угља (величине честица мање од 0,2 mm) разврстава се и оцењује поређењем са низом стандардних типова кокса. Словима А до G означавају се типови кокса, почињући од неспечених и завршавајући са чврстим, отпорним коксом, који има исту запремину као и почетни узорак угља (ЈУС Б.Х8.331).

4.1.5 ЗНАЧАЈ ПОДАТАКА ТЕХНИЧКЕ АНАЛИЗЕ

Свака од карактеристика, које су до сада разматране, има много шире значење и често пресудан утицај на целокупан систем, у коме се угаљ, користи. Ово се најбоље може уочити на примеру једне термоелектране, која користи угаљ различитог квалитета у спрашеном стању.

Овај утицај представљен је сумарно на Слици 4.10 и у даљем разматрању биће размотрен по појединим елементима система према Christopherson-у (Кристоферсону) /7/.

	Складиште угља	Транспортни уређаји	Млин	Горионик	Ложнице	Прегрејач паре	Загрејач воде	Загрејач ваздуха	Дувачи чађи	Вентилатор за димне гасове	Вентилатор за ваздух	Електрофилтер	Димњак	Депонија пепела
Топлотна моћ														
Гориве испарљиве материје														
Влага														
Пепео														
Састав пепела														
Топљивост пепела														
Сортиман сировог угља														
Тврдоћа														
Сумпор														

Слика 4.10

Утицај на складиште угља

Величине које утичу на складиштење угља су топлотна моћ, гориве испарљиве материје, влага, топљивост пепела и величина комада угља.

Капацитет складишта угља биће утолико већи, уколико је топлотна моћ угља мања при истој предвиђеној количини енергије. Садржај влаге, и у одређеном степену, величина комада имају исти ефекат. Што је садржај влаге већи, потребно је веће складиште. Сувише мали садржај горивих испарљивих материја или сувише ниска температура топљења пепела захтевају мешање оваквог угља са угљем већег садржаја горивих испарљивих материја, односно више температуре топљења, што захтева већи складишни простор. Угљеви са већим садржајем волатила захтевају брижљиво руковање због склоности ка самопаљењу на складишту.

Утицај на транспортне уређаје

Слични закључци важе као и за складиштење угља. Капацитет транспортних уређаја зависи од топлотне моћи. Да би се обезбедила иста количина топлоте дати транспортни уређаји радиће дуже да достави одређену количину угља ниже топлотне моћи (у односу на угаљ више топлотне моћи). Ово истовремено повећава трошкове и рада и одржавања, јер доводи до лепљења угља за елементе транспортног система и смањења капацитета. Слично, виши садржај воде има директне последице на транспортни систем. Утицај горивих испарљивих материја и топлivosti пепела је исти као и код складиштења угља.

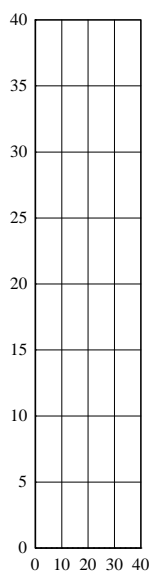
Што се тиче величине комада угља, транспортни систем може "захтевати" да се крупнији комади уситне. То значи да транспортни систем мора да буде тако изведен да целокупна количина угља прође кроз предвиђене решетке на путу ка пријемном бункеру.

Утицај на млинове

Млинови треба да самелу угаљ одређеног сортимана у угљени прах који се транспортује до горионика. Утицајни параметри угља на млин су:

- топлотна моћ,
- гориве испарљиве материје,
- влага,
- садржај пепела,
- састав пепела,
- величина честица, и
- тврдоћа угља.

За угљеве веће топлотне моћи, при истој количини потребне енергије, усвајају се млинови мањег капацитета. Гориве испарљиве материје утичу на конструкцију млина и на енергију коју треба утрошити да би се добила одговарајућа финоћа млевења (Слика 4.11). Најмања потрошња енергије уочена је за угљеве, чији је садржај горивих испарљивих материја 20-30%. Што се више енергије утроши на млевење угља, већи су и хабање млина и горионика, а самим тим и трошкови одржавања. Одстрањивање дела воде у млиновима може да има за последицу и појаву корозије. Пошто је тврдоћа минералне масе већа него тврдоћа угљене масе, повећање садржаја пепела у угљу захтева већи капацитет млина под свим осталим једнаким условима. Састав пепела има одлучујући утицај на хабање млинова. Присуство корунда у саставу пепела може да изазове веома јако хабање, што осетно повећа трошкове одржавања. Утицај величине комада које улазе у млин огледа се у чињеници да већи комади угља од предвиђене величине захтевају додатну енергију за млевење, што истовремено смањује капацитет млина. За млевење тврђег угља троши се више енергије чиме се смањује капацитет млина, а повећавају се и трошкови одржавања и рада.



Слика 4.11: Пошрошња енерѓије за млевење зависно од врсѿе угља (изражено садржајем волаѿила) /7/

Утицај на горионике

Горионик има функцију да доведену количину горива и ваздуха помеша и обезбеди услове да се паљењем и сагоревањем настале смеше, хемијска енергија горива преведе у топлотну.

Значајне особине горива важне за горионике су: топлотна моћ, гориве испарљиве материје и влага.

Мања топлотна моћ горива, уопштено посматрано, захтева већу стварну количину ваздуха потребног за сагоревање - ово директно утиче на конструкцију горионика. Смањењем топлотне моћи угљеног праха и снага горионика се смањује. Када се за случај угља мале топлотне моћи, конструктивне могућности исцрпе, једини пут да се оствари потребна количина топлотне енергије је да се повећа број горионика.

Гориве испарљиве материје омогућавају сигурно паљење и стабилно сагоревање смеше угљеног праха и ваздуха. Због тога се препоручује минимални садржај горивих испарљивих материја од 30%. Угаљ мањег садржаја од 30%, треба мешати са угљем већег садржаја горивих испарљивих материја [7]. У нашим условима мешање угљева врши се само у ТЕ Морава

За сушење угља, које се поред млевења, врши у млину, при повећаном садржају влаге се користе врели димни гасови рециркулисани са врха ложишта. Ови гасови и пара настала испаравањем влаге из горива повећавају запремину флуида који треба, заједно са угљем транспортовати до ложишта. Како је вентилациона способност млинова који се користе у савременим термоелектранама ограничена, потребно је у том случају смањити удео примарног ваздуха, тј. ваздуха који се са угљеним прахом и продуктима сушења угља удувава у ложиште.

Већ познат утицај на горионик имају и садржај пепела, као и његова топливост.

Утицај на ложиште

Коректна конструкција и димензионисање ложишта су предуслов да се оствари што потпуније сагоревање и спречи омекшавање пепела односно његово лепљење на грејним површинама. У ложишту се велики део топлоте, настао сагоревањем, преноси на екранске цеви где се врши испаравање воде.

Топлотна моћ, гориве испарљиве материје, влага, пепео, састав пепела и топливост пепела су битне особине горива које утичу на ложиште.

Мањи садржај горивих испарљивих материја смањује брзину сагоревања, што захтева веће димензије ложишта. Хигроскопска влага испарава за време процеса сагоревања, на шта се троши део топлоте. Настала водена пара успорава процес сагоревања, тако да је потребна већа запремина ложишта. Висок садржај пепела смањује количину топлоте размењену зрачењем што има за последицу веће ложиште. Такође, стварање наслага пепела на грејним површинама погоршава пренос топлоте, што смањује и степен корисности. Састав оксида у пепелу (присуство тврдих) директно утичу на хабање. Карактеристике топливости пепела су од пресудног утицаја за димензионисање ложишта. Да би се спречило лепљење пепела у пределу прегрејача, истошљени пепео би требало да отврдне пре него што напусти ложиште. Према немачким препорукама температуре димних гасова на излазу из ложишта треба да буде бар 50°C виша од температуре деформације пепела, а према енглеским - бар 30°C виша.

Утицај на прегрејач паре и загрејач воде

Функција прегрејача паре је да сувозасићену пару произведену у испаривачу котла прегреје до потребне температуре. Тип и геометрија прегрејача паре зависе

од: топлотне моћи, садржаја, састава и топлivosti пепела, као и од садржаја сумпора.

Димензионисање прегрејача паре се заснива на количини топлоте димних гасова, што је директно функција топлотне моћи и температуре димних гасова на излазу из ложишта (ограничене температуром деформације пепела). Садржај, састав и топливост пепела утичу на стварање наслага (смањују степен корисности котла), зачепљење простора између блиских цеви прегрејача паре и хабање. На повишеним температурама висок садржај сумпора доприноси повећању интензитета високотемпературске корозије, а тиме и смањењу века трајања прегрејача паре.

Утицај на загрејач ваздуха

Загрејач ваздуха се димензионише према расположивој количини топлоте димних гасова и жељеној температури загрејаног ваздуха.

Висок садржај пепела смањује ефикасност загрејача ваздуха, а заједно са повећаним садржајем влаге и високим садржајем сумпора може изазвати зачепљење и нискотемпературску корозију загрејача ваздуха.

Утицај на дуваче чађи

Што је виши садржај пепела, потребан је већи број дувача чађи. Уколико је састав пепела такав да изазива чврсте насlage, повећава се учесталост и продужује време рада дувача, што повећава и трошкове експлоатације.

Утицај на вентилатор за ваздух

Вентилатор за ваздух се димензионише према потребној количини ваздуха за сагоревање и паду притиска у ваздушном тракту. Што је топлотна моћ мања, потребна је већа количина ваздуха за сагоревање под свим другим једнаким условима(Слика 4.12) /7/.

Утицај на вентилатор димних гасова

Вентилатор димних гасова димензионише се према количини димних гасова и паду притиска у димном тракту. Количина димних гасова зависи директно од коефицијента вишка ваздуха са којим гориво сагорева, а индиректно од топлотне моћи: што је топлотна моћ мања, већа је количина димних гасова. Као и за-премина димних гасова зависи од влаге и садржаја сумпора у угљу.



Слика 4.12

Утицај на отпрашивач

Отпрашивач пепела се димензионише на основу запремине димних гасова и топлотне моћи и садржаја пепела. Величина отпрашивача пепела се повећава са већим садржајем пепела.

Утицај на димњак

Пречник ушћа димњака димензионише се на основу задате излазне брзине гасова, зависне од топлотне моћи, влаге и сумпора.

Утицај на депонију пепела

Величина депоније одређена је садржајем пепела у угљу.

4.2 ПРИРОДНА ЧВРСТА ГОРИВА

Природна чврста горива се у основи могу поделити на обновљива и необновљива. Обновљива чврста горива представљају горива која стално настају, односно која су, практично неисцрпна. Оваквих горива је, нажалост, мало, количина топлоте која се добија њиховим сагоревањем је мала, а њихово сагоревање обично представља најнерационалнији вид њиховог коришћења. Обновљива чврста горива чини углавном дрво и остаци његове прераде (гране, ивер, струготина, опилци и др.), биљне материје и остаци (слама, шаша, плева, кора и др.).

Необновљива природна чврста горива настала су највећим делом преображајем обновљивих чврстих горива или остатака живих организама (у мањој мери), процесом који је временски изузетно дуго трајао. Ова горива се практично не обнављају, а њихове резерве су исцрпљиве. Необновљива чврста горива чине тресет, све врсте угљева и гориви шкриљци.

4.2.1 БИОГОРИВА

Под појмом биогорива (биомаса) подразумева се широк опсег остатака биљних култура и материја насталих биолошким путем.

Типичне представнике чврстих биогорива чине:

- алге,
- дрво и остаци прераде (ивер, пиљевина, струготина, кора и др.),
- остаци ратарске производње и индустријске прераде (слама, плева, кукурузовина, окласак, љуске сунцокретових семенки, остаци пиринча, соје, лана, конопље, шећерне трске и др.).

Као и остала чврста горива, биогорива се могу користити:

- у процесима сагоревања (било у стању у каквом се налазе, било преведена у погодније облике - брикети, бале, на пример);
- у процесима термохемијског или ферментационог третмана преведећи их у етил алкохол, амонијак и др.

Код чврстих биогорива садржај воде се мења у широким границама, па тиме и топлотна моћ. Сведено на чисту гориву масу, сва биогорива имају топлотну моћ приближно једнаку целулози (око 17,5 MJ/kg).

4.2.1.1 Алге као гориво

Алге представљају веома примитивне биљке које конвертују (претварају) 6% сунчеве енергије. Претпоставља се, да би гајење алги у специјално конструисаним „рибњацима“ могло бити економичан начин производње горива односно

енергије. С обзиром на висок садржај влаге, потребно би било свести га на око 50%. Полазећи од морфологије алги ово би се могло постићи пресовањем - уз релативно мали утрошак енергије. Даље сушење у циљу повећања топлотне моћи коришћењем топлотне енергије није исплативо, јер је потребно уложити увек већу енергију, него што би се добило на повећању топлотне моћи /8/.

4.2.1.2 Дрво

Дрвена маса конвертује око 1% Сунчевог зрачења. Од укупне количине ове биомасе може се користити као гориво око 75%, јер се део налази у лишћу, корену, границима и пањевима.

Структура суве масе дрвета састоји се у основи из целулозе ($C_6H_{10}O_5$) и лигнина (сложеног једињења угљеника, водоника и кисеоника), а у малим количинама налази се смола, восак, масноће, беланчевине, танин и минералне примесе. Састав

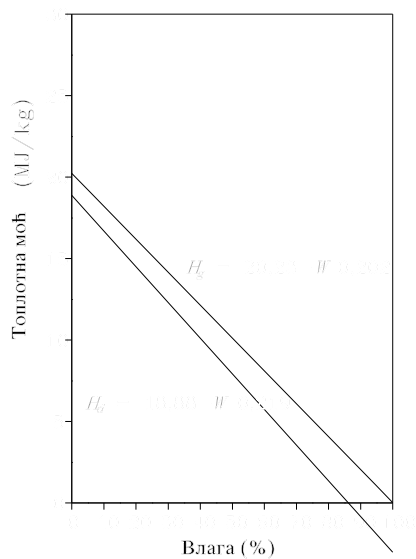
органске масе дрвета мало се разликује зависно од врсте дрвета и може се представити општим саставом:

$$C_o = 50\%, H_o = 6\%, O_o = 43\%, N_o < 1\%.$$

У дрвету практично нема сумпора, па се дати састав сведен на органску масу може сматрати и саставом сведеним на чисту гориву масу. Садржај пепела апсолутно сувог горива је незнатан (1-2%), а с обзиром на топлівост пепео је лако топлів. Садржај влаге код дрвета у природи креће се у границама 45-65%, а при складиштењу на ваздуху у периоду до 2 године смањује се на 18-20%.

Као последица практично непромењеног састава органске масе дрвета, топлотна моћ је приближно стална и износи 18,4 MJ/kg.

Садржај влаге знатно смањује



Слика 4.13 /10/

топлотну моћ; за радну масу дрвета израчунава се према обрасцу Kirsch-a (Кирша) /9/:

$$H_{dr} = 18,4 - 0,209 W_r, \quad \text{MJ/kg}$$

Новији подаци /10/ указују на следеће зависности топлотне моћи од садржаја влаге (Слика 4.13).

Знатан садржај горивих испарљивих материја ($V_g < 85\%$) условљава лаку упаливост дрвета. Брикетирањем остатака прераде дрвета добија се повољнији облик њиховог коришћења. Подаци о неким брикетима добијеним од дрвета дати су у Табели 4.6.

Табела 4.6 /14/

Узорак *	I	II	III	IV
Сагорљиво	67,02	65,93	91,06	90,43
W (%)	17,69	18,53	8,16	9,21
A (%)	15,29	15,54	0,78	0,27
S (%)	0,05	0,05	0,05	0,09
H_g (MJ/kg)	16,43	16,25	19,13	16,9
H_d (MJ/kg)	15,16	14,93	17,76	15,4

* Узорак I - 40% ситан угаљ + 60% пиљевина, Узорак II - 45% ситан угаљ + 55% пиљевина, Узорак III - чиста пиљевина, Пиљевина - 20% храстове ($W = 35\%$) + 80% јелове ($W = 5\%$), Узорак IV - пиљевина од буковине

Површина под шумама у СРЈ износи близу $3 \cdot 10^6$ ha, а дрвна маса $306 \cdot 10^6$ m³ /16/.

4.2.1.3 Пољопривредни остаци

Општа карактеристика пољопривредних остатака је њихова релативно велика запремина у односу на масу („складишна запремина“), па тиме и мала запреминска топлотна моћ (Табела 4.7).

Пољопривредни остаци, често ситног сортимана у процесу сагоревања пропадају кроз решетку ложинга, а у слоју споро и непотпуно сагоревају, па се зато приступа њиховом брикетирању.

У тропским земљама највећа количина пољопривредних остатака је добијена после експлоатације шећера из шећерне трске. У земљама умереније климе највећа количина отпадака ове врсте су слама и кукурузовина. У 1991. години произведено је у СР Југославији /17/:

- $4,109 \cdot 10^6$ t пшенице,
- $7,818 \cdot 10^6$ t кукуруза, и
- $376 \cdot 10^3$ t сунцокрета.

Табела 4.7: Складишна густина и зајремиска топлотна моћ сламе у зависности од припреме /16/

Облик припреме	Густина (kg/m^3)	$H(\text{kJ}/\text{m}^3)^*$
без припреме	35-70	385-770
гранулисана	50-100	550-1100
млевена	80-150	880-1650
пресована:		
нормалне бале	70-110	385-1210
округле бале	60-100	660-1100
брикети	400-800	4400-8800

* Рачунато са $H_d = 11 \text{ MJ/kg}$

Узимајући у обзир однос остатака ратарске производње (стабло+лист+окласак) и производа /18/ за кукуруз 1,4, а за пшеницу и сунцокрет 1,3 и производњу из 1991. године као меродавну за процену, добијају се, за најважније пољопривредне културе количине чврсте биомасе која се потенцијално може користити као гориво:

- за кукуруз $10,95 \cdot 10^6 \text{ t}$
- за пшеницу $5,34 \cdot 10^6 \text{ t}$
- за сунцокрет $488 \cdot 10^3 \text{ t}$.

Елементарни састав и топлотна моћ чисте гориве масе неких пољопривредних остатака дат је у Табели 4.8 /15/, а подаци техничке анализе остатака кукуруза (стабљике, листа и окласка) и сунцокретевог љуска дати су у Табели 4.9 /18/.

Табела 4.8

	Окласак кукуруза	Сунцокрет љуска	Слама	Памучна љуска
C_g (%)	48,28	52,51	46,78	46,67
H_g (%)	6,37	6,59	5,73	6,19
O_g (%)	44,01	39,69	46,78	46,21
N_g (%)	1,26	1,13	0,52	1,12
S_g (%)	0,08	0,08	0,10	-
H_g (MJ/kg)	19,59	21,77	17,97	18,50

Табела 4.9

	W_G (%)	W_{Ha} (%)	A_a (%)	V_{ga} (%)	K_a (%)	H_{ga} (MJ/kg)
Окласак	6,57	9,18	2,18	73,05	17,75	16,68
Стабљика	19,52	6,68	2,70	75,1	18,20	16,64
Лист	13,01	8,93	8,08	71,8	19,30	15,63
Љуска сунцокрета	2,49	7,23	2,93	73,4	15,5	20,29

Зависности топлотне моћи од садржаја воде, односно воде и пепела дате су на Сликама 4.14, 4.15, 4.16, и 4.17 /19/:

Општа карактеристика пољопривредних остатака је релативно неповољно понашање на повишеним температурама - топивост. Анализа пепела окласка кукуруза указује на следећи састав /20/:

SiO_2	-	49,95%
Al_2O_3	-	4,41%
Fe_2O_3	-	6,43%
CaO	-	5,13%
MgO	-	0,78%
K_2O	-	14,1%
Na_2O	-	1,21%
SO_3	-	3,04%

а карактеристичне температуре су:

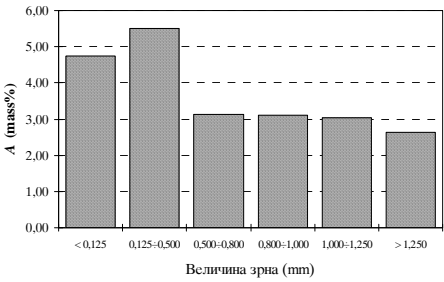
- температура синтеровања 880°C
- температура омекшавања 950°C
- температура полулопте 1100°C
- температура топљења 1210°C.

Узорак силосне прашине (отпадак у процесу силаже житарица - кукуруза, пшенице, соје и сунцокрета) са око 24% W_G , дефинисан је на основу података ситовне анализе, техничке анализе укључујући и топлотну моћ (Слике 4.18, 4.19, 4.20 и 4.21). Топлотна моћ аналитичке пробе износи: 15,83 MJ/kg, а радног горива 12,06 MJ/kg /21/.

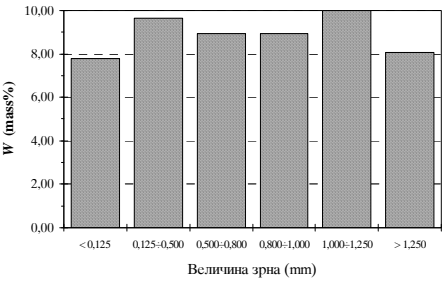
Погоднију форму коришћења биљних остатака чине брикети. Основни подаци о произведеним брикетима у СРЈ, дати су у Табели 4.10 /13/.

Табела 4.10

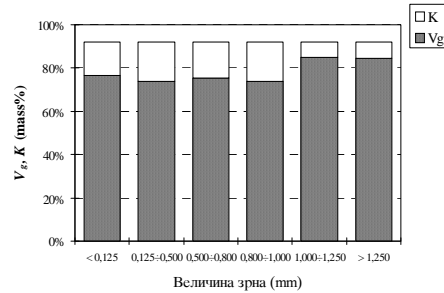
	Слама пшенице 100П50mm	Слама соје	Сунц.љуска	Кукурузовина
H_d (MJ/kg)	14,7-16	15,7-17,0	165	16-17,5
A (%)	105	-	55	-
S (%)	8	-	9	-



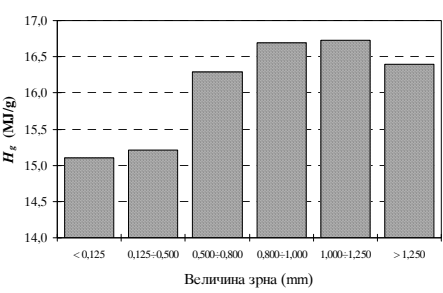
Слика 4.18



Слика 4.19



Слика 4.20



Слика 4.21

4.2.2 ТРЕСЕТ

Тресет представља прву фазу трансформације биљне материје у процесу који претходи настајању угља. По свом изгледу представља растреситу масу сиве до црне боје. Према степену извршене трансформације тресет може бити:

- влакнасти, који се састоји од још нераспаднутих остатака биљног растиња,
- земљаст, код кога се основни део трансформисао у тресетну масу, која садржи мали део нераспадног растиња, и
- смоласт, који се састоји из хомогене тресетне масе, која не садржи никакве остатке биљне праматерије.

Са степеном трансформације расте и квалитет тресета. Тресет се јавља у мочварним пределима и у зависности од места настајања разликујемо површински и дубински.

У састав органске масе тресета улазе угљеник (у границама 53-60%), водоник (4,5-6,5%), кисеоник (30-40%) и азот (1,5-3%). Садржај сумпора је веома мали и иде највише до 0,3%. Садржај пепела код површинског тресета је мањи и креће се у границама 3-5%, а код дубинског 6-12%. Пепео је у општем случају лако топљив што представља тешкоћу при његовом коришћењу. Садржај влаге креће се од 80 до 95%; сушењем на ваздуху у периоду до 2,5 месеца садржај влаге се смањује на 30-40%. Садржај горивих испарљивих материја иде до 90% (на гориву масу). Доња топлотна моћ аналитичке пробе је реда величине 11,75-12,58 MJ/kg [22].

Тресет се лако пали и гори дугим пламеном. Склон је самопаљењу при лежању на складишту. Због мале топлотне моћи, као и мале чврстоће, тресет се користи најчешће на месту његовог добијања. Користи се такође и у виду брикета.

Велика налазишта тресета су на северу Европе и Азије. Највећим резервама тресета на свету располаже Русија, где се индустријски широко користи.

4.2.3 УГАЉ

4.2.3.1 Порекло, састав и особине

Према досадашњим истраживањима утврђено је да порекло необновљивих чврстих горива потиче од биљне праматерије и само делом од остатака живих организама. Органску теорију настанка угља дефинисао је и доказао Gumbel (Гимбел) крајем 19. века. На сувом тлу, изумрла праматерија, која се првенствено састоји од угљеника, водоника и кисеоника, распада се у присуству кисеоника из атмосфере стварајући угљендиоксид и воду. У мочварним пределима или подручјима богатим водом, изумрла праматерија, биљног или животињског порекла, бива прекривена водом, па је тиме заштићена од деловања кисеоника из ваздуха. Овај остатак „нападнут“ је од стране такозваних анаеробних бактерија -

бактерија који за своју егзистенцију не захтевају слободан кисеоник. Као резултат овог бактериолошког третмана јавља се тресет. У току овог периода, садржај кисеоника и водоника се смањује, а садржај угљеника расте.

У току веома дугог временског периода тресет је био засипан и покриван песком, муљем и глином (Слика 4.22). Под притиском насталих слојева долази даље до издвајања гасовитих састојака из праматерије, а садржај угљеника расте. Тектонским поремећајима ова материја доспевала је на веће дубине и под повишеним притиском и температуром трпела даље промене које су довеле до стварања угља.

У целом овом процесу који је дуго времена трајао, првобитни састав је остао непромењен; однос између појединих састојака се, међутим, мењао. Садржај

Слика 4.22

угљеника је растао, а свих осталих елемената опадао. На Слици 4.23 дата је ова зависност /23/ изражена преко састава од биљне материје и тресета закључно са антрацитом, код кога је процес угљенисања најдаље отишао.

Илустрације ради може се навести да је за стварање слоја праматерије дебљине једног метра било потребно 3.000 година; за слој каменог угља дебљине једног метра било је потребно, међутим, 200 метара дебљине слоја праматерије /22/.

Најстарије врсте угљева настале су у периоду девона - пре око 450 милиона година, камени - у периоду карбона који је по угљу и добио име, пре око 380 милиона година, мрки - у периоду креде, а највећим делом у терцијеру („доба мрког угља“) пре 1 до 60 милиона година. Лигнити, најмлађи мрки угљеви,

настали су у периоду пре неколико милиона година, док је тресет настао пре око милион година.

Зависно од праматерије од које је настао, угаљ може бити хумусни, сапропелни и

Слика 4.23: Промена односа између угљеника, водоника и кисеоника, као и горивих испарљивих материја током угљенисања, представљена садржајем истих компоненти од биљне материје до антрацитна /23/

липтобиолитни. Ова класификација угља, такозвана генетичка класификација, потиче од немачког научника Potonie-a (Потонијеа) /24/ који је природна горива назвао каустобиолитима (caustos - горив, bios - живот, litos - камен). Биолити уопште, значи, означавају материје настале од живих организама, а каустобиолити представљају гориве биолите. Хумусни угљеви представљају угљеве чија је праматерија биљна. Сапропелни угљеви представљају угљеве чија праматерија потиче од остатака живих организама - органског муља (sapros - труо, pelos - муљ), док липтобиолитни угљеви представљају угљеве настале од воскова и смола.

Хумусни угљеви чине најраспрострањенију групу угљева.

4.2.3.2 Међународна подела угљева

Данас је на снази међународна класификација угљева, усвојена 1956. године од стране Комитета за угаљ Европске економске комисије Организације уједињених нација. Основу класификације чине три критеријума:

- садржај горивих испарљивих материја којим се угљеви деле на класе,
- карактеристике спацања (подела на групе), и
- карактеристике способности коксовања (подела на подгрупе).

Основна подела зависно од наведених утицајних фактора дата је Табелама 4.11, 4.12 и 4.13 и сумарно у Табели 4.14.

Табела 4.11: Класе угљева зависно од садржаја горивих испарљивих материја

Класа	Топлотна моћ влажног, беспепелног угља (MJ/kg)	Садржај горивих испарљивих материја на гориву масу (%)
0	-	0-3,0
1A	-	3,0-6,5
1B	-	6,5-10
2	-	10-14
3	-	14-20
4	-	20-28
5	-	28-33
6	Више од 32,44	33-41
7	30,14-32,44	33-44
8	25,53-30,14	35-50
9	23,86-25,53	42-50

Табела 4.12: Групе угљева према спацању

Група	Индекс надимања	Индекс Рога
1 - неспечени	0 - 1/2	0 - 5
2 - слабо спечени	1 - 2	5 - 20
3 - средње спечени	2 1/2 - 4	20 - 45
4 - јако спечени	више од 4	више од 45

Табела 4.13: Подгрупа угља према способности коксовања

Подгрупа	Понашање угља при загревању у дилатометру Одибер-Арну	Тип кокса према Греј-Кингу
0	не омекшава	A
1	долази само до контракције	B — D
2	после контракције шири се до првобитне висине	E — G
3	висина се повећа за 50%	G_1 — G_4
4	висина се повећава за 50-140%	G_5 — G_8
5	висина се повећава више од 140%	више од G_8

Према способности за коксовање угљеви се деле на шест подгрупа:

- Подгрупа 0 - не коксујући угљеви
- Подгрупа 1 - веома слабо коксујући
- Подгрупа 2 - слабо коксујући
- Подгрупа 3 - умерено коксујући
- Подгрупа 4 - јако коксујући
- Подгрупа 5 - врло јако коксујући.

На тај начин се угаљ, према усвојеном коду, означава са три цифре: прва означава класу, друга - групу, трећа - подгрупу. Пример класификације показате се за угаљ, за који су познати следећи подаци:

- $V_g = 37\%$ (на чисту гориву масу),
- $H_d = 31,81 \text{ MJ/kg}$ (за влажан, беспепелни угаљ),
- Индекс надимања = 5,
- Особина спицања - према методу Рога = 65,
- Максимално повећање запремине = 60%,
- Тип кокса према Греј-Кингу = G_6

Пошто садржај горивих испарљивих материја прелази 33%, класа се може одредити само помоћу топлотне моћи. На тај начин прва цифра према класи ће бити 7. Како је индекс надимања 5, а спеченост према методу Рога 65, угаљ ће се односити на групу 4, и то ће бити друга цифра. Максимално повећање запремине износи 80%, а алтернативно, тип кокса према Греј-Кингу износи G_6 - па ће трећа цифра бити 4. На тај начин посматрани узорак угља, према Међународној класификацији, биће означен бројем 744.

Према овој класификацији угљеви су подељени у седам група - група I се дели на две, група V - на четири, а група VI на две подгрупе.

Табела 4.14: Међународна подела камених угљева и антрациѡа

4.2.3.3 Мрки угљеви

Према степену угљенисања, мрки угљеви заузимају положај између тресета и камених угљева. У поређењу са тресетом, мрки угљеви су тамније боје, поседују већу густину и мање су хигроскопни. Између мрких, поготово старијих, и камених угљева не може се визуелно направити јасна граница.

У зависности од структуре, степена угљенисања и особина, мрки угљеви се деле на лигните, земљасте и смоласте мрке угљеве. Најмлађи су лигнити; они су претрпели најмање промене у односу на биљну праматерију. Према спољашњем изгледу лигнити чине светло мрку масу са јасно израженом дрвенастом структуром. Смоласти мрки угљеви представљају продукт дубоке трансформације биљне праматерије и за разлику од лигнита изразито су црне боје и поседују већу густину. Према својим особинама приближавају се младим каменим угљевима. Земљасти мрки угљеви се по својим особинама налазе између лигнита и смоластих мрких угљева.

У органској маси мрких угљева налази се 65-75% угљеника, 5-6% водоника, 17-28% кисеоника и азота и до 5% сумпора. Садржај воде креће се од 20-55%, а садржај пепела - од 7-45%. Садрже у већини случајева велику количину горивих испарљивих материја (40%, а код лигнита и 60%), а коксни остатак им је неспечен. При сагоревању образују дуг пламен.

Доња топлотна моћ чисте гориве масе мрких угљева не прелази 29,3 MJ/kg. Доња топлотна моћ радне масе је веома мала услед великог садржаја баласта (воде и минералних примеса) и износи од 6,3 до 16,8 MJ/kg.

Мрки угљеви су топлотно непостојани, мале тврдоће и чврстоће. Склони су променама при лежању на складишту, ситнећи се, а веома су склони оксидацији и самопаљењу.

Мрки угљеви се претежно користе за сагоревање у великим тероенергетским постројењима у спрашеном стању, а осим тога користе се и за даљу прераду у племенитије облике чврстих горива (брикете и полукокс) или у гасовита горива.

4.2.3.4 Камени угљеви

Камени угљеви представљају производ скоро потпуне трансформације почетне материје. За разлику од мрких угљева они садрже (на органску масу горива) више угљеника - 75 до 90%, а мање водоника и кисеоника ($H_o = 4-6\%$, $O_o = 2-28\%$); садржај сумпора се креће до 5%.

Камени угљеви су мање хигроскопни, а поседују већу густину и чврстоћу. Количина горивих испарљивих материја мења се у широком опсегу: од 10 до 45% (на чисту гориву масу). Садржај воде се креће у границама 3-15%, а пепела 10-

20%. Доња топлотна моћ радне масе камених угљева налази се у интервалу 20,9-29,3 MJ/kg.

У поређењу са мрким угљевима, камени угљеви су хемијски стабилнији, мало мењају особине при лежању на складишту; неке врсте су ипак склоне самопаљењу.

4.2.3.5 Антрацити

Антрацити представљају угљеве код којих је процес угљенисања - процес трансформације исходне праматерије - практично завршен. Садржај угљеника се зато код антрацита креће, сведено на органску масу, чак до 97-98%. Садржај воде у радној маси је око 6%, а пепела у границама 8-20%. Пепео је по правилу лако топлив. Антрацити имају несечен коксни остатак. Садржај горивих испарљивих материја је у границама 2-9% на чисту гориву масу. Тешко се пале и горе плавичастим пламеном.

У поређењу са каменим угљевима антрацити поседују још већу густину, мање су хигроскопни и веома су стабилни при складиштењу.

Доња топлотна моћ антрацита креће се у границама 21,1-27,2 MJ/kg.

4.2.4 ГОРИВИ ШКРИЉЦИ

Гориви шкриљци су се образовали од органског муља, насталог распадањем биљних и животињских организама - планктона стајаћих вода. Настали муљ се без присуства ваздуха разлагао даље, при чему је растао садржај угљеника и водоника. Добијена органска маса се мешала са великом количином минералних материја, постајала гушћа услед притиска слојева изнад ње и трансформисала се у стену прожету органском масом.

Минералне материје горивих шкриљаца чине кречњак, глина и песак. Садржај минералних материја достиже 70% рачунато на апсолутно суву масу, а воде, рачунато на радну масу, 20%. У органској маси горивих шкриљаца, као и у нафти, налази се висок садржај водоника - до 9,5%. Ово условљава велику количину горивих испарљивих материја, рачунатих на чисту гориву масу - до 80%, а тиме и лаку упаљивост. Садржај угљеника у органској маси износи 70%, а садржај сумпора - до 4,5%.

Знатан садржај угљеника и водоника у горивој маси горивих шкриљаца одређује високу вредност топлотне моћи: доња топлотна моћ рачуната на чисту гориву масу износи 27,2-33,5 MJ/kg. Ипак услед велике количине баласта топлотна моћ рачуната на радну масу износи свега 5,9-10,0 MJ/kg. Карактеристике најбоље истражених уљних шкриљаца су дате у Табели 4.15 [25].

Гориви шкриљци се користе или за масовну производњу електричне енергије у термоелектранама или се прерађују у гасовита и течна горива. Две термоелектра-

Табела 4.15

Налазиште	Природна влага	Садржај у односу на суву материју			Условна органска материја	Доња топлотна моћ (kJ/kg)
		Пепео	CO ₂	Општи S		
Естонија	10,0	47,0	18,0	1,5	35,4	13200
Green River (САД)	0,2	59,8	4,9	0,8	13,8	5100
Irrati (Бразил)	16,2-20,5	72,3	1,3	0,9	26,4	7600
Norke (Шведска)	1,40	79,0	1,0	5,3	20,0	8400
Lotiani (Шкотска)		78,0		0,7	19,0	5900
Фу Шун (Кина)	5,0	78,5	3,8	0,5	18,6	5800
Аустралија		51,6			49,7	18800

не, свака снаге по 1600 MW изграђене су у Естонији са горивим шкриљцима као горивом /26/.

Сагоревање горивих шкриљаца оставља много пепела и ствара наслагe на грејним повшинама, абразијом оштећује опрему итд. Низак је степен корисности котла и високи су транспортни трошкови пепела.

4.2.5 ДОМАЋИ УГЉЕВИ

Основу наших угљева према резервама, датих у глави I, чине лигнити са око 90% и мрки са скоро 10%. Камених угљева има у недовољним количинама: 0,5%. Зато ће се у даљем излагању основна пажња поклонити лигнитима и мрким угљевима.

На основу основних показатеља квалитета угља (влаге, топлотне моћи и садржаја горивих испарљивих материја) извршена је подела наших угљева, како је дато у Табели 4.16 (ЈУС Б.Х0.001...).

Табела 4.16

Врста угља	Укупна влага (%)	Доња топлотна моћ без влаге и пепела (MJ/kg)	Испарљиве материје без влаге и пепела (%)	Ознака угља
Лигнит	изнад 40	23-25		Л
Мрко-лигнитски угаљ	30 - 40	25-26		МЛ
Мрки угаљ	10 - 30	26-30		М
Камени угаљ	испод 10	изнад 29,7	испод 40	К

4.2.5.1 Домаћи лигнити

Наши лигнити су хумусни угљеви са малим количинама сапропелних и воштаних примеса. Могу бити дрвенасти (ксилитни) или аморфни (земљастни). Лигнити се обично у нас налазе на малој дубини - од неколико метара до неколико десетина метара, па се експлоатишу површинским коповима.

Садржај угљеника у односу на чисту гориву масу је у границама 60-65%, водоника 4-6%, а кисеоника и азота 20-30%. Садржај влаге на радну масу рачунато је 40-60%, а садржај пепела 7-18%. Садржај горивих испарљивих материја рачунато на чисту гориву масу креће се у границама 35-60%. Коксни остатак им је трошан. Сагоревају дугим чађавим пламеном црвено-жуте боје. Доња топлотна моћ радне масе наших лигнита због великог садржаја баласта је мала и налази се у опсегу 5,2-9,5 MJ/kg. Наши лигнити су веома непостојани на складишту и склони су самопаљењу.

Могућности примене наших лигнита су због његових карактеристика прилично ограничене: њихово основно рационално коришћење је у котловским јединицама велике снаге термоелектрана - сагоревањем у спрашеном стању. Без обзира на мању ксилитни лигнити се тешко мељу [32]. Друга могућност је у превозињу у гасовита горива. Срећна је околност да се лигнити релативно лако добијају површинским коповима, па је савременим средствима механизације њихово добијање економично. Практично у свим великим басенима налазе се и термоелектране.

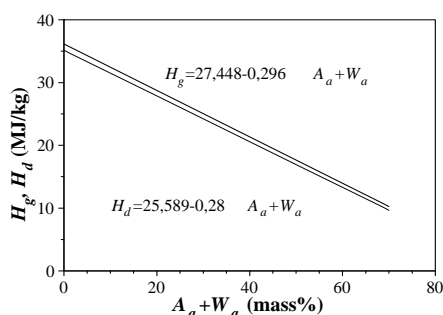
Налазишта лигнита у СРЈ су углавном у Србији. Налазишта лигнита у Србији су: Костолац, Косово, Метохија, Колубара, Деспотовачки рудници.

Рудници мрколигнитног угља, прелазног облика између мрких и лигнита су: Соко, Јелашница, Манасија и Оплењак у Србији и Пљевља у Црној Гори.

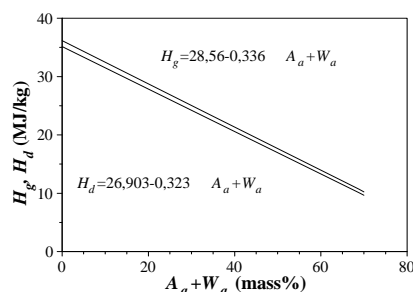
Подаци о нашим лигнитима, из рудника Колубара и Косово, дати су у Табелама 4.17 и 4.18. Зависност топлотне моћи од садржаја баласта за ове руднике дата је на Сликама 4.24, 4.25 [28]. Зависност топлотне моћи од садржаја баласта за неке домаће угљеве (мрке и камене) дата је следећим изразима:

$$\begin{aligned} \text{Боговина: } H_g &= 30,317 - 0,347(A_a + W_a) & \text{Јаворско: } H_g &= 35,964 - 0,383(A_a + W_a) \\ H_d &= 28,91 - 0,352(A_a + W_a) & H_d &= 34,603 - 0,374(A_a + W_a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ушће: } H_g &= 36,15 - 0,37(A_a + W_a) \\ H_d &= 35,142 - 0,364(A_a + W_a) \end{aligned}$$



Слика 4.24



Слика 4.25

4.2.5.2 Домаћи мрки угљеви

Према праматерији из које су настали, наши мрки угљеви су претежно хумусни и хумусно-сапропелни угљеви. Елементарни састав је прилично променљив. Рачунато на гориву масу угља угљеника има у границама 65-75%, водоника - 4-6%, кисеоника и азота 15-27%, а сумпора 2-10%. Садржај грубе влаге радне масе наших мрких угљева креће се од 3 до 20%, а хигроскопне влаге, за гориво суво на ваздуху од 6 до 20%. Количина пепела је у границама 10-30% на масу суву на ваздуху, што му отежава примену, а сам пепео је лако топлјив.

Садржај горивих испарљивих материја је у опсегу 28-40%, па се лако пале и брзо сагоревају дугим жутим до светлорвеним, доста чађавим пламеном. Доња топлотна моћ у радном (реалном) стању креће се у интервалу 14,67-18,18 MJ/kg. При лежању на складишту наши мрки угљеви су непостојани, оксидишу и склони самопаљењу. Користе се различите врсте пећи и ложишта, за прераду у гасовита горива, за прераду сувом дестилацијом и др.

Налазишта мрких угљева су у Србији и то: Ресавско-Моравски рудници, Боговина, Соко.

Табела 4.17: Подаци техничке и елементарне анализе угља из рудника Колубара /27/

	Радна маса	Маса сува на ваздуху	Апсолут- но сува маса	Чиста горива маса
ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА				
Укупна влага W (%)	50,39		-	-
Хигроскопска влага W_H (%)	9,11	15,52	-	-
Груба влага W_G (%)	41,28	-	-	-
Сагорљиво (%)	30,60	52,12	61,69	100
Пепео A (%)	19,00	32,36	38,31	-
Гориве испарљиве материје (%)	17,11	29,14	34,49	55,91
Коксни остатак K (%)	32,50	55,34	65,51	44,09
Фиксни угљеник C_{fix} (%)	13,49	22,98	27,20	44,09
Сумпор укупни S_u (%)	0,64	1,09	1,29	-
Гориви сумпор S_g (%)	0,23	0,39	0,46	0,75
Везани сумпор S_A (%)	0,41	0,70	0,83	-
ТОПЛОТНА МОЋ				
Горња топлотна моћ H_g (MJ/kg)	8,407	14,317	16,947	27,471
Доња топлотна моћ H_d (MJ/kg)	6,779	13,164	16,004	25,943
ЕЛЕМЕНТАРНА АНАЛИЗА				
Угљеник C (%)	23,72	40,40	47,82	77,52
Водоник H (%)	2,26	3,84	4,55	7,38
Азот N (%)	0,47	0,80	0,95	1,54
Кисеоник O (%)	3,93	6,69	7,91	12,81
Сумпор S (%)	0,23	0,39	0,46	0,75

Табела 4.18: Подаци техничке и елементарне анализе уља из рудника Косово /27/

	Радна маса	Маса сува на ваздуху	Апсолут- но сува маса	Чиста го- рива маса
ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА				
Укупна влага W (%)	41,13		-	-
Хигроскопска влага W_H (%)	7,93	11,87	-	-
Груба влага W_G (%)	33,20	-	-	-
Сагорљиво (%)	36,81	55,10	62,52	100,00
Пепео A (%)	22,06	33,03	37,48	-
Гориве испарљиве материје (%)	18,31	27,41	31,10	49,74
Коксни остатак K (%)	40,56	60,72	68,90	50,26
Фиксни угљеник C_{fix} (%)	18,50	27,69	31,42	50,26
Сумпор укупни S_u (%)	1,07	1,60	1,816	-
Гориви сумпор S_g (%)	0,17	0,25	0,28	0,46
Везани сумпор S_A (%)	0,90	1,35	1,536	-
ТОПЛОТНА МОЋ				
Горња топлотна моћ H_g (MJ/kg)	7,070	10,584	12,010	19,209
Доња топлотна моћ H_d (MJ/kg)	5,692	9,664	11,279	18,034
ЕЛЕМЕНТАРНА АНАЛИЗА				
Угљеник C (%)	22,85	34,20	38,81	62,08
Водоник H (%)	2,08	3,12	3,53	5,65
Азот+Кисеоник $N+O$ (%)	11,71	17,52	19,89	31,81
Сумпор S (%)	0,17	0,25	0,28	0,46

Напомена: Подаци дати у Табелама 4.18 и 4.19 су дати илустрације ради. У пракси састав и особине варирају у ширим границама.

4.2.5.3 Домаћи камени угљеви

Налазишта камених угљева у нашој земљи чине Ибарски рудници.

У чистој горивој маси камених угљева има: угљеника 76-97%, водоника 1,5-5,5%, кисеоника и азота 2-10%, а сумпора 1-6%. Садржај грубе влаге креће се у границама 2-6%, а хигроскопске (маса сува на ваздуху) 1-5%.

Наши камени угљеви поседују велику количину минералних примеса, које у неким случајевима прелазе и 30%, а пепео им је лако топљив. Садржај сумпора им је такође висок што отежава њихову примену.

4.2.6 ГОРИВИ ШКРИЉЦИ У СР ЈУГОСЛАВИЈИ

Резерве горивих шкриљаца у нашој земљи нису до сада ближе утврђене. До сада је утврђено њихово постојање у Србији. Распрострањеност горивих шкриљаца у Србији захвата Нишки, Врањски, Куршумлијски, Трстенички, Ваљевско-Мионички и најбоље истражен Алексиначки басен /29/. У саставу Алексиначких шкриљаца има 32% органске материје, 65% минералних примеса и 3% влаге /22/. Неки подаци о алексиначком шкриљцу дати су у Табели 4.19 /25/.

Табела 4.19

Влага	(%)	5,78
Пепео	(%)	62,62
Укупни сумпор	(%)	3,60
Пиритни сумпор	(%)	2,42
Сулфатни сумпор	(%)	0,96
Органски сумпор	(%)	0,22
Гориве испарљиве материје	(%)	31,30
Органска горива маса	(%)	37,38
Топлотна моћ	(MJ/kg)	10,655

Елементарни састав органске масе као и топлотна моћ износе /25/: $C-78,26\%$, $H-11,25\%$, $S-0,83\%$, $O+N-9,66\%$, а топлотна моћ $H_g-28,504$ MJ/kg.

4.3 ПОСТУПЦИ ПРИПРЕМЕ ЧВРСТИХ ГОРИВА

Да би се угаљ ефикасно и економски оправдано могао да користи потребно га је, пре употребе, на одговарајући начин припремити. У току процеса припреме угаљ се ослобађа дела минералних примеса, уситњава до одређене величине честица, оптималне за одговарајућу намену и, када је то могуће, ослобађа дела влаге. Припрема угља се врши:

- одстрањивањем грубих механичких примеса,
- уситњавањем,
- просејавањем и раздвајањем по величини, и
- делимичним ослобађањем од влаге.

Поступци одстрањивања грубих механичких нечистоћа и влаге и грубо дробљење се обично изводе по вађењу угља, а остали, укључујући и касније ситњење, изводе се зависно од намене.

4.3.1 УСИТЊАВАЊЕ УГЉА

Уситњавање угља је процес смањивања величине комада или честица угља деловањем спољних утицаја. Уситњавање може бити:

- припремно, ако се врши у циљу припреме угља за одстрањивање минералних примеса (дробљење великих комада), или
- коначно (завршно), ако су продукти дробљења спремни за употребу у величини до које су уситњени.

Остваривање овог процеса може се вршити на неколико принципијелно различитих начина или њиховом комбинацијом: ударом (Слика 4.26а, б, в, и г), притиском (Слика 4.26д), гњечењем (Слика 4.26ђ), цепањем (Слика 4.26е) и променом унутрашњих напона (ако се комад угља изложи нагло смањењу притиска у околини, Слика 4.26ж).

У условима континуалног процеса уситњавања, због хаотичности распореда и кретања комада који се у уређају јављају, могу бити заступљени сви случајеви уситњавања - један од њих је ипак заступљен у највећој мери, а по њему уређај носи име или се разврстава у одређену групу.

У експлоатацији се разликују следећи поступци уситњавања:

- дробљење и
- млевење.

Слика 4.26

Дробљење је део процеса уситњавања у коме се величина комада, од највећих (1500 mm) своди на жељену; при томе се разликују:

- крупно дробљење при коме се величина готовог продукта креће у границама од 100 до 200 mm,
- средње, са величином готовог продукта од 25 до 80 mm, и
- ситно, са величином готовог продукта од 3 до 25 mm.

Уређаји у којима се врши дробљење називају се дробилице. Зависно од конструктивног решења односно начина рада дробилице се деле на:

- чељустне (Слика 4.27),
- ваљкасте (Слика 4.28), и
- ударне (Слика 4.29).

Чељустне дробилице се користе углавном за крупно и средње дробљење, конусне за све врсте дробљења, ваљкасте за средње и ситно дробљење, а ударне за ситно дробљење па чак и грубо млевење.

Слика 4.27: Челјусна дробилица

У процесу млевења величина претходно уситњеног материјала своди на још мању величину. Разликују се грубо млевење са величином готовог продукта већом од 0,5 mm и фино млевење са величином готовог продукта мањим од 0,5 mm. О врстама млинова биће речи у одељку 4.4.1.

Слика 4.28: Ваљкаста дробилица

Слика 4.29: Ударна ројторна дробилица, 1-облоге, 2-ројтор, 3-вијак, 4-ударна плоча, 5-одбојне плоче, 6-ланчана завеса

4.3.2 ОСЛОБАЂАЊЕ ОД ГРУБИХ МЕХАНИЧКИХ НЕЧИСТОЋА - ФЛОТАЦИЈА

Ослобађање угља од грубих механичких нечистоћа је једна од основних мера које омогућавају побољшање особина и рационалније коришћење угља. Одстрањивање грубих примеса представља сложен процес који као резултат даје смањење садржаја минералних примеса и обогаћује угаљ горивом масом.

Најшире коришћене методе у овом смислу су методе које се заснивају на разлици густина угља ($1200\text{--}1600 \text{ kg/m}^3$) сепарације угаљ и минералних примеса ($1800\text{--}5200 \text{ kg/m}^3$). Поступцима мокре у кокама се потапа у воду обогаћену песком или другим „тешким“ материјама, тако да добијена суспензија има густину већу од угља. Угаљ се издваја и плива по површини, а минералне примесе падају на дно.

Уређаји којима се одстрањују минералне примесе називају се сепаратори и према начину деловања деле се на гравитационе и центрифугалне (Слика 4.30) /31/.

Слика 4.30: Центрифугални сепаратори

4.3.3 ПРОСЕЈАВАЊЕ И РАЗДВАЈАЊЕ ПО ВЕЛИЧИНИ

У циљу добијања комада одређене величине, потребне за одговарајућу намену, врши се просејавање на ситима различитог облика и величине. Само просејавање може да се дефинише као механички поступак раздвајања честица или комада угља на групе - фракције одређених величина.

Зависно од конструктивног решења, величине отвора и начина рада уређаји за просејавање се деле на:

- решетке (Слика 4.31а),
- решета (Слика 4.31б), и
- сита (Слика 4.31в).

Проласком преко једне површине просејавања материјал се раздваја у две класе - горњу и доњу, или надрешетни и подрешетни производ. Горњу класу чине зрна, односно комади, чија је величина већа од величине отвора, а доњу она чија је величина мања или једнака величини отвора.

Слика 4.31

Уколико је потребно да се материјал издвоји у више класа користе се сита са већим бројем површина просејавања. Ове површине се постављају једна за другом или једна испод друге, када се добијају, у првом случају редна а у другом паралелна сита.

Према начину рада уређаји за просејавање могу бити статичког и динамичког дејства. Површина просејавања код уређаја статичког дејства поставља се у односу на хоризонт косо, под углом већим од угла природног клизања материјала, чиме се омогућава гравитационо кретање (Слика 4.32). Уређаји динамичког дејства могу бити клатећи или вибрациони (Слика 4.31в).

Решетке се праве од профилисаних шипки поређаних паралелно (Слика 4.31а). Попречни профили шипки бирају се тако да горњи отвор решетки буде увек већи од доњег.

Површине просејавања сита и решета образују се од мрежа израђених од металних нити за сита, или перфорирањем танких лимова за решета.

Слика 4.32

Слика 4.33

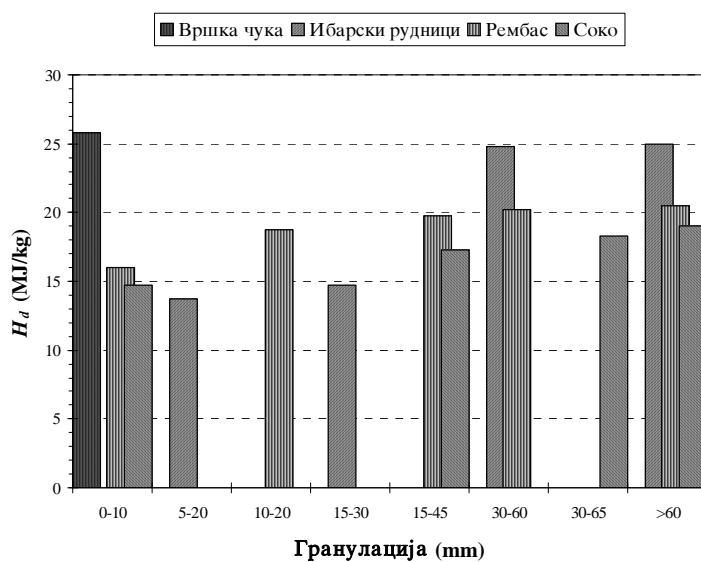
Отвори мрежа сита су квадратни или правоугаони, отвори перфорираних лимова решета могу бити округли, квадратни, правоугаони или неког другог сложеног облика (Слика 4.33).

У нашој земљи се користи следећа подела за разврставање угља по величини према ЈУС Б.Х0.001 (Табела 4.20). Несортиран угаљ назива се „ровни“ угаљ. Зависност топлотне моћи неких наших угљева од сортимана дата је на Слици 4.34.

4.3.4 ОДСТРАЊИВАЊЕ ВЛАГЕ

Делимично одстрањивање влаге у експлоатацији врши се на више начина:

- природним сушењем,
- дренажањем, тј. природним одстрањивањем воде из угља под утицајем сопствене тежине,
- центрифугирањем, и
- филтровањем.



Слика 4.34

Табела 4.20

Сорти-ман	Камени		Мрки		Мрко-лигнитски и лигнит		Сушени угаљ	
Назив и Ознака	Доња граница (mm)	Горња граница (mm)	Доња граница (mm)	Горња граница (mm)	Доња граница (mm)	Горња граница (mm)	Доња граница (mm)	Горња граница (mm)
Комад А	60-80	неодређено	60	неодређено	80-120	неодређено	60	неодређено
Коцка В	30	60	30-40	60-65	40-65	80-120	30	60
Орах С	15-20	30	15-20	30-40	20-35	40-65	12-15	20
Граh Д	5-10	10-20	5-10	15-20	10-20	20-35	5	12-15
Ситан Е	0	5-10	0	5-10	0	10-20	-	-
Гриз F	0	35	3-5	10	5-10	10-20	-	-
Прах G	0	3	0	3-5	0	5-10	0	5

Дренирање, као поступак за смањење садржаја влаге у угљу, користи се у бункерима за угаљ, на непомичним решетима, у елеваторима и на складишту. Код свих поступака одстрањује се добар део грубе влаге. Временски посматрано, у почетку се одстрањује највећи део влаге. Одстрањивање на дренажним површинама траје утолико дуже уколико је дебљина слоја већа и мања величина комада. Што се тиче одвајања влаге у бункерима, прво се ослобађају влаге горњи слојеви, а затим доњи. Већа висина слоја и мањи комади угља захтевају дуже време за одстрањивање влаге. Неопходно време за комаде веће од 13 mm износи 6-8 часова, а за комаде величине од 0,5 до 13 mm 16-24 часа [31]. Део воде одстрањује се и приликом транспорта угља у елеваторима.

Зависно од намене угља одстрањивање влаге се може остварити и у сушницама.

4.4 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ УГЉА

Зависно од састава и особина, угаљ се користи било у процесима сагоревања, било у процесима прераде у квалитетнија чврста, течна или гасовита горива.

При преради у друга горива, разликују се процеси код којих се само незнатно или уопште не мења састав почетне масе - процеси механичке, примарне прераде, којом приликом се мења само вид и облик, и процеси у којима се суштински мења састав - процеси хемијске, секундарне прераде, код којих се мења и вид и облик као и хемијски састав, углавном у циљу добијања квалитетнијих производа.

Примарни процеси прераде су брикетирање и млевење угља, а секундарни, поступци којима се из природних чврстих горива добијају прерађена чврста, течна и гасовита горива.

У оквиру овог поглавља неће бити речи о производњи течних и гасовитих горива из чврстих, већ у одељцима о течним и гасовитим горивима.

4.4.1 МЛЕВЕЊЕ УГЉА И САГОРЕВАЊЕ УГЉЕНОГ ПРАХА

Како се у нас угаљ највећим делом користи за производњу електричне енергије сагоревањем у спрашеном стању, то ће се овим поступцима посветити највећа пажња. У том смислу, поступке механичке прераде угља, а нарочито процес млевења угља може се сматрати примарним процесима његове примене.

На Слици 4.35 приказана је шема транспорта угља у оквиру савремене термоелектране велике снаге у којој се као гориво користи лигнит. Угаљ се до термоелектране допрема вагонима нарочите конструкције (у случају када је термоелек-

трана у близини рудника за допрему се користе тракасти транспортери). Из вагона се истоварује у пријемни бункер одакле се системом тракастих транспортера доводи у расподељиваче, којима се угаљ може усмерити било ка складишту, било ка котловским бункерима. На складиште се угаљ допрема системом транспортних трака, а са њега, помоћу роторског претоваривача, преко пресишног уређаја, на коси тракасти транспортер. Са косог транспортера угаљ доспева на систем надбункерских трака, а затим у котларничке бункере из којих се млинским додавачима доводи до постројења за припрему угљеног праха.

4.4.1.1 Припреma угљеног праха

У постројењима за припрему угљеног праха врши се млевење угља и његово сушење, у случају повећаног садржаја влаге.

Сушење угља може да се врши воденом паром, produktima sagorevanja течnog goriva, vazduhom zagrejanim u parnom kotlu ili produktima sagorevanja recirkulisanim iz ložišta. Proces sušenja je otvoren ako se produkti sušenja izbaćuju u atmosferu, a zatvoren ako se oni uduvavaju u ložište parnog kotla zajedno sa ugljenim prahom i primarnim vazduhom.

Према начину транспорта угљеног праха и процесу сушења, постројења за припрему угљеног праха се деле на централизовану, међубункерску и индивидуалну.

У централизованом постројењу се угаљ најпре суши у заједничкој сушари воденом паром или продуктима сагоревања течног горива по отвореном процесу, па се меље у млиновима. Добијени угљени прах се смешта у бункере, одакле се посебним уређајима разводи у горионице.

Код међубункерског система се млевење и сушење обавља у млиновима смештеним у непосредној близини котла. Продукти сушења се избацују у атмосферу, а угљени прах транспортује у бункер између млинова и котла, одакле се прах транспортује у горионице.

Основна предnost централизованог и међубункерског система је што у ложиште долази сушени угаљ који је бољег квалитета од полазног, али је проблем експлозије сушеног угљеног праха практично нерешив, па се ова два система више не користе.

Индивидуални систем припреме угљеног праха се од међубункерског разликује само по одсуству бункера за угљени прах и затвореном процесу сушења. Наиме, угаљ се меље и суши у млиновима загрејаним ваздухом или рециркулисаним продуктима сагоревања, па се мешавина угљеног праха, продуката сушења и примарног ваздуха (такозвана аеросмеша) кроз горионице директно удубава у ложиште.

Слика 4.35: 1-Железничка композиција, 2-Бункер за угља, 3-Систем транспортних трака, 4-Пресини уређај, 5-Транспортна трака за угља на складишту, 6-Приспособљено складиште угља, 7-Роторски претоваривач, 8-Трака за транспорт угља са складишта, 9-Расподељивачи угља, 10-Коси тракасти транспортер, 11-Надбункерске транспортне траке, 12-Котларнички бункер, 13-Млински додавач

Индивидуални систем припреме угљеног праха или систем са директним удувавањем, како се још назива, данас се искључиво користи за производњу угљеног праха у термоенергетским постројењима. За квалитетније угљеве, који имају мањи садржај влаге, угаљ се суши загрејаним ваздухом, док се за сушење лигнита искључиво користе врели продукти сагоревања рециркулисани са врха ложишта, температуре око 950°C .

Основни елемент постројења за припрему угљеног праха је млин. Конструкција млина зависи од врсте угља који се у њему меље. Постоји приличан број различитих концепција, али се млинови најчешће деле на спороходе, средњеходе и брзоходе. Спороходи и средњеходи млинови служе за млевење квалитетнијих угљева, углавном камених. За мрке угљеве и лигните се користе брзоходи млинови са бројем обртаја ротора $n = 12,5 \div 25 \text{ s}^{-1}$. У ову групу спадају млинови чекићари и вентилаторски млинови. Млинови чекићари имају слабо вентилационо дејство, па се данас углавном не користе за млевење угља. За млевење мрких угљева и лигнита у термоенергетским постројењима данас се скоро искључиво користе вентилаторски млинови, који су конструкције сличне радијалним вентилаторима, али са ојачаним лопатицама и кућиштем /32/ (Слика 4.36).

Термоенергетска постројења су опремљена, зависно од снаге, са $2 \div 8$ млинова са свим елементима која улазе у састав постројења за припрему угљеног праха.

Слика 4.36

На Слици 4.37 приказано је постројење за припрему угљеног праха лигнита по индивидуалном систему за сагоревање у енергетском парном котлу велике снаге. Угаљ се из котларничког бункера доводи млинским додавачем и кроз вертикални део рециркулационог канала слободним падом доспева у млин. Врели продукти

сагоревања, који служе за сушење угља, одузимају се са врха ложишта и кроз рециркулациони канал доводе такође у млин. Температура рециркулисаних гасова се подешава загревањем ваздухом у циљу заштите материјала млина. Угаљ се суши и меље, па се мешавина угљеног праха, охлађених продуката сагоревања, водене паре и примарног ваздуха (такозвана аеросмеша) кроз горионик удувава у ложиште. У циљу остваривања сагорљиве смеше угљеног праха и ваздуха, кроз горионик се, назависно од аеросмеше, удувава секундарни ваздух. За одржавање потребне финоће млевенја се на излазу из млина поставља сепаратор, који дејством инерцијалне силе из струје аеросмеше издваја неомлевене честице које се враћају у млин на поновно млевење.

4.4.1.2 Сагоревање угљеног праха

Слика 4.37: 1-Млински додавач, 2-Рециркулациони канал, 3-Канал за загрејан примарни ваздух, 4-Вентилаторски млин, 5-Млински сепаратор, 6-Довод аеросмеше, 7-Довод секундарног ваздуха, 8-Горионик за угљени прах, 9-Ложиште парног котла

Да би угљени прах у простору ложишта могао да сагори потребно је да се образује одговарајућа смеша горива и ваздуха унутар концентрационих граница паљења смеше. Прву фазу зато чини образовање примарне смеше угљеног праха и ваздуха која се из млина уводи у ложиште. Обично се том приликом честице угљеног праха мешају са једним делом ваздуха неопходног за потпуно сагоревање - примарним ваздухом. Ово омогућава веома погодне услове за паљење смеше. Остатак ваздуха, потребан да

се оствари потпуно сагоревање (такозвани секундарни ваздух), доводи се тако, што се кисеоник из ваздуха уводи у процес после паљења примарне смеше угље-

ног праха и ваздуха. Мешање секундарног ваздуха са примарном смешом, односно његово довођење у пламен, и као последица тога остваривање погодних услова за даље сагоревање, представља другу фазу образовања гориве смеси, која се остварује у самом ложишту.

Количина примарног ваздуха се бира у зависности од врсте горива, у првом реду од количине горивих испарљивих материја. За горива са већим садржајем горивих испарљивих материја количина примарног ваздуха биће већа, водећи рачуна да настала смеша сагоревањем обезбеди довољну количину топлоте за даље стабилно сагоревање. Увођење секундарног ваздуха може довести и до наглог пада температуре, уколико његова количина није довољно добро процењена, тако да у екстремном случају може доћи и до гашења пламена, а нарочито код угљева са малим садржајем горивих испарљивих материја. Секундарни ваздух се зато мора уводити постепено и опрезно.

За остваривање сагорљиве смеси угљеног праха и ваздуха од великог значаја су брзине којом се у ложиште удувавају аеросмеша и секундарни ваздух. Брзина аеросмеше принципијелно треба да буде једнака брзини сагоревања, а брзина секундарног ваздуха неколико пута већа (одељак 4.4.1.2).

На нормално одвијање процеса сагоревања, поред односа примарног и секундарног ваздуха, од утицаја су:

- избор конструкције горионика и њихов распоред у ложишту,
- загревање ваздуха, чиме се повећава температура и смањује потребна количина топлоте за загревање гориве смеси до паљења,
- финоћа млевења угљеног праха.

Током процеса сагоревања, укључујући при томе и фазу образовања смеси угљеног праха и ваздуха, честице угљеног праха трпе низ трансформација: због интензивне размене топлоте по уласку честица угљеног праха у ложиште оне се изванредно брзо загревају, брзином реда величине од неколико хиљада степени у секунди. У таквим условима долази до термичког разлагања масе чврстог горива: издвајају се гориве испарљиве материје и настаје коксни остатак. Гориве испарљиве материје се мешају са кисеоником из ваздуха образујући хомогену смешу која се, зависно од температуре самопаљења, пали и сагорева. Настала количина топлоте користи се и за загревање коксног остатака који се такође пали и то или за време сагоревања горивих испарљивих материја или по њиховом сагоревању. Процес сагоревања, уопштено посматрано, одвија се у неколико фаза /33/:

- I фазу чини период закашњења паљења горивих испарљивих материја - временски период од увођења честица угљеног праха у ложиште до појаве видног паљења горивих испарљивих материја; у току ове фазе издвајају се највећим делом гориве испарљиве материје, мешају са ваздухом образујући смешу погодну за паљење.,

- II фазу чини период сагоревања горивих испарљивих материја - временски период од тренутка паљења горивих испарљивих материја до краја сагоревања горивих испарљивих материја.,
- III фазу чини период закашњења паљења коксног остатка,
- IV фазу, период сагоревања коксног остатка - временски период од почетка па до краја сагоревања коксног остатка.

Приликом оваквог разматрања тока сагоревања угљеног праха треба нагласити да је наведена подела условна и да се не могу повући јасне границе између појединих фаза сагоревања, бар не код свих угљева /34/. Процес сагоревања се континуално одвија и често се за време сагоревања горивих испарљивих материја јавља почетак сагоревања коксног остатка (III фаза уопште не постоји).

Како брзину сагоревања у општем случају одређује брзина најспорије фазе, то онда, при сагоревању чврстих горива, брзину сагоревања одређује брзина сагоревања коксног остатка. Сагоревање чврсте супстанце, представља најсложенији вид сагоревања уопште - хетерогено сагоревање везано за низ физичко-хемијских промена, чије разматрање превазилази обим овог курса и детаљније се разматра у оквиру предмета Сагоревање.

Интензификација процеса сагоревања угљеног праха остварује се зависно од врсте угља, повећањем финоће млевења. Повећање активне површине са повећањем финоће млевења омогућава брже ослобађање топлоте сагоревањем и скраћује потребно време за сагоревање.

Горива са већим садржајем горивих испарљивих материја, због повољног деловања горивих испарљивих материја, као и због полиедарске структуре честица, могу се грубље млети, јер поседују већу брзину сагоревања, за разлику од горива са мањим садржајем горивих испарљивих материја који се морају финије млети. Утицај финоће млевења је више изражен код старијих угљева са мањим садржајем горивих испарљивих материја. Према /3/ на основу испитивања антрацитног праха три различите финоће млевења, повећањем финоће млевења се знатно убрзава паљење, а расту и брзина сагоревања и температура сагоревања.

Утицај садржаја горивих испарљивих материја на брзину сагоревања према /35/ дат је на Слици 4.38.

Слика 4.38: Уїицај садржаја жоривих испарљивих маїерија на брзину сажоревања зависно од коефицијентїа вишка ваздуха, односно од масеног односа ваздуха и жорива /35/

На основу свега до сада изложеног, карактеристике угљеног праха као горива могу се свести на основне три:

1. Веома велика површина, постигнута млевењем: ако се претпостави да све честице имају правилан сферни облик и исти пречник, онда ће површина 1 кг угља зависно од величине честице бити једнака

Пречник честице (mm)	100	10	1	0,1	0,01
Површина честица (m^2/kg)	0,03	0,3	3	30	300

У стварности, услед неправилног облика честица угљеног праха специфична површина биће још већа. Тако на пример, честице угљеног праха каменог угља, средњег пречника око 15-20 микрометара имају специфичну површину око $400 \text{ m}^2/\text{kg}$. Вишеструко повећање специфичне површине при млевењу ствара услове за јако убрзавање хетерогених реакција сагоревања.,

2. Висока способност лебдења честица: за сферну честицу пречника око 20 микрометара која се налази у струји димних гасова, брзина слободног пада у односу на брзину димних гасова износи свега 0,0055 m/s (температура димних гасова 1500°C). За честице угљеног праха неправилног облика брзина слободног пада је око два пута мања. (Дате вредности се односе на честицу у струји димних гасова која не реагује са околном средином). За честицу угљеног праха која сагорева у струји гасова јавља се још један фактор, који смањује брзину слободног пада. То је реактивно деловање продуката сагоревања од површине честице. Са чеоне стране, која "добива" већу количину кисеоника сагоревање се одвија брже па је већа и реактивна сила. Извршена испитивања указују да је брзина слободног пада чак три пута мања у односу на исту код честице која не реагује.,
3. Трећа предност угља у спрашеном стању састоји се у високом интензитету размене топлоте између честица и околне гасне средине. Захваљујући томе температура честице угљеног праха се мало разликује од њене температуре све до појаве паљења.

Коришћење угља у спрашеном стању има својих предности, али и мана. Предности коришћења угљеног праха као горива су што се могу користити угљеви са већим садржајем баласта („нискокалорични“ угљеви), што се и до 20% остварује потпунији процес сагоревања у односу на класичан начин сагоревања на решеци, и што се производи већа количина топлоте по јединици запремине простора за сагоревање. Истовремено, процес сагоревања одвија се са мањим коефицијентом вишка ваздуха, остварују се више температуре у ложишту, лакше је опслуживање и постоји могућност аутоматизације рада постројења, а припрема котла за рад је бржа.

Недостатке чине:

- постојање већег броја (2-8) постројења за припрему угљеног праха што повећава цену целокупног постројења, па и јединице произведене количине топлоте,
- потреба за већим простором за сагоревање,
- могућност паљења и експлозивног сагоревања угљеног праха било у млину, било у бункерима за смештај, као и
- повећана концентрација летећег пепела тј. честица пепела ношених димним гасовима.

4.4.2 БРИКЕТИРАЊЕ

Брикетирање представља процес у коме се од ситнијих комадића угља, углавном прашине, слепљивањем под притиском добијају комади правилног геометријског облика - брикети, масе од 1 до 8 kg. Брикетирање се изводи у пресама. Пресовању претходи сушење угљене прашине на влажност 12-16% за мрке, односно 2-4% за камене угљеве.

Лигнити се брикетирају, по правилу, без додатака везива под притиском од 98-120 МПа за разлику од каменних угљева, који се брикетирају са везивом на нижим притисцима од (10 до 40 МПа) /9/. У принципу, као везива могу се користити и органске и неорганске материје, при чему при коришћење органске има предност, јер повећава топлотну моћ и побољшава карактеристике горивости. Од органских везива користе се тер угљева добијених сувом дестилацијом, остаци прераде нафте и др., а од неорганских - глина, гипс и специјалне врсте цемента. Примена везива олакшава извођење брикетирања смањујући радни притисак.

Поступком брикетирања омогућава се примена угљене прашине, која се иначе не би могла користити, равномернија је „ватра“ у ложишту, јер су брикети исте величине, лакши је транспорт и руковање, побољшана је топлотна моћ, као и карактеристике горивости. Добијени брикети су постојани на складишту, јер мање мењају своје особине и отпорнији су према самопаљењу.

4.5 ПРОИЗВЕДЕНА ЧВРСТА ГОРИВА

Секундарни процеси прераде који представљају термохемијске процесе прераде чврстих горива омогућавају добијање квалитетнијих производа, бољих особина у односу на почетну материју из које су настали.

Основни секундарни процеси прераде угља су процеси дубоког сушења и процеси разлагања угљева без присуства ваздуха - процеси суве дестилације угљева.

4.5.1 ПОСТУПЦИ СУВЕ ДЕСТИЛАЦИЈЕ

Поступци суве дестилације заснивају се на топлотној непостојаности чврстих горива. Приликом загревања чврсте материје угљева у условима недовољне количине или без ваздуха долази до њеног распадања на низ чврстих, течних и гасовитих производа. Најдрагоценији од њих је свакако кокс, чврсто гориво, које се користи у металургији.

Сува дестилација се може поделити према чврстом гориву са којим се процес изводи, као и према условима остварења процеса (температура, и др.). Као полазна сировина за суву дестилацију користе се дрво и све врсте угљева, па се аналогно томе разликују сува дестилација дрвета, мрког угља и каменог угља. Према максималној температури која се постиже у току процеса, а од које зависе врста и квалитет добијених производа, сува дестилација може бити:

- примарна или нискотемпературска сува дестилација, ако се процес изводи на температурама од 450 до 550°C,
- сува дестилација, на средњим температурама - од 600-800°C, и
- високотемпературска сува дестилација, која се изводи на температурама од 900 до 1000°C, а ређе од 1300-1350°C.

Примарна сува дестилација се, према основном производу, полукоксу, назива „швеловање“ (полукоксовање), а високотемпературска, према коксу, који се јавља као њен производ - коксовање.

При загревању чврстог горива без присуства ваздуха долази до разлагања угљене масе при чему прво долази до сушења, услед испаравања влаге из горива на температурама од 100-120°C, а даље се, до 280°C, издваја кисеоник у облику CO_2 и CO , велики део сумпора у виду сумпорводоника (H_2S) и SO_2 . У температурском интервалу 310-350°C појављују се у насталим гасовитим продуктима угљоводоници, који се највећим делом издвајају до 450°C. Даљим разлагањем јавља се све већа количина водоника у гасовитим продуктима да би после 800°C он остао једини продукт који се издваја. До 1000°C углавном су се из масе првобитног угља издвојиле све гориве испарљиве материје, тако да се као коначан остатак процеса јавља полукокс или кокс, зависно од врсте угља. Чврсти остатак после издвајања угљенмоноксида и угљендиоксида, метана, водоника и других угљоводоника, садржи мање и кисеоника и водоника, али и више угљеника него првобитно гориво. Овако добијено гориво често „беспламено“ сагорева, поседује високу топлотну моћ и остварује у процесу високу температуру сагоревања.

У општем случају, при сувој дестилацији добијају се:

- гасовити продукти (дестилациони гасови),
- течни продукти (тер и терна вода) и
- чврсти продукти (кокс или полукокс).

На процес прераде угља на овај начин утиче низ фактора: врста горива, температура процеса, брзина загревања честица горива, величина честица и притисак.

Од природе горива, односно од његове старости зависи почетак разлагања горива: што је угаљ млађи температура на којој долази до издвајања горивих испарљивих материја је нижа, а до самог разлагања лакше долази. Са повишењем температуре загревања горива повећава се степен његовог разлагања. Смањење количине тера при повећању температуре од температура уобичајених за примарну суву дестилацију до температура потребних за високотемпературску

суву дестилацију објашњава се распадањем терних пара на повишеним температурама на једноставнија угљоводонична једињења [36].

Брзина загревања представља један од најважнијих фактора, који утиче на количину и особине добијених продуката суве дестилације. Према подацима [36] може се закључити да се споријим загревањем честица до одређене температуре разлагање брже и потпуније врши, него при брзом загревању. Време потребно за полукоксовање односно коксовање одређено је, у основи, временом потребним да се угљ загреје до одређене температуре. При коришћењу угља ситнијег сортимана време потребно за извршење овог процеса је 10-20 пута краће у поређењу са временом потребним за крупније комаде угља. Утицај притиска је занемарљив на количину и особине добијеног кокса: он суштински делује на састав горивих испарљивих материја.

4.5.1.1 Примарна сува дестилација мрког и каменог угља („швеловање“)

Примарном сувом дестилацијом каменог и мрког угља, која се одвија на 550-580°C, добија се 50-60 m³ дестилационих гасова, 80-200 kg тера и 700-750 kg полукокса по тони полазног горива (рачунато на суву масу). У саставу исте гориве масе полукокса налази се 90-92% угљеника, 2-3% водоника, 3-4% кисеоника, обично 1,5% сумпора и око 2% азота. Топлотна моћ се креће у границама од 23,9 до 27,2 MJ/kg [22].

Садржај пепела полукокса је, природно, већи од садржаја истог у полазној материји. Садржај воде код полукокса мрког угља је 12-20%, а код полукокса каменог угља 4-10%. Чврстоћа полукокса зависи од састава прерађеног угља. Комадни полукокс сагорева без дима, лако се пали, високо је порозан, а калориметарска температура сагоревања му је 2100°C.

4.5.1.2 Високотемпературска дестилација каменог угља

Најважнију врсту прерађеног чврстог горива добијеног секундарним процесима прераде представља кокс, који се добија високотемпературском дестилацијом каменог угља на температурама око 1000°C. За производњу кокса могу се користити такозвани коксујући угљеви: гасни, коксни дугопламени и коксни краткопламени, од којих су најбољи ови задњи.

Индустријска производња кокса врши се у коморним пећима, састављеним од више комора које образују батерије дужине 14-15 m, висине 4-4,5 m и ширине 0,4-0,45 m загреваних у трајању од 15 до 18 h (Слика 4.39). Загревање масе угља у овим пећима врши се слојевито од грејних површина пећи ка центру уз постепену трансформацију пуњења угља у полукокс и кокс. Гориве испарљиве материје које

настају у првој фази процеса коксовања - дестилациони гасови и тер, пролазе кроз зону високих температура и подвргавају се даљој преради дајући коначне продукте: тер, бензен, коксни гас и др. Са овим гасовима удаљавају се водоник, азот, сумпор, кисеоник и испарљиви угљеник. Коксни остатак се обогаћује садржајем угљеника. Готов кокс се избацује из пећи и гаси водом, мада се користи и суви начин „гашења“ инертним гасовима. После гашења, кокс се просејава и раздваја по величини.

У процесу коксовања, по тони угља, рачунато на суву масу, добија се 700-800 kg кокса, 300-330 m³ високотемпературских дестилационих гасова (кокских гасова), 20-50 kg тера, око 8-10 kg сировог бензена и 2-3 kg амонијака /22/.
Добијени кокс има следећи просечни састав: угљеника 90-95%, до 1% водоника, 1,5-2% кисеоника и азота, 2-4% влаге и до 11% минералних примеса.

Слика 4.39: Појречни пресек и детаљ коксне батерије са коморним пећима типа Корре (Које): 1,7-канал за ваздух и гас, 2-регенераторски загрејач, 3-вертикални канали за грејање комора, 4-коксне коморе, 5-водови за коксни гас, 6,8-водови за сиромашни - генераторски гас

Приликом производње ливеног гвожђа из железне руде у високим пећима кокс се користи и као гориво и као редукционо средство. Угљенмоноксид, који се образује реакцијом угљеника и угљендиоксида, редукује у високој пећи гвожђев оксид, а нереаговани део остаје и налази се у коксном гасу високих пећи. У том

циљу пожељна је што већа активна површина реаговања угљеника из кокса и CO_2 , па се примењује кокс порозности веће од 50%.

Оцена могућности примене кокса врши се помоћу критеријума горивости и критеријума реакционе способности. Под критеријумом горивости подразумева се брзина образовања угљендиоксида реакцијом угљеника из кокса са кисеоником. Насупрот овом критеријуму, критеријум реакционе способности се дефинише брзином образовања угљенмоноксида реакцијом угљеника из кокса и угљендиоксида. Ова два критеријума су међусобно супротна, што значи, да ће кокс који поседује високу вредност критеријума горивости, имати малу вредност критеријума реакционе способности и обрнуто.

Ливачки кокс због тога мора поседовати ниску вредност критеријума реакционе способности, јер се од њега захтева да обезбеди што већу количину топлоте и што вишу температуру сагоревања, односно, што већу вредност критеријума горивости. Кокс за високе пећи, насупрот ливачком коксу, треба да поседује што већу вредност критеријума реакционе способности.

Поред наведених особина од ливачког кокса се захтева да не садржи ни сумпор, ни фосфор, а код кокса за високе пећи дозвољава се садржај сумпора до 3,5%, а фосфора - до 0,03%.

4.5.2 ПОСТУПАК ДУБОКОГ СУШЕЊА

Поступком такозваног дубоког сушења одстрањује се највећи део влаге из горива, а током процеса мења се и структура угља, тако да се од лигнита, на пример, добија квалитетно гориво, слично мрком угљу.

Дубоко сушење се може вршити посредно и непосредно. Један од најпознатијих поступака је Fleissner-ов (Флајснеров) поступак. По овом поступку угаљ који се суши, налази се у аутоклавима запремине 20-40 m^3 у којима се третира врелом водом и воденом паром. Радни притисак у аутоклаву износи 2,0 до 30,0 МПа. Вакумирањем се из аутоклава одстрањују сви флуиди, тако да остаје сушени угаљ.

Овај поступак је нарочито погодан за сушење лигнита, код којих је садржај влаге од 40-60%, па се и код нас користи (Косово, Колубара).

4.6 ПОНАШАЊЕ УГЉЕВА НА СКЛАДИШТУ

Током лежања на складишту угаљ трпи низ промена:

- на нижим температурама долази до његовог уситњавања: услед појаве леда, његовог ширења, па, као последица тога, прскања и ситњења,
- на повишеним температурама долази до испаравања влаге и дела горивих испарљивих материја, као и до оксидације.

Због свих ових појава квалитет угља опада, а у екстремним случајевима долази и до самопаљења угља.

Различити видови чврстог горива у већем или мањем степену реагују са кисеоником из ваздуха зависно од свог састава и структуре. Када се угљеви налазе на складишту на релативно ниским температурама (20-25°C) током одређеног временског периода не уочава се битнија промена, која би наступила као резултат процеса оксидације. У току овог периода одвијају се спори оксидациони процеси и настала количина топлоте се одводи околином, тако да температура угља остаје практично константна. Услови неправилног складиштења омогућавају да у одређеном тренутку дође до повишења температуре, јер се одвођење топлоте спречава или умањује. Као резултат оваквих појава температура расте све више, све док не дође до самопаљења. Уколико се у овом периоду загревања омогући одвођење топлоте, угаљ ће се охладити, а процес прекинути (Слика 4.40). У том случају долази само до губитка горивих испарљивих материја - угаљ „ветри“.

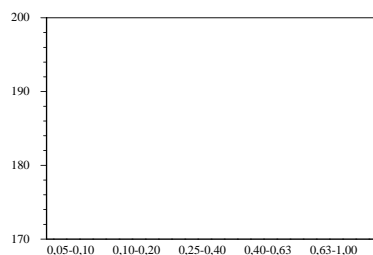
Слика 4.40: Шема могућих процеса при лежању угља на складишту /24/

Дужина трајања, као и сама појава зависе у основи од врсте угља, његовог састава и особина, али и од околних услова: температуре околине, влажности ваздуха, одвођења топлоте и др. Према оваквим променама најотпорнији и најстабилнији су најстарији угљеви, антрацит и камени, да би стабилност опадала преко мрких до лигнита, који су непостојанији.

Оцена склоности према самопаљењу угљева врши се на више начина: један од најчешћих је преко температуре самопаљења. И поред тога што услови њеног одређивања (загревање у атмосфери чистог кисеоника) не одговарају реалним условима, температура самопаљења се користи као упоредни параметар. Према Schusteru (Шустеру) температуре самопаљења леже у границама:

за мрке угљеве	150-160°C,
за гасне угљеве	170-190°C,
за антрацит	више од 220°C.

Резултати испитивања извршених у Лабораторији за горива и сагоревање Машинског факултета зависно од влаге и других утицајних параметара приказани су на Сликама 4.41 и 4.42 /37/.



Слика 4.41



Слика 4.42

Литература

1. Б. Репић: „Кинетика образовања наслага пепела на конвективно-озраче-ним грејним површинама котловских ложишта која користе спрашени лигнит“, Магистарски рад, Београд, 1979.
2. Д. Драшковић, М. Радовановић, М. Адић: „Сагоревање“, Машински факултет, Београд, 1986.
3. С.Н. Мирнов: „Организация и регулирование режимов камерного сжигания угольной пыли“, Энергия, Москва, 1972.
4. М. Радовановић: "Combustion in Fluidized Bed" in "Fluidized Bed Combustion", Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London, Edited by М. Радовановић, 1986.
5. М. Радовановић, Д. Симић: „Могућности прорачуна топлотне моћи волатила према подацима добијеним техничком анализом“, Процесна Техника, Број 2, Година 7, Београд, 1991.
6. S.J. Harison: "Inovation for the Clean use of Coal", Energy World, No.170, 1989.
7. M.C. Christopherson: "Oil to Coal Conversion in a Danish Power Station", Coal Technology Europe, Амстердам, 1982.
8. D.G. Daniel: "Renewable Energy Systems in Perspective", Energy World, No.168, 1989.
9. В.Т. Кумсков, Д.И. Покалук: „Топливи и масла електрических станций“, Энергия, Москва, 1969.
10. D.G. Daniel: "Renewable Energy Systems in Perspective", Energy World, No.168, 1989.
11. ***: „Техничка и елементарна анализа биомасе“, Институт за нуклеарне науке Винча - Лабораторија за термотехнику и енергетику, Београд, 1981.
12. Љ. Чојбашић и др.: „Извештај о испитивању пресоване пиљевине од буковине“, МИН Институт, Ниш, 1987.
13. ***: „Основна информација о брикетирању“, УТВА Инжењеринг, Београд, 1992.
14. М. Шупут: Лични допринос, Пољопривредни факултет, Београд, 1994.
15. М. Гулич, П. Перуновић: "Les processus de la combustion des matières végétales en couche verticale limitie", Revue Générale de Thermique. Tome 19, No.27, 1980.
16. М. Солујић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1991.
17. ***: Статистички годишњак СРЈ, Статистички завод Југославије, Београд, 1992.
18. З. Стевановић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1992.

19. И. Радаковић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1992.
20. Б. Арсић: Интерни извештај Лабораторије за термотехнику и енергетику, Институт за нуклеарне науке Винча, Београд, 1990.
21. Р. Савић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1992.
22. Д. Величковић: „Погонске материје - I део - Термогене материје“, Машински факултет, Београд, 1972.
23. H.L. Solberg, O.C. Cromer, A.R. Spalding: "Thermal Engineering", J. Wiley, Лондон, 1960.
24. Д.Д. Русчев: „Химия тврдогo топлива“, Химия, Лењинград, 1976.
25. С. Лампа: „Могућности прераде уљних шкриљаца у гориви гас“, Докторски рад, Београд, 1989.
26. ***: „Највеће термоелектране на свету“, Политика од 29.12.1975.
27. Б. Репић, „Утицај конструктивних и радних карактеристика горионика на паљење и сагоревање угљеног праха“, Докторски рад, Београд, 1992.
28. А. Велашевић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1993.
29. И. Мијатовић: „Уљни шкриљци“, Јединствени програм истраживања у енергетици СФРЈ, Знанствени савјет за нафту ЈАЗУ, Загреб, 1977.
30. П. Миловић: Лични допринос, Машински факултет, Београд, 1994.
31. Т.Г. Фоменко, В.С. Бутовецкиј, Е.М. Погарцева: „Технология обогащения углей“, Недра, Москва, 1976.
32. Љ. Бркић: Лични допринос, Машински факултет, Београд, 1994.
33. В.И. Бабиј, И.И. Иванова: „Изучение механизма вигорания честиц назаровского угля“, Горение тврдогo топлив, Новосибирск, 1969.
34. М. Радовановић: „Карактеристике паљења домаћих угљева“, Научно стручни скуп "Енергетско машинство", Београд, 1977.
35. J. Gonzales: "Spanish Experience with Burning Low-Grade Fuel", Combustion, Vol.11, 1970.
36. С. Д. Федосејев, АЉ.Б. Черниев: „Полукоксование и гасификација тврдогo топлива“, Гастептехиздат, Москва, 1960.
37. М. Радовановић, М. Адић, Д. Алексић-Пајић: „Карактеристике самопаљења домаћих лигнита“, припремљене за штампу, Београд, 1978.
38. А. А. Агроскин: „Химия и технология угля“, Недра, Москва, 1969.

5 ТЕЧНА ГОРИВА

Течна горива налазе широку примену у свим областима захваљујући својим особинама и предностима у односу на чврста горива. У поређењу са њима течна горива поседују, у општем случају:

- високу топлотну моћ,
- мали садржај баласта,
- мање топлотне губитке при сагоревању, како због ниже вредности коефицијента вишка ваздуха, тако и због потпунијег сагоревања,
- већу универзалност при коришћењу и примењивању у различитим постројењима, уређајима и моторима,
- лакоћу регулисања процеса сагоревања, и
- могућност транспорта цевоводима на велика растојања.

Ипак, она поседују и одређене мане, које се огледају у:

- лакој упаливости и експлозивности,
- стварању електростатичког напона,
- тешком одстрањивању емулговане воде,
- отровности неких течних горива и др.

И поред ових недостатака, који су далеко мањи од предности, течна горива су учинила огромне услуге човечанству и омогућила изванредно брз развој низа области - саобраћаја и енергетике посебно.

У даљем излагању течна горива биће разматрана на основу усвојене поделе према пореклу: у оквиру ове поделе даље излагање о горивима ће се вршити према намени.

Према пореклу течна горива се деле на природна и прерађена.

5.1 ПРИРОДНА ТЕЧНА ГОРИВА - НАФТА

5.1.1 ОСОБИНЕ И ПОРЕКЛО

Јединствени представник природних течних горива је нафта. Нафта (име потиче од староперсијске речи „нафата“, што значи - знојити се) је флуоресцентна зеленкасто-мрка до тамно-мрка уљаста течност. Нафта није хомогена течност: она је сложена смеша великог броја угљоводоника различите молекулске масе и различите међусобне грађе уз присуство сумпора, кисеоника и азота у примесама. Топлотна моћ нафте износи око $42\text{--}43 \text{ MJ/kg}$, али се као гориво не користи;

нафта се прерађује у низ драгоцених горива, мазива и сировина за петрохемијску индустрију.

У саставу органске масе нафте налази се угљеник у границама 83-87%, водоник 11-14%, кисеоник 0,1-1%, азот 0,05-1,5% и сумпор 0,1-5%. Кисеоник, азот и сумпор се налазе у нафти у везаном стању - у облику различитих једињења. Садржај воде (влаге) и минералних примеса је мали: садржај воде креће се до 2%, а ређе преко. Садржај минералних примеса је незнатан и износи 0,1-0,3%. Густина нафте креће се у границама од 820-920 kg/m³.

О постанку нафте говоре две теорије: органска и неорганска. Према органској теорији, која је данас од већине научника и истраживача прихваћена, нафта је настала од остатака живих организама сложеним процесом, који је мање изучен, него што је то случај код настајања угља. Упрошћени механизам настајања нафте, према органској теорији, могао би се представити на следећи начин: основна органска материја из које је настала нафта су примитивни биљни и животињски организми (планктон) који су се развијали у хидросфери. Остаци ових организама сакупљали су се на дну, заштићени од могућих процеса оксидације. Под дејством анаеробних бактерија мењала се праматерија, тако што се смањивао садржај кисеоника, азота и других елемената, а истовременим растао садржај угљеника и водоника у преосталој маси. Ова материја је била прекривена талозима и наносима, који су спречавали даље разлагање. Под утицајем низа утицајних фактора, од којих су најважнији свакако били повишени притисак и температура, ова материја је прешла, сложеним процесом у нафту и земни гас. Са порастом дебљине слојева, нафта и земни гас су, са места где су настали продирали кроз поре и пукотине, заустављајући се у погодним шупљинама порозних стена, изнад којих се налазио непропустљиви слој. Обично је простор, до кога су нафта и гас доспевали био раније испуњен водом; специфички лакша нафта и гас заузимају су онда горње слојеве, а вода - доње (Слика 5.1а и 5.1б).

5.1.2 САСТАВ НАФТЕ

Сирова нафта је састављена из великог броја сложених претежно угљоводоничних али и други једињења. Ова једињења, међутим, припадају неколицини основних угљоводоничних група, чије су особине добро проучене.

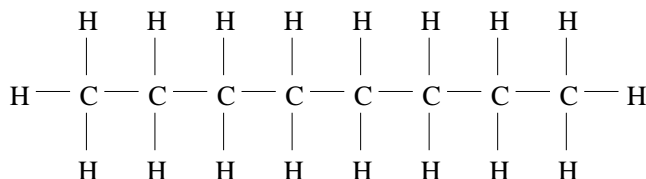
Основну масу чине три групе угљоводоника:

- парафински угљоводоници, општег обрасца C_nH_{2n+2}
- нафтенски угљоводоници, општег обрасца C_nH_{2n}
- ароматски угљоводоници, општег обрасца C_nH_{2n-6} .

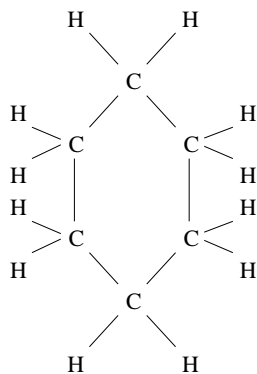
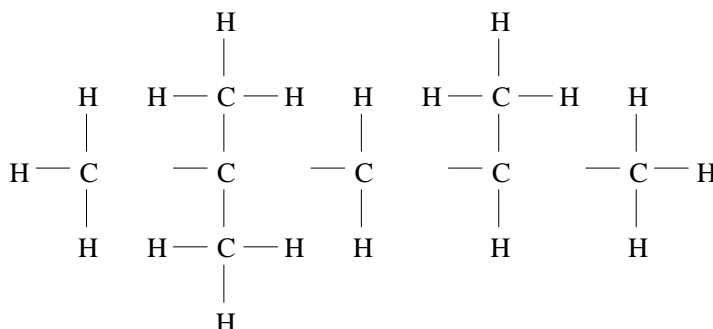
Слика 5.1: Два различита типа геолошких формација у којима се обично нафта и гас налазе: нафта се налази у порозним слојевима седиментних стена изнад воде, а гас изнад нафте

Парафински угљоводоници (алкани) чине знатан део многих нафти. Нижи чланови овог реда, са бројем атома угљеника у молекулу од 1 до 4 су гасовити (метан - CH_4 , етан - C_2H_6 , пропан - C_3H_8 и бутан - C_4H_{10}). Течни угљоводоници парафинског реда су са бројем атома угљеника у молекулу од 5 до 15, а изнад 15 атома угљеника у молекулу су чврсти (на нормалној температури). Парафински

угљоводоници су ланчани, засићени угљоводоници (пример: нормални октан C_8H_{18}).



Парафински угљоводоници, а и неки други, поседују особину да распоред атома угљеника немају само у једном ланцу, већ и да се бочно надовезују један на други, образујући разгранате ланце. Такви угљоводоници, који задржавају исти број атома угљеника и водоника, а имају другу структуру, називају се изомерима, а парафини - изопарафинима (пример: изооктан C_8H_{18}).

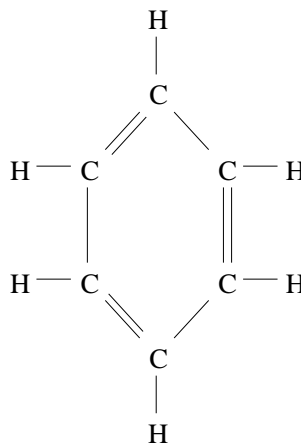


Нафтенски угљоводоници (циклоалкани) су, као и парафински, засићени, али за разлику од њих - прстенасти. У нафти се ова група угљоводоника јавља са најједноставнијим представницима - циклопентаном (C_5H_{10}) и циклохексаном (C_6H_{12}). Нафтенски угљоводоници, као и парафински, поседују високу хемијску стабилност (пример: циклохексан C_6H_{12}).

Ароматски угљоводоници, као и нафтенски угљоводоници, имају прстенасту структуру. Представник ароматских угљоводоника је бензен

C_6H_6 . Скелет молекула бензена састоји се из шест атома угљеника који су међусобно повезани једногубим и двогубим везама.

Поред ове три групе угљоводоника одређену пажњу треба посветити и незасићеним ланчаним угљоводонцима и поред тога што их у нафти практично нема. Ови, такозвани олефински угљоводоници (алкени, алкини) јављају се у продуктима прераде нафте и зависно од броја двогубих веза могу бити моно и диолефини. Општи образац моноолефинских угљоводоника је C_nH_{2n} , а диолефинских C_nH_{2n-2} .



Практично све нафте садрже у себи сумпор односно једињења сумпора. Максимални садржај може бити 6%. Не улазећи у поделе нафте према садржају сумпора, у нафти се налазе:

- меркаптани (RSH),
- сулфиди (моно-, ди-, полисулфиди),
- тиофани,
- тиофени,
- елементарни сумпор,
- H_2S ,
- сумпор у другим облицима.

Нафте се могу разврстати на више начина зависно од састава. Не улазећи детаљније у ове поделе, нафте се, према претежном садржају одговарајућих група угљоводоника деле на парафинске, нафтенске и мешане.

5.1.3 ДОБИЈАЊЕ НАФТЕ

Нафта се налази у дубини земље углавном до 5000 m. После утврђивања налазишта геолошким, геофизичким, сеизмичким и другим методама нафта се добија бушењем, било на површини земље било, у подморју. Комплет уређаја који се користи приликом бушења на копну састоји се из торња, дизалице, мотора, пумпи, котурача, бушаћег стола уз алат и прибор (бушилице, погонска шипка, цеви и др.) - Слика 5.2.

Слика 5.2: *Постројење за бушење нафте; 1-дизалица, 2-обртни сто, 3-погонско постројење, 4-кошураче, 5-погонска шийка /2/*

Када се бушењем утврди да постоји нафта, у количини која је економски оправдана за коришћење, прилази се ојачавању и учвршћивању бушотине.

Нафта најчешће истиче из бушотине на површину под притиском који влада на дубини на којој је нафта пронађена (природна ерупција). Када се, касније, експлоатацијом налазиште до извесне мере искористи, проток опада па је потребно предузети одговарајуће мере да би се искористила што већа количина нафте. У ту сврху користе се данас два могућа начина: помоћу пумпи или увођењем у лежиште нафте, гаса или воде под притиском (Слика 5.3) /1/.

Идући према површини притисак се стално смањује, па долази до издвајања раствореног гаса из нафте, тако да се на излазу из бушотине добија мешавина нафте и гаса. Ова мешавина се одводи у сабирну станицу, где се у такозваним сепараторима, одваја течна од гасовите фазе, а одатле и нафта и гас у засебне резервоаре. Из резервоара се затим нафта превози цистернама, танкерима, нафтоводима до постројења за прераду нафте - рафинерија.

Слика 5.3: Шема извлачења нафте: а) помоћу пумпе, б) помоћу гаса под притиском

5.1.4 НАЛАЗИШТА НАФТЕ У НАШОЈ ЗЕМЉИ

Налазишта нафте у нашој земљи су за сада у северним деловима, у Војвођанском басену. Основне карактеристике наших нафти дате су табеларно (Табела 5.1).

У току су интензивна истраживања на Јадрану, где први резултати указују на могућност добијања нафте. Пронађене су и одређене количине земног гаса, који је најчешће пратилац нафте.

5.2 ПЕРАЂЕНА И СИНТЕТИЧКА ТЕЧНА ГОРИВА

Перађена течна горива се добијају перађом природних горива (течних, чврстих или гасовитих) или перађом продуката или остатака њихове перађе. Основни извор за добијање течних горива је природно течна гориво - нафта, мада се данас, с обзиром на њену несташницу и потребе њеног рационалног коришћења и штедње, врше интензивна истраживања у циљу добијања квалитетних течних горива перађом других супстанци, а нарочито угља, чије резерве далеко превазилазе резерве нафте.

5.2.1 ПЕРАЂЕНА ГОРИВА ИЗ НАФТЕ

5.2.1.1 Перада нафте

Основни поступак за пераду нафте је физички поступак њеног раздвајања на низ фракција. Овај поступак се заснива на познатој чињеници да је нафта састављена из великог броја различитих угљоводоничних једињења, одређених особина. Како сваки од угљоводоника, који се налазе у нафти поседују своју температуру на којој прелазе у парно стање - температуру кључања, то онда, загревањем, неће доћи до преласка целокупне нафте у парно стање на једној одређеној температури: постепено ће се издвајати и прелазити у парно стање прво угљоводоници са најнижом температуром кључања (са мањим бројем атома угљеника у молекулу) а затим и осталих. Хлађењем угљоводоника који испаре у одређеном температурском интервалу добијају се, зависно од одабраног и подешеног опсега, различити корисни продукти - течна горива и мазива. Група угљоводоника која испари у одређеном температурском интервалу назива се фракција, а цео поступак, аналогно томе, фракционисање.

Првобитно коришћени поступак за пераду нафте је била фракциона дестилација, која се заснивала на постепеном загревању нафте и постепеном њеном испаравању и кондензовању. Данас се користи поступак фракционе кондензације, где се највећи део нафте испари а потом, постепено кондензује. Поступак фракционе кондензације се изводи, у принципу, као једнофазни и двофазни.

У општем случају из нафте се добијају примарна перађена горива:

- гасовита горива,
- бензинске фракције,
- петролеумске фракције,
- фракције дизел моторских горива, и
- уља за ложење, чијом даљом перађом се добијају
- фракције мазивих уља,
- остатак (тешко уље за ложење или битумен).

Процес фракционе дестилације остварује се као континуалан процес. Нафта се пумпама доводи у цевну пећ где се загрева до температуре 330-350°C. Загрејана нафта, заједно са насталим парама уводи се у средину ректификационе колоне (Слика 5.5). Довођењем водене паре (у циљу лакшег раздвајања фракција) нафта се даље загрева, тако да се у доњем делу колоне налази мешавина течне и парне фазе. Ова колона је подељена на низ делова кроз које угљоводоничне паре струје навише. Детаљ ректификационе колоне дат је на Слици 5.4.

Интензивним супротносмерним струјањем уз сталну промену фаза (из течне у парну, и из парне у течну) у појединим деловима се остварују и одржавају одређене температурске границе, које одговарају границама испаравања појединих фракција.

Слика 5.4: Детаљ колоне, А-прелив, Б-угљоводоничне паре

Тежи угљоводоници, више температуре испаравања, кондензују се одмах по улазу у ректификациону колону. Лакши угљоводоници кондензују се на већим висинама, док се најлакши и гасовити не кондензују уопште, већ излазе изван колоне. Са врха колоне се одводе лаке бензинске фракције, нешто ниже добија тзв. петролеумска фракција, а испод ње се добија гасно уље или дизелмоторска фракција (Слика 5.5).

У зависности од свог састава остатак прераде ове фазе, се користи или директно као гориво (у котловима, на пример) или служи као сировина за даљу прераду (за добијање мазивих уља или за добијање бензина секундарним процесима прераде).

За случај када се остатак прераде из ове фазе користи за даљу прераду потребно га је допунски загрејати до температуре 420-430°C и довести у ректификациону колону која се налази сниженом притиску (потпритиску 7-14 kPa - Слика 5.6). Овим се постиже снижавање температуре кључања угљоводоника, а истовремено се спречава разлагање тешких угљоводоника, који се налазе у остатку. Прерадом остатка на овај начин, такозваном вакуум дестилацијом, добијају се, зависно од температурског интервала тешка дизел моторска горива, низ фракција мазивих уља и остатак.

Сви добијени производи на овај начин - фракције - не могу се одмах користити у постројењима за која су намењена, већ се морају прво пречистити, а велики број и даље прерађивати у циљу побољшања и остваривања жељеног квалитета.

5.2.1.2 Прерада продуката прераде нафте

Основни поступак прераде нафте назива се често примарном прерадом, за разлику од поступака прераде продуката прераде нафте - секундарних поступака прераде. Основни разлози постојања секундарних поступака прераде су добијање веће количине појединих производа и добијање производа бољег квалитета.

Секундарни поступци прераде су, за разлику од фракционисања, сви хемијски процеси. Према суштини процеса деле се у четири основне групе:

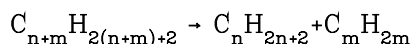
- поступке разградње угљоводоника,
- поступке изградње угљоводоника,
- поступке конверзије угљоводоника, и
- поступке уградње водоника у угљоводонике.

5.2.1.2.1 Поступци разградње угљоводоника

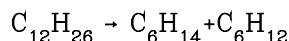
Основни поступак разградње угљоводоника је *cracking* (крековање) - поступак у коме се на повишеним температурама и притиску угљоводоници вишег реда распадају на угљоводонике нижег реда. Поступак крековања се јавио као последица добијања недовољне количине бензина током прераде нафте фракцио-

ном дестилацијом. Добијени бензин поседовао је боље карактеристике у односу на бензин добијен фракционисањем нафте. У првим постројењима вршено је разлагање угљоводоничних пара (1912. година), а тек 1925. године су настала технички усавршена постројења, са разлагањем у парној и течной фази.

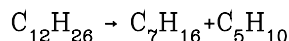
Процес крековања може се аналитички представити на примеру парафинских угљоводоника. У општем случају једначина крековања би гласила:



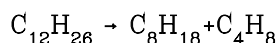
одакле се може закључити да се, као резултат процеса крековања добија један парафински и један олефински угљоводоник. Ако се посматра, на пример, додекан ($C_{12}H_{26}$), процес крековања може да се одвија према могућим реакцијама:



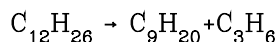
или



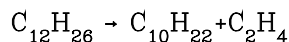
или



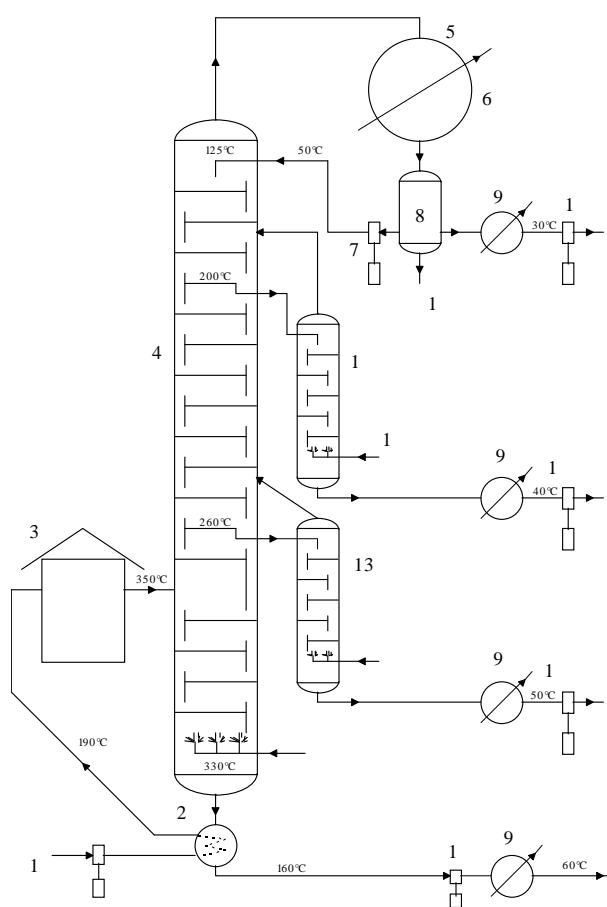
или



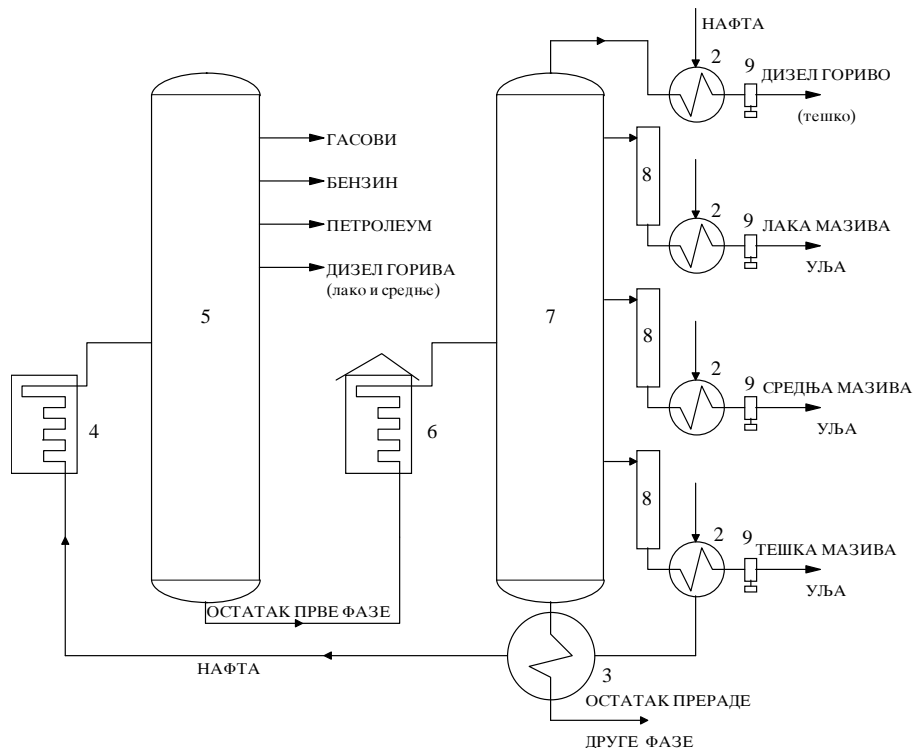
или



Из наведеног примера уочава се да до цепања угљоводоничног ланца може доћи на средини или ближе крајевима ланца. На место цепања угљоводоника, као и на одвијање самог процеса, суштински утичу услови при којима се процес изводи: температура, притисак и време. Са повишењем температуре процеса, цепање молекула је интензивније, потпуније и брже, а количина продуката крековања је, за исто време трајања процеса, већа. Истовремено, са повишењем температуре, место цепања угљоводоничног ланца је ближе крају. Повећањем притиска, цепање молекула угљоводоника одвија се ближе средини ланца. Повећање времена трајања процеса омогућава потпуније цепање угљоводоничних ланаца. Као сировина за крековање користи се најчешће остатак прераде нафте атмосферском дестилацијом, а основни производ овог процеса је бензинска фракција (крекинг-бензин).



Слика 5.5: Шема фракционе дестилације нафте („атмосферске дестилације“): 1-јумља са електропомпатором за довод нафте из резервоара, 2-шпољшњи разменич, којим остйацк прераде нафте загрева нафту, 3-цевна пйећ за загревање нафте, 4-ректификациона колона, 5-издајач воде, 6-кондензатор, 7-повратна јумља са електропомпатором, 8-сейрачатор воде, 9-хладњак, 10-јумља са електропомпатором која води бензин у резервоар - фракција у ојсежу 40-175°C, 11-колона за одавање пйетролеума (у ојсежу 150-275°C), 12-увођење водене пйаре, 13-колона за одавање дизел моторских фракција (фракција у ојсежу од 225-330°C), 14-јумља са електропомпатором која води пйетролеум у резервоар, 15-јумља са електропомпатором која води дизеломоторску фракцију (гасно уље) у резервоар, 16-јумља са електропомпатором која води остйацк прераде нафте у резервоар или на дйљу прераду (фракција у ојсежу од 325°C па навише).



Слика 5.6: Шема вакуум десџилације - двофазног постојуйка прераде нафџе: 1- сирова нафџа из резервоара, 2-појлојни размењивачи којима се нафџа загрева на рачун количине појлојне добијене хлађењем произукаџа прераде нафџе у вакуум колони, 3-појлојни размењивач којим се нафџа дојунски загрева појлојном остџаџка прераде нафџе из друге фазе (вакуум колони), 4-цевна џећ за загревање нафџе, 5- рекџификациона колони - аџмосферска десџилација, 6-цевна џећ за загревање остџаџка из прве фазе прераде нафџе 7-вакуум колони, у којој се врши прерада остџаџка прве фазе фракционисања нафџе, 8- колоне за одвајање појединих фракџија, 9-пумџе са електромоторима за одвођење добијених производа у резервоаре или на даљу прераду.

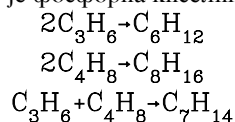
У општем случају, поступак крековања се изводи као термички, термокаталитички и хидрокрековање. Термички поступак крековања се данас не изводи, јер је садржај незасићених угљоводоника велик, па је добијени бензин мале хемијске стабилности, а и бензин и дизел гориво слабог квалитета с обзиром на радне карактеристике. Данас је у употреби поступак каталитичког крековања, који се изводи уз помоћ одређених супстанци, способних да изазову, усмере и убрзају процес - катализатора. Катализатори истовремено омогућавају да се процес изведе под повољнијим технолошким условима - на нижим температурама и притисцима. Квалитет добијених производа, првенствено бензина је бољи. Као катализатори се користе алуминосиликати са другим металним оксидима: први патентирани катализатор састојао се из 70–80% SiO_2 , 20–10% Al_2O_3 и не више од 10% других оксида [4]. Процес термичког крековања се изводи на температурама од 350–500°C и притисцима 2–5 МПа, а поступак каталитичког крековања се одвија на притисцима блиским атмосферском 0,1–0,3 МПа и температурама око 500°C. У пракси се среће низ комбинација термокаталитичког крековања: са непокретним и покретним катализаторима, у парном и парно-течном стању полазне сировине, са спрашеним катализатором и др. Током времена катализатори губе своја својства услед наслага чађи, кокса, деловања сумпора, па их је потребно регенерисати.

5.2.1.2.2 Поступци изградње

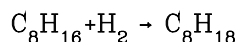
Поступци изградње се могу представити као поступци супротни претходном. Ако су се код поступака крековања од виших угљоводоника добијали нижи, код поступака изградње се од нижих угљоводоника добијају виши. Основни поступци ове групе су полимеризација и алкилација.

Полимеризација

Полимеризацијом се назива хемијска реакција спајања два или више молекула у већи молекул, односно, угљоводоника нижег реда у угљоводоник вишег реда. У реакцији полимеризације учествују само незасићени угљоводоници, па су зато сировине које се користе рафинеријски гасови, богати олефинским угљоводоникима са три или четири атома угљеника у молекулу (гасови настали при термичком и каталитичком крековању, коксовању и пиролизи). Најчешће коришћен катализатор је у овом процесу је фосфорна киселина.



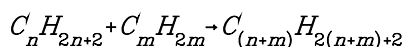
Овако добијени изоолефини се могу увођењем водоника у процес превести у изопарафинске угљоводонике, који су изванредних карактеристика с обзиром на примену у ото мотору (пример: добијање изеооктана)



Полимеризација се обично изводи као каталитичка, на температурама 150-205°C и под притиском од 20-60 МПа [5]. Бензинска фракција добијена овим поступком се назива полимер бензин.

Алкилација

Алкилација се као поступак широко користи. У основи се састоји од сједињавања једног олефинског угљоводоника са парафинским, остварујући изопарафинске угљоводонике вишег реда. Како се овај поступак користи за добијање квалитетних бензинских фракција, и овде је полазна сировина гасовита компонента са 2 до 4 угљеникових атома у молекулу. Реакција алкилације може се, у општем случају представити изразом



Изводи се као каталитички процес, при чему се као катализатори користе алуминијум хлорид ($AlCl_3$), сумпорна или флуороводонична киселина. Катализатори омогућавају да се овај поступак изведе на температурама 20-30°C и притисцима 1 МПа, за разлику од термичког поступка када су температуре око 550°C, а притисак 35 МПа. Добијени производ назива се алкилат и садржи у себи углавном изопарафинске угљоводонике од пентана (C_5H_{12}) до декана ($C_{10}H_{22}$).

5.2.1.2.3 Поступци конверзије угљоводоника

У данашњим условима захтеви који се од стране ото мотора постављају бензинима су толико високи да се њихово задовољавање може остварити само помоћу специјалних секундарних процеса прераде. У тим процесима, који не дају и повећање количине бензина, сировина која улази у процес је бензин ниског квалитета, а крајњи производ је бензин, али осетно побољшан. Побољшање квалитета бензина омогућило је повећање степена корисности мотора, економичности и степена усаглашености захтева мотора и потребног квалитета горива.

Реформисање

Типичан производни процес, који задовољава наведене услове, је поступак *reforming* (реформисање), којим се врши превођење угљоводоника једне групе у угљоводонике друге, повољнијих особина за примену. Поступак реформисања се изводи искључиво као каталитички, јер се термичким не добија жељено побољшање. Суштина поступка реформисања се састоји у ароматизацији и изомеризацији бензинских фракција. У овим условима, нафтенски угљоводоници губе део водоника, прелазећи у аромате, а парафински угљоводоници прелазе прво у нафтенске (врши се циклизација) а затим, као и нафтенски угљоводоници, губе одређен број атома водоника и прелазе у ароматске. Поред ових реакција, молекули парафинских угљоводоника прелазе у изопарафинске. Тежи угљоводоници се могу разложити - крековати. Настајање незасићених угљоводоника спречава се увођењем водоника у процес који се онда назива хидроформинг.

Основни индустријски катализатор, који се користи у овом процесу је алуминосиликатне основе (0,1 до 1,0%). Он омогућава извођење процеса на температури 460-510°C при притиску од 4 МПа и назива се, када се платина користи као катализатор, платформинг (добијени бензин је платформат). Бензин произведен овим поступком не садржи уопште олефинске угљоводонике: састоји се из аромата и изопарафина, уз веома мало нормалних парафинских угљоводоника.

Изомеризација

Други од поступака конверзије угљоводоника је поступак изомеризације који се састоји у превођењу нормалних угљоводоника у њихове изомере. Иако до ових поступака долази и при каталитичком крековању и при реформисању, код овог поступка изомеризација представља основну и главну појаву. Одвија се увек у присуству катализатора, а водоник се уводи само да би непожељне, незасићене фракције учинио повољнијим за употребу. Као катализатори се користе племенити метали, алуминијумхлорид са соном киселином.

5.2.1.2.4 Поступак уградње водоника

Првобитно су поступци увођења водоника у процес, коришћени приликом добијања течних горива и мазива из чврстих. Данас се они користе са циљем да се искористе остаци прераде низа раније наведених поступака. Тако се остатак прераде нафте фракционисањем излаже притиску од 20 МПа и температури од 450°C и уз помоћ катализатора добија бензинска фракција, која се даље користи за добијање квалитетних аутомобилских и авионских горива. Увођење водоника у секундарним процесима прераде је значајно за добијање квалитетних средњих фракција (дизел моторских фракција).

5.2.1.3 Дорада горива

Производи добијени различитим процесима прераде нафте или њених продуката нису погодни за коришћење, већ их је потребно усавршити и побољшати. Ови поступци, којима се низ штетних састојака одстрањује (органска једињења сумпора, кисеоника, азота и др.) називају се поступцима дораде. Они се према редоследу могу разврстати у неколико група:

- редестилација тј. поновна дестилација у циљу постизања тачнијег и повољнијег опсега испаравања,
- стабилизација, којом се издваја заостала количина гасовитих угљоводоника,
- накнадна дорада гасовитих угљоводоника базама у циљу удаљавања сумпора,
- додавање специјалних супстанци, које у малим количинама осетно побољшавају одређене особине појединих врста горива, спречавају кородивно деловање горива или га само боје,
- мешање истих фракција добијених различитим поступцима у циљу добијања коначног састава горива, који ће одговарати постојећим прописима и захтевима уређаја у коме се користи.

Остваривање овог последњег поступка, представља, нарочито за бензине суптилан задатак, поготово данас када се поред побољшања низа експлоатационих особина посебна пажња обраћа на загађење околине. Групни састав угљоводоника у том смислу представља основу за добијање квалитетног производа. У Табели 5.2 дати су састави бензинских фракција, добијених различитим производним поступцима /5/. Анализа састава бензинских фракција указује да ни једна од наведених фракција не би могла да се користи у данашњим моторима. Тек мешањем више бензинских фракција, водећи рачуна о задовољењу оба неопходна критеријума за рад мотора (критеријум образовања смеше и критеријум сагоревања) добија се моторни бензин.

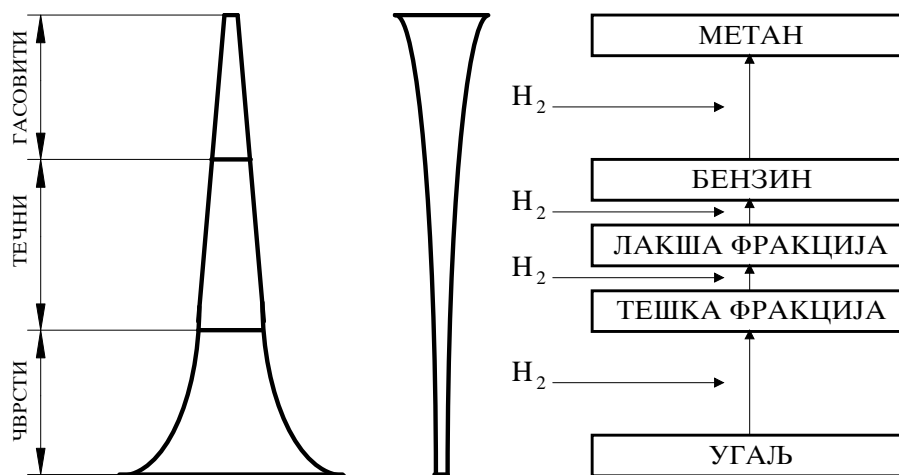
Табела 5.1 Угљоводонични састав бензинских фракција добијених различитим поступцима /6/

Производни поступак	Садржај (%)				
	n-парафина	изо-парафина	олефина	нафтена	аромата
Фракциона дестилација	41	27	0,5	20	11,5
Терм. крековање	24,5	10,5	46	10	9
Кат. крековање	6,5	15,4	45	11	22
Терм. реформисање	11,5	21,5	22,5	21,5	23
Кат. реформисање	12,15	28,35	0,5	5,0	54
Хидрирање	6,0	34,0	1,5	33,0	25,5
Полимеризација	-	5	95	-	-
Алкилација	-	98	2	-	-

5.2.1.4 Синтетичка течна горива

И поред тога што су ови поступци у принципу били познати још двадесетих година нашег века, није им у већој мери поклоњена била пажња, како због цене добијених производа, тако и због довољних количина течних горива добијених из нафте. Изузетак у том смислу представља Немачка у периоду пре II светског рата која је развијала ове поступке због непоседовања налазишта нафте и великих резерви квалитетног угља. У Немачкој је у току 1943-1944. године произведено чак $4 \cdot 10^6$ т моторних горива из угља [7]. Данас постројења ове врсте постоје и раде у Јужноафричкој републици што је последица вишегодишњег ембарга на увоз нафте због политике „апартејда“.

Угаљ, као и земни гас и нафта припада угљоводоникима. Од течних и гасовитих угљоводоника угаљ се разликује тиме што је састављен из осетно већих молекула, који садрже мање водоника (Слика 2.1). Полазећи од метана преко лакших и све тежих фракција нафте, мрких и камених угљева до антрацита садржај водоника опада: однос H/C (однос атома водоника и угљеника) од 4 код метана опада на 0,5 код антрацита. Супротно се мења молекуларна маса: од 16 за метан до неколико стотина хиљада за антрацит (Слика 5.7).



Слика 5.7

Према [8] угаљ је састављен у основи из ароматских структура који су међусобно спојени ланчаним везама. При загревању до изнад 350°C кидају се прво ланчане везе, при чему се издвајају гасовити продукти (волатили). Тако настаје полукокс. Ако се у овом процесу доводи водоник у већим концентрацијама, попуњавају се

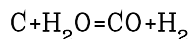
незасићене везе и тако настају молекули богатији водоником, чији је H/C однос већи од исходне материје угља. Довођењем веће количине водоника сукцесивно добијају се прво теже, затим лакше фракције и коначно бензин. Добијени продукти разликују се од деривата нафте већим садржајем аромата.

Овакав поступак, који се одвија на температурама између 300 и $500^{\circ}C$ и на притисцима од 20 МПа назива се хидрирање. Поступак се изводи помоћу катализатора који омогућавају лакше и брзо извођење процеса. Добијени производи се даље прерађују уобичајеним поступцима, који се користе за прераду нафте и њених деривата.

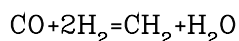
Као сировина за добијање течних горива, на сличан начин, користе се и тешки остаци прераде нафте, као и тер добијен сувом дестилацијом угљева.

Други од поступака добијања течних горива из чврстих је поступак синтезе. Извођење синтезе према Fisher-у (Фишеру) и Tropesch-у (Тропшу), који су спровели у делу замисао Француза Sabatie-a (Сабатјеа), врши се у неколико фаза.

У првој фази се преко ужареног кокса преводи водена пара, при чему настаје водени или синтезни гас, састављен од угљенмоноксида и водоника:



По одстрањивању сумпора (међуфаза) уводи се водоник са истом сврхом, као и приликом хидрирања, при чему се одвија реакција



Спајањем CH_4 група долази до стварања уља сличног по својим особинама и саставу нафте, које се даље прерађује уобичајеним поступцима за прераду нафте.

Претежни удео у овом уљу имају парафински угљоводоници, тако да су дизел горива изванредног квалитета, а бензини лоши, па се морају даље побољшавати. Општа заједничка особина свих горива добијених овим поступком је висок степен чистоће.

После енергетско-политичке кризе, поново је порастао интерес за добијање течних (и гасовитих) горива из угља. И поред тога што су добијени производи скупи, улажу се у истраживања велика средства јер ће се, са сталним порастом цена нафте, у блиској будућности достићи цена горива добијеног из чврстих. Истовремено одређене групације земаља (САД, Јапан и Западно-европске земље) овим поступком желе, да у случају несташице нафте, очувају бар за догледно време независност од произвођача нафте.

5.3 МОТОРНИ БЕНЗИНИ

Моторни бензини представљају течна горива која се користе за погон ото мотора са унутрашњим сагоревањем. Поред општих захтева који се постављају сваком гориву, они морају да задовоље и низ специфичних. Ови захтеви могу се груписати у два основна:

- за образовање смеше и
- за сагоревање настале смеше.

Моторни бензин треба да са ваздухом створи хомогену смешу неопходног састава (кофицијента вишка ваздуха) за било које климатске услове. Због тога бензин треба да добро и лако испарава, да поседује добре особине приликом пуштања мотора у рад (хладног односно загрејаног мотора), да обезбеди брзо загревање хладног мотора, да не изазива залеђивање карбуратора, да не утиче на хабање мотора при свим режимима рада мотора и да не ствара талог у устисној грани мотора и комори за сагоревање.

С друге стране, образована смеша горива и ваздуха треба да што потпуније и брже сагори у предвиђеном временском интервалу. Зато треба: да поседује што већу топлотну моћ, да сагорева без појаве ненормалних видова сагоревања на свим режимима рада мотора и у било којим климатским условима, да не образује токсичне и канцерогене компоненте у издувним гасовима, као и да продукти сагоревања не делују корозивно.

5.3.1 ОБРАЗОВАЊЕ СМЕШЕ

Да би се процес сагоревања обавио, неопходно је да се бензин преведе у парно стање и да се настале паре горива помешају са неопходном количином ваздуха и образују гориву смешу унутар концентрационих граница паљења. Код ото мотора горива смеша се може образовати на два принципијелно различита начина:

- у карбуратору, и
- убризгавањем у устисну грану.

И поред тога што непосредно убризгавање горива поседује низ предности у односу на образовање смеше у карбуратору (већа равномерност расподеле бензина по цилиндрима, већи коефицијент пуњења и већа литарска снага) и представља већ садашњост развоја мотора, образовање смеше разматраће се даље углавном помоћу карбуратора из разлога што већина данашњих мотора у нашој земљи има овакав начин образовања смеше, а и што би детаљније излагање ове материје превазишло материју предвиђену овим програмом.

Образовање смеше у карбуратору (Слика 5.8) се врши на следећи начин; брзина ваздуха у дифузору карбуратора је 20 до 30 пута већа од брзине горива. У таквим

условима млаз горива распада се на fine капи средњег пречника величине $0,1 - 0,2 \mu\text{m}$. Струја ваздуха повлачи са собом настале капи, које почињу интензивно да испаравају. И поред изразите турбулентности смеше део горива не испари, већ се таложи по површини усисне гране, где опет, на високим температурама, испарава. Смеша горива и ваздуха повлачи са собом слој течне фазе који није испарио брзином која је 50 до 60 пута мања од брзине парне фазе гориве смеше. Присуство течног слоја горива битно отежава образовање хомогене смеше, а основни је разлог појаве неравномерне расподеле смеше по цилиндрима мотора (поред утицаја конструктивних особина карбуратора и усисне гране). Бензин, значи, почиње да испарава у карбуратору, наставља са испаравањем у усисној грани и завршава у цилиндру мотора.

У циљу тачнијег дефинисања ове појаве и лакшег оцењивања утицаја горива, уводе се појмови квалитативне и квантитативне неравномерности расподеле

Слика 5.8: Пресек кроз главни горивни систем карбуратора

смеше. Квалитативна неравномерност расподеле смеше по цилиндрима последица је различитог садржаја појединих фракција или додатака (адитива) у горивој смеси у различитим цилиндрима мотора ($\phi = \text{const}$), за разлику од кванти-

тативне неравномерности расподеле смеше која је одређена само различитим вредностима коефицијента вишка ваздуха по цилиндрима.

Услед цикличности довођења гориве смеше у цилиндар мотора, карактер струјања гориве смеше има пулзациони карактер. У току такта усисавања горива смеша се креће у правцу цилиндра, при чему се њена брзина мења зависно од подпритиска у цилиндру и површине попречног пресека у зони усисног вентила. Затварање вентила прекида довод смеше у цилиндар. И парна и течна фаза бензина (која се налази на зидовима усисне гране) наставља кретање и даље у истом смеру, при чему течна фаза поседује далеко већу инерцију. Ово не изазива само локално смањење коефицијента вишка ваздуха односно локално обогаћење смеше у посматраном делу усисне цеви, већ и прераспodelу горива по дужини усисне гране: део гориве смеше у непосредној близини усисног вентила поседује највећу количину горива. Истовремено у овој зони течна фаза интензивно почиње да испарава. У првом моменту по отварању усисног вентила у цилиндар доспева богата смеша пара горива и ваздуха, као и течна фаза. Зато ће у почетку такта усисавања бити богата смеша, а довођењем осталих количина смеше пара горива и ваздуха ће осиромашавати. На овај начин настаје неравномерна расподела гориве смеше. Ова појава је још више појачана чињеницом да се из једног извора напаја више цилиндара.

Квалитативна неравномерност расподеле смеше јавља се, као последица чињенице да бензин представља фракцију нафте која испарава у одређеном температурском интервалу. Током испаравања долази до издвајања прво лакших угљоводоника, са нижом температуром кључања, а затим тежих. Оваква законитост испаравања јавља се и приликом припреме смеше у карбуратору. Испаравање лакших угљоводоника најчешће из капљица бензина води обогаћивању гориве смеше лакшим угљоводоницима, док испаравање слоја кондензованог по зидовима усисне гране води обогаћивању смеше тежим угљоводоницима. Неравномерност расподеле смеше ове врсте јавља се у стационарним условима рада мотора, а изразито је изражена у нестационарним условима - при убрзавању возила.

Неравномерност расподеле смеше по цилиндрима условљена је, чињеницом да се у усисној грани налазе две материје различитих агрегатних стања: ваздуха и пара горива и течног горива, у виду капи и слоја. За остваривање равномерне расподеле смеше потребно је обезбедити исте масене протоке горива и ваздуха за сваки цилиндар и за сваки такт усисавања. Извршена мерења у вишцилиндричним моторима показала су да се пуњења незнатно разликују по маси ваздуха, а знатно по маси горива. Ове појаве су нарочито изражене у условима екстремних температура у зимским и летњим условима и то: пуштања у рад незагрејаног мотора на ниским температурама и загрејаног мотора на повишеним температурама.

Савремена решења уређаја за образовање смеше се више не заснивају на карбуратору, већ на новом концепту којим се тачно одређена количина моторног бензина убризгава у усисну грану мотора. Убризгавање бензина у усисну грану, уз контролу, праћење и управљање целокупним системом за напајање мотора горивом и паљење образоване смеше, остварује се на два начина:

- убризгавањем, само на једном месту (у усисној грани изнад лептира, Слика 5.9), и
- убризгавањем за сваки цилиндар понаособ (Слика 5.10).

Слика 5.9: Моно (централно) убризгавање бензина на лептир /9/

Слика 5.10

Поред контролисане и оптимизације припреме гориве смеше цео систем је много сложенији (Слика 5.11) и омогућава постизање оптималних перформанси по свим критеријумима: енергетским, еколошким и економским.

Образовање смеше у основи зависи од карактеристика испарљивости горива.

5.3.2 ИСПАРЉИВОСТ ГОРИВА

Испаравањем се назива процес преласка течне фазе у парну. Брзина и потпуност преласка горива из течног у парно стање у датим условима одређени су првенствено фракционим саставом самог горива, што се краће назива испарљивошћу горива. Утицајне величине на испарљивост су свакако температура, брзина кретања струје гаса и др. У различитим ложиштима котлова и пећи, моторима ове вредности нису ни једнаке ни сличне, па зато потребне карактеристике испарљивости не могу да буду сличне - захтев за потребном испарљивошћу горива проистиче директно од постројења у коме се гориво користи.

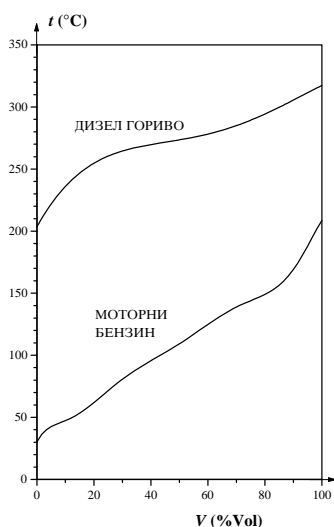
Испаравање са слободне површине течности настаје на било којој температури, при чему је испаравање брже што је слободна површина већа. Повећањем температуре, испаравање се повећава. Испаравање течности са слободне површине може бити статичко и динамичко. Под статичким испаравањем подразумева се такво испаравање код кога нема међусобног кретања између површине горива и ваздуха (испаравање течног горива у условима складиштења у резервоарима). Динамичким испаравањем назива се испаравање, у условима међусобног релативног кретања површине течности и ваздуха. Такво испаравање се уочава у ото моторима са унутрашњим сагоревањем при испаравању горива приликом образовања смеше. При свим осталим непромењеним условима брзина динамичког испаравања је увек већа у односу на брзину статичког испаравања.

Слика 5.11: MOTRONIC MP 3.1 за возила „Јуџо 89“

У општем случају са порастом молекулске масе угљоводоника из горива погоршава се испарљивост, јер истовремено расте и густина и температура кључања. Како су течна горива у стварности смеша великог броја угљоводоника, за које је утврђено да испаравају у одређеном температурском интервалу, неће при њиховом испаравању доћи до преласка целокупне масе горива у парно стање на једној одређеној температури: постепеним загревањем доћи ће до издвајања и преласка у парно стање најпре угљоводоника са најнижом температуром кључања, а затим редом све тежих и тежих. Ако се настале паре горива и кондензују и ако се при томе бележе температуре, добија се крива испаравања горива или крива дестилације. Одређивање криве испаравања врши се једноставним уређајем који је дат Сликаом 5.12. Загревањем горива (100 cm^3), настале паре пролазе кроз хладњак где се кондензују. Течна фаза се хвата у мензур и читава предестилисана количина горива. При томе се бележе за сваких десет кубних центиметара одговарајуће температуре, а добијене вредности графички се представљају.

Слика 5.12: Уређај за одређивање криве испаравања: 1-општина посуда, 2-термометар, 3-водено кувинило, 4-мензура, 5-електрични грелач

На Слици 5.13 дате су карактеристичне криве испаравања уобичајених горива.



Слика 5.13: Криве испаравања моторних бензина и дизел горива

За оцену испарљивости бензина овакав начин одређивања је неадекватан, јер су услови одређивања карактеристика испаравања у експерименту статички, а у условима примене бензин испарава у динамичким условима. Оцена динамичких услова испаравања је изузетно отежана и сложена и поред тога, за сваку врсту горива, потребно би било конструисати одговарајући уређај који би са више или мање тачности опонашао стварне услове рада. Како услови рада различитих мотора и топлотних постројења нису исти, досадашњи покушаји, да се створи једноставан уређај за оцену динамичке испарљивости, нису уродили плодом. Наведени метод, омогућава јединственим уређајем и за кратко време одређивање једне од могућих карактеристика испаравања, са добром репродуктивношћу добијених резултата, тако да је прихваћен и широко коришћен у целом свету, па и у нас.

Одговарајући значај има топлота испаравања, која представља количину топлоте потребне да јединица количине (обично масе) буде преведена из течног агрегатног стања у парно. Уколико је топлота испаравања велика, онда ће се приликом образовања гориве смеше утрошити релативно велика количина топлоте, па ће се температура целе смеше снизити и брзина испаравања ће се смањити. Поредити, на пример, испарљивост бензина, чија је топлота испаравања $403,11 \text{ kJ/kg}$ са испарљивошћу етилалкохола, чија је топлота испаравања $891,62 \text{ kJ/kg}$ утврђено је да при температури ваздуха који се уводи у мотор од 60°C у парно стање пређе 97% бензина, а само 67% етилалкохола. Пад температуре је међутим у првом случају био 24°C (температура се смањила на 36°C), а у другом случају чак целих 60°C (температура се снизила на 0°C) /8/.

На основу изложеног може се закључити да брзина и потпуност испаравања у постројењу у коме се примењују зависе са једне стране од особина горива (фракционог састава, топлоте испаравања, коефицијента дифузије), и с друге стране од спољашњих услова (температуре, притиска, величине површине испаравања,

релативне брзине струјања ваздуха у односу на површину горива). Уколико се, међутим, испаравање одвија у затвореном простору са слободне површине течности, после одређеног временског интервала уочиће се да ће ниво течности престати да се смањује услед успостављања динамичке равнотеже између парне и течне фазе: количина молекула која испарава са површине течности једнака је количини молекула који прелазе из парног у течно стање. Притисак који образују паре горива у условима равнотежног стања са течношћу, на одређеној температури, назива се притисак засићених пара. За хомогена једињења овај притисак зависи од температуре и природе течности: за сложене течности (из више компоненти), као што су течна угљоводонична горива, ова величина зависна је и од односа запремина, парне и течне фазе.

Притисак засићених пара одређује се уређајем по Reid-у (Риду). Горива лакшег фракционог састава по правилу имају већи притисак засићених пара. Подешавањем садржаја најлакше испарљивих компонената у једном гориву може се омогућити лак старт мотора у зимским условима, када је околна температура ниска, а спречити појава испаравања горива у летњим месецима, када је, насупрот, температура висока. Сувише велика количина лако испарљивих компонената у гориву узрок је и одређених губитака горива у условима складиштења.

Однос парне фазе према течној фази неког горива (V/L) дефинише се као запремина насталих пара горива по јединици запремине течног горива при одређеној температури и притиску.

Карактеристике испарљивости горива оцењују се, значи, преко неколико карактеристичних величина: криве испаравања, притиска засићених пара и односа парне и течне фазе (V/L односа - Vapour - Liquid).

На Слици 5.14 је приказан утицај испарљивости (преко криве испаравања) на проблеме који се могу јавити у току експлоатације путничког моторног возила.

Као што се може уочити, основни проблеми везани за испарљивост бензина су у условима хладног (зимски услови) и топлог времена (летњи услови).

5.3.2.1 Утицај испарљивости бензина на ниским температурама

Неопходна испарљивост бензина на ниским температурама је кључна у условима хладног рада мотора и то приликом његовог покретања (стартовања) и рада још недовољно загрејаног мотора.

Слика 5.14: Утицај испарљивости горива на неке од проблема који настају при експлоатацији пумпичких моторних возила

5.3.2.1.1 Утицај испарљивости бензина на стартовање хладног мотора

Тешкоће при стартовању хладног мотора резултат су одређених особина самог мотора, али и низа других утицајних фактора. Утицајне величине могу се разврстати у четири групе:

- конструктивне величине,
- опрема,
- гориво и одговарајуће мазиво уље, и
- одржавање мотора.

Не разматрајући у даљем конструктивне величине (степен компресије, облик простора за сагоревање, конструктивно извођење усисне гране и образовање смеше и др.), опрему (систем за довод горива, акумулатор), одржавање (под претпоставком да је мотор одржаван у свему по прописима произвођача), као и избор моторног уља, размотриће се само утицај горива.

У условима ниских температура испаравање бензина је отежано како услед ниске температуре самог бензина и његовог лошијег распршивања при малим брзинама у дифузору, тако и услед пада температуре због испаравања дела бензина. Такође, део испареног бензина се кондензује услед хладних зидова усисне гране. Испитивањима је утврђено да у овим условима само 10% од укупне количине горива доспе у парном стању у цилиндар. Количина бензина у парном стању била би недовољна за покретање мотора, па се зато, да би се постигла доња концентрациона граница упaljивости, смеша мора обогатити.

Због тога се, као величина меродавна за оцену могућности остварења успешног старта мотора узима одговарајућа температура криве испаравања - температура на којој испари 10% горива. Успешан старт мотора биће када се у бензину налази што више лакших фракција, односно онда када је температура на којој испари 10% горива нижа. То је и разлог да се у нас, у оквиру истог квалитета бензина, данас производе две градације: летњи и зимски бензин. Основна разлика између ове две градације је у испарљивости почетка криве испаравања: t_{10} код зимског бензина је нижа и њена максимално дозвољена вредност износи 55°C док је код летњег - $t_{10}=65^{\circ}\text{C}$ (ЈУС Б.Х2.220).

Поред десетопостотне тачке криве испаравања за оцену садржаја најлакше испарљивих фракција у бензину користи се и притисак засићених пара. Већем садржају најлакше испарљивих компонената одговара и виши притисак засићених пара, а нижа температура на којој испари 10% бензина (и обратно). Прописане максималне вредности притиска засићених пара за зимски и летњи бензин износе:

лети - 70kPa , а зими - 90kPa

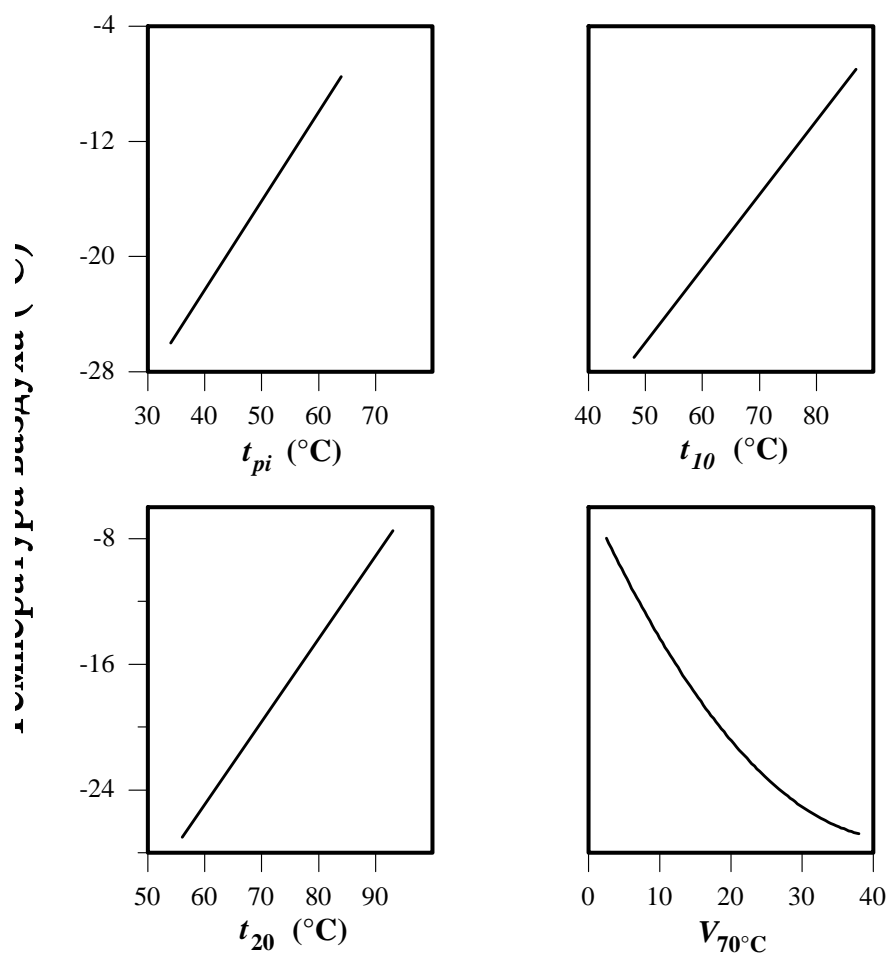
Поред температуре на којој испари 10% бензина и притиска засићених пара, за оцену утицаја бензина на старт мотора на ниским температурама користе се још

температура почетка испаравања, температура на којој испари 20%, нагиб криве испаравања у t_{10} и количина бензина која испари до 70°C . На Слици 5.17 дата је зависност температуре ваздуха при којој је могућ старт мотора зависно од испарљивости бензина; дефинисане температуром почетка испаравања, t_{10} , t_{20} и количином која испари до 70°C .

На Слици 5.15 дата је такође зависност температуре ваздуха на којој је могућ старт мотора од притиска засићених пара /11/, а на Слици 5.16 дата је зависност времена стартовања зависно од температуре ваздуха и испарљивости горива.

Слика 5.15: Зависност времена стартувања од околне температуре ваздуха и испарљивости горива (t_{10}) /11/

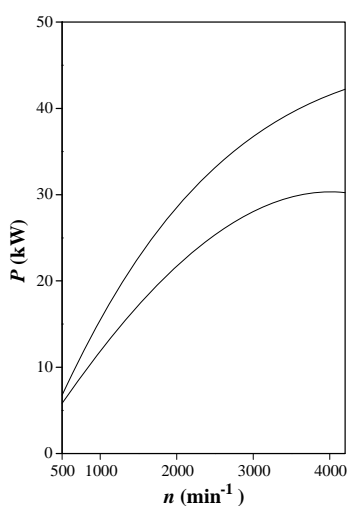
Слика 5.16: Зависност температуре ваздуха, на којој је могућ старт мотора, од притиска засићених пара: t_v -температура ваздуха, p_{zp} -притисак засићених пара горива (шрафирани део означава подручје у коме старт није могућ) /12/



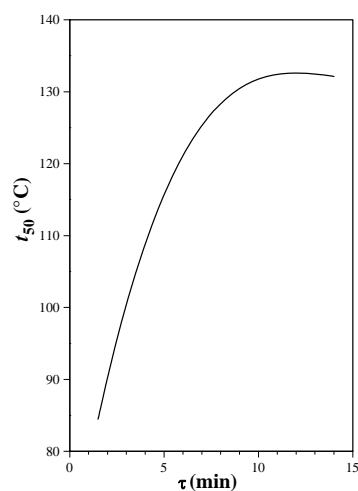
Слика 5.17: Зависности температуре ваздуха, при којој је могућ старт мотора од карактеристика испарљивости бензина: t_{pi} -температура почетка испаравања, t_{10} -температура на којој испари 10%, t_{20} -температура на којој испари 20%, $V_{70^{\circ}\text{C}}$ -количина лаких фракција која испари до 70°C (исход кривих је области у којој старт није могућ)/10/

5.3.2.1.2 Утицај испарљивости бензина на загревање мотора

Време загревања мотора дефинише се као временски интервал од тренутка покретања мотора до тренутка постизања мирног рада (постизања предвиђених вредности снаге, температура воде за хлађење, температуре мазивог уља, броја обрта и др.). Пожељно је да оно буде што краће, јер за време периода загревања долази до лошијег образовања смеше и лошијег сагоревања па мотор одаје и мању снагу (Слика 5.18). На време загревања мотора утиче температура на којој испари 50% бензина. Њена оптимална вредност је директно зависна од температуре околног ваздуха. Са падом температуре ваздуха потребна је и нижа вредност t_{50} . На Слици 5.19 дата је зависност времена загревања од испарљивости (t_{50}).



Слика 5.18: Снага мотора зависно од броја обрта при температури воде за хлађење од 80°C (крива 1) и 40°C (крива 2)



Слика 5.19: Зависност времена загревања од испарљивости горива: τ -време загревања (min), t_{50} -температура испаравања 50% горива [12]

5.3.2.1.3 Утицај испарљивости бензина на залеђивање карбуратора

Потребна количина топлоте за испаравање бензина одузима се од околног ваздуха и кућишта карбуратора. Последица је хлађење, тако да се у одређеним климатским условима јављају температуре испод тачке мржњења. Како се у ваздуху налази увек одређена количина влаге, јавља се танак слој леда на оним деловима карбуратора који се налазе у близини зоне распршивања. Појава леда изазива смањење попречног пресека кроз који прострујава ваздух. При ниским бројевима обрта и при делимичном оптерећењу количина гориве смеше се смањује, број обрта опада и јављају се прекиди у раду. У крајње неповољним случајевима може доћи до прекида рада мотора (када лептир замрзне уз дифузор).

Залеђивање карбуратора зависи од температуре и влажности ваздуха, конструкције усисног система, испарљивости бензина (заједно са топлотом испаравања) и услова рада мотора.



Слика 5.20: Утицај релативне влажности ваздуха и температуре на појаву залеђивања карбуратора /14/

Најповољнији услови за појаву залеђивања карбуратора јављају се у хладним кишовитим данима (Слика 5.20). Највећи број сметњи и прекида рада мотора јавља се када је релативна влажност ваздуха 100%-центна и температура околног ваздуха 4-5°C. Температура од 11°C је сувише висока за појаву леда, а на температурама испод -2°C у ваздуху се налази веома мало влаге, да би то могло да

изазове залеђивање карбуратора. Лакше испарљива горива као и горива веће топлоте испаравања изазивају веће хлађење па и чешћу појаву леда - Слика 5.21. Досада извршена испитивања указују да доминантан утицај на појаву залеђивања има t_{50} . Данас се овај проблем решава додавањем специјалних површинско активних адитива гориву, који спречавају пријањање леда на метал. У општем случају стварање леда се јавља при делимичним оптерећењима, мада се код неких мотора ова појава може јавити и при пуном оптерећењу.

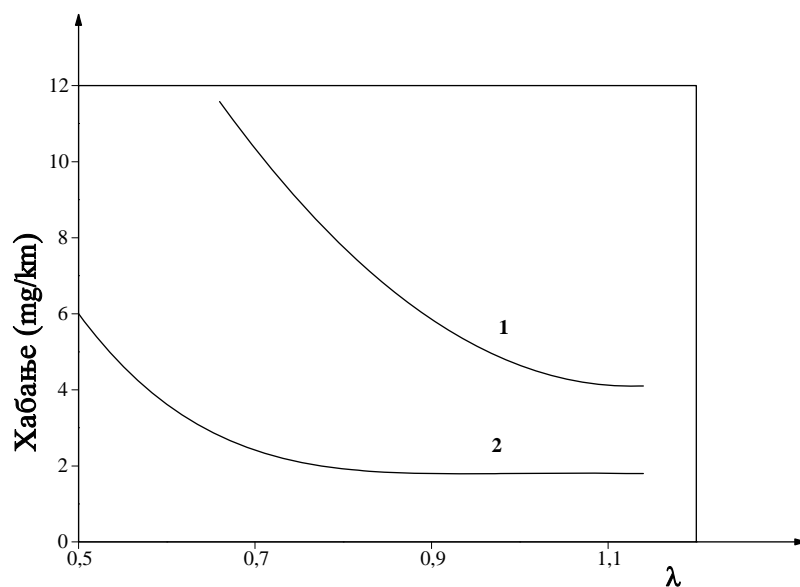
Слика 5.21: Утицај испарљивости горива на хлађење металних делова карбуратора: 1-гориво мале испарљивости, 2-гориво средње испарљивости, 3-гориво високе испарљивости /15/

5.3.2.1.4 Утицај испарљивости на хабање мотора

Потпуност испаравања бензина, као и количина тежих фракција у њему, оцењују се на основу температуре на којој испари 90% горива. Више температуре ове карактеристичне величине указују на већу количину теже испарљивих ком-

понената у бензину. Теже фракције не успевају да испаре у потпуности, а нарочито у условима стартовања на ниским температурама још незагрејаног мотора и доспевају у течном стању у цилиндар мотора. Ова количина бензина се слива између цилиндра и клипа спирајући постојећи слој мазивог уља. Последица је разређење уља, а тиме и повећано хабање. Основни узрок хабања није ипак разређење уља, већ његово спирање са површина у додиру - клипних прстенова, клипа и цилиндра, на пример.

Зависност утицаја тешких фракција у бензину, на хабање мотора представљена је на Слици 5.22.



Слика 5.22: Зависност хабања мотора од испарљивости горива и коефицијента вишка ваздуха /13/: 1-бензин чије су $t_{90}=200^{\circ}\text{C}$, $t_{ki}=225^{\circ}\text{C}$, 2-бензин чије су $t_{90}=180^{\circ}\text{C}$, $t_{ki}=205^{\circ}\text{C}$

5.3.2.2 Утицај испарљивости бензина на повишеним температурама

Проблеми на повишеним температурама везани су за услове загрејаног мотора приликом стартовања и његовог рада.

5.3.2.2.1 Утицај испарљивости бензина на образовање парних чепова

У условима рада загрејаног мотора на повишеним температурама (летњи климатски услови) може доћи до прекида рада мотора и његовог заустављања у зависности од карактеристика испарљивости примењеног бензина. Ови проблеми се јављају као последица испаравања најлакших компонената бензина у инсталацији за напајање мотора горивом. Образоване паре горива поседују запремину која је 150-200 пута већа од запремине бензина који је испарио. У таквим условима уместо течне фазе, у систему за напајање мотора горивом налазе се смеша течне и парне фазе горива (образују се такозвани „парни чепови“), тако да пумпа за довод горива доводи мању количину бензина и горива смеша, која доспева у комору за сагоревање мотора, осиромашује. Мотор почиње нестабилно да ради на празном ходу, прекида у вожњи и у екстремном случају се зауставља.

Настајање парних чепова у инсталацији за довод горива зависи од испарљивости бензина и режима рада мотора. Погодни услови се јављају нарочито лети када се често вози под пуним оптерећењем у брдским пределима, где је и атмосферски притисак нижи. До испаравања горива долази:

- у водовима између резервоара и карбуратора,
- у пумпи за довод горива, нарочито у њеном усисном делу, где због подпритиска настају повољни услови за образовање пара горива, и
- у комори пловка карбуратора.

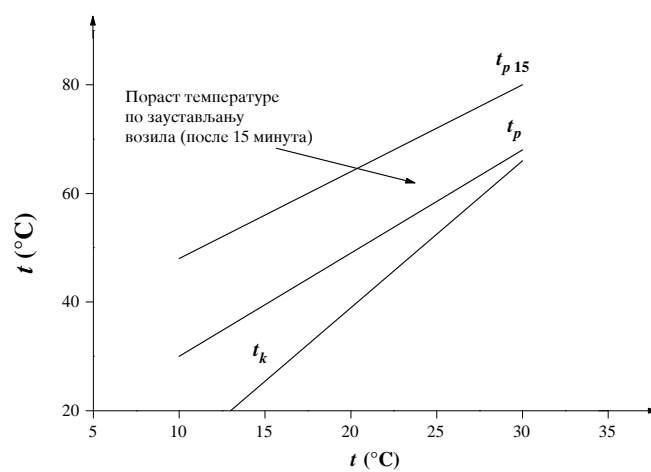
Најнеповољнији услови настају после дуже вожње под пуним оптерећењем и заустављања возила. Тада у знатној мери престаје одвођење топлоте од стране околине и у затвореном простору око мотора температура нагло расте (Слика 5.23). На основу извршених мерења утврђено је да, зависно од околне температуре, температура у простору око мотора (t_1), температура у пумпи за гориво (t_2) и температура у пловковој комори карбуратора (t_3) достижу вредности дате у Табели 5.3.

Табела 5.2

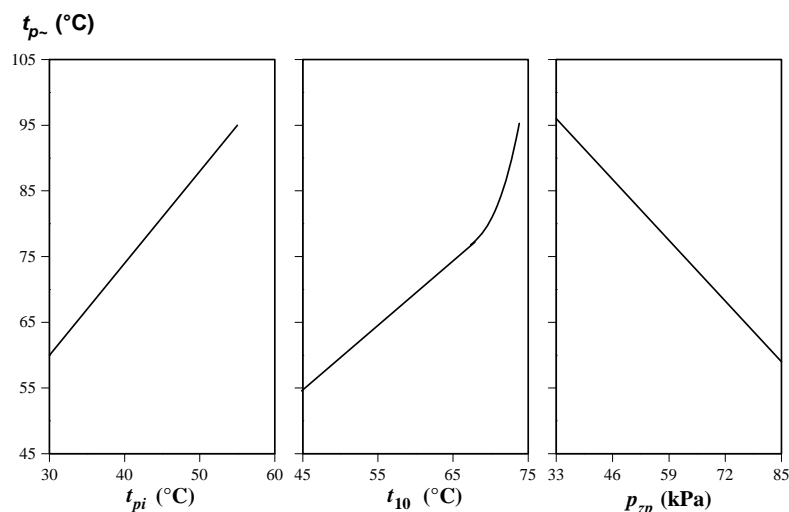
За околну температуру	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_3 (°C)
30°C /14/	60-70	50-65	55-75
35°C /43/	70-80	72	-
40°C /10/	90-95	70-75	-

На основу испитивања возила Застава 750 утврђено је да температура у пумпи за гориво бензина достиже чак 80°C при околној температури ваздуха од 30°C (Слика 5.24). Зависност температуре при којој се у возилима јављају парни чепови од карактеристика испарљивости дата је на Слици 5.25 /9/.

Слика 5.23: Промена температуре у простору око мотора, њеловковој комори, њуми за гориво и ѓлавном бризгачу по заустављању мотора /16/



Слика 5.24: Температуре бензина у њуми за гориво возила Застава 750 по заустављању (t_p), после 15 минута (t_{p15}), и у комори њеловка карбуратора после заустављања (t_k), у зависности од температуре околног ваздуха (t_v) /17/



Слика 5.25: Температура бензина при којој долази до појаве парних чепова (t_{pc}) у зависности од t_{pi} , t_{10} и притиска засићених пара бензина /10/

Склоност ка образовању пара зависи од количине и својстава угљоводоника, који су при датој температури и притиску способни да пређу у парно стање. И поред везе која се може успоставити (што је већи притисак засићених пара и нижа температура почетка испаравања и 10%, то је већа склоност ка настајању парних чепова), ни један од тих критеријума не може у потпуности да да податак колико ће се пара образовати у бензину при његовом загревању. Зато се, данас, искључиво користи V/L (Vapor–Liquid) однос - однос парне и течне фазе. Обично се однос V/L налази у зависности од температуре. Користећи два типа горива са положенијом и стрмијом кривом промене односа V/L са температуром, и утврђујући на возилу када долази до одговарајућих сметњи услед појаве парних чепова, може се одредити критични V/L однос, који се одговарајућом производњом бензина треба да спречи (Слика 5.26). Критични V/L однос одређује се из пресека кривих опитних горива узимајући за меродавне вредности задње криве без сметњи и прве следеће криве са појавом сметњи. Опитна горива су припремљена лабораторијским путем а различитих су вредности V/L односа и различите законитости промене V/L односа са температуром. Додавањем техничког n-пентана и изобутана добијају се криве промене V/L односа са температуром различитог нагиба: горива са n-пентаном имају већи нагиб, а горива са изо-бутаном - мањи.

Слика 5.26: Одређивање критичног V/L односа и захтева за потребним V/L односом

Као последица појаве пара горива могу настати следеће потешкоће: прекид рада мотора на празном ходу, губитак снаге после стартовања загрејаног мотора и може доћи до „не прихватања“ мотора, што се нарочито уочава при убрзавању возила. Ове појаве најчешће служе као критеријуми за оцену квалитета бензина - његове испарљивости и утврђивање потребног захтева за одговарајуће возило или више возила.

Критична вредност V/L односа се за већину путничких моторних креће око вредности 25:1. Испитивањима на низу моторних возила је такође утврђено да при V/L односу једнаком 36:1 долази до немогућности рада мотора због парних чепова, па се зато при производњи бензина узима као гранична дозвољена вредност.

5.3.3 САГОРЕВАЊЕ У ОТО МОТОРУ

Сагоревање представља најважнији такт једног циклуса у мотору јер се у току сагоревања хемијска енергија горива трансформише у топлотну, а ова у механичку. Процес сагоревања одређује карактеристике снаге и економичности мотора, а карактер његовог одвијања суштински утиче на сигурност и век трајања мотора. Са еколошке стране процес сагоревања одређује и ниво токсичних компонената у издувним гасовима мотора.

Сагоревање смеше горива и ваздуха у мотору представља крајње сложен скуп физичко-хемијских процеса који се одвијају у условима брзих промена температуре, притиска и концентрација реагујућих материја. Изучавање процеса сагоревања усложњено је и чињеницом да бензин чини сложену смешу различитих угљоводоника.

При сагоревању се, у принципу, морају разграничити два процеса: процес паљења и процес простирања пламена.

За паљење гориве смеше неопходно је довести одређену количину енергије из околине у количини која ће бити довољна, да бар у неком делу запремине обезбеди такве брзине хемијских реакција, да количина настале топлоте буде већа од одведене. Паљење се може остварити или принудним путем или самопаљењем. Принудним паљењем остварује се интензивно локално загревање мањег дела гориве смеше до високе температуре. Електричном варницом при принудном паљењу, део смеше у зони пражњења постиже скоро тренутно високу температуру, која далеко превазилази и температуру паљења и температуру сагоревања. Брзина реакције сагоревања у том тренутку је изванредно велика, али после престанка деловања електричне варнице опада на величину која одговара сагоревању дате смеше у датим условима температуре и притиска и концентрације.

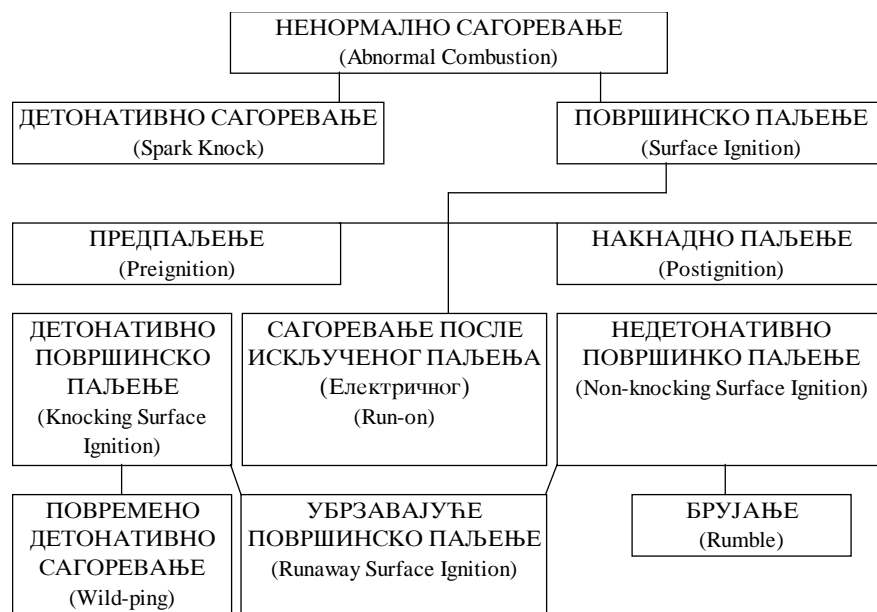
За разлику од процеса паљења, процес простирања пламена остварује се без спољашњих утицаја на гориву смешу, јер се следећи, суседни слојеви свеже смеше пале на рачун енергије образоване при сагоревању претходних слојева исте смеше горива и ваздуха. Не улазећи детаљније у суштину паљења и сагоревања, рамаграће се у даљем само макро појаве ових процеса.

У условима рада мотора са унутрашњим сагоревањем пуњење радном смешом горива и ваздуха врши се брзинама, при којим се стварају вртложна, вихорна кретања смеше. Овакво кретање гориве смеше бива очувано и током такта сабијања, тако да, у овим условима, процес сагоревања има изразит турбулентан карактер. Брзина простирања пламена креће се у границама 10-40 m/s. На повећање брзине сагоревања утиче низ фактора: она је директно пропорционална броју обрта, температури и притиску. Брзина простирања пламена зависи у основи од коефицијента вишка ваздуха и максималну вредност достиже за $\alpha = 0,85-0,9$.

На неким режимима рада мотора односно возила:

- при коришћењу бензина који не одговара у потпуности захтевима мотора односно возила,
- услед лоше конструкције коморе за сагоревање,
- лошег одржавања мотора,
- отежаних услова експлоатације,

може доћи до једног од видова ненормалног сагоревања - детонативног сагоревања (Слика 5.27). И поред тога што су узроци и последице оваквог, крајње штетног вида сагоревања у принципу добро познати, суштина и механизам саме појаве ни до дан-данас нису у потпуности разјашњени. Упрошћено ова појава се може описати појавом самопаљења дела смеши горива и ваздуха, до које, после паљења иницијалног дела гориве смеши, фронт пламена није доспео и то на више места при чему се образује ударни, детонативни талас. У почетку самопаљење и образовање новог фронта пламена се јавља на једном или на неколико места у несагорелом делу смеши. Ударни таласи који се образују и који се простиру по целој загрејаној активној смеши изазивају и потпомажу самопаљење осталог неупаљеног дела смеши. При томе брзина простирања пламена постаје иста као и брзина детонативног таласа тј. јавља се детонативни талас сагоревања, брзине 2000 до 2500 m/s.



Слика 5.27: Упрошћена шема могућих видова ненормалног сагоревања, дефинисана од стране CRC (Coordinating Research Council)

На тај начин детонативно сагоревање може се окарактерисати веома брзим завршетком процеса сагоревања као резултат самопаљења гориве смеше, праћено настајањем ударног таласа, који са своје стране помаже да се сагоревање остатка гориве смеше заврши надзвучном брзином.

Спољни показатељи детонативног сагоревања су карактеристичан метални звук, дим у издувним гасовима и прегревање мотора. Метални звук је резултат вишеструких периодичних одбијања ударних таласа од и о зидове коморе за сагоревање. Мерењима и снимањем такозваних индикаторских дијаграма (Слика 5.28) уочавају се осцилације при крају сагоревања, чија је учестаност реда величине од неколико хиљада херца. Повећање притиска, само по себи, са тачке гледишта механичке отпорности мотора не би представљало опасност да се ови максимуми и минимуми не јављају у виду крајње кратких импулса (трају мање од 0,0001 s). Истовремено, ова појава изазива уклањање слоја моторног уља са површине цилиндра повећавајући, на тај начин, хабање цилиндара и клипних прстенова. Такође осцилаторни карактер ових осцилација притиска оштећује антифрикционе материјале лежаја клипњаче.

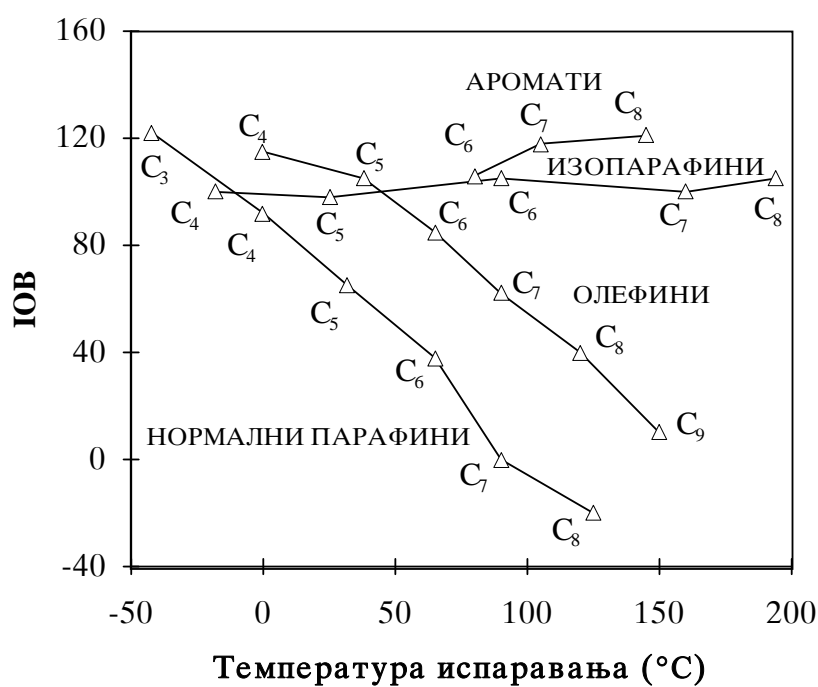
Поред механичког преоптерећења, услед детонативног сагоревања долази и до термичког преоптерећења: највећа опасност овог вида сагоревања састоји се у повећаном одавању топлоте зидовима коморе за сагоревање и челу клипа. Ово води прегрејавању мотора и може изазвати локална оштећења површина коморе за сагоревање и чела клипа, чији се први трагови манифестују појавом пукотина, а крајњи резултат може бити прегоревање.

Слика 5.28: Снимљени индикаторски дијаграми нормалног (а), и детонативног (б, в) сагоревања у мотору

Појави детонативног сагоревања погодују повећања степена компресије, повећани коефицијент вишка ваздуха, повећање оптерећења уз смањење броја обрта, повећање угла предпаљења, настајање талоба на челу клипа и у комори за сагоревање, као и неадекватан квалитет горива.

Не улазећи детаљније у образлагање утицаја конструктивних и експлоатационих фактора, даће се у даљем тексту утицај горива на појаву и спречавање детонативног сагоревања.

Испитивањима која су до сада извршена утврђено је да најмању отпорност према детонативном сагоревању поседују ланчани неразгранати угљоводоници - парафински угљоводоници, код којих са порастом молекулске масе отпорност према детонативном сагоревању опада. Отпорност према детонативном сагоревању даље расте преко незасићених, ланчаних угљоводоника (олефинских) до изопарафинских и ароматских угљоводоника (Слика 5.29). То је и разлог што се низом поступака прераде парафински и олефински угљоводоници преводe у ароматске и изопарафинске угљоводонике.



Слика 5.29: Окџански број угљоводоника различитог згруповања /11/

5.3.4 ОТПОРНОСТ ПРЕМА ДЕТОНАТИВНОМ САГОРЕВАЊУ БЕНЗИНА

Отпорност према детонативном сагоревању бензина представља једну од његових најважнијих карактеристика. Са појавом ненормалног сагоревања у моторима истраживачи су се сусрели први пут 1919. године, а већ у периоду 1920-1927. године јављају се и прве методе за оцену квалитета горива с обзиром на отпорност према детонативном сагоревању. Коришћени критеријуми (критични степен сабијања и други) нису обезбеђивали добро поређење добијених резултата, а и добијени резултати су се лоше слагали са истим карактеристикама у условима експлоатације мотора односно возила. Појам октанског броја уведен је 1927. године, када су за еталон горива предложени индивидуални угљоводоници: изооктан (2, 2, 4 три метилпентан) C_8H_{18} и нормални хептан C_7H_{16} , који су се међусобно јако разликовали с обзиром на отпорност према детонативном сагоревању. Изооктан поседује велику отпорност према детонативном сагоревању па је узето да има такозвани „октански број” - 100, а нормални хептан - веома малу, па му је октански број једнак нули (условно узет). Образујући смеше ових еталон горива могу се добити октански бројеви од 0 до 100. Проценат изооктана у овим смешама представља њихов октански број.

Суштина одређивања октанских бројева састоји се у испитивању бензина непознатог понашања с обзиром на отпорност према детонативном сагоревању на специјалном једноцилиндричном мотору, који има могућност промене степена сабијања и поређења његовог сагоревања са опитним мешавинама изооктана и n -хептана: основни циљ је да се нађе смеша изооктана и n -хептана која ће под истим условима испитивања имати иста антидетонативна својства као и испитивани узорак. Отпорност према детонативном сагоревању карактерише се помоћу октанског броја, који је бројно једнак процентуалном садржају изооктана у смеси са n -хептаном, која у прописаним стандардним условима испитивања на специјалном мотору антидетонативно сагорева исто као и испитивани бензин. Ако је на пример, испитивани бензин сагоревао исто као и смеша од 96% изооктана и 4% n -хептана, каже се да је октански број бензина -96.

Од оцењивања отпорности према детонативном сагоревању преко октанског броја првобитно, до данас с обзиром на развој конструкција и наменски различитих мотора, број могућности за оцену понашања једног бензина у реалном мотору је стално растао. Данас се за оцену понашања једног бензина користи читав низ карактеристика отпорности према детонативном сагоревању: истраживачки октански број, моторски октански број, осетљивост, путни октански број, дистрибуциони октански број, PR и др.

5.3.4.1 Одређивање истраживачког и моторског октанског броја

Оцена отпорности према детонативном сагоревању помоћу октанских бројева врши се помоћу такозваног „истраживачког“ и „моторског“ октанског броја. Испитивања се обављају на једноцилиндричним опитним CFR (Cooperative Fuel Research) моторима, конструисаним тако да им се, у одређеном опсегу, може мењати степен сабијања, док се при испитивању сви остали могући утицајни параметри (температура средстава за хлађење, температура уља за подмазивање, температура уласног ваздуха и др.) одржавају константним. Степен компресије је изабран као директно утицајна величина на појаву детонативног сагоревања (Слика 5.30).

Одређивање октанског броја и истраживачком и моторском методом своди се на

Слика 5.30: Опитни мотор за одређивање октанског броја

следеће: опитни једноцилиндрични мотор пушта се у рад и доводи на прописани режим. Затим се прелази на рад мотора са горивом чији се октански број одређује и током рада постепено повећава степен компресије до појаве интензивног и чујног детонативног сагоревања (што се контролише такозваним мерачем интензитета детонативног сагоревања). По налажењу састава смеше горива и ваздуха (коэффициента вишка ваздуха) степен сабијања се смањује и доводи се интензитет детонативног сагоревања на прописани ниво. Задржавајући све утицајне величине сталним, као и одговарајући степен сабијања, прелази се на рад са сталон горивима (смешама изооктана и n-хептана) - познатог октанског броја и тражи она смеша, која ће у датим условима сагоревати детонативно као и испитивано

гориво. Процентуално запреминско учешће изооктана у смеси са *n*-хептаном, бројно је једнак октанском броју испитиваног горива (бензина).

Табела 5.3

Основне карактеристике	Истраживачка метода F-1	Моторска метода F-2
Број обрта (min^{-1})	600 ± 6	900 ± 9
Температура средстава за хлађење ($^{\circ}\text{C}$)	100	100
Температура гориве смеси ($^{\circ}\text{C}$)	-	149
Температура уисног ваздуха ($^{\circ}\text{C}$)	52	-
Угао предпаљења ($^{\circ}$ колена коленастог вратила пре СМТ)	13	променљив

Истраживачка метода одређивања октанског броја поправљена је и допуњена 1939. године у односу на првобитно коришћену. Основне разлике ове две методе дате су у Табели 5.4.

Моторска метода одређивања октанског броја бензина разрађена је још 1932. године као резултат одређеног незадовољства са тада коришћеном истраживачком методом (добити резултати по истраживачкој првобитној методи нису се довољно слагали са понашањем горива у условима експлоатације).

Поред америчких CFR мотора, у даљем временском периоду развијени су и други од којих се данас користе мотори сличне конструкције у бившем Совјетском Савезу и СР Немачкој.

Испитивање отпорности према детонативном сагоревању бензина по истраживачкој методи врши се у условима мање оптерећеног режима рада мотора, него што је то случај код моторске методе. Зато је октански број бензина одређен по истраживачкој методи обично увек виши за неколико октанских јединица у односу на октански број одређен по моторској методи. Из истог разлога се може написати релација

$$IOB > MOB$$

де су:

- IOB - истраживачки октански број,
- MOB - моторски октански број.

Поређењем добијених вредности IOB и MOB са понашањем бензина у примени, уочило се да октански број добијен истраживачком методом карактерише антидетонативне карактеристике бензина при раду мотора односно возила у условима градске вожње, односно у условима релативно мањег топлотног оптерећења мотора. У условима дугих међуградских вожњи на отвореном путу, када је мотор топлотно више оптерећен, показало се да је за оцену отпорности према детонативном сагоревању бољи октански број одређен моторском методом.

5.3.4.2 Осетљивост бензина

Истраживања отпорности према детонативном сагоревању показала су да бензин различитог групног својства на различитим режимима рада мотора показују различита својства. Овакво понашање објашњава се различитом осетљивошћу бензина у односу на режим рада мотора, па је зато у циљу потпунијег оцењивања антидетонативних својстава горива уведен појам „осетљивости“, који се дефинише разликом између истраживачког и моторског октанског броја:

$$S=IOB-MOB$$

Од угљоводоника који се налазе у нафти и продуктима прераде нафте највећу осетљивост поседују олефински угљоводоници, а мало за њима заостају ароматски. Најнеосетљивији су парафински, док нафтенски угљоводоници заузимају место између парафинских и ароматских угљоводоника.

5.3.4.3 Одређивање путног октанског броја

У почетку убрзавања моторног возила мотор ради на ниским бројевима обрта и при потпуном отвореном лептиру карбуратора, а притисак у усисној грани се по својој вредности приближава атмосферском.

Настајање детонативног сагоревања при ниским бројевима обрта била је широко распрострањена појава, нарочито код европских возила са ручном променом степена преноса. Поред конструкције мотора, ова појава зависи од октанског броја лако испарљивих компонената горива. Другим речима, поред вредности истраживачког и моторског октанског броја, потребно је познавати и расподелу октанских бројева дуж криве испаравања. Октански бројеви одређени истраживачком и моторском методом у стационарним условима рада опитних једноцилиндричних мотора не могу да дају резултате који би били применљиви у условима експлоатације моторних возила, која раде у условима сталних промена и броја обрта и оптерећења.

Оцена понашања моторних бензина у оваквим условима рада може се вршити само на стварним вишцилиндричним моторима код којих су ове појаве највише и изражене. У том циљу врши се одређивање отпорности према детонативном сагоревању бензина такозваним путним октанским бројем.

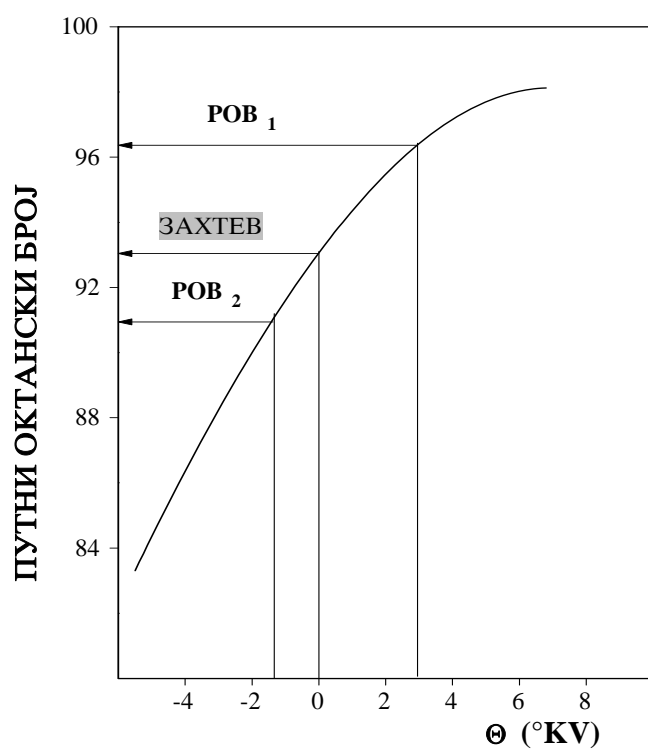
Како код стварних мотора није могуће мењати степен сабијања, за изазивање појаве детонативног сагоревања користи се друга утицајна величина на ову појаву: угао претпаљења.

Принцип методе (такозвана модифицирана Union Town) састоји се у томе да се моторно возило специјално опреми тако да је могуће мерење температуре ваздуха на улазу у карбуратор, температуре моторног уља, температуре воде за хлађење, броја обрта и на коме је уграђен уређај за промену угла претпаљења из кабине возача. У овако припремљено, релативно ново и добро разрађено возило (5000 до 8000 km пређеног пута), уграђен је низ резервоара у којима се налазе одговарајуће мешавине изооктана и n-хептана, као и резервоар за узорак бензина чији се путни октански број испитује. Поступак се своди на убрзавање возила у директном степену преноса (IV брзина) од релативно ниског броја обрта ($cca 1000 \text{ min}^{-1}$) пуним отвора лептира карбуратора за одређене углове претпаљења све док не дође до изразите, чујне појаве детонативног сагоревања (до 2500 min^{-1}). Угао претпаљења се затим постепено смањује (за сваки угао возило се по истој процедури убрзава) и утврди када долази до граничне појаве детонативног сагоревања. Са сваким од предвиђених еталон горива (мешавина изооктана и n-хептана) утврди се угао претпаљења при коме долази до појаве граничног детонативног сагоревања и добијене вредности уносе у одговарајући дијаграм: добијена крива представља такозвану „баждарну криву“ (Слика 5.31). Сада се поступак испитивања понавља са узорком бензина тражењем угла претпаљења при коме ће доћи до исте граничне појаве детонативног сагоревања. Ова вредност уноси се на дијаграм. Повлачењем ординате до пресека са баждарном кривом, добија се путни октански број. Знајући фабрички подешену вредност угла предпаљења може се на овај начин оценити и захтев мотора односно возила за потребним октанским бројем, а на основу захтева оценити да ли испитивани узорак задовољава возило (уколико је POB већи од захтева) или не (уколико је POB мањи од захтева).

Путни октански број се по својој вредности налази између истраживачког и моторског:

$$IOB > POB > MOB$$

Путни октански број важи за једно возило и за један бензин. У Табели 5.5 дати су резултати испитивања два наша бензина испитиваних на пет моторних возила, а на Сlici 5.32 дате су баждарне криве за иста возила и добијене вредности путних октанских бројева за иста два узорка бензина.



Слика 5.31: Одређивање путног октанског броја: 1-баждарна крива, добијена са мешавином изооктана и n-хептана, 0-представља фабрички подешено предлажење, захтев износи 93,2 октанске јединице, ПОН₁-задовољава захтев, а ПОН₂-не

Табела 5.4

Возило	Узорак	
	I	II
А - Застава	94,6	93
Б - FIAT 125	98,7	94
В - AUSTIN MAXI	98,8	95,2
Д - PEUGEOT 304	96,0	92,75
Е - RENAULT R 10	95,5	93,2

Слика 5.32: Пуџини окџански бројеви испџиваних узорака бензина (I и II) на различџим возилима (ознаке одџоварају Табели 5.5) /18/

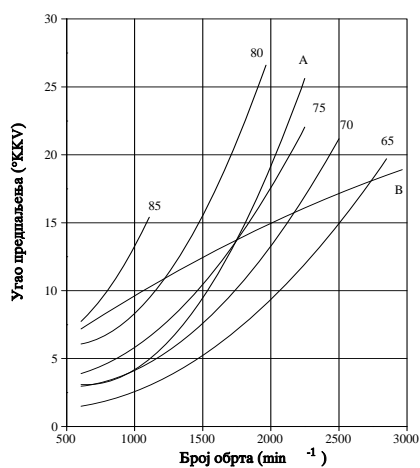
Поред модифициране "Union-Town" методе, користи се и метода „граничне линије" ("Border Line"). И овом методом узимају се брзина возила и угао предпаљења, као утицајне и значајне величине на појаву детонативног сагоревања, али она даје више података о односу између горива и мотора. Одређивање карактеристика отпорности према детонативном сагоревању у овом случају врши се на следећи начин: угао предпаљења се смањи, а брзина возила успори до минималне у директном степену преноса, а затим убрзава пуним отвором лептира карбуратора. Утврђују се брзина (број обрта) граничне појаве детонативног сагоревања и уноси као тачка на дијаграму - угао предпаљења у функцији броја обрта. У даљем се поступак понавља повећавајући угао предпаљења за 2°KKV све док се не добију комплетни подаци у целом опсегу броја обрта рада мотора.

Као и код прве методе, изложени поступак се врши прво са референтним горивима (мешавинама изооктана и n-хептана) и тек онда са моторним бензинима, чије се карактеристике отпорности према детонативном сагоревању одређују.

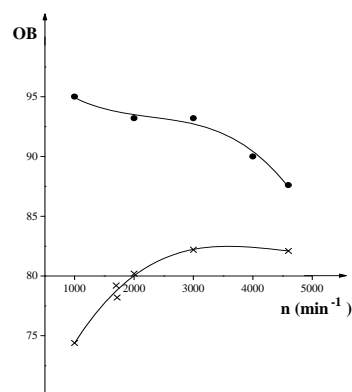
За испитивани моторни бензин октански бројеви у целокупном опсегу рада мотора добијају се из пресека криве за моторни бензин са кривама референтних горива. На Слици 5.33 дати су подаци криве граничне линије појаве детонативног сагоревања за референтна горива и два моторна бензина А и Б, а октански бројеви моторних бензина А и Б дати су у Табели 5.6 /20/.

Метода граничне линије користи се и за одређивање захтева за потребним октанским бројем одређног мотора у широком опсегу броја обрта мотора. Највећа вредност октанског броја добијена на овај начин, представља захтев за октанским бројем тог мотора.

На Слици 5.34 су дати подаци испитивања /21/ за мотор 128.А.064 произвођача ДМБ, Раковица који се уграђује у возила Застава /21/.



Слика 5.33



Слика 5.34

Табела 5.5

	Октански број	n (min^{-1})	α ($^{\circ}\text{KKV}$)
Моторни бензин А	75	1750	13,0
	70	1000	4,5
Моторни бензин Б	80	1150	10,0
	75	1800	13,5
	70	2200	16,0
	65	2800	18,5

5.3.4.4 Дистрибуциони октански број и PR

Како су испитивања на возилима скупа, захтевају већи број возила, људи и време, учињено је више покушаја да се ова појава симулира у лабораторијским условима. У том циљу се одређују дистрибуциони октански број или/и PR_{75} и слично.

Одређивање дистрибуционог октанског броја своди се на уградњу специјалног хладњака између карбуратора и усисне гране стандардног једноцилиндричног опитног мотора (Слика 5.35). Овај додатак, кроз који струји вода приближне температуре од 4°C , врши кондензовање делимично или потпуно испарених тежих фракција бензина, омогућавајући само најлакшим фракцијама да дођу до цилиндра мотора, где се одређује њихов октански број. Добијена вредност октанског броја представља такозвани дистрибуциони октански број.

Слика 5.35: Додатни уређај за одређивање дистрибуционог октанског броја

Карактеристика PR представља разлику истраживачког октанског броја бензина и истраживачког октанског броја одређене фракције бензина. $\text{PR}_{100^{\circ}\text{C}}$ на пример, представља разлику IOB и октанског броја одређеног истом методом фракције бензина која испари до 100°C и карактерише отпорност према детонативном сагоревању лакших фракција бензина. У општем случају пожељно је да PR буде што мање.

5.3.4.5 Могућности повећања отпорности према детонативном сагоревању бензина

Побољшањем отпорности према детонативном сагоревању бензина омогућава се примена бензина у моторима вишег степена сабијања па тиме и већи степен корисности мотора. Развој мотора уско је био везан за развој бензина и повећање његове отпорности према детонативном сагоревању.

У САД је 1926. године 49 произвођача моторних возила производило motore са степеном компресије од 4,4, а одговарајући октански број бензина кретао се у широком границама. Исте године произведен је бензин октанског броја од 70. Неопходност сарадње између моторне и нафтне индустрије нарочито се јасно показала 1932. године, када је произведен мотор степена компресије од 6,2 (фирма Крајслер), али како није било одговарајућег бензина, степен компресије се морао снизити на 4,75.

Првобитно је отпорност према детонативном сагоревању побољшавана производним процесима и избором оптималних компонената, у циљу добијања високог октанског броја, а касније и са циљем његове равномерне расподеле по фракцијама - дуж криве испаравања.

У принципу бензин високе отпорности према детонативном сагоревању се добија поред мешања бензинских фракција добијених различитим процесима (реформисањем, изомеризацијом, крековањем и др.) и додавањем специјалних супстанци, способних да у малим количинама осетно побољшају антидетонативна својства.

Данас још увек најчешће коришћени поступак за побољшање отпорности према детонативном сагоревању је додавање супстанци растворљивих у бензину, које су способне да у малим концентрацијама осетно побољшају антидетонативна својства. Овим додацима, названим антидетонаторима, поред високог антидетонативног деловања поставља се још низ захтева:

- да се добро растварају у гориву,
- да се мало или уопште не растварају у води,
- да им испарљивост одговара испарљивости бензина, односно да им је температура кључања унутар температуре почетка и краја испаравања бензина,
- да су стабилни у мешавини са бензином,
- да нису отровни по околину, и
- да не ометају предвиђен рад мотора, односно да не делују кородивно на делове инсталације за довод горива.

Овим свим захтевима тешко је удовољити: од свих до сада коришћених антидетонатора највише су коришћена метало-органска једињења на бази олова - тетраетилолово и тетраметилолово.

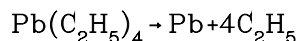
И поред тога што је употреба оловних алкилата у моторном бензину у већини развијених земаља већ искључена, у нашој земљи је још увек у употреби и биће, вероватно, до краја овог века, па ће предности и мане њиховог коришћења бити изложене. Примена тетраетиллова ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) почела је после испитивања низа органских и металоорганских једињења која је у САД обавио Ценерал Моторс у току 1921. и 1922. године, са циљем да се повећа отпорност према детонативном сагоревању бензина. Примена тетраметил олова ($\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$) је новијег датума (1962. година) и последица је релативно високе температуре испаравања тетраетиллова, а тиме и неадекватно покривеног опсега испаравања бензина са гледишта отпорности према детонативном сагоревању.

Основне физичке карактеристике тетраетил и тетра метил олова дате су у Табели 5.7.

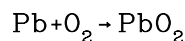
Табела 5.6

Карактеристика	ТЕО	ТМО
Температура кључања ($^{\circ}\text{C}$)	200	110
Молекулска маса (kg/kmol)	323,5	267,4
Густина (kg/m^3)	1650	1995

На повишеним температурама у комори за сагоревање тетраетиллово се у потпуности разлаже, образујући олово и етил-радикал:



при чему олово оксидише стварајући оксид



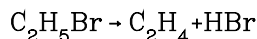
а угљеник и водоник сагоревају у CO_2 и H_2O .

Овај диоксид олова, према једној од теорија, ступа у реакцију са пероксидима разлажући их и образујући слабо активне продукте сагоревања и оксид олова, спречавајући појаву детонативног сагоревања.

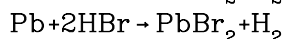
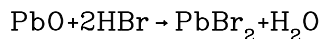
Оловодиоксид има високу температуру топљења (880°C), па се таложи у комори за сагоревање и на челу клипа. На основу извршених прорачуна утврђено је да би већ после 40 часова рада мотора целокупна запремина компресионог простора била пуна олова. У стварности већи део продуката сагоревања олова бива изнесен продуктима сагоревања изван коморе (90%). У току низа процеса сукцесивног сагоревања долази до таложења оловних оксида, али и до одвајања већ створених делова наслага; после извесног времена успоставља се динамичка равнотежа при којој су количине наталожених и одвојених оловних оксида међусобно једнаке.

Издуним гасовима се износи и део оловних оксида који се није наталожио. Међутим, и количина од 10% оловних оксида, која остаје у мотору узрок је непожељних последица. Оловни оксиди акумулирају топлоту и могу бити узрок другог вида ненормалног сагоревања у мотору - површинског паљења, које може да пређе у детонативно сагоревање,

Спречавање таложења овог дела олова остварује се додавањем етилбромида и етилхлорида тетраетилолову (такозвани „етилфлуид“) који, распадајући се, образују водоникхлорид и водоникбромид. Ови последњи реагују са оловним оксидом, стварајући оловне бромиде и хлориде, ниже температуре топљења од температура које се јављају у комори за сагоревање па се у парном стању износе из коморе за сагоревање



односно,



Тетра етил и тетра метил олово могу се користити као физичке и хемијске мешавине. Хемијске мешавине облика:

триетил-метил олово	$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_3(\text{CH}_3)$
диетил-диметил олово	$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_2(\text{CH}_3)_2$
етил-триметил олово	$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)(\text{CH}_3)_3$

су боље, јер заједно са ТЕО и ТМО покривају целу криву испаравања, али и скупље /19/.

На отпорност према детонативном сагоревању при ниским бројевима обрта мотора (у условима убрзања возила) највећи утицај има тетра метил олово са којим су добијени најбољи резултати. Примена ТМО даје најбоље резултате са бензином каталитичког реформисања, што је и логично, с обзиром на законитост промене октанског броја дуж криве испаравања. То је био разлог примене тетра метил олова поред тетра етил олова.

И поред тога што су оловни алкилати пожељни са моторске тачке гледишта, са порастом загађења околине у којој живимо, примена ових антидетонатора се забрањује делом што су сами токсични, делом што инхибиторски делују у процесу сагоревања (утичу на настајање отровних компонената), а делом што онемогућавају ефикасан рад уређаја за смањење осталих непожељних материја у издуним гасовима мотора (CO , C_mH_n , NO_x).

Смањење садржаја аромата, који су носиоци високе отпорности према детонативном сагоревању, као и забрана коришћења оловних једињења као антидето-

натора, уводи као једину могућу замену - оксигенате (метанол, етанол, МТБЕ, ЕТБЕ и др.). Поред изванредне отпорности према детонативном сагоревању оксигенати не повећавају испарљивост моторних бензина, не утичу на постојеће материјале система за напајање мотора горивом и могу се намешавати у рафинеријама. Присуство оксигената у моторним бензинима омогућава смањење CO , посебно код старијих моторних возила без каталитичких конвертора.

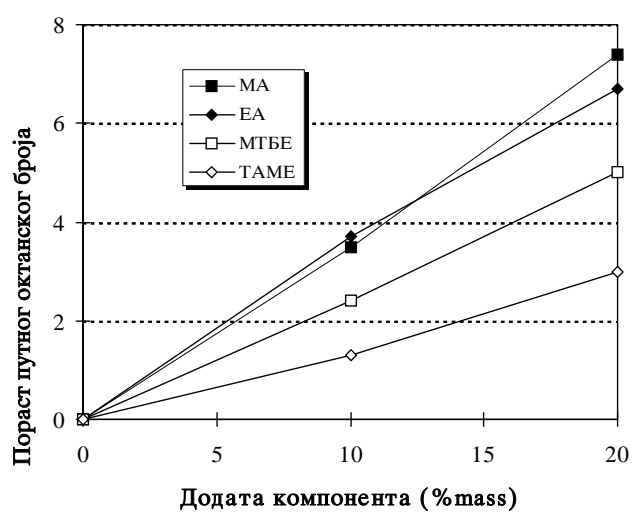
Физичко-хемијске карактеристике оксигената у поређењу са моторним бензином и водоником дате су у Табели 5.8 /20, 21/. Утицај оксигената на неке карактеристике моторних бензина дат је на Сликама 5.36, 5.37, 5.38 и 5.39 /22, 23/.

Слика 5.36

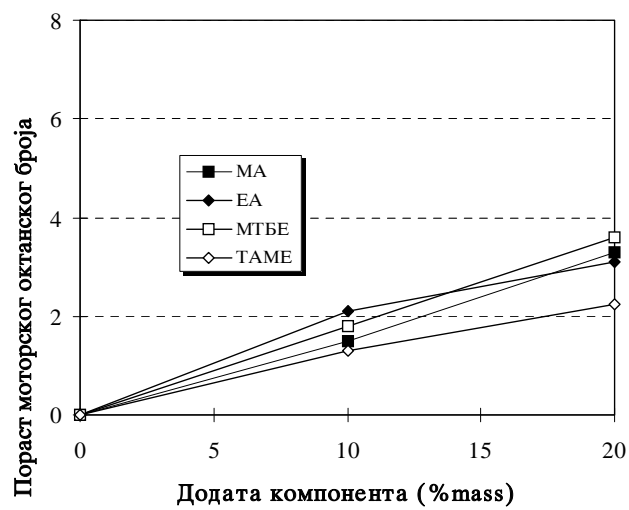
Слика 5.37

Табела 5.7

	Јед. мере	БЕНЗИН	МЕТАНОЛ	ЕТАНОЛ	ПРА	ТВА	МТВЕ	ТАМЕ	ВОДОНИК
Хемијска формула		C_8H_{18}	CH_3OH	C_2H_5OH	C_3H_7OH	C_4H_9OH	$C_5H_{11}OH$	$C_6H_{13}OH$	течни H_2
Густина	kg/d m^3	720–750	791	784	784	792	746	750	71
Моларна маса	kg/k mol	114	32	46	60	74	88	102	2
Садржај киселика	%	0	50	35	27	22	18	16	0
Температура кључања	°C	30–200	64,7	78,5	82,4	82,8	55,3	86,3	–252,7
Температура стињавања	°C	–65	–97,8	–114,9	–89,5	–25,5	–115,5		–259,1
Топлота испаравања	kJ/kg	280	1080	845	702	510	337	310	450
Специфични топлотни капацитет	kJ/kg °C	2,0	2,52	2,43	2,45				9,5
Стехиометријски однос ваздух/гориво	kg/kg	14,5	6,5	9,0	10,4	11,1	11,7	12,1	34,2
Топлотна моћ									
- горња	MJ/kg	45,9	22,7	30,2	33,1	35,6	38,2	39,4	142,4
- доња	MJ/kg	43,0	19,9	27,2	30,1	32,6	35,2	36,5	120,2
- доња	MJ/d m^3	32,3	15,9	21,6	23,6	25,8	26,3	27,4	8,5
- стехиомет. смеше		2,96	3,06	3,02	2,90	2,94	3,0	3,01	4,05
Границе упаливости		25–4	12,6–1,6	18,5–2,7					345–5



Слика 5.38



Слика 5.39

Садржај оксигената у моторним бензинима је ограничен Директивом 85/536/ЕЕС усвојеном децембра 1985. године (Табела 5.9).

Табела 5.8: Дозвољени садржај оксигена у моторним бензинима

	A (% Vol)	B (% Vol)
Метанол са косолвентом (обавезно)	3	3
Етанол са косолвентом (евентуално)	5	5
Изопропилалкохол (IPA)	5	10
Терцијарни бутил алкохол (ТВА)	7	7
Изобутил алкохол (IBA)	7	10
Етри (са 5 и више атома угљеника)	10	15
Мешавине са органским оксигенатима (не смеју се прекорачити горе наведене границе)	2,5 % mass O ₂	3,5 % mass O ₂

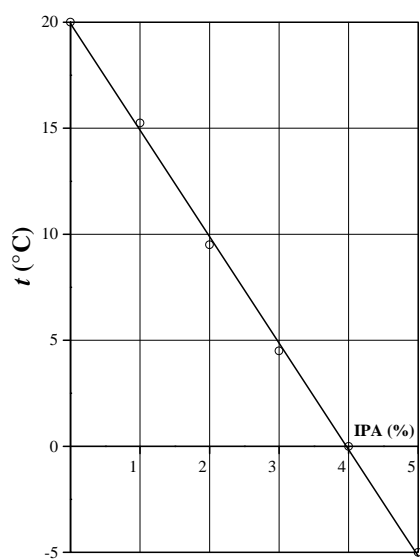
Увођење оксигената (метанола првенствено) може да изазове појаву раслојавања бензина и алкохола. Ова појава је потенцирана присуством воде и нижим температурама. Појава раслојавања успешно се спречава додавањем такозваних косолвената - виших алкохола изопропил и терцијарног бутил алкохола (IPA, TBA) (Слике 5.40 и 5.41).

5.3.5 ОСТАЛЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ БЕНЗИНА

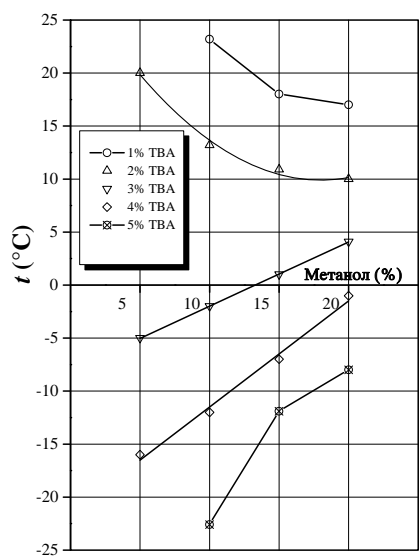
Поред најважнијих особина везаних за испарљивост и отпорност према детонативном сагоревању, стандардима је предвиђено и испитивање низа других физичких и хемијских показатеља квалитета горива.

Густина

И поред тога што прописима није дата граница у којима треба да се креће густина, у извештају о испитивању се увек захтева навођење вредности густине.



Слика 5.40



Слика 5.41

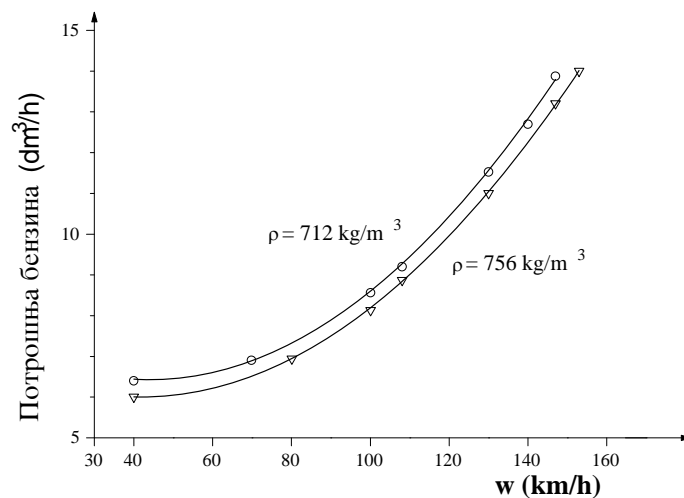
Густина нафте и производа прераде нафте се мења са температуром: већа је на нижим температурама, а нижа на повишеним температурама. Зависност ове промене даје се линеарном везом облика

$$\rho = \rho_1 - a(t - t_1)$$

где је:

- a - корекциони фактор за 1° промене температуре,
- t_1 - усвојена реперна температура (15°C или 20°C),
- t - температура за коју се израчунава густина.

На основу густине бензина може се успоставити веза са стварном потрошњом. Уобичајен начин изражавања помоћу запреминских јединица ($\text{dm}^3/100\text{km}$, на пример) није у потпуности коректан, јер што је већа густина бензина, то је већа количина масе по запремини, па ће и добијена количина топлоте бити већа. Мерења извршена у овом смислу показују да ће потрошња горива са бензином веће густине бити мања, из наведеног разлога (Слика 5.42).



Слика 5.42: Потрошња горива у зависности од брзине возила (возило *Citroen DS 19* /25/)

Из слике се, такође, може уочити зависност промене потрошње горива од брзине кретања возила: са порастом брзине потрошња расте. То је и разлог ограничавању брзине возила у низу земаља у циљу штедње горива уопште, а посебно бензина.

5.3.6 МОТОРНИ БЕНЗИНИ НАШЕ ЗЕМЉЕ

Према прописима СР Југославије (ЈУС Б.Х2.220) у Југославији се производе три врсте моторног бензина:

- моторни бензин октанског броја 98 - ознака МБ 98,
- моторни бензин октанског броја 86 - ознака 86, и
- безоловни моторни бензин октанског броја 95 - ознака БМБ 95.

Моторни бензини по овом стандарду користе се за погон свих ото мотора изузев авионских, при чему се моторни бензини вишег октанског мотора користе код мотора вишег степена компресије или тачније већег октанског захтева. Основне прописане карактеристике дате су у Табели 5.10.

Како се из наведених података може уочити све градације бензина се производе као зимски и летњи бензин. Карактеристика испарљивости, одређене карактеристичним тачкама криве испаравања, напоном пара и односом пара - течност су у периоду зимском такве да омогућавају лак старт хладног мотора захваљујући већем садржају лакших фракција. Насупрот овом, у летњем периоду спречава се појава парних чепова захваљујући мањој испарљивости.

Европски прописи дефинишу испарљивост на прецизнији и нешто другачији начин. Уместо t_{10} користи се као мерило садржаја најлакших фракција количина бензина која испари до 70°C (E70-evaporated). Зависно од климатских услова, према испарљивости, сви бензини су подељени у пет класа (Табела 5.11). Земље чланице европске заједнице су обавезне да утврде класу за одређени период године, односно део земље.

Осетљивост, дефинисана као разлика истраживачког и моторског октанског броја, предвиђена нашим стандардима од 11 октанских јединица је сувише велика, јер вредност наших бензина не прелазе за последњих неколико година вредност 7,5 (26). Садржај олова је прилично висок и у будућности треба очекивати његово смањење.

Безоловни моторни бензин, уз развијену катализаторску технику, представља данас најзначајнију меру за смањење токсичних компонената у издувним гасовима ото мотора. Истовремено, нестаје емисија олова, хлора и брома. Примена безоловног моторног бензина продужава век трајања свећица и издувног система.

Табела 5.9: Карактеристике моторних бензина СРЈ и Европе

Карактеристике	СРЈ			Европа
	МБ 98	МБ 86	БМБ 95	БМБ 95
Густина на 15°C	не прописује се, али се одређује и уноси у извештај			725-780
Дестилација -10%Vol испари до -50%Vol испари до -90%Vol испари до -95%Vol испари до	у зимском периоду 55°C у летњем периоду 65°C			
	115°C		120°C	
	200°C			
			205°C	
Напон пара по Риду, hPa највише	у зимском периоду 900 у летњем периоду 700			
Однос пара-течност 36:1 у °C, највише	у зимском периоду 45 у летњем периоду 55		53	
Октански број по истраживачкој методи, најмање	98	86	95	95
Октански број по моторској методи, најмање	87	80	85	85
Садржај олова, g/dm ³ , највише	0,6	0,6	0,013	0,013
Садржај сумпора, % највише	0,1	0,1	0,2	0,1
Корозивност на бакарној траци, највише	1a	1a	1b	1
Садржај смола, mg – /100ml, највише	6	6	5	5
Индукциони период, min, најмање	420	420	420	360
Боја	плава	жута	необојен	

Табела 5.10

Особина	Јединице	Класа				
		1	2	3	4	5
Напон пара min. max.	hPa hPa	350 700	450 800	550 900	600 950	700 1050
Проценат испареног до 70°C min. max.	% %	10 45	10 45	15 47	15 47	20 50
Проценат испареног до 100°C min. max.	% %	38 65	38 65	43 70	43 70	43 70
Проценат испареног до 180°C min.	%	85	85	85	85	85
Крајња тачка кључања, max.	°C	215	215	215	215	215
Остатак дести- лације, max.	%	2	2	2	2	2

5.4 ГОРИВА ЗА ДИЗЕЛ МОТОРЕ

Под горивом за дизел моторе обично се подразумева фракција нафте, која, својим највећим делом, испарава у границама од 180-350°C. Таква врста горива најпогоднија је за примену у брзоходим дизел моторима, који, данас, чине основни део дизел моторског парка. Шири појам обухвата, поред наведене фракције, и теже дестилате који се примењује у спороходим дизел моторима. Специфичности њихових карактеристика произилазе из особина рада самог мотора, поред општих захтева који се постављају једном гориву уопште. Аналогно материји која је изложена код бензина, најважније карактеристике проистичу из услова образова-

ња смеше и сагоревања самог мотора. С обзиром да у зимским условима проточност дизел горива може да буде знатно отежана или чак у потпуности спречена, нискотемпературске карактеристике горива имају посебан значај.

Образовање смеше у дизел мотору се суштински разликује од истог код ото мотора (Слика 5.43). У току такта компресије сабија се ваздух који се услед тога загрева. У овако загрејан ваздух убризгава се млаз горива. Да би до паљења дошло уопште, као што је познато, течност гориво мора испарити и образовати са околним кисеоником одговарајућу смешу. Да би процес испаравања могао да се заврши у што краћем времену гориво се под притиском распршује у велики број финих капи. Механизам распршивања и испаравања течност горива може се са задовољавајућом тачношћу представити у неколико фаза:

- образовање млаза горива, као резултат истицања кроз бризгалку под притиском,
- поремећај млаза услед трења са околним ваздухом и стварање већег броја капи, њиховог уситњавања и у мањем броју укрупњавања,
- испаравања.

Време од увођења горива у комору за сагоревање дизел мотора па до појаве видног паљења назива се период закашњења паљења. На Слици 5.44 дате су уопштене промене које настају на једној капи горива у току овог периода.

У тренутку када капљица горива доспе у комору за сагоревање испаравања на површини капи је температура $t_{\text{с}}$, а како до испаравања и мешања са ваздухом још није дошло коефицијент вишка горива има вредност нула. Коефицијент вишка горива је обрнуто сразмеран коефицијенту вишка ваздуха. У даљем току, гориво се загрева, испарава и меша са ваздухом, па зато расте и температура горива и коефицијент вишка горива. Ако до паљења не дође гориво ће се загревати све док се температура пара горива и ваздуха не изједначе.

У стварном процесу увек се, загревањем, достигне вредност температуре самопаљења. Пресек кривих температуре горива и криве температуре самопаљења одређује почетак реакција. Видно паљење не настаје одмах већ нешто касније. Укупни период закашњења паљења може се теоријски посматрано, поделити на физички и хемијски период закашњења паљења.

Период закашњења паљења, значи, преставља припремну фазу за процес сагоревања. Дужина ове фазе је утолико мања, уколико су притисак и температура при крају такта компресије већи. Не мањи значај има финоћа распршивања, која обезбеђује брзину испаравања капи, и састав горива, који директно утиче на упаливост настале смеше.

Најмању температуру самопаљења поседују парафински угљоводоници, затим нафтенски, па ароматски угљоводоници. Тако, на пример, температура самопаљења п-хептана у мешавини са ваздухом износи $470-480^{\circ}\text{C}$, док је при истим усло-

вима температура самопаљења бензена реда величине 700-750°C. Теже самопаљење бензена објашњава се већом отпорношћу везе између угљоводоникових атома у шесточланом ароматском прстену бензена у поређењу са C—C везом парафинских угљоводоника. Код ароматских угљоводоника потребно је за раскидање C—C везе утрошити 490 kJ/kmol, док је код парафинских угљоводоника одговарајућа количина енергије 298 kJ/kmol, па је зато одговарајућа потребна температура виша. Полазећи од угљоводоника мање молекулске масе ка вишим, температура самопаљења се смањује.

Присуство двогубе везе, као и разгранатости парафина повећава температуру самопаљења. На тај начин се једино може објаснити да лако испарљива горива, као што је бензин на пример, који имају нижу температуру паљења, поседују вишу температуру самопаљења, него теже испарљива дизел горива и уља за ложење. Код дизел моторских горива температура самопаљења, на нормалном атмосферском притиску, се налази у границама 350-400°C, док за бензине износи 400-450°C, а за ароматске угљоводонике чак преко 700°C. Повећање притиска за 1 МПа снижава температуру самопаљења дизел горива од 400 на 250°C [28].

После појаве првих иницијалних места упаљења почиње да сагорева она количина која је прва убризгана у простор за сагоревање и која је, после испаравања успела да образује гориву смешу са кисеоником. Даље се процес одвија тако што се пламен шири на суседне делове смеше и што се јављају нови извори упаљења. Процесу сагоревања погодује постојање релативне брзине између капи и пара горива и ваздуха, која омогућа одвођење насталих продуката сагоревања и довођење нових количина кисеоника потребног за сагоревање. У почетном стадијуму сагоревања количина кисеоника која се налази око капи је довољна за сагоревање и процес се одвија брзином, која у основи зависи од брзине увођења горива. У даљем току, са доласком нове количине горива а истовремено са смањењем количине кисеоника услед сагоревања претходно убризганог горива, брзина сагоревања се успорава и одређена је брзином мешања пара горива са неутроше-ним кисеоником.

Оштра граница између наведених фаза се не може повући и ова разматрања су, у реалном процесу зависна од низа утицајних чинилаца (конструктивних карактеристика мотора, особености образовања смеше и кретања ваздушног пуњења).

Поред наведених фактора, на образовање смеше утичу конструкција бризгалке и вискозност горива, док на паљење и сагоревање од стране горива највећи утицај имају групни угљоводонични састав.

Динамику процеса сагоревања одређују брзина пораста притиска и максимална вредност притиска сагоревања - величине директно зависне од периода закашњења паљења. Мањи период закашњења паљења обезбеђује благ пораст притиска и предвиђене максималне притиске сагоревања.

Слика 5.43: Комора за сагоревање дизел мотора ИМ-033

Слика 5.44: Зависности промене температуре горива (t_G), температуре самопалажења (t_{sp}) и коефицијента вишка горива (ρ_G) током времена: $\rho_{ф}$ -физички период закашњења паљења, $\rho_{х}$ -хемијски период закашњења паљења, $\rho_{зр}$ -период закашњења паљења /27/

Процес сагоревања код дизел мотора се остварује спонтаним самопаљењем настале смеше горива и ваздуха, без страног извора паљења. Зато су карактеристике упаливости оне које у основи одређују квалитет горива.

5.4.1 СВОЈСТВА ГОРИВА КОЈА УТИЧУ НА ОБРАЗОВАЊЕ СМЕШЕ

Брзина образовања смеше у дизел мотору одређена је брзином испаравања, која зависи од температуре, финоће распршивања горива и његове испарљивости односно вискозности.

5.4.1.1 Испарљивост

Дизел горива лакшег фракционог састава - веће испарљивости испаравају брже па се период потребан за образовање хомогене смеше смањује. Сразмерно повећање испарљивости води, међутим, тврђем раду мотора - већој брзини порас-

та притиска, јер се у тренутку паљења у комори за сагоревање налази већа количина пара горива спремна за сагоревање (Слика 5.45). Такође, пошто се на испаравање горива троши део топлоте, услед чега опада температура у простору за сагоревање, отежавају се услови паљења горива односно стартовање мотора, нарочито у зимским условима, када је температура ваздуха нижа од 0°C .

Слика 5.45: Утицај испарљивости горива на процес сагоревања у дизел мотору са вихорном комором (ИМР-033): 1-дизел гориво, 2-дизел гориво са 20% дестилајног безина, 3-дизел гориво са 40% дестилајног бензина, 4-дизел гориво са 60% дестилајног бензина /29/

5.4.1.2 Вискозност

Вискозност представља карактеристику унутрашњег трења течних материја: то је израз отпора којим се материја супротставља деловању спољних сила, које теже да изврше померање честица те материје. Изражава се на више начина као: динамичка, кинематска, релативна. Одређује се експериментално тзв. вискозиметрима; зависи од саме материје, а и од температуре.

Вискозност утиче на финоћу и хомогеност распршивања горива у комори за сагоревање. Што је вискозност горива нижа, то је мањи пречник капи насталих убризгавањем горива у компримован и загрејан ваздух, па и боље образовање смеше. Нижа вредност вискозности даје међутим мању дубину продирања млаза

убризганог горива. Сувише велика вискозност онемогућује распршивање на мале, fine капи, али повећава дубину продирања. Већи средњи пречник распршених капи, има за последицу непотпуније сагоревање и повећање специфичне потрошње горива. Ова појава је нарочито изражена код брзоходних дизел мотора.

Избор одговарајуће вискозности горива није само од утицаја на процес сагоревања смеше, већ и на правилан рад свих елемената инсталације за довод горива - нарочито на ниским температурама. Сувише мала вискозност, такође, неповољно утиче на пумпу високог притиска - услед недовољног подмазивања долази до губитка горива и неправилне расподеле. Доња граница вискозности одређена је, према томе, губицима услед пропуштања, а горња - потребном финоћом распршивања.

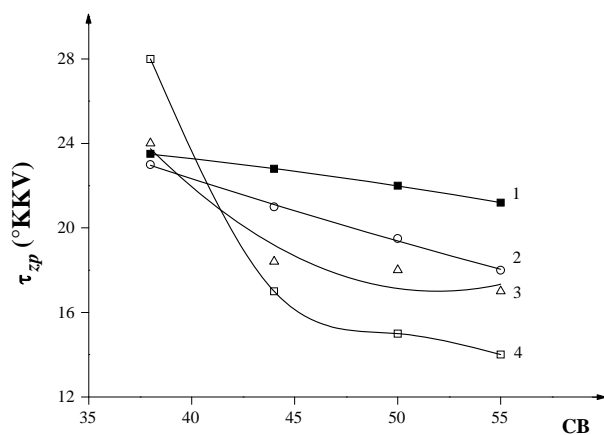
5.4.2 УПАЉИВОСТ ДИЗЕЛ ГОРИВА

Најважнија особина, која карактерише радна својства дизел горива је упaljивост. Упaljивост одређује карактер сагоревања горива у дизел мотору, а такође је и најважнији показатељ за оцену погодности горива.

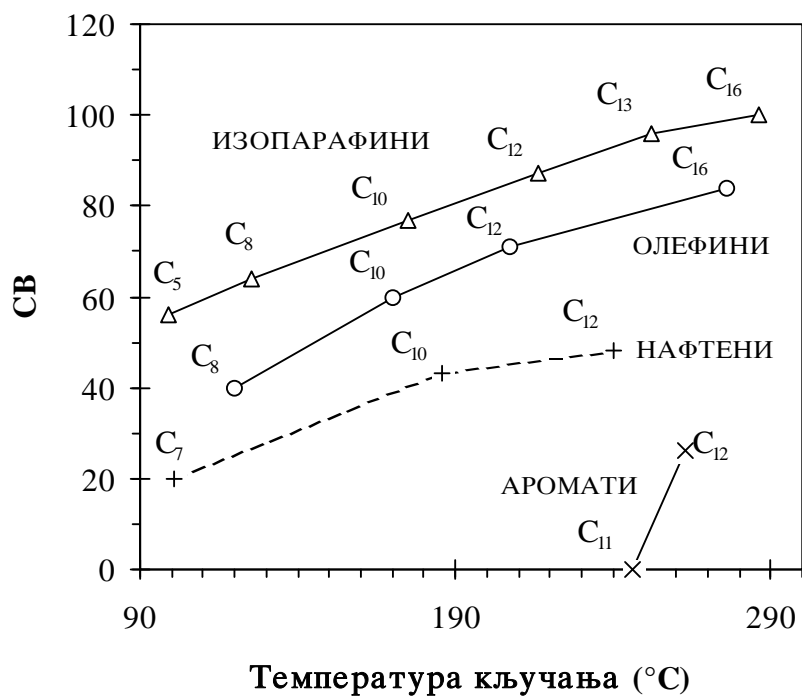
Упaljивост дизелмоторског горива окарактерисана је температуром самопаљења и периодом закашњења паљења и зависи од групног угљоводоничног састава горива и услова у којима се процес одвија. Као показатељ којим се изражава упaljивост дизел горива усвојен је цетански број, који се одређује на специјалном дизел мотору упоређивањем испитиваног горива са смешом угљоводоника: цетана $C_{16}H_{34}$ и Π -метилнафталина $C_{11}H_{10}$. Цетански број горива бројно је једнак процентуалном учешћу цетана (запремински проценти) у његовој смеси са Π -метилнафталином, која је еквивалентна по упaljивости са испитиваним горивом у прописаним условима испитивања.

Најбољу упaljивост имају нормални парафински угљоводоници; зато горива са високим садржајем парафинских угљоводоника имају високе цетанске бројеве (Слика 5.46). Зато је и један од ових угљоводоника - цетан узет као један од еталона при оцени упaljивости горива у условима паљења и сагоревања у цилиндру мотора. Што је ланац угљеникових атома дужи то је цетански број већи, а период закашњења паљења мањи. Вредности цетанских бројева појединих угљоводоника дате су на Слици 5.47.

Најтеже се пале ароматски угљоводоници, па је за њихово паљење потребан висок степен компресије - због тога се сматрају непожељним компонентама дизел горива. Као други еталон изабран је, зато, Π -метилнафталин. Присуство дугачких неразгранатих бочних ланаца код ароматских угљоводоника знатно ограничава утицај бензеновог језгра, па такви угљоводоници могу да поседују задовољавајуће вредности цетанских бројева.



Слика 5.46: Утицај цејанског броја на период закашњења паљења за различите ујлове појискивања ($^{\circ}\text{ККВ}$), мотор ИМ-033/29/



Слика 5.47

Као и отпорност према детонацији горива за Otto моторе, тако се и упаљивост горива за дизел моторе одређује у опитним моторима.

Првобитно су Boerlage (Бурлаге) и Broeze (Брузе) за еталоне усвојили лако упаљиви цетен и тешко упаљиви Π -метилнафталин. Због осетљивости цетена при ускладиштењу, употребљава се данас цетан $C_{16}H_{34}$, који је постојанији. Карактеристике ових еталон горива дате су у Табели 5.12.

Одређивање цетанских бројева горива врши се на једноцилиндричним моторима Табела 5.11

Карактеристике	Цетан	Π -метилнафталин
Густина на 20°C (kg/m^3)	775	1000
Температура кључања (°C)	288	247
Вискозност (mm^2/s)	4,54	3,12
Доња топлотна моћ (MJ/kg)	43,744	38,093

специјално опремљеним за ту сврху: у САД се за одређивање цетанског броја примењује дизел мотор CFR, у бившем СССР-у дизел мотор ИТ9-3, у Западној Немачкој IG (Табела 5.13).

Табела 5.12

Тип мотора	IG	CFR	ИТ9-3
Произвођач	MWM	Вокеша (Waukesha)	
S/D (mm/mm)	150/98	114,3/82,6	115/85
V (cm^3)	1.063	613	652
Степен компресије	сталан 18,2:1	променљив 7:1 до 28,1	променљив 7-23
Начин образовања смеше	директно убризгавање	вихорна комора	вихорна комора
Број обрта (min^{-1})	1000	900	900
Температура уласног ваздуха (°C)	20	65	-
Температура воде за хлађење (°C)	100	100	100

За одређивање цетанског броја постоји више метода, али се данас користи метода закашњења паљења.

Методом закашњења паљења врши се испитивање на једноцилиндричном мотору који је снабдевен уређајем за мерење периода закашњења паљења. При убризгавању горива 13°KV пре спољне мртве тачке одабира се такав степен компресије, који омогућава појаву пламена у спољној мртвој тачки, тј. при периоду закашњења паљења од 13°KV. Затим се бира смеша еталон горива од којих једна при истом степену компресије даје већи период закашњења паљења, а други мањи. Цетански број одређен је интерполацијом на овај начин.

Одређивање цетанског броја горива за дизел моторе на специјалним моторима није доступно свима и свуда, па је за условну оцену упаливости предложено читав низ образаца, везаних за друге физичке или хемијске или физичке и хемијске особине горива. У мноштву ових образаца најширу примену има тзв. цетански индекс, добијен испитивањем великог броја горива, познат под именом цетански индекс (Calculated Cetan Index); заснива се на резултатима испитивања 668 дестилисаних дизел горива и признат је по ЈУС-у. Израз за израчунавање цетанског индекса гласи:

$$CI=454,74-1641,416\cdot\Pi+774,74\cdot\Pi^2-0,554\cdot t_{50}+97,803\cdot(\log t_{50})^2$$

где је:

Π - густина на 15°C,
 t_{50} - температура на којој се предестилише 50%Vol (из криве испаравања).

Веза између измерених цетанских бројева и цетанског индекса дата је на Слици 5.48. Чешће се користи номограм дат на Слици 5.49, који омогућава израчунавање цетанског индекса са нешто мањом тачношћу, али брже.

Поред овог израза постоји и низ других, једноставнијих:

$$CB=AT-15,5$$

где је:

AT - анилинска тачка изражена у °C /14/,
или према обрасцу Е.С.Чушкова /32/:

$$CB=(\Pi_{20}+17,8)\frac{1,5879}{\Pi_{20}}$$

где је:

Π_{20} - кинематска вискозност изражена у mm²/s.

Цетански број може бити израчунат и на основу познатог групног састава - садржаја парафинских, нафтенских и ароматских угљоводоника у гориву /99/:

$$CB=0,85P+0,1N-0,2A$$

где су:

P, N и A - садржај парафинских, нафтенских и ароматских угљоводоника у запреминским процентима.

Слика 5.49

Са појавом вишегоривних мотора, на бази дизел процеса требало је одредити цетански број високооктанских бензина, који су се налазили изван мерних граница мотора одређених за ову сврху (уобичајени мотори за одређивање цетанског броја мере цетанске бројеве у границама 20-100). Овај проблем решаван је на неколико начина. Мешањем горива познатог, високог цетанског броја и горива непознатог, ниског цетанског броја (високог октанског броја), добија се мешавина непознатог цетанског броја, чији цетански број, сада може да се одреди уобичајеним поступком на једном од поменутих мотора. На овај начин, мешавина се доводи у опсег мерења опитног мотора. Ако се добијени цетански број мешавине горива обележи са CB_m , цетански број познатог горива са CB , онда се тражени цетански број CB_x високооктанског горива може израчунати према једначини:

$$CB_x = \frac{100 CB_m - b \cdot CB}{a}$$

где су:

a и b - процентуално учешће поменутих компонената горива у мешавини.

Испитивања, која је извршила фирма BASF (СР Немачка), имала су за циљ да утврде, колико је овај начин одређивања цетанског броја тачан. У ту сврху конструисан је специјални опитни мотор степена компресије 27:1, који је омогућио да се мере вредности цетанског броја од 6 јединица. Резултати су показали да се најмање грешке добијају при мерењима у којима је процентуално учешће непознате компоненте 75%, а 25% цетана. На основу овога позната зависност између цетанског и октанског броја према Wilke-у (Вилкеу) из 1940. године

$$CB = 60 - 0,5 \cdot OB$$

која је важила за опсег $20 < CB < 50$, односно $20 < OB < 80$, ова релација претрпела је корекцију за вредности октанског броја изнад 80. Испитивањима је утврђено да ове вредности задовољавају, сада, једначину

$$CB = 100 - OB$$

5.4.3 ОСТАЛЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ГОРИВА ЗА ДИЗЕЛ МОТОРЕ

5.4.3.1 Густина горива

Иако се густина, најчешће, не прописује техничким захтевима (стандардима), она је ипак, тесно повезана са низом других показатеља: фракционим саставом, вискозитетом, запреминском топлотном моћи и др. Осим тога, вредност густине неопходна је при пројектовању резервоара, услова транспорта и др. Најчешће, у пракси, густина дизел горива се креће у границама $830\text{--}860 \text{ kg/m}^3$.

5.4.3.2 Нискотемпературске карактеристике дизел горива

Снижавањем температуре испод нуле (у зимским условима) долази до појаве која ометају предвиђени проток горива од резервоара до коморе за сагоревање. Уопштено посматрано са падом температуре расте вискозност свих угљоводоника из састава горива, а парафински угљоводоници се издвајају у облику кристала. Кристали парафинских угљоводоника расту и међусобно се повезују водећи постепено до потпуног престанка течења горива кроз инсталацију за напајање мотора горивом. Оцена понашања дизел горива на сниженим температурама оцењивана је експериментално у лабораторијским условима преко температура замућења и температуара стињавања.

Температура замућења представља највишу температуру на којој долази до стварања микрокристала угљоводоника. Температура стињавања је највиша температура на којој гориво губи особину течљивости приликом испитивања у прописаним условима. Код горива нафтенске основе и горива добијених крековањем ова имобилизација наступа услед повећане вискозности, а код горива парафинске структуре услед издвајања чврстог парафина и стварања кристалне мреже. Замућење горива не отежава кретање горива кроз водове и инсталације за гориво, али са падом температуре и растом и агломерацијом кристала може да доведе до запушивања пречистача, а тиме и до прекида тока горива.

Поред проблема проточности на сниженим температурама услед повећања вискозности дизел горива долази и до издвајање кристала и парафина и њиховог нагомилавања у пречистачима инсталације за напајање дизел мотора горивом (Слика 5.50) што може да изазове и потпуни прекид довода горива. Ова појава оцењује се и прописује данас температуром зачепљења хладног пречистача - филтера (Cold Filter Plugging Point – CFPP). Највиша температура на којој у лабораторијским условима испитивани узорак дизел горива не пролази кроз прописани филтер назива се температура филтрабилности или краће филтрабилност (ЈУС Б.Х8.032). Вредност температуре филтрабилности налази се између температуре замућења и температуре стињавања.

Поређењем резултата испитивања добијених на моторним возилима у експлоатацији када долази до зачепљења пречистача и лабораторијских - на уређају којим се одређује CFPP указује на њихово изванредно слагање (Слика 5.51).

Слика 5.51:

Слика 5.50: *Неправилно изведена инсталација за напajaње мотора горивом: 1-незачишћена преливна цев, 2-цев савијена под правим углом, 3-недовољно зачишћен пречистач горива, 4-„сифонски“ део цевовода за гориво, 5-фини пречистач у сейпайпору, 6-фини пречистач између резервоара и сейпайпора, 7-промена пречника цевовода за гориво, 8-лоше решење наливног жрла, 9-фини пречистач на усису за гориво из резервоара, 10-недостатак одвода из резервоара (вода, нечишће), 11-неповољан положај резервоара за гориво /33/*

Одређена побољшања проточности на ниским температурама могу се постићи конструктивним решењима инсталације за напајање горивом (Слика 5.52). Општа препорука своди се на смештање свих елемената инсталације за напајање горивом укључујући и пречистаче што ближе мотору да би се загрејали топлотом коју одаје мотор у непосредну околину.

Слика 5.52: Препоручена инсталација за напајање мотора горивом: 1-главни пречистач, смештен у непосредну близину мотора, 2-цев савијена са великим полупречником кривине (а не под правим уђлом), 3-цевовод за гориво константног пречника (без сужења), 4-изолирани цевовод за гориво, 5-сепаратор (без мрежице), 6-положај уписа горива (без пречистача), 7-повољан положај резервоара за гориво, 8-предвиђени одвод за испуштање примеса (вода, нечистоће), 9-пречистач у наливном ѓрлу резервоара за гориво

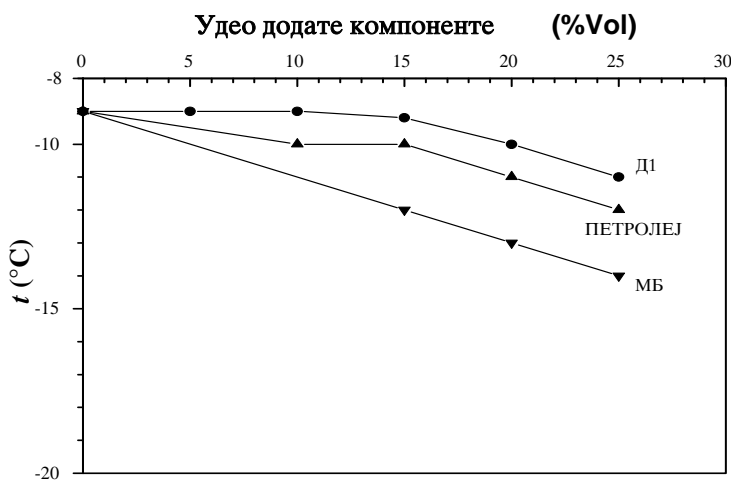
Поред одређених, данас већ коришћених решења (да се пречистач стави у непосредну близину мотора, да би се грејао његовом топлотом или да се у пречистач угради електрични грејач), филтрабилност у основи зависи од горива. По својим вредностима она се налази између температуре замућења и температуре стињавања.

На побољшање нискотемпературских својстава дизел горива може се утицати:

- избором и производњом дизел горива из непарафинске нафте,
- удаљавањем п-парафина из горива (екстракцијом),
- разређењем горива додавањем лакших фракција и
- коришћењем додатака.

Додавање лаких фракција препоручује низ произвођача моторних возила, али је ова мера недовољно ефикасна (Слика 5.54). Додавање лаких фракција (петролеја, моторног бензина) у већем проценту може да изазове додатне проблеме (смањење вискозности, густине, па тиме и топлотне моћи).

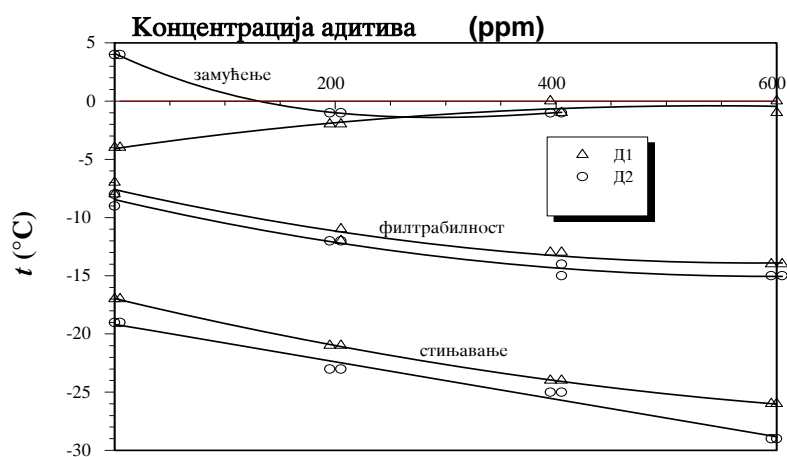
Овај проблем се успешно решава додавањем специјалних супстанци (етиленвинил ацетата, етилен акрилата) обично већ у производњи (Слика 5.54). Ови додаци не спречавају стварање микрокристала парафина (не утичу на температуру замућења), али ограничавају њихов раст и међусобно повезивање.



Слика 5.53: Утицај додавања лаких фракција (Д1, петролеј и моторни бензин) на филтрабилност Д2 /34/

5.4.3.3 Механичке примесе и вода

Вода се, у гориву, јављају слободна, хигроскопна и у виду емулзије. Слободна вода се у гориву диспергована у виду ситних капи и издваја се (таложити) утолико теже, уколико су капи ситније, а гориво гушће. Емулзије горива и воде су врло ретке. Хигроскопна влага доспева у гориво услед његове хигроскопности - гориво упија влагу из ваздуха и један део таложити на дно суда. Промена температуре погодује упијању и издвајању воде. Хигроскопност расте идући редом према угљоводоничним групама: парафини, нафтени, олефини, аромати.



Слика 5.54

Вода је непожељан пратилац горива: смањује топлотну моћ, потпомаже корозију. Доспева у гориво најчешће приликом транспорта, манипулације и при лежању на складишту.

Механичке примесе (песак, рђа, коксне честице) доспевају у гориво или још у току процеса прераде нафте, или при транспорту и чувању. Штетно делују, нарочито у инсталацији за довод горива. Док се ове механичке нечистоће, код бензина талоче на дно резервоара, у дизел гориву остају суспендоване и доспевају свуда где и гориво. Садржај механичких примеса и воде обично расте идући од лакших ка тежим горивима.

5.4.3.4 Склоност ка образовању кокса

Склоност ка образовању кокса је својство горива да образује кокс при загревању без присуства ваздуха. Склоност ка образовању кокса, код дизел горива расте са отежавањем фракционог састава. Како је коксни остатак дестилационих горива обично мали (не већи од 0,05-0,10%) за њих се одређује склоност ка образовању кокса од 10%-ог остатка дестилације, сматрајући, да крајњи продукти дестилације, пре свих осталих, карактеришу склоност ка образовању кокса.

5.4.3.5 Садржај сумпора

При преради нафте не могу се одстранити све непожељне материје и један део сумпора остаје и у дизел горивима, која се том приликом добијају. На корозију инсталације за довод горива и резервоара не утичу само велики садржај сумпора у гориву, већ присуство у њему агресивних сумпорних једињења - меркаптана, на пример. Ова активна сумпорна једињења не изазивају само корозију у инсталацији за гориво, већ и њихови оксиди, везани са водом у облику сумпорасте и сумпорне киселине у простору где се врши сагоревање. Такође, сумпорни оксиди катали-тички делују на процес полимеризације угљоводоничних горива и мазива и потпо-мажу непожељно стварање талога.

Количина сумпора у дизел гориву одређује се квантитативно, а кородиван утицај само квалитативно пробом на бакарну плочицу.

Дозвољени садржај сумпора у дизел гориву према европским прописима износи 0,1 - 0,2%.

5.4.3.6 Температура паљења

Температура паљења представља карактеристику која је од интереса за пожарну безбедност при чувању горива на складишту, транспорту и у условима експлоата-ције. То је најнижа температура до које треба материју загрејати у прописаним условима испитивања па да се из ње издвоји толико горивих и испарљивих састојака да се могу упалити страним извором топлоте и да тренутно сагоре. Ниска температура паљења код дизел горива указује на присуство лаких компонената, чије присуство може бити штетно по рад мотора.

5.4.4 ДОДАЦИ ДИЗЕЛ ГОРИВИМА

Слично бензинима и дизел моторским горивима се додају материје које у малим концентрацијама побољшавају одређене особине. Дизел моторским горивима се додају:

- антидимни додаци у циљу смањења димности издувних гасова. Начешће су то органске соли, обично баријума.,
- додаци који побољшавају упaljивост најчешће органска једињења на бази пероксида нитрата или етера, која повећавају цетански број. Њихова ефикасност ипак варира и зависи од врсте горива и конструкције мотора (Слика 5.55).,

- додаци за побољшавање проточности дизел горива на сниженим температурама на бази полимерних једињења. Они делују на кристале угљоводоника модифицирајући њихову величину и облик смањујући и температуру замућења и стињавања, а побољшавајући проточност.

Слика 5.55: Типична осетљивост дизел горива на адитив за побољшање паљења

Табела 5.13

Карактеристика	Дизел гориво		
	Д1	Д2	Д3
Густина на 15°C (kg/m^3)	800-840	810-860	830-880
Дестилација - до 300°C предестилише најмање % Vol - до 360°C предестилише најмање % Vol	90	90	60
Вискозитет на 20°C ($-\text{mm}^2/\text{s}$)	1,0-6,5	1,8-9,0	5,0-25,0
Температура стињавања (°C), испод			-5* 0**
Филтрабилност, испод (°C)	-17* -7**	-9* +1**	
Температура паљења, изнад (°C)	40	55	65
Кокс, % највише	0,15	0,10	0,30
Пепео, % највише	0,01	0,02	0,05
Вода, % највише	0,05	0,10	0,25
Корозивност, највише	1	2ц	3а
Сумпор, % највише	0,5	1,0	1,5
Цетански број, најмање	45	45	35

* температура стињавања и филтрабилност у периоду од 15. октобра до 15. априла

** температура стињавања и филтрабилност у периоду од 15. априла до 15. октобра

5.5 ГОРИВА ЗА МЛАЗНЕ МОТОРЕ

5.5.1 УСЛОВИ КОЈЕ ЈЕДНО ГОРИВО ЗА МЛАЗНЕ МОТОРЕ ТРЕБА ДА ЗАДОВОЉИ

Све услове које једно гориво за млазне моторе мора да задовољи одређују првенствено основни делови погонског апарата ваздухоплова: инсталација за гориво, комора за сагоревање и гасна турбина.

Инсталација за гориво представља један од елемената чији исправан рад непосредно обезбеђује успешно довођење горива до коморе за сагоревање. Ова инсталација, која се најчешће састоји из резервоара за гориво, пумпе високог притиска, финог пречистача и бризгалки, поставља гориву следеће услове:

- да се гориво не стињава до -50°C и не издваја кристале угљоводоника са високом температуром стињавања;
- да у гориву не дође до издвајања - стварања леда;
- да у гориву не дође до стварања пара лако испарљивих угљоводоника;
- да на температурама $120-200^{\circ}\text{C}$ гориво не ствара чврсте талог, и
- да не изазива корозију инсталације за гориво.

Сагоревање у комори за сагоревање млазног мотора врши се непрекидно - на високим температурама - што омогућава брзу реакцију између горива и кисеоника. За обезбеђивање сигурног рада мотора, гориво мора:

- да се задовољавајуће распршује на различитим режимима рада мотора, а посебно на ниским бројевима обрта,
- да сагорева у широком дијапазону промена параметара околног ваздуха, а такође и при различитим вредностима коефицијента вишка ваздуха,
- да омогућује лако стартовање,
- да обезбеди брзину сагоревања која ће да осигура завршетак сагоревања у комори за сагоревање. Истовремено гориво односно производи његовог непотпуног сагоревања не смеју да изазову таложење горива на зидовима коморе за сагоревање и других елемената.

Што се тиче услова које поставља гасна турбина, потребно је да гориво садржи минималну количину минералних примеса (пепела), да исти не би изазвао ерозију лопатица.

Поред ови специфичних карактеристика које једно гориво за млазне моторе мора да задовољи постоји, свакако, и они уопштени захтеви који се траже од било ког горива: што већа концентрација енергије (топлотна моћ), да гориво обезбеђује сигуран рад и дуг век трајања самог мотора, да гориво при чувању на складишту не мења битно своје особине и др.

5.5.2 ВРСТЕ ГОРИВА ЗА МЛАЗНЕ МОТОРЕ

Температура горива мења се у релативно великом интервалу обзиром да се температура непосредне околине мења још више. Тако се при стајању горива у складишту на земљи, температура околног ваздуха може се охладити и на -20°C па и више; такође на висинама 12-15 km температура околине износи око -60°C . При хлађењу течних горива јавља се низ специфичних појава, које отежавају нормалан довод горива од резервоара до коморе за сагоревање, што је последица са једне стране повећања густине и вискозитета, а с друге - издвајања

кристала угљоводоника. Горива у овом стању тешко се крећу кроз инсталацију за гориво запушавајући прво делимично, а касније и потпуно, пречистаче. Из ових разлога карактеристике горива на сниженим температурама имају велик значај за предвиђен безбедан рад млазног мотора.

Овако понашање горива карактеристично је за брзине лета ваздухоплова до брзине лета од 1М. Горива у ваздухопловима који се крећу брзинама већим од 1М, изложена су сасвим супротним утицајима - повишеним температурама, које се јављају као последица размене топлоте између чврстих тела и флуида великих брзина и трансформације механичке енергије, при том, у топлотну - аеродинамичног загревања. Аеродинамичко загревање ваздухоплова при сталној брзини лета повећава се све дотле док се не успостави равнотежа између доведене и одведене количине топлоте. Поред овога гориво се допунски загрева и у самој инсталацији, тако да, према неким подацима, може да достигне температуру и од 200°C непосредно пре бризгальке.

Са порастом висине лета ваздухоплова, као што је познато долази до смањења притиска. Последица овога је повећано испаравање горива и ваздуха раствореног у гориву. Ови гасови сакупљају се на различитим местима у инсталацији за гориво, ометајући на тај начин, нормалан рад мотора. Такође, издвајање пара горива са повећањем висине, а и температуре, изазива губитке.

5.5.3 УТИЦАЈ НЕКИХ КАРАКТЕРИСТИКА НА РАД МОТОРА

За рад једног млазног мотора од одлучујућег утицаја је квалитет процеса који се врши у комори за сагоревање. Од тога, како брзо и колико потпуно се врши процес сагоревања зависе и стабилност и сигурност рада мотора.

Процес сагоревања остварује се увек у фронту пламена, који одваја област продуката сагоревања од области смеше горива и ваздуха које још није ступило у реакцију. Једну од основних карактеристика процеса сагоревања представља брзина простирања фронта пламена. Не улазећи детаљније у суштину процеса сагоревања и суштину фактора који утичу на њега биће речи само о неким карактеристикама горива и њиховом утицају на рад мотора. Тако, на пример, недовољна испарљивост горива може да изазове низ непожељних појава: погоршава се квалитет процеса распршивања па тиме и сагоревања, а ствара се већа количина чађи, смањује се потисак мотора а повећава потрошња горива. Штетно деловање чађи је вишеструко: издвајање чађи на зидовима коморе за сагоревање омета правилно, предвиђено струјање што се негативно одражава на образовање смеше; истовремено, издвајање чађи на зидовима изазива локално предгревање, као последица чега се јавља извијање и пуцање зидова коморе за сагоревање; честице чађи које се одвајају од зидова коморе за сагоревање делују абразивно на лопати-

це турбине; таложењем чађи на брызгалкама омета правилно распршивање горива

Нормално сагоревање горива у млазним моторима, карактерише се стабилним пламеном при коме се сагоревање врши без осцилација, прекида или пригушења.

5.6 УЉА ЗА ЛОЖЕЊЕ

У котловима различите намене, а такође и у низу индустријских пећи користи се течно гориво које представља средњи или тешки остатак фракционисања нафте или крековања, а такође и тер камених и мрких угљева. Понекад се као котловско гориво користи и сирова нафта, лишена лаких фракција.

У односу на чврста горива течна горива овог типа поседују низ предности:

- већа је количина топлоте која настаје сагоревањем (услед више топлотне моћи), што омогућава веће топлотно оптерећење ложишта у односу на исто при сагоревању чврстих горива (угља),
- потпуније је сагоревање, а са мањим коефицијентом вишка ваздуха,
- мањи је садржај баласта,
- могућа је аутоматизација довода горива у ложиште, и
- лакше је руковање при транспорту и ускладиштењу.

Индустријске пећи које раде са течним горивом мањих су димензија у односу на пећи које раде са чврстим горивом, при свим другим истим карактеристикама.

Поред низа подела (према пореклу, садржају сумпора, области примене) најважнија је подела према вискозности јер вискозност одређује могућност и услове примене, како у условима транспорта, тако и добаве до горионика и образовање смеше повољне за сагоревање.

5.6.1 ОСНОВИ ОБРАЗОВАЊА СМЕШЕ И САГОРЕВАЊА

Сагоревање течног уља за ложење одвија се, као и код осталих течних горива, у парном стању, а цео процес се може поделити на неколико условних фаза:

- припреме горива за сагоревање, односно његовог распршивања, загревања и испаравања и мешања са ваздухом,
- паљења и сагоревања.

Припрему гориве смеше (распршивање и мешање са ваздухом - који се принудно доводи) врши горионик (Слика 5.56), а загревање капљица и њихово испаравање се одвија у ложишту.

Слика 5.56: Пример горионика на уље за ложење /37/

Разматрањем фаза испаравања и фаза сагоревања може се доћи до неколико случајева. Уколико је брзина сагоревања пара горива већа од брзине испаравања, целокупни процес биће одређен брзином испаравања течног горива. Уколико је, пак брзина сагоревања пара горива мања од брзине испаравања, брзина одвијања целокупног процеса сагоревања биће одређена брзином сагоревања пара горива. Оба ова размотрена могућа случаја представљају екстремне случајеве.

У реалном случају је брзина испаравања горива једнака је брзини сагоревања. Интензификацијом процеса сагоревања средњих и тежих фракција прераде нафте - уља за ложење, неопходно је битно скратити или свести на најмању меру фазу испаравања капљица течног горива. То се може постићи претходним загревањем горива до температуре испаравања, која превазилази температуру zasiће-

ња тј. гориво се доводи до „прегрејаног“ стања пре излаза из бризгачке. При изласку из бризгачке (Слика 5.57) загрејано гориво распршено у fine капи услед пада притиска, прелази у парно стање. На тај начин може се смањити утицај испаравања капи на образовање смеше погодне за паљење. На ток одвијања процеса и трајања самог сагоревања утиче и низ других фактора: брзина струјања горива, дифузија између пара горива и околног кисеоника (образовање смеше), размена топлоте и масе како унутар млаза, тако и између пламена и околине и др. Такође, потребно је да и ваздух, буде на температури коју има гориво. Треба, такође водити рачуна да исувише висока температура предгревање горива може да изазове његово термичко разлагање, услед чега долази до стварања наслага у систему за напајање горивом, а при сагоревању у ложисти до образовања чађи. Повећањем температуре горива смањује се вискозност чиме се побољшава распршивање и остварује, са гледишта хомогености, боља смеша, јер су капљице ситније, па брже и лакше испаравају. С друге стране смањење вискозности смањује

Слика 5.57: Неке од бризгачки горионика на уљу за ложење /44/

је дубину продирања млаза горива па се у овом погледу тражи одговарајуће, компромисно решење: решење које ће омогућити и релативно лако образовање смеше и довољну дубину продирања млаза горива. Сувише велика вискозност остварила би већу дубину продирања, па и могућност удара честица (капи) горива о зид ложиста, а добијене капи биле би већег пречника.

Зависност промене вискозности са променом температуре представљена је на Слици 5.58. Промена вискозности са температуром дата је у $\log \log$ вискозности - \log температура дијаграму, којим се добија линеарна промена вискозности. Потребна вискозност за остваривање најповољнијег распршивања односно најбољег сагоревања одређена је од стране произвођача горионика (шпафирано подручје), Зависно од врсте горива може се одредити до које температуре треба уље за ложење загрејати да би се добила тражена вредност вискозности. Истовремено овим дијаграмом се уочава да и са уљима различитих градијација може да се постигне жељена вискозност. То ипак не значи да, за одређени горионик може да се користи било које уље за ложење, потребно је користити предвиђено гориво, а изложене поставке омогућавају мање корекције у том смислу.

Слика 5.58: Зависно́сти промене вискозитета́ од температу́ре. Шрафи́рано подру́чје је оптимално подру́чје вискозитета́ за рад одре́женог горионика

Обезбеђење сигурног и економичног рада постројења оствариће се ако уље за ложење (мазут) непосредно пре горионика поседује прорачуном предвиђене вредности температуре и притиска, а такође ако у довољној мери буде пречишћен од примеса. Зато се комплексу опреме, у коју спадају пумпе за мазут, пречистачи и грејачи, поклања велика пажња, како приликом пројектовања тако и при експлоатацији. На Слици 5.59 дата је шема инсталације, а на Слици 5.60 грејачи уља за ложење.

Поред вискозности на проточност уља за ложење велики утицај има и температура стињавања. Она, код уља за ложење, зависи од сировине из које је гориво добијено, врсте прераде и начина добијања. Тако уље за ложење добијено фракционом дестилацијом нафте парафинске основе има вишу температуру стињавања од уља за ложење добијеног из нафтенских нафти, због садржаја чврстог парафина.

Температура стињавања уља за ложење ипак одређена у лабораторијским условима по прописаном поступку може јако да се разликује од стварне

температуре на којој гориво губи течљивост у условима експлоатације. Ово се објашњава знатном зависношћу температуре стињавања од: температуре, на коју се загрева, трајања загревања и брзине хлађења. У зависности од температуре претходног предгревања тешко уље за ложење може да губи особину течљивости и на вишим и на нижим температурама: зависно од састава и начина добијања, као и наведених параметара, код горива ове врсте могуће је разликовати две температуре стињавања - горњу и доњу. Виша, такозвана максимална температура стињавања добија се обично при загревању мазута до 30-60°C, а нижа, при загревању до 80-100°C. Повећање температуре претходног загревања мазута до 130-150°C не утиче на температуру стињавања /38/.

Температура стињавања после термичког третмана (70-100°C), као и вискозност, није стабилна - при дужем складиштењу она се поново враћа на првобитну вредност. При брзом хлађењу, температура на којој ово уље за ложење губи течљивост је знатно виша, него при спором хлађењу.

Ове промене могу се објаснити присуством у мазуту чврстих угљоводоника. Ако је температура загревања мазута била нижа од температуре топљења угљоводоника - најчешће парафинских, онда при хлађењу ови кристали постају центри кристализације, који убрзавају појаву стињавања. При загревању изнад 90-100°C долази углавном до топљења свих чврстих угљоводоника, што, касније при хлађењу отежава успостављање кристалне структуре и температура стињавања је знатно нижа.

То значи да тешко уље за ложење, на пример, треба предгревати да би било у течном стању. Температуру на коју треба загрејати одређује препоручено подручје од стране произвођача - пумпа за довод уља за ложење до горионика (прва температура предгревања). Уље за ложење треба додатно загрејати до вискозности која је оптимална за добро распршивање (друга температура предгревања). Ову вискозност одређује горионик (Слика 5.58).

5.6.2 САДРЖАЈ ВОДЕ

Присуство воде је, као што је познато, из више разлога штетно. Не понављајући већ изнесене ставове о томе, присуство воде у уљима за ложење намењених котловским постројењима доводи до пулзације и гашења пламена, општећења бризгаљки, па чак и до експлозија.

При мешању воде и уља за ложење до којих долази највећим делом приликом транспорта и манипулације са њиме, образују се емулзије типа "вода у уљу": дисперзиона средина је уље за ложење у коме се вода налази у облику финих капљица. Могућност одстрањивања воде једноставним таложењем зависи од разлике густина уља за ложење и воде - што је уље за ложење лакше, вода се лакше одваја. Уља за ложење са већим садржајем сумпора образују веома стабилне емулзије.

Слика 5.59: *Инсталација за припрему шешког уља за ложење за сагоревање; 1-довод уља за ложење, 2-удвојени пречисајач на усисној сфери, после кога се налазе шермометар T и манометар P са заштитном дијафрагмом, 3, 4-усисни вод, 5-цумпе, 6-усисни вод пре грејача, 7-грејачи, 8-заштитни вентил грејача, 9-сферишни грејач са електричним грејањем, 10-излазни вод из грејача, 11-суд за кондензат, 12-испуштање кондензата, 13-улаз водене паре у грејач, 14-сферишни електрогрејач, 15-регулајтор температуре уља за ложење, 16-појисни вод загрејаног уља за ложење, 17-улазни вод паре у грејач, 18-излаз уља за ложење ка горioniку, 19-удвојени пречисајачи на излазу са манометром и шермометром, 20-регулајтор притиска уља за ложење, 21-црпач у резервоар*

Слика 5.60: Шема грејача уља за ложење

Вода се одстрањује обично загревањем уља за ложење до 40-70°C, којом приликом током времена долази до одвајања дела воде. Одстрањивање дела воде који је у облику емулзије, врши се додавањем специјалних додатака - деемулгатора.

5.6.3 САДРЖАЈ МИНЕРАЛНИХ ПРИМЕСА

Садржај минералних примеса у уљу за ложење образује при сагоревању количину пепела од свега 0,1 до 0,4%. Ипак и поред релативно малог садржаја пепео битно утиче на карактеристике уља за ложење, односно постројења где се користи. Пепео се таложи на грејним површинама, смањује пренос топлоте, чиме се смањује степен корисности, а истовремено неопходност удаљивања наталоженог пепела усложњава и поскупљује експлоатацију.

Занатан део минералних примеса уља за ложење отпада на ванадијум, најчешће везаног са сумором у оквиру сложених једињења. Током сагоревања образује се ванадијум пентоксид. Присуство ванадијума каталитички делује на процес оксидације SO_2 и SO_3 , који веома кородивно делују на металне површине са којима долазе у додир.

5.6.4 САДРЖАЈ СУМПОРА

Сагоревањем сумпора настаје SO_2 а при вишку ваздуха и SO_3 , који реагујући са водом даје сумпорну киселину. Због тога треба водити рачуна да температура димних гасова (продуката сагоревања) буде виша од температуре кондензације - такозване „тачке росе“ (да настали кондензати не би кородивно деловали). Када се у уљу за ложење налази већи садржај сумпора, тада температуру росе одређује температура кондензације сумпорних оксида (реда величине 140-150°C). Присуство сумпора је с друге стране крајње непожељно због загађивања околине.

5.6.5 УЉА ЗА ЛОЖЕЊЕ СР ЈУГОСЛАВИЈЕ

Према нашим прописима (ЈУС Б.Х2. 430) производи се седам врста уља за ложење:

- | | |
|----------------------------------|-----------------|
| - уље за ложење екстра лако | - ознака ЕЛ, |
| - уље за ложење лако | - ознака Л, |
| - уље за ложење средње | - ознака СР, |
| - уље за ложење тешко | - ознака Т, |
| - уље за ложење лако специјално | - ознака ЛС, |
| - тешко металуршко уље за ложење | - ознака ТМ1, и |
| - тешко металуршко уље за ложење | - ознака ТМ2. |

Уље за ложење екстра лако ЕЛ користи се углавном као гориво за загревање стамбених просторија у пећима код којих се процес припреме смеше одвија слободним или принудним испаравањем са површине горива (Слика 5.61).

Уље за ложење Л користи се и у индустрији и пољопривреди за централна грејања и за све врсте индустријске намене.

Уље за ложење средње употребљава се као гориво у индустрији за постројења мањег и средњег капацитета.

Тешко уље за ложење користи се као гориво у индустријским пећима и великим енергетским јединицама.

Уље за ложење ЛС употребљава се за погон јединица Југословенске ратне морнарице и у приобалном поморском саобраћају, као и за све оне намене где се тражи квалитетније гориво.

Тешка металуршка уља ТМ1 и ТМ2 намењена су, као што им и само име каже, металургији и свуда где се захтева мањи садржај сумпора.

Основне карактеристике ових горива, без металуршких, дате су у Табели 5.15.

Слика 5.61: Пећ за загревање са принудним испаравањем горива са слободне површине

Табела 5.14

Карактеристика	Уља за ложење				
	ЕЛ	Л	СР	Т	ЛС
Густина на 15°C (kg/m ³)	највише 860				
Температура паљења (°C)	55	65	50	100	55
Вискозитет - на 20°C (mm ² /s) - на 50°C (mm ² /s) - на 100°C (mm ² /s)	3,7	30	21	53	6-21
Температура стињавања (°C), испод	-10			у зимском периоду -5, у летњем +10	
Кокс, % највише	0,05	8,8	10,0	15,0	2,0
Сумпор, % највише	1,0	2,0	3,0	4,0	1,5
Садржај воде и мех. примеса, % највише	0,15	1,0	1,5	2,0	0,3
Дестилација, испари 95% до највише (°C)	370				
Доња топлотна моћ (MJ/kg), најмање	41,86	41,02	39,77	39,7	41,02
Садржај пепела, % највише	0,02	0,15	0,20	0,20	0,10

Литература

1. Б. Прохаска и група аутора: „Технологија нафте - ИНА”, Загреб, 1968.
2. *** : Das Buch von Erdöl. ВР, Хамбург, 1967.
3. Р. Протић: Х светска конференција за енергетику, Нафта, Вол.28, Загреб, 1977.
4. Б. Прохаска, Ј. Широла и др. : „Технологија нафте”, Нафта, Загреб, 1968.
5. Д. Величковић: „Погонске материје - I део - Термогене материје”, Машински факултет, Београд, 1972.
6. F. Jantsch: "Kraftstoffhandbuch, Franckh'sche Verlagshandlung", Штутгарт, 1960.
7. Д. Д. Русчев: „Химия тврдог топлива”, Химия, Лењинград, 1976.
8. W. Peters: "Kohle als Rohstoff und Energiesträger", Erdöl und Kohle Vol.27, 1974.
9. С. Веиновић: „Мотори са унутрашњим сагоревањем - ото, дизел, двотактни, четворотактни”, ЦВШВЈ, Београд, 1993.
10. А. А. Гурејев: „Применения автомобильных бензинов”, Химия, Москва, 1972.
11. F. Jantsch: "Kraftstoffhandbuch, Franckh'sche Verlagshandlung", Штутгарт, 1960.
12. C. G. Williams: "in Kraftsofthandbuch", F. Jantsch (L.11) Engineering, 1953.
13. C. J. Brady, D. R. Johnson: "SAE Journal", Vol. 18, 1959.
14. J. Weissman: "Carburants et combustibles pour moteurs a combustion interne", Editions Technic, Париз, 1970.
15. А. А. Гурејев, Р. Ј. Иванова, И.В. Шчеоголев: „Автомобильные эксплуатационные материяли”, Транспорт, Москва, 1974.
16. *** : "Gasoline Volatility - Its Relation to your Car's Performance", Lubrication, Тахасо, 1939.
17. М. Мандл: „Цестовна метода одређивања максимално дозвољене испарљивости горива”, Техника подмазивања и примена горива, Вол.13, 1974.
18. М. Радовановић, С. Веиновић: „Степен усклађености горива и мотора моторних возила”, Саопштења Института Машинског факултета - Моторна возила, 1/1971.
19. М. Радовановић: „За и против оловних алкилата”, Техника подмазивања и примена горива, Вол.11, 1972.
20. N. Apostolescu, D. Sfinteanu: "Automobilul cu combustibili neconventionali", Editura Tehnica, Bucharest, 1989.
21. M. E. Goodger: " Liquid Fuels for Transport", Prog. Energy Combust. Sci, Vol.8, pp 233 - 260, Pergamon Press, 1992.
22. М. Радовановић, М. Ацић, Д. Симић: "A new criteria for the automotive fuels", Mobility & Vehicle Mechanics, Vol. 19, No. 3, 1993.
23. *** : „Поршневије и газотурбинне двигатели”, Всесоюзний институт научной и технической информации, Москва, 1991.
24. Б. Живковић, М. Васић: Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Београд, 1982.
25. Y. Durier : "Caracteristiques des carburants et combustibles et leur influence sur le fonctionnement des moteurs", Societe des edition Techic, Париз, 1967.

26. *** : "Octtel Group Gasoline Survey, letta - zima, 1974, 1975, 1976, 1977", The Associated Octtel Company Limitad, Лондон.
27. R. Pischinger : "Zur Frage der unvollständigen Verbrennung in Motoren", Österreichische Ingenieur Zeitschrift, Vol. 3, 1970.
28. Г. А. Морозов : „Применение топлив и масел в дизелях", Недра, Ленинград, 1964
29. М. Радовановић : „Горива за вишегориве моторе", Магистарска дисертација, Београд, 1968.
30. Е. И. Забрянский, А. П. Зарубин: „Детонационная стойкость и воспламеняемость моторных топлив", Химия, Москва, 1974.
31. T. J. Russell: „Мањкавости метода за испитивање дизелског горива", Симпозијум ЈУГОМА П85, Пореч, 1985.
32. Б. В. Лесиков : „Нефтепродукти - свойства, качество, применение", спречник, Хиния, Москва, 1966
33. T. R. Coley: "Low temperature operability of diesel", SAE No. 830596, 1983.
34. Ф. Тамаш: „Понашање дизел горива на сниженим температурама", Интерни извештај, Машински факултет, Београд, 1990.
35. З. Посаец и др.: „Побољшање нискотемпературних својстава дизелског горива", Горива и мазива (25), 4, 1986.
36. J. D. Morris, P. B. Mabley: „Улога адитива у постојећим и горивима будућности", Симпозијум ЈУГОМА П85, Пореч, 1985.
37. K. Steiner: "Oil Burners", McGraw-Hill Book Company, Њујорк - Лондон, 1937.
38. Б.В. Лосиков, А.Д.Фатјанов, Ј.В.Микулин, Л.А.Александрова: „Топлива для стационарных и судовых газовых турбин", Химия, Москва, 1970.
39. M. Popovich, C. Hering: "Fuels and Lubricants", Chapman & Hall, Лондон, 1959.
40. М. Радовановић, М. Ацић, С. Меметовић, Ж. Милутиновић: "Образовање талога и захтевани октански број при раду са безоловним моторним бензином", Саветовање ЈУМВ П88, Крагујевац, 1988.
41. ***: „Југословенски стандарди за течна горива", Савезни завод за стандардизацију, Београд
42. ***: „Техничке препоруке за горива за моторна возила - ЈУС ТП2 и ЈУС ТП3", Савезни завод за стандардизацију, Београд, 1992.
43. D. E. Foringer, H. F. G. Richards: "Die Bedeutung des Siedeverlaufs von Autobenzin für den Fahrbetrieb", Schweizer Archiv für angewandte, 27, 1961.
44. ***: "Ray Taschenbuch für Öl und Gasbrenner", Ray International, Hamburg, 1990.

6 ГАСОВИТА ГОРИВА

Гасовита горива се данас све више користе, у првом реду због својих повољних особина у односу на чврста и течна горива, јер поседују низ предности:

- потпуније сагоревају,
- поседују мањи садржај баласта,
- сагоревају са веома малим коефицијентом вишка ваздуха, блиским стехиометријском,
- процес сагоревања се може лако регулисати,
- продукти сагоревања су чистији,
- лако се транспортују,
- производе се у централизованим постројењима великог капацитета, ако се ради о произведеним горивима.

Као и течна горива гасовита горива одликују се лаком упаљивошћу и експлозивношћу, па приликом руковања и транспорта треба о томе водити посебно рачуна.

Не улазећи у поделе по саставу, по којој се гасовита горива деле на елементарна (водоник), хомогена једињења (метан, бутан, угљенмоноксид, на пример и др.), мешавине елемената и једињења или мешавине једињења, у даљем ће се разматрати природна и произведена (примарна, секундарна и синтетичка) гасовита горива.

6.1 ПРИРОДНА ГАСОВИТА ГОРИВА

И поред тога што се природним гасовитим горивима могу сматрати јамски или руднички гас, који се јављају у рудницима угља, као и барски и трули гас, пошто се индустријски не користе, природним гасовитим горивом сматра се само земни гас.

Природни земни гас се јавља или на местима где има нафте или самостално (без нафте). Настао је истим процесом трансформисања од исте праматерије као и нафта. Земни гас се налази као слободан, у такозваној „гасној капи“ изнад нафте (Слика 5.1), и као везан, растворен у нафти. У саставу природног гаса налазе се гасовити угљоводоници, од којих највише метана, уз примесе водоника и негоривих гасова (CO_2 , N_2 и CO). У природном гасу који се налази тамо где има и нафте налази се већи садржај етана (до 10%), пропана (до 7%) и бутана (до 7%). Природни гас који се налази у бушотинама без нафте првенствено се састоји од метана (до 98%), а у појединим случајевима се његов садржај приближава 100%. Садржај осталих парафинских угљоводоника у овом случају достиже 1,5 до 2%.

Гасови који садрже већу количину пропана и бутана називају се влажни или богати, за разлику од природних гасова са далеко мањим њиховим садржајем,

који се називају суви или сиромашни. Поступком „дегазолинаже“ из влажних природних гасова издвајају се течни гасови (пропан и бутан) угљоводоници вишег реда (од 5 атома угљеника у молекулу и навише) из којих се добија лаки бензин (газолин) и остаје суви природни гас.

Топлотна моћ природних земних гасова који се добијају из чисто гасних бушотина је нешто нижа од одговарајућих добијених из бушотина где се гас налази заједно са нафтом: топлотна моћ првих износи у просеку око $36\text{--}36,5 \text{ MJ/m}^3$, других - око $37,7 \text{ MJ/m}^3$, достижући понекад 41 MJ/m^3 . Са већим садржајем етана, пропана и бутана расте и топлотна моћ гасовитих горива.

Поред наведених компонената, у неким природним гасовима налазе се и једињења сумпора, првенствено сумпорводоника (H_2S) - до 2% највише. Сумпорводоник је веома токсичан, добро се раствара у води и кородивно делује на метале, нарочито у присуству воде и кисеоника. Све ово чини присуство сумпорводоника крајње непожељним па се он одстрањује пре транспорта и коришћења.

Највећа налазишта природног земног гаса налазе се у Русији, САД, Ирану, Холандији, Алжиру и земљама Блиског истока. У нашој земљи најважнија налазишта природног земног гаса су Елемир, Кикинда и Пландиште.

Састав неких домаћих природних гасова дат је у Табели 6.1 /1/. За ефикасно коришћење природног гаса у индустријским центрима у нашој земљи је изграђен гасовод који поред домаћег омогућавају довод гаса из Русије (Слика 6.1).

Природни земни гас, као и друга гасовита горива, има широку примену: поред коришћења као горива, он се употребљава и као сировина у хемијској индустрији. Као енергетско гориво природни гас се користи за загревање воде, загревање ваздуха, производњу водене паре и производњу електричне енергије.

Применом природног земног гаса код котлова остварује се боље искоришћење у односу на угаљ. У погледу конструкције и експлоатације котлови ложени гасом поседују, поред општих предности гаса као горива, низ преимућстава:

- једноставније и мање ложиште,
- одсуство знатног броја помоћних уређаја, па је мања потрошња енергије за њихов погон,
- мање је прљање грејних површина,
- нема летећег пепела и шљаке,

док у недостатке треба убројити:

- мању ефикасност озрачених површина услед мањег коефицијента зрачења (што има за последицу повећање грејних површина), и
- опасност од експлозије услед лошег заптивања, односно пропуштања гаса.

На Слици 6.2 дати су губици и степен корисности котла за различита горива.

Слика 6.1: Постијећа и перспективна гасоводна мрежа у Србији /2/

Састав природног гаса у Југословенском гасоводу (чворниште Панчево), средње вредности по месецима за 1991. годину /1/

Табела 6.1:

Слика 6.2.: Слџејен корисностџи и џубици коџџла за различџиџа горива: : 5-мрки уџаљ, 6-ложџиџџе са сувим удаљавањем шљаке, 7-ложџиџиџе са џџечним удаљавањем шљаке, 8-џџеџи мазуџџ, 9-џприродни земни џас /121 из сџџаре/

Као технолошко гориво природни гас се употребљава у низу процеса топљења руде (производња гвожђа, челика, бакра и др.), печења материјала, загревања материјала, термохемијске обраде метала и материјала, сушења материјала и делова и испаравања раствора. Поред овог, природни гас се користи за грејање и остале комуналне потребе.

Као сировина у хемијској индустрији природни гас се користи било за добијање коначних производа, било за добијање полупроизвода коџи се даље користе за производњу низа драгоценџх супстанци. Од природног гаса добијају се водонџк, амонијак, метанол, ацетилен, олефински угљоводоници и др. Из низа од наведених производа добија се пластична маса, синтетџички каучук, вештачка влакна, високооктанске компоненте и др.

Са уочавањем појаве „ефекта стаклене баште“ и, као последице, загревања Земље, последњих година се за оцену квалитета и применљивости горива, уводи допунски критеријум количина CO_2 настала сагоревањем по јединици енергије - коефицијент емисије CO_2 - KE_{CO_2} (Поглавље 7 - Перспективна горива) /4/. По овом критеријуму метан, као основни састојак природног гаса, има најповољнију вредност - $\text{KE}_{\text{CO}_2} \sim 55 \text{ kgCO}_2/\text{GJ}$, што га по значају сврстава у перспективна горива (Слика 7.6, Табела 7.1).

То је основни разлог што се природни гас намеће као гориво за погон мотора са унутрашњим сагоревањем - и ото и дизел мотора. Инсталација за напајање мотора горивом (гасом) у основи састоји се из резервоара под притиском, регулатора притиска и мешача гаса и ваздуха (пored сигурносних уређаја). Природни гас може бити ускладиштен у судовима под притиском у сабијеном (CNG – Compressed Natural Gas) или течном стању (LNG – Liquefied Natural Gas). Смештање резервоара на возилу и тежина резервоара представљају основне проблеме ширем продору природног гаса као горива и поред повољнијег састава и токсичних компоненти у продуктима сагоревања. На Сликама 6.3 и 6.4 су дата решења за путничка возила и аутобусе.

Слика 6.3: Инсталација за напајање мотора гасом на путничком моторном возилу /5/: 1-свећица, 2-лејтхир (клапна), 3-мешна комора за гас, 4-гасни претварач, 5-пречистиач за ваздух, 6-преклопни вентил за гас/пречистиач, 7-гасни Ош мотор, 8-разводник палења, 9-резервоар за гас

Слика 6.4: Смештај резервоара на аутобусу

Око 300.000 моторних возила (1% укупног возног парка) на 238 пумпних станица у Италији користи природни гас као гориво, а око 200.000 возила у Русији [7].

6.2 ПРОИЗВЕДЕНА ГАСОВИТА ГОРИВА

Произведена гасовита горива могу се на основу полазне материје, зависно од процеса којим се добијају, поделити у три основне групе: гасове добијене прерадом нафте или производа прераде нафте; гасове добијене из гасовитих природних горива и гасове добијене из чврстих горива.

6.2.1 ПРЕРАЂЕНА ГАСОВИТА ГОРИВА ИЗ НАФТЕ ИЛИ ПРЕРАДЕ ПРОДУКАТА НАФТЕ

6.2.1.1 Рафинеријски гасови

У низу поступака прераде нафте или продуката прераде нафте (фракционисање, крековање, реформисање и др.) добија се одређена количина гасовитих продуката, који се углавном састоје из угљоводоника. Док се фракционисањем

добиајау углавном засићени угљоводоници, крековањем и другим поступцима добијају се и незасићени, олефински угљоводоници. Тако се поред пропана, бутана, изобутана и нешто етана, налазе и пропилен, бутилен и у примесама етилен. После издвајања угљоводоника са три и четири атома угљеника у молекулу угљоводоника, рафинеријски гасови се обично користе за загревање цевних пећи. Ови гасови називају се рафинеријски гасови.

6.2.1.2 Течни гасови

Течне гасове чине угљоводоници са три или четири угљеникова атома у угљоводоничном молекулу: пропан (C_3H_8), пропилен (C_3H_6), бутан (C_4H_{10}), бутилен (C_4H_8), изобутан и изобутилен. С обзиром на особину да на нормалним температурама и релативно ниском притиску од 0,2-0,8 МПа (ређе до 1,6 МПа) прелазе у течно стање, називају се течни гасови.

Добијају се издвајањем из природних или рафинеријских гасова, а продају под називом „бутан“.

Течни гасови представљају, како сировину за хемијску индустрију, тако и цењено гориво у домаћинствима, индустрији, као и за погон мотора моторних возила (Слика 6.5).

Слика 6.5: 1-акумулаијор, 2-преклојник врсије горива, 3-филијер за течну фазу ТГ, 4-филијер за ваздух, 5-адаптирани карбуратјор, 6-соленоидни вентил за бензин, 7-улазни колектијор горива, 8-исаијривач режулатјор, I, II-течна односно гасовијта фаза ТГ, III-бензин (резервно гориво), IV, V-вода у хладњаку и из хладњака

Течни гасови поседују високу топлотну моћ, сагоревају потпуно, без дима и мириса. Као горива за ото моторе поседују изванредну отпорност према детонативном сагоревању (Табела 6.2). Изразито су повољни са гледишта загађења атмосфере, јер су продукти сагоревања чисти - садрже осетно мање токсичних компонената у односу на бензине.

Табела 6.2 /10/

Гориво	<i>IOB</i>	<i>MOB</i>
Пропан	111,5	100
n-Бутан	95	92
Изо-бутан	100,4	99
Пропилен	100,2	85
Бутилен	100	82
МБ 98	најмање 98	најмање 87

Као горива за ото моторе течни гасови имају низ предности:

- како се течни гас мешачу, односно карбуратору доводи у гасној фази, припрема гориве смеше и расподела смеше по цилиндрима је боља у поређењу са образовањем смеше са моторним бензином, а сагоревање је потпуније. Боља хомогеност смеше омогућава и при делимичним оптерећењима рад са сиромашнијом смешом,
- садржај угљенмооксида у издувним гасовима је код добро подешеног, оптимизованог уређаја за примену течног гаса много мањи у поређењу са садржајем CO код бензинских мотора: у просеку износи око 10% од садржаја CO у издувним гасовима насталим при сагоревању моторног бензина /8/,
- садржај несагорелих угљоводоника при сагоревању течних гасова је у просеку за око 40% мањи у поређењу са количином која настаје при сагоревању моторног бензина,
- и поред тога што је при стехиометријском односу садржај азотових оксида већи, са течним гасом могу се остварити и до 40% ниже вредности /9/. Ове вредности су, међутим, јако зависне од врсте карбуратора и оптерећења мотора (Слика 6.6).,
- висока вредност октанског броја течног гаса омогућава и смањење оловних једињења у околини, јер их течним гасовима није потребно додавати. Истовремено, применом течних гасова свећице и издувни систем остају чистији и имају дужи век трајања у поређењу са истим при бензинском погону,
- како су и пропан и бутан гасови, током рада мотора не долази до кондензације горива у усисној грани и зидовима цилиндра, па ни до разређења моторног уља чиме се остварује боље подмазивање и дужи век трајања не само моторног уља, већ и мотора уопште.

Као што је познато, данас се потрошња код путничких возила изражава у dm^3 на 100 km пређеног пута. Коришћењем течног гаса добија се потрошња изражена

на поменут начин нешто већа у односу на моторни бензин, зависно од врсте горива (под врстом горива подразумева се чист пропан, технички пропан, пропан-бутан или чист бутан), врсте возила и врсте уређаја за коришћење течног гаса.

Разлике у потрошњи између течних гасова и бензина су последица разлике запреминских топлотних моћи (Табела 6.3).

Упоредне вредности продуката сагоревања, односно токсичних компоненти (угљенмоноксида CO , несагореог горива CH и азотних оксида NO_x) моторног бензина и течног гаса приказане су у Табели 6.4.

Слика 6.6: Упоредне вредности продуката сагоревања, односно токсичних компоненти (угљенмоноксида CO , несагореог горива CH и азотних оксида NO_x , моторног бензина и течног гаса (ТГ))

Табела 6.3 Тојлојне моћи течних гасова /10/

Гориво	Густина на 15°C	Доња топлотна моћ	
	kg/dm^3	MJ/kg	MJ/dm^3
Пропан	0,509	46,33	23,58
Технички пропан	0,512	46,27	23,69
Пропан-бутан мешавина	око 0,55	45,82	25,20
Бутан	0,585	45,66	26,71
МБ 98	0,76	42,96	32,65

Табела 6.4

Токсичне компоненте	Моторни бензин	Течни гас	Максимално дозвољена вредност
CO	14,2	2,6	26,4
CH	1,2	0,9	2,0
NO _x	1,5	1,3	3

6.2.2 ПРОИЗВЕДЕНА ГАСОВИТА ГОРИВА ИЗ ЧВРСТИХ ГОРИВА

Произведена гасовита горива из чврстих добијају се процесом гасификације угљева, горивих шкриљаца и др. и процесима суве дестилације. Аналогно поступку добијају се генераторски и дестилациони гасови.

6.2.2.1 Генераторски гасови

Поступак гасификације представља суштински процес непотпуног сагоревања којим се из чврстих горива добијају гасовита, тако да се у добијеним гасовима налазе продукти непотпуног сагоревања, али и термичког разлагања материје чврстог горива. Процес гасификације се изводи индустријски у посебним уређајима - гасним генераторима, па се добијени гасови називају скраћено генераторски гасови.

Примена овог поступка конверзије чврстих горива у гасовита значајан је како са гледишта постојећих резерви примарних носилаца енергије (релативно велике резерве угља), тако и са гледишта решавања актуелних проблема:

- гасификацијом чврстих горива са већим садржајем сумпора добија се гас са мање сумпора, па се смањује загађење околине,
- гасификацијом великих количина чврстих горива производе се гасовита, која могу да замене природна гасовита горива и
- овим поступком може се добити такозвани синтезни или водени гас, који се састоји од угљенмоноксида и водоника, важних сировина за хемијску индустрију.

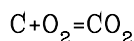
У досадашњим истраживачким радовима као и у пракси освојен је низ метода у циљу добијања или гасова, код којих је одлучујући утицај имао њихов састав, или гасовитих горива, код којих је доминантан утицај имала одговарајућа топлотна моћ.

Без обзира на циљ - добијања гасовитих горива одређене топлотне моћи или добијања гасова одређеног састава, поступак газификације се врши са количином ваздуха која је мања од минимално потребне за потпуно сагоревање - са коефицијентом вишка ваздуха мањим од један. Зависно од врсте флуида коришћеног у процесу, добија се и одговарајући састав, па тиме и одговарајућа топлотна моћ. У општем случају, у овим поступцима користе се ваздух, мешавина водене паре и ваздуха или кисеоника и водена пара, па се тако добијају ваздушни, мешани и водени генераторски гас. Зависно од притиска под којим се поступак газификације изводи разликују се процеси са нормалним и повишеним притисцима.

Не улазећи у низ постојећих поступака за извођење газификације који данас већ постоје, па и читаве монографије написане о њима /11, 12/ дају се у оквиру овог излагања само њени основи.

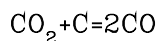
Процес превођења чврстог у гасовито гориво одвија се, према упрошћеној шеми (Слика 6.7) у неколико зона:

- у првој зони - зони сагоревања долази до сагоревања угљеника из полукокса или кокса према познатој једначини



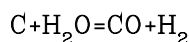
уз издвајање одговарајуће количине топлоте, која се користи за загревање горњих слојева.,

- у другој зони - зони редукције, настали угљендиоксид из прве зоне, крећући се навише наилази на слој усијаног полукокса или кокса и редукује се у угљенмоноксид



- у трећој зони долази до термичког разлагања коришћеног угља уз издвајање горивих испарљивих материја и истовремено настајање полукокса или кокса (зависно од врсте коришћеног угља и температуре), и
- у четвртој зони, услед загревања долази до сушења угља, односно одстрањивања влаге.

За случај када се уместо ваздуха (горњи случај) у процес уводи водена пара или мешавина водене паре и ваздуха, долази до образовања такозваног воденог или синтезног гаса: поред угљенмоноксида, добија се и друга горива компонента - водоник



Слика 6.7 Шема гасогенератора са зонама сагоревања, редукције, суве десублимације и сушења, променом температуре у гасогенератору и времена одвијања појединих фаза у зонама /13/

У једноставним генераторима користи се ваздух, при чему се добија гасовито гориво које се у основи састоји од угљенмоноксида и азота. Топлотна моћ ваздушног гаса, добијеног на овај начин, креће се у границама $3,7\text{--}4,7 \text{ MJ/m}^3$. Добијање гаса веће топлотне моћи остварује се удувавањем водене паре: топлотна моћ овако добијеног гаса износи до $7,5 \text{ MJ/m}^3$. Даље повећање топлотне моћи генераторског гаса постиже се заменом ваздуха кисеоником, чиме се одстрањује азот из гаса и добија топлотна моћ до $11,2 \text{ MJ/m}^3$. За добијање гасова веће топлотне моћи, процес газификације се изводи и под притиском од $3,5$ до 10 MPa . Том приликом, поред угљенмоноксида и водоника настаје метан, а топлотна моћ се повећава до $18,6 \text{ MJ/m}^3$. Даљим усложњавањем процеса може се добити гас, који не заостаје за природним и који се састоји претежно из метана, топлотне моћи од $37,3 \text{ MJ/m}^3$.

На Сликама 6.8 и 6.9 дате су шеме поступака за газификацију фирме Lurgi (Лурги) и Koppers–Totzek (Коперс-Тоцек) /14/. Састав генераторског гаса, добијеног поступком Лурги на Косову, после пречишћавања, дат је у Табели 6.5.

Слика 6.8: *Поступак ѓасификације по систему Lurgi:*
1-довод уља, 2-усјава за уља, 3-штер, 4-погон, 5-водена пара, 6-раз-
дељивач, 7-решијка, 8-погон решијке, 9-водени омийач, 10-водена
пара+кисеоник, 11-усјава за пеео, 12-пречишћавање и хлађење
ѓаса, 13-генераторски ѓас /14/

Слика 6.9: *Постројак за гасификацију Којерс-Тоцек:*
 1-увођење угља у сипашном сипању, кисеоника и водене паре, 2-
 реактор за гасификацију угља, 3-непречишћени генераторски гас,
 4- пепео /14/

Табела 6.5

Угљенмоноксид (%Vol)	35,5
Водоник (%Vol)	26,5
Метан (%Vol)	26,9
Азот (%Vol)	11,3
Кисеоник (%Vol)	0,5

Пример малог генератора са отпацама дрвета као горивом дат је шематски на Слици 6.10 и у изведеној верзији на Слици 6.11. Отпаци прераде дрвета (струготина, пиљевина и др.) доводе се одозго у гасни генератор (1). Загрејани ваздух (2) неопходан за процесе гасификације уводи се у централни део реактора. У реактору (3) врши се трансформација масе дрвних отпадака у коксни остатак, тер, CO_2 и водену пару. Високе температуре омогућавају крековање, паљење и сагоревање тера. Генераторски гас, који се састоји од водоника и CO , настаје реакцијом коксног остатка са CO_2 и H_2O (воденом паром) (4). Произведени гас

(5), температуре око 500°C , изводи се из реактора и у размењивачу топлоте хлади, предајући топлоту ваздуху за газификацију (2). Генераторски гас се даље хлади до 300°C и пречишћава од честица (6) и води (7) ка котлу (8а) или мотору (8б). На Слици 6.11 је приказана производња електричне енергије помоћу мотора и електромотора.

У последње време врше се интензивна истраживања у циљу остварења такозване подземне газификације угља, а у Русији су резултати ових испитивања нашли и индустријску примену. Подземни газогенератор састоји се од система бушотина међусобно повезаних реакционим каналима у лежишту угља. У процесу газификације не учествује само ваздух, обogaћен кисеоником или уз додатак водене паре, већ и испарене подземне воде, и влага угља. Такође у зони повишених температура долази до разлагања угља и стварања горивих испарљивих материја (Слика 6.12).

Због високог садржаја баластних гасова (азота и угљендиоксида) и мале топлотне моћи (од 2,9 до 5 MJ/m^3), гас добијен подземном газификацијом није економски оправдано транспортовати на већа растојања - он се користи на месту производње: у индустријским котловским постројењима и термоелектранама.

6.2.2.2 Дестилациони гасови

Слика 6.10

Дестилационе гасове чине продукти суве дестилације дрвета, тресета, мрких и камених угљева добијени примарном или високотемпературском сувом дестилацијом. Квалитет добијеног гаса зависи у основи од врсте горива подвргнутог термичком разлагању. Топлотне моћи се, зависно од горива, крећу у границама:

- за дестилационе гасове мрког угља
 - примарне: $H_d = 5,8 - 8,8 \text{ MJ/m}^3$
 - високотемпературске: $H_d = 10,5 - 15,5 \text{ MJ/m}^3$
- за дестилационе гасове каменог угља:
 - примарне: $H_d = 12,5 - 30,5 \text{ MJ/m}^3$
 - високотемпературске: $H_d = 16,7 - 23,8 \text{ MJ/m}^3$.

Слика 6.11: Изведено посціројење за жазифікаціју дрвних ошйадака /15/

Слика 6.12: Шема подземне газификације угља: 1-довод ваздуха, 2-бушотине за увођење ваздуха, 3-зона сагоревања, 4-налазишће угља, 5-бушотина за излаз гаса, 6-пречишћавање гаса, 7-гас подземне газификације /16/

6.2.3 БИОГАС

Суштина настајања биогаса своди се на трансформацију органске материје (органских отпадака) у процесу који се одвија без присуства ваздуха деловањем анаэробних бактерија, у вишестепеном биохемијском и биолошком процесу којим настаје гас богат метаном.

У недостатку кисеоника органска материја се разлаже под дејством анаэробних бактерија. Процес се одвија у три фазе деловањем две различите групе бактерија. У првој фази комплексна органска једињења као што су масти, протеини и угљени хидрати се ензимском хидролизом претварају у једноставнија органска једињења. Друга фаза чини ферментирање ових једноставнијих компонената у испарљиве масне киселине групом анаэробних бактерија, званих „градитељи киселина“. У трећој фази се органске киселине трансформишу у угљендиоксид и метан групом анаэробних бактерија, званих „градитељи метана“. На тај начин у задњој фази настаје гас (биогаз) богат метаном топлотне моћи $22\text{--}26 \text{ MJ/m}^3$.

Количина и квалитет биогаза зависе од:

- врсте органске материје и њене уситњености,
- температуре процеса,
- времена трајања процеса и
- начина одвијања процеса.

Саставни делови постројења за производњу биогаза, у општем случају су:

- пријемни резервоар са, по могућству, додатним уређајем за мешање и ситњење,
- дигестор (реактор) у коме се обавља ферментација (по могућству изолован) и са уређајима за загревање и мешање,
- резервоар за гас, по могућству са претходним пречишћавањем биогаза,
- резервоара за остатак из процеса ферментације и
- контролно-мерни инструменти.

Данас постоји читав низ различитих решења. На Слици 6.13 дато је једно од постојећих, предвиђено за коришћење стајњака као сировине за производњу биогаза. Свеж стајњак меша се са истом количином топле воде у пријемном резервоару. Пријемни резервоар треба да се налази у непосредној близини млекаре из два разлога:

- стајњак се може лако скупити и допремити у пријемни резервоар. С обзиром да просечна крава проведе једну трећину свог живота у непосредној близини штале, релативно велика количина стајњака може се скупити на малој површини,
- отпадна топла вода од прања пода штале може се допремити у припремни резервоар. Коришћење ове отпадне топле воде смањује потребу за коришћењем топлотног измењивача и смањује трошкове загревања мешавине стајњака и воде на оптималну температуру.

Као сировина за производњу биогаза може се користити у принципу било која органска материја, тачније, свака влажна органска материја - стајњак и отпаци, сви зелени остаци после жетве, као и остаци хране. Током анаэробне ферментације минимални садржај влаге у органској материји је есенцијалан за живот (одржање) бактерија. То значи да би било крајње непожељно влажити органску масу која је већ сува и онда је излагати анаэробном третману. Слама се, на пример, може боље искористити директним сагоревањем, уз мања улагања и са бољим учинком.

Производња биогаза условљена је присуством резервоара за гас, који треба да уједначи: варијације у потрошњи (дневне, недељне, сезонске), разлике у квалитету гаса и флуктуације у количини произведеног гаса.

Карактеристике биогаза су нешто лошије него природног гаса. Биогаз се може користити у дизел моторима у облику двогоривог погона - 75% дизел горива може се заменити биогазом, док се 25% дизел горива користи за обезбеђивање несметаног рада (паљење). Коришћењем биогаза у стационарним дизел моторима може се постићи и 80%-тно искоришћење комбинованом производњом електричне енергије и топлоте. Биогаз се може користити и за загревање станова, штала, производњу топле воде и сл.

Литература

1. ***: Дневне анализе састава природног гаса, Енергогас, Београд, 1991.
2. Министарство за индустрију, енергетику и грађевинарство Републике Србије: „Информација о досадашњем развоју гасификације у Републици Србији и перспективе развоја до 2000. године“, Београд, 1990.
3. Н. Puher-Westerheide: "Kraftwerke mit Kohle-duckvergasung", VGB Karftwerkstechnik, Vol. 54, 1974.
4. М. Радовановић, М. Аџић, Д. Симић: "A new criteria for the automotive fuels", Mobility & Vehicle Mechanics, Vol. 19, No. 3, 1993.
5. F. Mariano: "Il metano nella panoramica dei trasporti ecologici", CH₄-energia metano, No. 2, 1992.
6. F. Mariano: "An overall perspective of Italian NGV", CH₄-energia metano, ...???
7. Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский: „Природный газ как моторное топливо на транспорте“, Недра, Москва, 1986.
8. ***: "Wissenwerfes über Autogas", British Petrol, SQV-MCG. 1981.
9. ***: "Der Krafstoff mit Zukunft", British Petrol, 1981.
10. G. Leggewie: "Flüssiggas als Krafstoff für Verbrennungs Motoren", Flüssiggas, 1981.
11. Г. Јанкес, М. Митровић, С. Братуљевић: „Гасификација угља“, Институт Машинског факултета, Београд, 1976.
12. В. С. Салтшулер: „Новие процеси гасификации твёрдого топлива“, Недра, Москва, 1976.
13. R. C. Patterson: "The Combustion Engineering Coal Gasification Program", Combustion, Vol. 47, 1976.
14. J. Faucounau: "Le charbon de l' an 2000", La recherche, Vol. 5, 1974.
15. ***: Wood waste gasification, Prospektni materijal firme Energy Equipment Engineering, Холандија, 1990.
16. Д. Величковић: „Погонске материје - И део - Термогене материје“, Машински факултет, Београд, 1972.
17. R. M. Brule: "Design of Small-Scale Biogas Plants in Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels", Plenum Press, New York, London, 1981.
18. E. Dohne: "Biogas Production from Organic Agricultural Wastes", ECE, United Nations, New York, 1982.

7 ПЕРСПЕКТИВНА ГОРИВА

Као што је познато, нафта са својим многобројним дериватима представља данас најзначајнији енергетски извор. Сагледавајући, са већом или мањом тачношћу, крај њеног исцрпљења поставља се питање перспективних или алтернативних горива, посебно у саобраћају. У том циљу врше се у целом свету, па и у нас, интезивна истраживања, како изналажења „нових“ врста горива, тако и усавршавања и прилагођавања постојећих потрошача (мотора односно возила) новим горивима.

Домаћа производња нафте обезбеђује приближно једну четвртину потрошње у нашој земљи. С обзиром на сталан пораст броја моторних возила, па тиме и одговарајуће потрошње, као и на нестабилност цена и могућност набавке нафте, посебан значај за нашу земљу има свака могућност обезбеђивања домаћег извора енергије за погон мотора са унутрашњим сагоревањем.

Избор који човечанству стоји на располагању није велики. Предмет истраживања су горива од којих су нека нова (водоник), а нека већ релативно позната и коришћена, али су у условима довољних и јефтиних количина горива из нафте била одбачена (алкохоли, синтетички бензин и дизел гориво добијени из угља). Избор ових нових горива заснива се на усклађивању и оптимирању низа критеријума:

- количине и расположивости потенцијалних примарних носилаца,
- обновљивости,
- потребне технологије за производњу и примену,
- степена искоришћења примарног носиоца енергије,
- трошкова експлоатације,
- утицаја на загађење околине и др.

Досадашња истраживања указују да релативно брза, краткорочна решења треба тражити у увођењу неконвенционалних горива на бази алкохола и биљних уља, а дугорочна на бази водоника (21. век). Последњих година проблем загревања Земље уводи и нове критеријуме за перспективна горива.

Загревање услед ефекта стаклене баште настаје када одређени гасови омогућавају сунчевој светлости да продре до земљине површине али делимично спречавају инфрацрвено излучивање планете у атмосферу. Извесно загревање је природно и неопходно. Уколико не би било водене паре, угљендиоксида и других гасова да апсорбују инфрацрвено зрачење, наша планета била би хладнија за око 33°C, а живот на њој, какав постоји, не би био могућ.

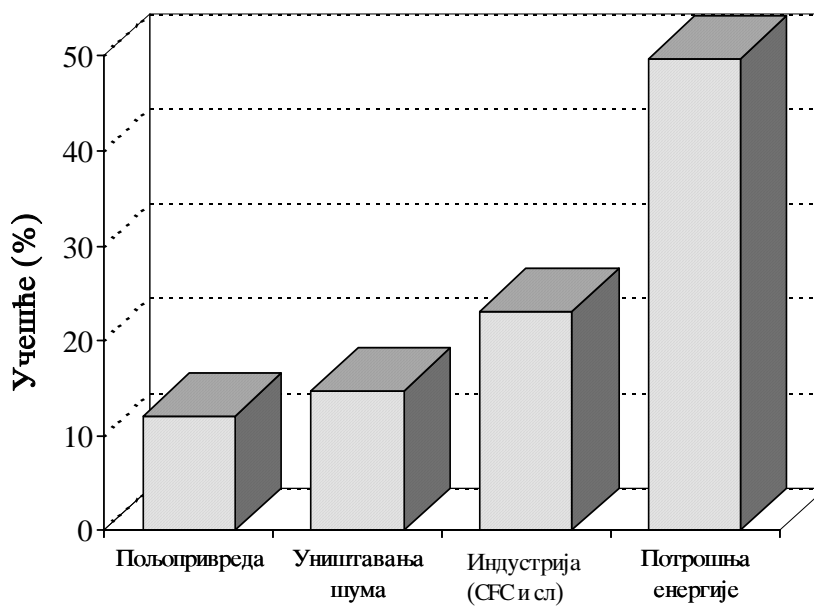
Током овог века, у атмосферу је испуштена огромна количина штетних материја што сада представља опасност по људе, природни систем и климу на земљиној

кугли. Сагоревање фосилних горива, масовно уништавање шума, испуштање индустријских хемикалија и пољопривредних адитива појачало је природни ефекат стаклене баште, повећавајући опасност од глобалног загревања планете. Поред тога, испуштање индустријских хемикалија које садрже хлор и флуор допринело је уништавању озонског омотача у атмосфери.

У којој мери различите људске активности доприносе промени климе? Као што показују најновије процене World Resources Institute (WRI) /1/ далеко највећи удео има потрошња енергије (око 50%), од чега највећи део чини сагоревање фосилних горива (Слика 7.1).

Остале људске активности које доприносе промени климе су:

- индустрија (око 22%),
- уништавање шума (око 14%), и



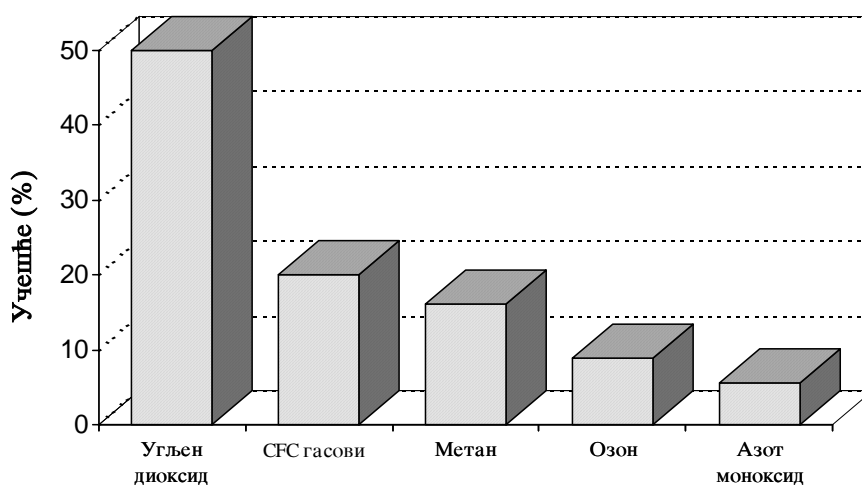
Слика 7.1: Активности које доприносе глобалном загревању (1980-1990) /1/

- пољопривредне активности (око 13%).

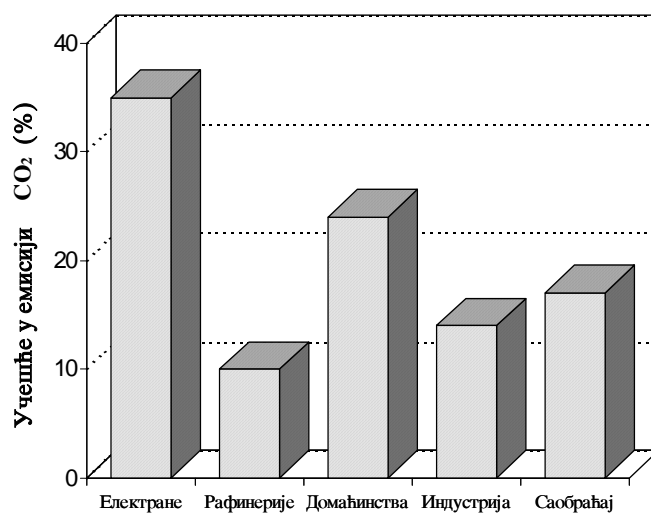
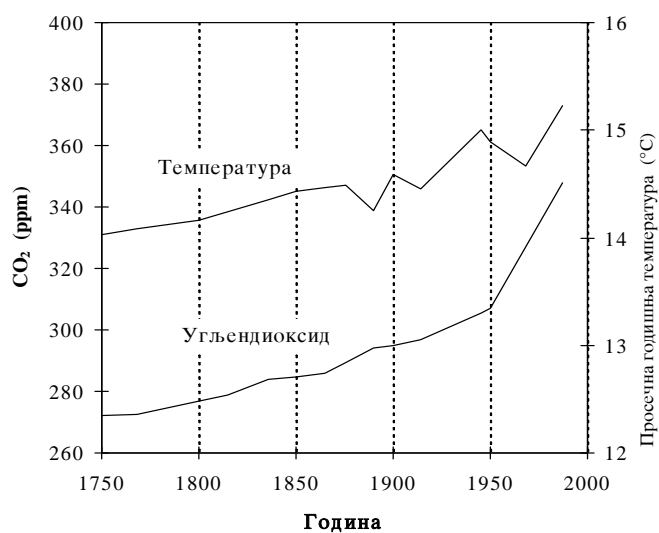
Гасови „стаклене баште“ који највише утичу на глобално загревање планете дати су на Слици 7.2. Енергетска постројења имају највећи удео у „производњи“ CO_2 , као што је приказано на Слици 7.3.

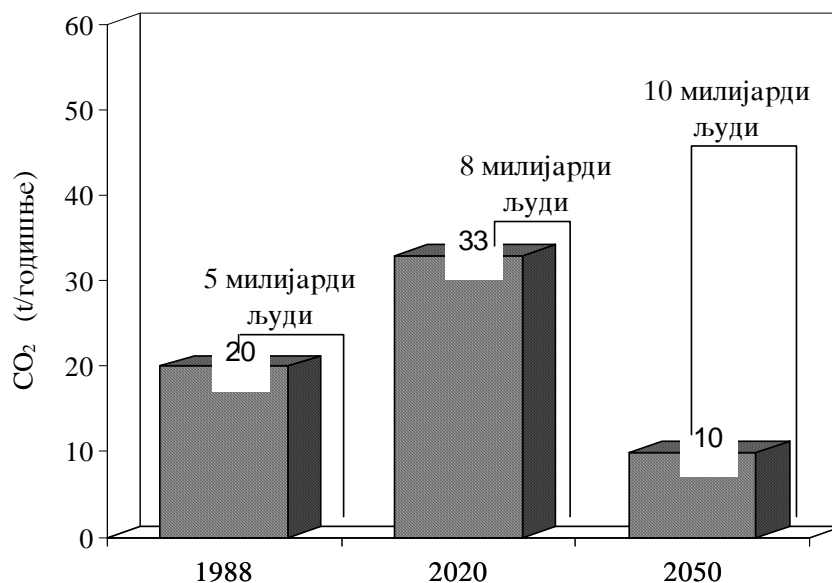
Угљендиоксид учествује са половином у укупном загревању земљине кугле. Концентрација CO_2 у атмосфери тренутно расте за око 0,5% годишње, и већ је за око 25% већа у односу на преиндустријско доба. Половина овог пораста десила се током последње три деценије. Веза између пораста концентрације CO_2 и просечне годишње температуре дата је на Слици 7.4.

Према Конференцији о светској клими, Торонто, 1988., неопходно је смањити емисију CO_2 за 20% до 2005. године и за 50% до 2050. године. Узимајући у обзир непрестани раст популације на земљи и потребе за енергијом, емисија CO_2 ће и даље бити у порасту и достићи ће вредност од 33 милијарде тона у 2020. години - Светска конференција о енергетици, Монреал 1989., (Слика 7.5) .



Слика 7.2: Човеков допринос ефекту стаклене баште (1980-1990) /1/

Слика 7.3: Структура „произвођача CO₂“ /2/Слика 7.4: Пораст концентрације CO₂ и годишње просечне температуре /3/

Слика 7.5: Свјетска емисија CO₂/2/

Количина емитованог CO₂ директно зависи од: количине потрошеног горива, садржаја угљеника у гориву и потпуности сагоревања угљеника.

Основна мера за оцену горива по овом критеријуму је коефицијент емисије угљендиоксида - KE_{CO_2} .

Коефицијент емисије угљендиоксида (KE_{CO_2}) је функција садржаја угљеника у

$$KE_{CO_2} = 3,67 \frac{g_c}{H}$$

гориву и дефинише се као:

где су:

- g_c (kg/kg, t/t) - садржај угљеника у гориву
- H (MJ/kg, GJ/t) - топлотна моћ горива
- 3,67 - коефицијент из стехиометријске једначине сагоревања угљеника.

Како се топлотна моћ може изразити у виду доње и горње, неопходно је уз вредност KE_{CO_2} навести на коју од ових величина се односи KE_{CO_2} .

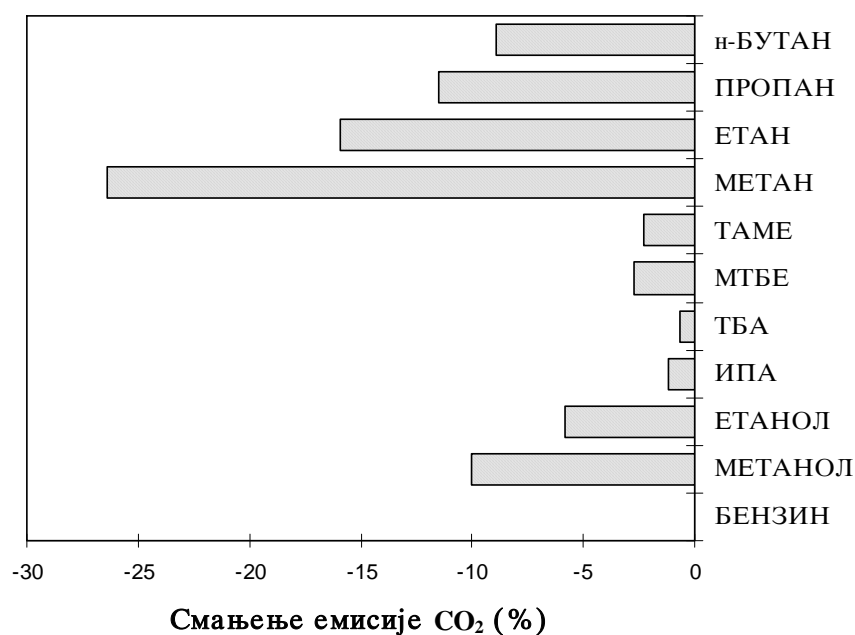
Вредности KE_{CO_2} за стандардна и перспективна горива дате су у Табели 7.1. Смањење емисије CO_2 које се постиже применом перспективних горива у односу на моторни бензин приказано је на Слици 7.6.

Вредности за KE_{CO_2} рачунате су као директна емисија CO_2 из процеса сагоревања, без CO_2 из процеса производње горива, што ову слику може знатно да промени. Посебну анализу захтевају горива добијена из биомасе где би требало да биланс CO_2 буде једнак нули (CO_2 које се користи за добијање биомасе = CO_2 које се ослобађа сагоревањем биомасе).

По овом критеријуму приоритет добијају обновљива горива из биомасе: станол - као гориво за ото моторе и биљна уља као горива за дизел моторе.

Табела 7.1: Вредности KE_{CO_2} за стандардна и перспективна горива [4]

Врста горива	Хемијска формула	g_c	KE_{CO_2g}	KE_{CO_2d}	ΔKE_{CO_2g}	ΔKE_{CO_2d}
		kg/k g	kgCO ₂ – g/GJ	kgCO ₂ – g/GJ	%	%
БЕНЗИН	~ C ₈ H ₁₈	0,842	67,3	71,9	0,0	0,0
МЕТАНОЛ	CH ₃ OH	0,375	60,6	69,2	–10,0	–3,8
ЕТАНОЛ	C ₂ H ₅ OH	0,522	63,4	70,4	–5,8	–2,1
ИПА	C ₃ H ₇ OH	0,600	66,5	73,2	–1,2	1,8
ТБА	C ₄ H ₉ OH	0,649	66,9	73,0	–0,7	1,6
МТБЕ	C ₅ H ₁₁ OH	0,682	65,5	71,1	–2,7	–1,1
ТАМЕ	C ₆ H ₁₃ OH	0,706	65,8	71,0	–2,3	–1,2
МЕТАН	CH ₄	0,750	49,6	55,0	–26,4	–23,4
ЕТАН	C ₂ H ₆	0,800	56,6	61,8	–15,9	–14,0
ПРОПАН	C ₃ H ₈	0,818	59,6	64,8	–11,5	–9,9



Слика 7.6: Смањење емисије CO₂ при примени перспективних горива [5/]

7.1 ВОДОНИК

Водоник представља чисто гориво, како са гледишта састава, тако и са гледишта загађења, јер је, као што је познато, производ сагоревања водоника чиста вода. На овај начин настала количина воде је тако мала, да не доводи до поремећаја биолошке равнотеже. Водоник се може складиштити у гасовитом, течном и чврстом (у виду металних хидрида) стању и може се транспортовати бродом, железницом, као и цевоводима. Универзална применљивост водоника као горива у индустрији и домаћинствима за производњу електричне енергије, за моторна возила, ваздухоплове и др. отвара широке могућности, тако да са осталим својим карактеристикама водоник одговара условима који се постављају будућем гориву - носиоцу енергије.

Водоник представља изузетно квалитетно гориво, како са гледишта енергетских карактеристика (највећа концентрација енергије по маси), тако и са гледишта еколошких карактеристика. Док се код мотора при погону са моторним бензином или дизел горивом налази низ токсичних компоненти (угљенмоноксид, не-

сагорели угљоводоници, оксиди азота, сумпордиоксид и оловна једињења), при коришћењу водоника се јављају само оксиди азота.

Водоник је веома упаљив, јер поседује широке концентрационе границе паљења (водоник се пали у границама, које су око 15 пута шире од истих код бензина), што омогућава истовремено лакши старт хладног мотора, брже загревање, „еластичнији“ рад и постизање веће снаге у односу на класична горива. Одређене проблеме ствара могућност повратка пламена и површинског паљења.

Као озбиљан проблем јавља се ускладиштење водоника у возилу, односно резервоару. Полазећи од критеријума за резервоар једног возила да поседује:

- сразмерно прихватљив однос тежине и запремине,
- време пуњења резервоара од највише 10 min, и
- сигурност при удесима,

за складиштење водоника постоје у основи 4 могућности: резервоар под притиском, Ђуарова (Duar-ова) посуда, ускладиштење у облику металних хидрида и у оквиру других хемијских горива (амонијака, на пример).

Од свих описаних варијанти могућих резервоара најповољнији је свакако на бази металних хидрида (Табела 7.2) мада је све ове комбинације веома тешко поредити са бензином, који је са ове тачке гледишта идеалан и незаменљив (Табела 7.3).

Ускладиштење водоника у металима остварено је тек последњих година. Различити метали (најчешће у облику праха) реагују егзотермички са водоником стварајући металне хидриде. Повратна реакција ослобађања водоника из хидрида остварује се уз довођење топлоте или снижење притиска. Као први захтев јавља се довољан притисак водоника у резервоару и на нижим температурама, да би био могућ хладан старт. Гвожђе - титан хидриди налазе се у овом опсегу, али се због велике тежине не могу користити за главни резервоар. Метални хидриди на бази лантан-никла или ванадијум ниобијума су веома погодни за главни резервоар, али се као врло скупи и тешки, не примењују. Зато се примењује јефтинији и релативно лакши хидрид магнезијума, који водоник ослобађа тек на вишим температурама. Загревањем резервоара топлотом издувних гасова или воде за хлађење остварује се задовољавајући притисак водоника.

Наравно, неки још нерешени проблеми онемогућавају данас увођење водоника у примену. Не постоји још увек индустријски поступак за добијање довољних количина водоника са ценом која би била једнака или нижа од цене одговарајућих фосилних горива. Такође постоје још увек технички нерешени проблеми производње водоника и његовог транспорта у већој количини. Лака упаљивост и опасност од експлозије смеше водоника и ваздуха захтевају посебну пажњу са гледишта безбедности.

Табела 7.2

Врста горива	Запремина садржаја резервоара	Маса садржаја резервоара	Маса резервоара и садржаја
	dm ³	kg	kg
Бензин	75,7	53,1	68
Течни водоник	275,0	19,5	136
Гасовити водоник	1820,0	19,5	2090
Метал хидрид (Mg ₂ Ni-H)	132,0	233,0	284

Табела 7.3

Врста горива	Густина	Топлотна моћ	Еквивалент горива који одговара 75 dm ³ бензина		
	kg/m ³	MJ/kg	dm ³	kg	маса са резервоаром (kg)
Бензин	703	44,38	75	52,5	68
Течни пропан	510	44,40	99	50,6	85
Метанол	797	20,10	145	116,0	141
Етанол	795	26,66	109	87,1	107
Течни водоник	71	120,90	273	19,3	136

7.2 АЛКОХОЛИ

Примена алкохола као горива није новијег датума: коришћење горива овог типа познато је још од краја I светског рата - двадесетих година нашег века коришћен је алкохол у Немачкој, а у Швајцарској за време и непосредно после Другог светског рата.

Примена алкохола (метил и етил) као моторног горива интересантно је са више гледишта: са једне стране, као горива које може да смањи потрошњу бензина, користећи га у мешавини са бензином или потпуно чистог, с друге стране као чистијег горива са гледишта загађења околине токсичним компонентама издувних гасова мотора. Добијање метанола из угља истовремено омогућава чистији начин коришћења угља, јер је неупоредиво мање загађење атмосфере сагоревањем метанола у поређењу са сагоревањем угља. Проблем коришћења алкохола као горива за моторе поставља и питање производње довољне количине и питање цене. Неке особине алкохола дате су у Табели 5.8.

7.2.1 МОГУЋНОСТ ПРИМЕНЕ МЕТАНОЛА КАО МОТОРСКОГ ГОРИВА

Разматрајући карактеристике метанола као горива за ото моторе поређењем особина са бензином, може се доћи до следећих поставки:

- 1) Топлотна моћ метанола износи $19,6 \text{ MJ/kg}$ и у поређењу са бензином је приближно два пута мања, што значи да би коришћењем метанола за исти пређени пут била потребна два пута већа количина него са бензином, односно два пута већа запремина резервоара. Пошто у свом саставу садржи кисеоник, који се у процесу сагоревања може искористити, минимално потребна количина кисеоника, потребна за потпуно сагоревање, биће мања: за сагоревање 1 kg метанола потребно је свега $6,46 \text{ kg}$ ваздуха, док се за бензин иста вредност креће око 15 kg ваздуха по килограму бензина. Из истих разлога, међутим, топлотна моћ гориве смеше метанола и ваздуха и бензина и ваздуха се мало разликују: топлотна моћ смеше метанола и ваздуха износи око $3,05 \text{ MJ/kg}$, а бензина и ваздуха $2,95 \text{ MJ/kg}$. Концентрационе границе паљења метанола су шире у поређењу са бензином, па су стога повољније. Што се тиче отпорности према детонативном сагоревању метанол поседује изванредна својства. И поред тога што је одређивање октанског броја метанола било отежано одређеним недостацима CFR мотора низ истраживача је утврдио да се октански број налази у границама од 104 до 114, па чак и изнад. Овим је омогућено повећање степена компресије, па тиме и степена корисности мотора. Утицај садржаја метанола на побољшање путног октанског броја дато је на Слици 7.7 /16/.
- 2) Проблеми при коришћењу метанола стварају неповољне карактеристике испарљивости: притисак zasiћених пара, константна непроменљива температура испаравања (метанол као једињење одређених карактеристика не испарава као бензин у одређеном температурском интервалу, већ на одређеној температури - $64,7^{\circ}\text{C}$), осетно већа топлота испаравања и кородивно деловање. Такође, и поред ниског притиска zasiћених пара чистог метанола, у мешавини са моторним бензином он нагло расте и превазилази дозвољене вредности што може да доведе до појаве парних чепова.

Ови назначени проблеми су далеко мање изражени при коришћењу метанола у мешавини са бензином (видети Слике 5.36 до 5.39). Са релативно мањим реконструкцијама данас се метанол може успешно користити са 15-20% запреминског учешћа у смеси са бензином.

Приликом коришћења мешавина метанола и бензина јавља се нов проблем: раслојавање на бензин и метанол. Овој појави погодује снижење температуре и присуство воде у алкохолу (алкохол је хигроскопан!), али се може успешно

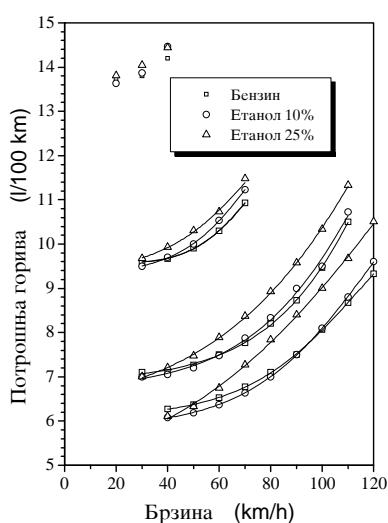
Слика 7.7: Утицај метанола на побољшање утичног октанског броја код бензина без оловних алкилања (возило Застава 101): 1-прејезно изоцарафинска фракција (69,4% *mass*); 2-прејезно олефинска фракција (49,8% *mass*); 3-прејезно ароаајска фракција (37,9% *mass*) /16/

спречити додавањем малих количина виших алкохола (пропил или бутил алкохола - Сlike 5.40 и 5.41).

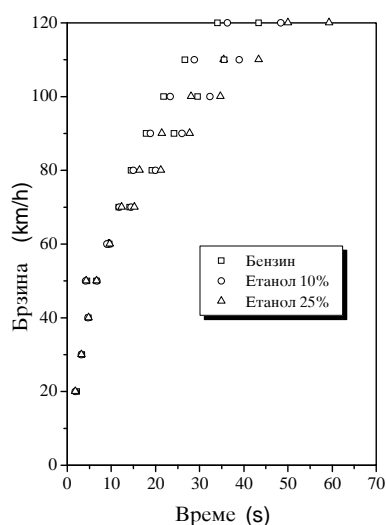
7.2.2 МОГУЋНОСТ ПРИМЕНЕ ЕТАНОЛА КАО МОТОРСКОГ ГОРИВА

Карактеристике етанола су сличне са одговарајућим код метанола, тако да опште претпоставке дате у претходном поглављу важе и за етанол. Ипак може се констатовати да етанол поседује нешто повољније карактеристике од метанола: већа топлотна моћ (26,78 MJ/kg), мања топлота испаравања, мања токсичност и др. Карактеристике етанола, као и мешавина са моторним бензином дате су у Табели 5.8 и на Сликама 5.36 до 5.39.

Једна од основних предности етанола је, међутим, у чињеници да се етанол успешно добија из низа производа и отпадака приликом прераде биомасе, чиме је један од веома важних критеријума за увођење нових горива - критеријум обновљивости (једино код етанола) испуњен.



Слика 7.8



Слика 7.9

Данас се још увек етанол користи у мешавини са моторним бензином (сем у Бразилу). Потрошња горива у различитим степенима преноса возила З-101, као и карактеристике залета за мешавине са 5, 10, 15 и 25% етанола дате су на Сликама 7.8 и 7.9 /17, 18/.

7.3 БИЉНА УЉА

Историјски посматрано обновљива нису новост, јер је од првих покушаја њиховог коришћења прошло скоро 100 година. Још 1900. године тржишту је понуђен мотор „на шпиритус“ /19/. У патентној пријави из 1912. године Diesel (Дизел) пише, могло би се рећи, историјску реченицу:

„Коришћење биљног уља као горива у данашњем тренутку може се оценити безначајним. Међутим, током времена и овакви производи могу бити значајни као што су данас производи добијени прерадом нафте.“

Обновљива горива нису од интереса само због дугорочног обезбеђивања сигурних извора енергије, већ и због неоспорних еколошких предности у односу на класична горива добијена прерадом нафте. Поред наведених, за развијене земље Европе, производња течних био горива би смањила постојеће пољопривредне вишкове.

Производња и коришћење биљних уља данас, у основи посматрано не би требало да буде проблем. Водећи, ипак, рачуна о чињеници да је постојећи комплекс „гориво-мотор-возило“ данас оптимизан по сва три критеријума (енергетски+економски+еколошки), примена био горива захтева ипак усклађивање са постојећом структуром возила и развој оптимизираних мотора за њих.

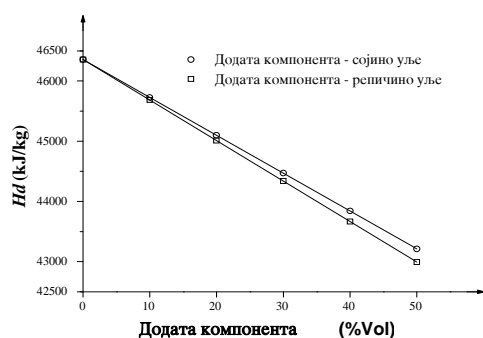
Од биљних уља данас се као гориво користе: репичино, сојино, сунцокретово, палмино уље и др. Основне карактеристике биљних уља дате су у Табели 7.4 /20, 21, 22, 23/.

Биљна уља се могу користити као гориво за дизел моторе и као гориво за котлове и пећи.

Како се неке карактеристике биљних уља осетно разликују од уобичајеног дизел горива, њихово коришћење на данашњем нивоу сазнања је или у мешавини са дизел горивом или после оплемењивања (естерификације) којим се добијају метил или етил естри - веома квалитетна био-дизел горива.

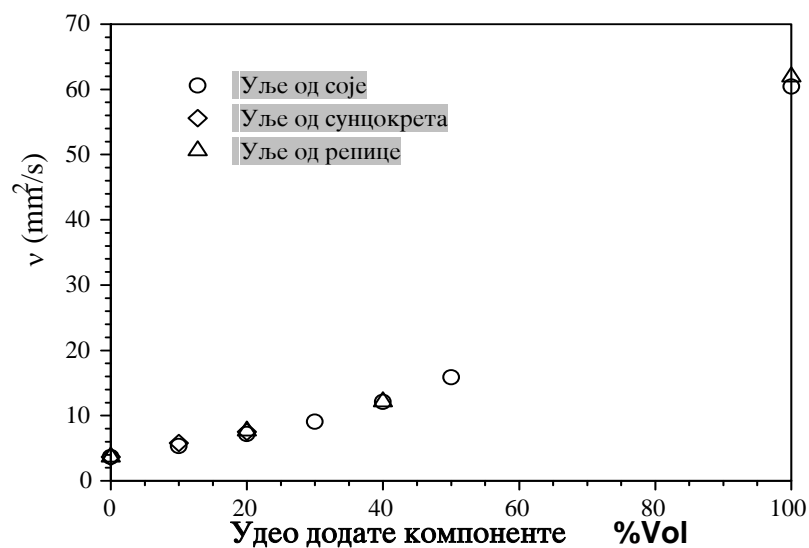
Неке особине мешавина дате су на Сликама 7.10, 7.11 и 7.12 /20, 21/.

На Сликама 7.13 и 7.14 дати су резултати естерификације биљних уља: као што се уочава исувише велика вискозност биљних уља се своди у границе предвиђене стандардом, а цетански број осетно расте /24/.

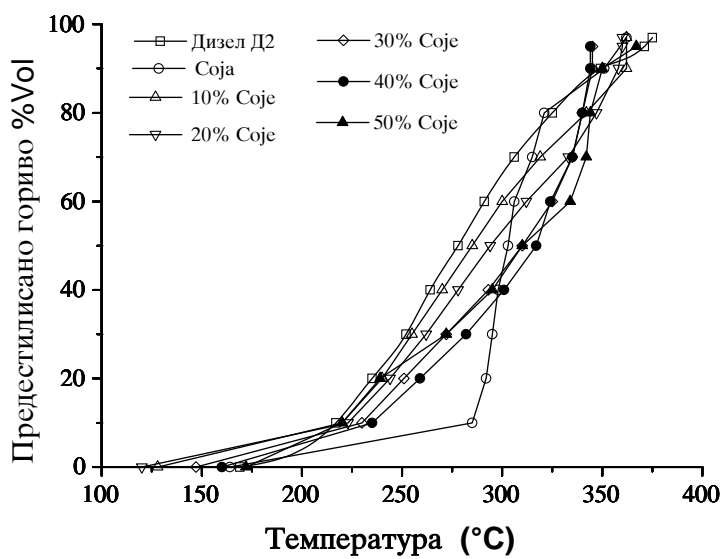


Слика 7.10

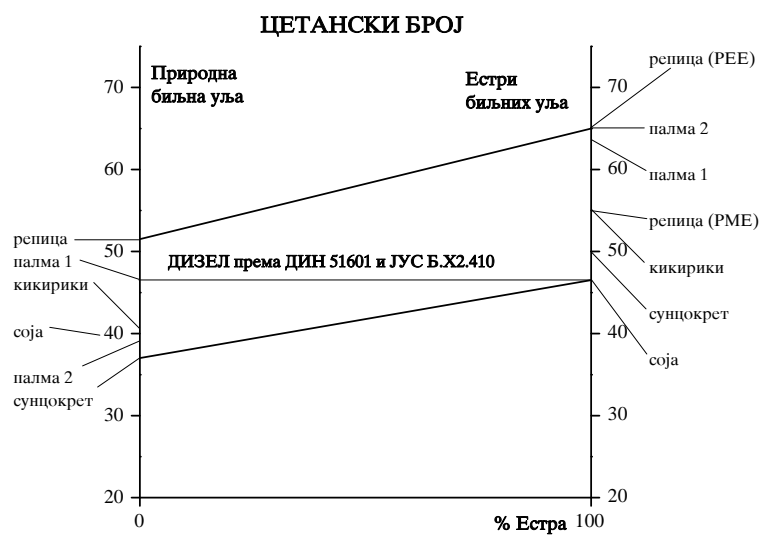
Табела 7.4



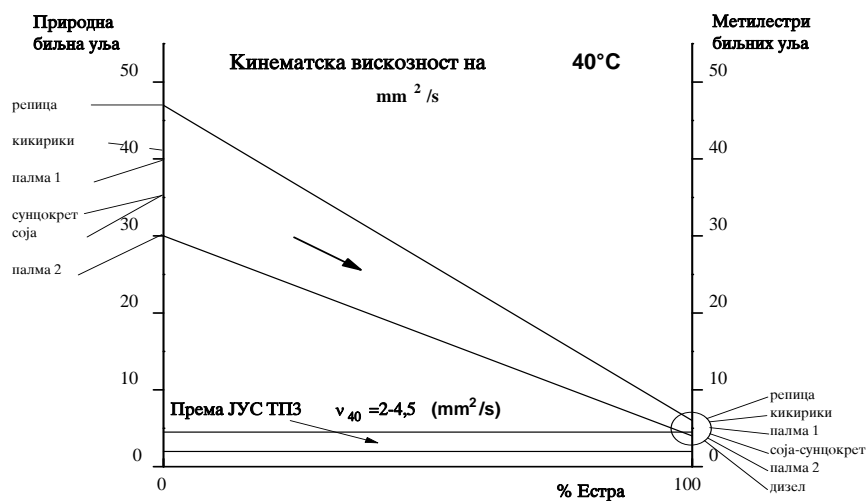
Слика 7.11



Слика 7.12



Слика 7.13



Слика 7.14

Литература

1. World Resources, 1990-1991: "Climate Change: A Global Concern", Chapter 2, Oxford University Press, New York, 1990.
2. A. King, B. Schneider: "die Globale Revolution, ein Bericht des Rates des Club of Rome", Spiegel Spezial 2/91, Hamburg, 1991.
3. A. A. Regutzky, J. Fabri: "Chancen Alternativer Kraftstoffe unter dem Besonderen Aspekt der Umweltverträglichkeit", Deutsche Shell AG, 1989.
4. М. Радовановић, М. Аџић, Д. Симић: "A new criteria for the automotive fuels", Mobility & Vehicle Mechanics, Vol. 19, No. 3, 1993.
5. T. Akiba: "Technologically Feasible Options For Consumption And Emission Abatement", Nissan European Technology Center, Брисел, 1992.
6. E. Tschegg, W. Wachter: "Wasserstoff als Energieträger", Österreichische Ingenieur Zeitschrift, Vol. 10, 11, 1977.
7. J. A. Casazza: "What can Hydrogen do for an Energy Company", Combustion, Vol. 11, 1976.
8. Grupa autora: "Wasserstoff als energieträger", Teekomstige mogelijkheden in Nederland, TNO, Hag, 1975.
9. ***: "Wasserstoff als Alternativ-Kraftstoff", Daimler Benz, Erdöl und Kohle, Vol. 28, 1975.
10. H. May, U. Hattingen, W. Jordan: "Thermodynamische Untersuchung des Ottomotoren Prozessen mit Wasserstoff als Zusatzkraftstoff", Motortechnische Zeitschrift, Vol. 4, 1976.
11. H. Buchner, Sauerer: "Wasserstoff als Alternativkraftstoff für Motoren", Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 4, 1976.
12. ***: "Wasserstoff als motorbrandstoff", Auto Service, Vol. 2, 1976.
13. R. M. Dell, N. J. Bridger: "Hydrogen-the ultimate fuel", Applied Energy, Vol. 1, 1975.
14. J. F. Baxter, R.R. Husted, L. O. Williams: "Future Hydrogen Production Methods", Applied Energy, Vol. 1, 1975.
15. W. E. Winsche, T. V. Sheehan, K. C. Hoffman: "Hydrogen a clean Fuel for Urban Area", Intersoc. Energy Conf., Boston, 1971.
16. М. Мандљ: "Метанол - гориво за моторе са унутрашњим изгарањем, Горива и мазива, Вол. 15, 1976.
17. М. Радовановић и др.: "Примена перспективних горива за моторна возила ЗЦЗ", Машински факултет, Београд, 1978.
18. М. Радовановић и др.: "Примена перспективних горива за моторна возила ЗЦЗ - II фаза", Машински факултет, Београд, 1980.
19. O. Syassen: "Chancen und Problematik nachwachsender Kraftstoffe", Teil 1, MTZ Motortechnische 53, 1992.
20. М. Радовановић, Д. Стојиљковић: "Biomass as an energy and environment friendly resource", UNESCO International Seminar Energy - environment policies "Central and East European approach", Букурешт, 1993.

21. М. Радовановић, Д. Стојиљковић, А. Крстеканић: „Анализа узорка репичиног уља и мешавина са дизел горивом и екстра лаким уљем за ложење“, Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1994.
22. М. Радовановић, З. Стевановић, Р. Савић: „Извештај о испитивању метил-естра добијеног из сунцокретовог уља“, Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1993.
23. М. Радовановић, З. Стевановић, Р. Савић: „Извештај о испитивању метил-естра добијеног из репичиног уља“, Интерни извештај Лабораторије за горива и сагоревање, Машински факултет, Београд, 1993.
24. О. Syassen: "Chancen und Problematik nachwachsender Kraftstoffe", Teil 2, MTZ Motortechnische 53, 1992.