В.П. ШОСТАК, О.П. ВОІНОВ, В.І. ГЕРШАНІК,
Б.М. ЛИЧКО, В.С. САМОХВАЛОВ

ОСНОВНІ ПАЛИВА

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ - ВИКОРИСТАННЯ

Миколаїв
2025

V.P. SHOSTAK, O.P. VOINOV, V.I. GERSHANIK,
B.M. LYCHKO, V.S. SAMOKHVALOV

MAIN FUELS

DISTRIBUTION - APPLICATION

ADMIRAL MAKAROV
NATIONAL UNIVERSITY
OF SHIPBUILDING

V.P. SHOSTAK, O.P. VOINOV, V.I. GERSHANIK,
B.M. LYCHKO, V.S. SAMOKHVALOV

HAUPTBRENNSTOFFE

VERBREITUNG - ANWENDUNG

NATIONALE UNIVERSITÄT
FÜR SCHIFFBAU
"ADMIRAL MAKAROW"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

В.П. ШОСТАК, О.П. ВОІНОВ,
В.І. ҐЕРШАНІК, Б.М. ЛИЧКО, В.С. САМОХВАЛОВ

ОСНОВНІ ПАЛИВА

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ • ВИКОРИСТАННЯ

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою НУК імені адмірала Макарова
як навчальний посібник

Миколаїв
Видавець: Ємельянова Т.В.
2025

УДК 621.431:629.5(075)
ISBN 978-966-2650-49-5
0-75

Рецензенти:
Білоусов Є.В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації ОНМУ;
Сербін С.І., доктор технічних наук, професор, директор Машинобудівного навчально-наукового інституту НУК імен адмірала Макарова;
Тітлов О.С. , доктор технічних наук, професор, зав. кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики ОНТУ.

Рекомендовано вченою радою НУК імені адмірала Макарова як навчальний посібник (протокол №*6* від «25» червня *2025 р.)*

Шостак В.П.
0-75 Основні палива: розповсюдження, використання. Навчальний посібник / В.П. Шостак, О.П. Воінов, В.І. Ґершанік, Б.М. Личко, В.С. Самохвалов; за ред. проф., FRINA В.П. Шостака. – Миколаїв: Ємельянова Т.В., 2025. – 111 с.

Подано матеріал стосовно твердого, рідкого, газоподібного та ядерного палива. Значна увага приділена розповсюдженню покладів нафти, газу й урану як сировини для основного палива, що наразі широко застосовується для одержання теплової енергії з подальшим її використанням. Крім того, наведена систематизована інформація щодо сучасного вироблення й використання деревного палива як дешевого та здавна відомого. Автори вважали за необхідне нагадати читачеві деякі відомості щодо хімічного складу паливної сировини та нафтопродуктів, а також щодо ядерних реакцій у водо-водяному атомному реакторі.

Призначено для студентів і курсантів, які навчаються за спеціальностями «Теплоенергетика», «Суднобудування» та «Морський та внутрішній водний транспорт». Також буде корисним фахівцям стаціонарної та суднової енергетики, які працюють у сфері проектування, виготовлення, технічного обслуговування й експлуатації паливо-енергетичних об’єктів.

Shostak V.P.
0-75 Main fuels: distribution, use. Textbook / V.P. Shostak, O.P. Voinov, V.I. Gershanik, B.M. Lychko, V.S. Samokhvalov; edited by prof., FRINA V.P. Shostak. – Mykolaiv: Yemelianova T., 2025 – 111 p.

This material covers solid, liquid, gaseous, and nuclear fuels. Considerable attention is given to the distribution of oil, gas, and uranium deposits as raw materials for main fuels, which are currently widely used to generate thermal energy for further application. The text also presents systematized information on the modern production and use of wood fuel, which is an inexpensive energy source known from ancient times. The authors found it necessary to remind readers of some details regarding the chemical composition of fuel raw materials and petroleum products, as well as the nuclear reactions in a pressurized water reactor.

The material is intended for students and cadets specializing in Thermal Power Engineering, Shipbuilding, and Marine and Inland Water Transport. It will also be useful for professionals in stationary and marine power engineering involved in the design, manufacturing, maintenance, and operation of fuel and energy facilities.

УДК 621.431:629.5(075)
ISBN 978-966-2650-49-5

© Шостак В.П., Воінов О.П., Ґершанік В.І., Личко Б.М., Самохвалов В.С., 2025

– Я знаю все, – сказала Вікіпедія.
– У мене все можна знайти, – похвастався Гугл.
– Я самий головний у світі! – заявив Інтернет.
– Без мене ви ніщо!! – осадила Електрика.
– Ну, ну... – тихо промовило Паливо.

ПЕРЕДМОВА

Майже на всій території земної суші люди потребують додаткового тепла – локально сонячних променів виявляється недостатньо. Отож за сивої давнини вони використовували паливо, тобто те, що можна знайти і горить, випромінюючи теплову енергію. З плином часу людство потребувало все більше цієї енергії, бо саме вона є альфа й омега в існуванні кожної людини та в задовільненні її все зростаючих потреб. Проте це дається незадарма. Отож стоїть питання, як задовольняти потреби з найменшими затратами.

Даний навчальний посібник спрямований озброїти майбутніх фахівців енергетичної сфери азами виготовлення та використання основних видів палива з метою бережливого використання сировинної бази, в першу чергу покладів нафти, газу та урану у земній корі, які нажаль не є необмеженими.

Автори мають надію, що використання в навчальному процесі такого посібника сприятиме економії часу при засвоєнні вкрай необхідної інформації по енергоресурсам на шляху їх професійної діяльності. Адже роздрібнених даних у цьому аспекті предостатньо в сучасному інформаційному просторі, які, як бачимо, не всі коректні.

Автори з вдячністю приймуть зауваження й побажання щодо цього навчального посібника, які можна надсилати за адресою: НУК, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, 54025 – для кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАЛИВО

Паливо − це горюча речовина, що виділяє при згорянні значну кількість теплоти, яка використовується безпосередньо в технологічних процесах чи перетворюється в інші види енергії. Для згоряння палива слугують різні технічні пристрої: топки, печі, камери згоряння тощо. Існує багато горючих речовин, проте до палива відносяться тільки ті, які в достатній мірі поширені в природі, причому здобування їх не пов'язано з великими затратами, а продукти згоряння не перевищують прийнятний поріг шкідливості. Таким вимогам відповідають речовини, основна частина яких − вуглець. До них відносяться корисні викопні органічного походження: буре вугілля, горючі гази, сланці, кам'яне вугілля, нафта, торф, а також деревина та рослинні відходи (солома, лузга тощо).

У ядерній енергетиці застосовуються поняття ядерного палива, ядра елементів якого діляться під дією нейтронів, виділяючи при цьому енергію в основному у вигляді кінетичної енергії осколків (уламків) поділу ядер і нейтронів, вона майже миттєво перетворюється у теплову при їх гальмуванні. Ядерне паливо являється альтернативою викопному органічному паливу. Зараз понад 10 % споживаної електричної енергії виробляється з використанням ядерного палива.

Найважливіша характеристика практичної цінності енергетичного палива – нижня теплота згоряння . Це кількість «корисної (зовнішньої)» теплоти, виділеної при згорянні певної маси палива; базова одиниця виміру − кДж/кг. Властивості палива в значній мірі визначаються його хімічним складом (наявними елементами, зазвичай у % по масі). Основні хімічні елементи: вуглець C, водень H, кисень O, азот N і сірка S. Крім того, у паливі можуть бути зола A і вода W. Основні характеристики деяких палив наведені у табл. 1.1.

Для порівняльної ефективності різних видів палива та їх сумарного врахування використовується так звана теплота згоряння умовного палива, яка прийнята, наприклад: у важкій промисловості 29300 кДж/кг; у машинобудуванні 42707 кДж/кг.

У деяких країнах прийняте інше значення теплоти згоряння умовного палива. Наприклад, у Франції воно становить 27300 кДж/кг.

Таблиця 1.1

Характерні палива і їх поелементний склад (середні значення)

Види палива	Склад, % (по масі)							$Q_н^р$, кДж/кг
	C	H	O	N	S	A	W	
Дрова……..	30,3	3,6	25,1	0,4	-	0,6	40	10200
Фрезерний торф….....	27,4	2,6	15,2	1,1	0,1	6,3	50	8100
Буре вугілля……..	43,7	3	13,5	0,6	0,2	6	33	15700
Кам'яне вугілля.....	55,2	3,8	5,8	1,0	3,2	23	8	2200

Продовження таблиці 1.1

Мазут (високосірчистий)	83	10,4	0,7	-	2,8	0,1	3	39200
Природний газ……....	74	25	-	1,0	-	-	-	57000

Найбільше використовується викопне паливо, основною складовою якого є вуглеводні. Вуглеводні − це хімічні сполуки, що складаються із водню та вуглецю. Наприклад, сира нафта, природний газ, вугілля тощо. Вуглеводні легко спалахують і являються основним джерелом енергії в світі.

Походження вуглеводнів у природі неоднозначне. Одна гіпотеза − неорганічне походження (чимало прихильників); інша − органічне походження. В певний час саме І.Д.Менделєєв вважав, що вуглеводні утворилися у товщі земної кори, коли залізомісткі породи контактували з водою при високому тиску й значній температурі. Наприклад, карбід заліза вступав у хімічну взаємодію з водою, внаслідок якої утворювався оксид заліза і вуглеводень:

$$2FeC + 3H2O = Fe_2O_3 + C_2H_6.$$

Більш обґрунтованою є гіпотеза про органічне походження викопного палива. Воно являє собою перетворені останки рослин і тварин, які жили мільйони років назад. Вугілля утворювалося з дерев і інших рослин, а нафта і природний газ − із водоростей і тварин.

Ймовірно, першим із викопних палив став використовуватися торф − дуже м’яке, не повністю створене вугілля, яке залягає у поверхні в помірних поясах Землі. Свіжий торф містить до 90 % води, тому, щоб стати придатним для використання, тобто стати паливом, він підлягає висушуванню. Крім того, згораючи він дає відносно мало теплоти і при цьому сильно коптить. Його головні недоліки: 1) низька теплота згоряння; 2) складний процес очищення.

Згідно з домінуючою гіпотезою походження викопного палива торф протягом багатьох епох спочатку перетворювався в м’яке, зазвичай коричневе (буре) вугілля, а потім у більш тверде бітумізоване вугілля чорного кольору. Для утворення із нього кам’яного вугілля (антрациту, самого твердого із усіх видів вугілля) потребуються мільйони років.

Вуглець є основною горючою частиною вугілля. Чим більше його у складі, тим вище теплота згоряння. Вміст вуглецю за масою у вугіллі лежить в межах 43...95 %. Максимальне значення відноситься до антрациту. Водень міститься в невеликій кількості – 2...6 %. Кисень входить до складу у вигляді різних сполук, у тому числі з горючими елементами, що знижує кількість теплоти, яка виділяється при спалюванні. Тому кисень у вугіллі відноситься до баласту. Азот також, хоча вміст його незначний – не перевершує 2 %.

Під мінеральною частиною вугілля розуміють негорючі домішки. Розрізняють внутрішні мінеральні домішки, які утворилися при формуванні покладів вугілля,

і зовнішні, які попадають до вугілля під час його видобутку з прилеглих пластів породи. Внутрішні на відміну від зовнішніх рівномірно розподіляються у вугільному паливі, тому не можуть бути відокремлені від горючої маси. При спалюванні вугілля з мінеральних домішок утворюється зола А (див. табл. 1.1.). Значна частка золи міститься у кам'яному вугіллі, вона сягає 23 % і більше. При горінні вугілля в зоні високої температури (800...1000 °С) відбувається часткове або повне розплавлення золи. Значна частка її у твердому стані видаляється з нижньої частини топки. Це ускладнює застосування вугілля, особливо на водному транспорті, хоча в недалекому минулому вугілля було основним паливом на суднах.

Волога, як і мінеральна частина, є баластом палива. У бурому вугіллі вона становить W = 33 % (див. табл. 1.1.). Загалом W і А зменшують теплоту згоряння вугілля і наразі суттєво обмежують його застосування.

Використання як палива бурого вугілля, яке відносно легко видобувати, супроводжується також, як і торф, викидами значної кількості сажі й копоті, що сильне забруднює довкілля, а теплота згоряння не набагато більше ніж у торфу.

Кам'яне вугілля – тверда речовина чорного кольору, без запаху, крихка, важча за воду, нерозчинна у воді, горить яскравим полум'ям. Воно використовується як технологічна, енерготехнологічна і енергетична сировина (на ТЕС, в побуті тощо), при виробництві коксу і напівкоксу з отриманням великої кількості хімічних продуктів (нафталін, феноли, пек тощо), на основі яких одержують добрива, пластмаси, синтетичні волокна, лаки та фарби. Також застосовується при виробництві штучного каучуку, гуми, ліків, тканин, парфумів і димного пороху.

У першій половині минулого століття у якості палива широко застосовувалось кам'яне вугілля. Це тверда, горюча корисна копалина, яка утворюється з органічних залишків рослин, що зазнали змін під впливом високого тиску та температури. Вміст вуглецю в кам'яному вугіллі, залежно від його сорту, лежить в межах 75 – 92 %. Містить до 12 % вологи (3 – 4 % внутрішньої). Має вищу теплоту згоряння в порівнянні з бурим вугіллям. Містить до 32 % летких речовин, завдяки чому непогано спалахує. Ця корисна копалина – біогенного походження; належить до групи гумолітів; є проміжним різновидом між бурим вугіллям і антрацитом. Крім вуглецю, у кам›яному вугіллі – 3,4 – 6,0 % водню, 1,2 – 1,6 % азоту, 1,6 – 1,7 % кисню, а також мінеральні домішки у вигляді глинистих мінералів або уламків, прожилків з сульфідів заліза, карбонатів тощо; в незначній кількості у вигляді сульфітів входить сірка. Внутрішня зольність незначна (1 – 3 %), а зовнішня коливається в широких межах (від 5 до 30 %). Густина кам›яного вугілля складає 1,3 – 1,5 т/м^3.

У кам'яновугільних пластах і породах містяться вуглеутворюючі (C, H, O, N, Si, Al, Ca, Mg, Na, K, S) і попутні хімічні елементи. Усі хімічні елементи від часток до сотень грамів на тонну розсіяні по всій масі вугілля у вигляді солеподібних і комплексних з›єднань з органічною речовиною тощо. Вища теплота згоряння, в залежності від марки, становить 30500 – 36800 кДж/кг.

Залягає кам'яне вугілля у формі пластів і лінзовидних покладів різної потужності – від десятків см до декількох десятків і сотень м, на різних глибинах – від виходів на поверхню до 2500 м і глибше.

В Україні використовується стандартизована класифікація вугілля. Кам'яне вугілля поділяють на 10 основних марок:

- довгополуменеве (Д);
- газове (Г);
- газово-жирне (ГЖ);
- жирне (Ж);
- коксове жирне (КЖ);
- коксівне (К);
- коксове друге (К2);
- слабкоспікливе (СС);
- опіснене спікливе (ОС);
- пісне (П).

Від марки Д до марки П вміст вуглецю послідовно збільшується від 76 до 92 %.

Останній варіант класифікації вугілля унормовано за стандартом України «Вугілля буре, кам'яне та антрацит» (ДСТУ 3472-96).

Антрацит – це блискучий різновид вугілля, що містить біля 95 % вуглецю і має низький відсоток домішок, високу електропровідність, щільність і слабкі магнітні властивості.

Антрацит – найдревніший із викопних видів вугілля; у нього найбільш висока ступінь вуглефікації. Це найкращий сорт кам›яного вугілля, яке відрізняється чорним кольором, сильним блиском, великою теплотворною здатністю. Зразки антрациту розрізняються по гранулометричному складу, щільності, твердості.

Антрацит використовується як паливо чи сировина для металургійної, хімічної та енергетичної промисловості, а також для виробництва адсорбентів і фільтруючих матеріалів, для механічних фільтрів, електродів, електрокорундів, мікрофонного порошку тощо.

Видобуток кам'яного вугілля є трудозатратним (залягає на глибинах до 2,5 км і більше) і досить небезпечним, що обмежує використання його як палива. Таке вугілля цінується перш за все як джерело кокса (твердої, пористої форми вуглецю), яке утворюється у процесі нагріву вугілля без доступу кисню. Кокс використовується для виплавки сталі.

Найбільші розвідані поклади кам'яного вугілля (млн т) у світі належать США (108501), за ними йдуть Росія (49088), Китай (62200) і Австралія (37100). В Україні переважна частина запасів кам'яного вугілля (40073 млн т) зосереджена в Донецькому вугільному басейні, який розташований на територіях Дніпропетровської, Донецької, Луганської та Харківської областей.

Вважається, що за запасами вугілля Україна посідає провідне місце у світі.

Найбільшим виробником кам'яного вугілля у світі є Китай: видобувається близько 46 % світового вугілля. За ними йдуть США (26,6 %), Росія (17,6 %), КНР (12,8 %) і Австралія (8,6 %).

На даний час застосування торфу і вугілля як палива носить обмежений характер, оскільки викопне рідке і газоподібне паливо (нафта та газ) їх суттєво

перевершує. У зв'язку з цим торф і вугілля надалі у посібнику окремо не розглядаються.

Родовища нафти широко розповсюджені у земній корі − як океанській, так і материковій. Із цієї темної суміші рідких вуглеводнів виробляються різні види палива й багато споживчих товарів.

Як зазначалось вище, нафта має органічне походження (!?) і утворилась переважно із останків в дрібних рослин і тварин. Вони частково були перероблені бактеріями, а потім поховані під товстими шарами осадкових порід, таких як глина, які з плином часу все більше ущільнювались. Тиск і утворюване ним тепло перетворювали органічну речовину у нафту та газ (в основному метан). У процесі подальшого стискання вони просочувалися через породи та тріщини в породах і відкладалися у пустотах й осадкових породах між шарами водонепроникних порід.

Зазвичай нафта і газ знаходяться у водонепроникних породах, оточених герметизуючими шарами. Типовий колектор нафти зображений на рис. 1.1. Він являє собою антиклиналь (випуклу складку), де під водонепроникним куполом знаходяться газ і нафта.

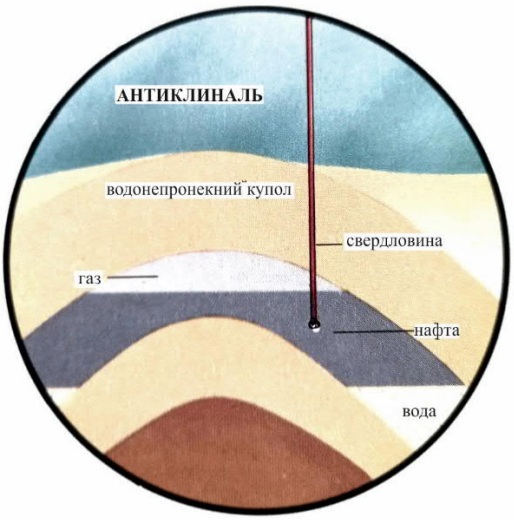


Рис. 1.1. Залягання нафти і газу у земній корі

Основна частина найбагатших нафтових покладів знаходиться під товстим шаром породи, до яких можна добратися тільки за допомогою широкомасштабного й дороговартісного буріння.

Нафта залягає на глибинах від десятків метрів до 5 − 6 км. Однак на глибинах понад 5 км переважають газові і газоконденсатні поклади з незначною кількістю легких фракцій. Максимальна кількість покладів нафти розташовується на глибині 1 − 3 км.

Світові розвідані запаси нафти оцінюються тисячами млрд барелів (1 барель дорівнює ~159 л). За оцінками Міжнародного енергетичного агентства пік споживання нафти досягне у 2030 році, а потім піде на спад. За підрахунками вчених, доступними для видобутку на планеті залишилося близько 1,6 трлн барелів нафти. Це означає, що запасів нафти вистачить на набагато більший термін, ніж 50 років. За прогнозами вичерпання планетних запасів природного газу слід очі-

кувати у 2050 − 2055 рр. Пошук і розвідка нафтогазових родовищ продовжується. Вважається багатьма, що нафта та природний газ є відновлювальними природними ресурсами.

Найпоширенішим паливом, що застосовується в даний час, є рідке паливо, що виготовляється шляхом переробки нафти. Її поклади у земній корі будуть достатні людству щонайменше на сотню років.

Як відмічалось вище, при спалюванні вуглеводнів з димовими газами в атмосферу викидається так званий парниковий газ. До основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться:

- пара води (H_2O);
- вуглекислий газ (CO_2);
- озон (O_3);
- оксиди азоту (NO_x);
- метан (CH_4);
- хлорофлуоровуглеводні.

Парникові гази здатні сильно поглинати інфрачервоне випромінювання, що спричиняє парниковий ефект. Основним його підсилювачем є CO_2.

У 2024 році концентрація вуглекислого газу, який вважається основною складовою парникових газів, в атмосфері вперше в історії людства досягла максимального рівня. Біля 67 % викидів парникових газів спричиняє енергетика і спалювання викопних видів палива.

Отже, викиди парникових газів, спричинених людською діяльністю, а саме використанням палива, підвищують глобальну температуру, що є ключовою причиною зміни клімату.

У зв’язку з цим останнім часом багато уваги приділяється декарбонізації в енергетичній сфері. Декарбонізація, з одного боку, − це заходи, покликані скоротити викиди парникових газів, з іншого − це процес зменшення викидів CO_2 шляхом переходу від викопного палива до безвуглецевих джерел енергії. Тому держави та компанії, після підписання Паризької кліматичної угоди у 2015 році щодо декарбонізації, прагнуть зменшити, або зовсім уникнути викидів CO_2. Але їх прагнення не підтверджуються відповідними діями, і викиди CO_2 збільшуються щорічно.

Відомо, що кожний вид застосованого палива по-різному впливає на карбонізацію довкілля. На даний час серед палив домінують вуглеводні. Ступінь їх карбонізації може бути розрахований за наступною формулою:

$$\overline{C} = \frac{n_C}{n_C + n_H - 2n_O} \cdot 100\ \%,$$

де n_C, n_H, n_O − кількість атомів відповідно вуглецю, водню і кисню у молекулі палива.

Формула придатна як для «чистих» вуглеводнів, так і для таких, що містять у молекулі кисень. Вона виходить з того, що при повному спалюванні палива утворюється в углекислий газ (діоксид вуглецю CO_2) та вода (H_2O).

У табл. 1.2 для характерних викидів палива наведено склад молекул і розрахований за вказаною вищу формулою ступінь карбонізації. Крім вуглеводнів, для порівняння вказаний ступінь карбонізації і для водню, антрациту та деревини.

Таблиця 1.2

Ступінь карбонізації палива C

Паливо	Формула	C, %
Водень	H_2	0
Метан	CH_4	20
Етан	C_2H_6	25
Пропан	C_3H_8	27
Бутан	C_4H_{10}	29
Високооктановий бензин 92, 95, 98	C_8H_{18}	31
Нафта (очищена)	C_nH_{2n+2}	27…32
	C_nH_{2n}	33
Метанол	CH_3OH	33
Етиловий спирт	C_2H_6O	33
Ацетилен, бензин	C_2H_2, C_6H_6	50
Вугілля – антрацит	95 % – C; 5 % – домішки	99
Деревина (целюлоза)	$C_6H_{10}O_5$	100

Очевидно, що чим вищий ступінь карбонізації палива, тим більше викидів вуглекислого газу. Для наочності на рис. 1.2 наведена шкала ступеня карбонізації для певних вуглеводнів і деревини (целюлози), вугілля (антрациту) та водню.

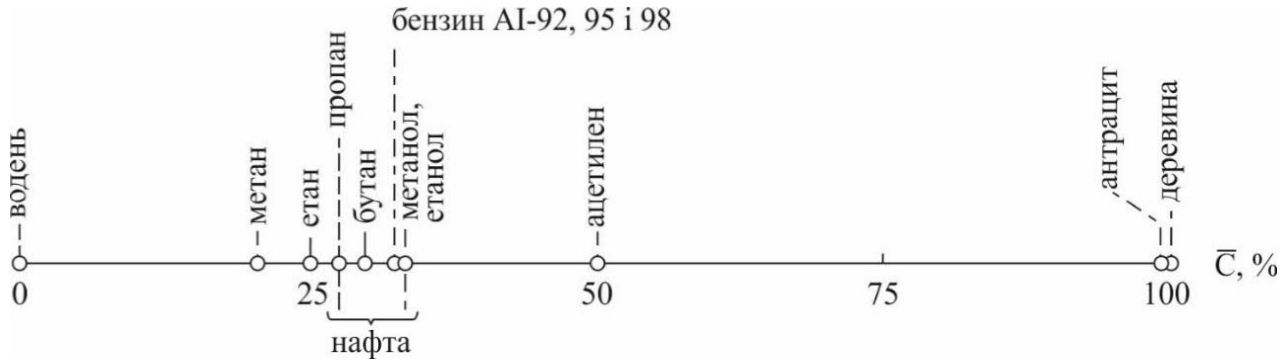


Рис. 1.2. Ступінь карбонізації різних видів палива (по відношенню до водню)

***

Що таке паливо простими словами

Паливо – це те, що за певних умов задовольняло, задовольняє та задовольнятиме потреби людини у тепловій енергії.

Питання для самоконтролю по розділу 1

1. Чим відрізняється паливо від горючих речовин?
2. Який хімічний елемент відіграє головну роль у найпоширенішому на сьогодні паливі?
3. Який вид енергії виділяється безпосередньо при поділі ядер важких елементів?
4. Яка характеристика палива є найголовнішою?
5. Які хімічні елементи складають основу органічного палива?
6. Чим відрізняється торф від бурого вугілля?
7. Чим відрізняється кокс від антрациту?
8. Яке паливо найпоширеніше в даний час?
9. Що таке «ступінь карбонізації палива» і про що він свідчить?
10. Що таке «декарбонізація» в енергетиці?

2. НАФТОВЕ ПАЛИВО

«Нафтове паливо або Жидкое нефтяное топливо (англ.: Liquid oill fuel)» згадується у нормативному документі «ДСТУ 3437-96 НАФТОПРОДУКТИ Терміни». Нафтове паливо − це нафтопродукт, який використовується як джерело енергії та задовольняє енергетичні потреби шляхом перетворення хімічної енергії вуглеводнів в теплову з застосуванням повітря, а саме кисню, що в ньому міститься.

2.1. Розповсюдження нафтового палива

Із нафти шляхом її переробки одержують такі основні види рідкого палива: бензин, гас і мазут. Перші два відносяться до дистилятних палив, третє – до залишкових (важких) палив. Ці види палива використовуються в наземному, водному та повітряному транспорті, а також у мобільних електростанціях і завдяки зручності у застосуванні витісняють все більше тверде паливо. Отже, в даний час рідке паливо як продукт переробки нафти широко застосовується в паливно-енергетичній галузі промисловості та на транспорті.

Зауважимо, що з нафти виробляють різні розчинники, технічні масла, бітуми та високотехнологічні матеріали, в тому числі пластмаси і тканини для одягу, асфальт для дорожнього покриття тощо, та все ж основне її застосування - сировина для палива.

Бензин використовується перш за все як моторне паливо. Для підвищення детонаційної стійкості до нього додають, зокрема, тетраетилсвинець, ізооктан та ін. Автомобільний бензин – це суміш рідких вуглеводнів, яка википає при температурі 30...215 °С та використовується як паливо для двигунів внутрішнього згоряння з примусовим запалюванням паливоповітряної суміші. Одним з поширених видів палива є бензин АІ-95. Він призначений для забезпечення роботи двигунів карбюраторного і інжекторного типів. Використовується також не тільки для роботи автомобілів, але й різної садової, будівельної техніки: бензопили, бензогенератори, тримери тощо. Певні сорти бензину можуть містити миючі речовини, що нейтралізують іржу у вузлах паливної системи та видаляють нагар у двигуні.

Кожна марка бензину має умовне позначення, в яке входять букви і цифри, наприклад АІ-98. Буква А означає, що бензин автомобільний, буква І показує, що визначення детонаційної стійкості вироблено за дослідним (рос. исследовательским) методом, а цифри – мінімальне октанове число.

Гас (керосин) – це горюча рідина, продукт перегонки нафти. Він широко використовується як авіаційне пальне для турбогвинтових, турбореактивних і реактивних двигунів. Застосовується також як паливо для приготування їжі, освітлення, обігріву тощо. Гас авіаційний є продуктом прямої перегонки нафти, та ретельного очищення. Його склад – легкі фракції; це прозора жовтувата рідина із блакитним відливом. Питома вага (густина) − 0,820…0,840 кг/л, температура кипіння − 150…300 °С.

Для порівняння у табл. 2.1. наведена густина деяких речовин.

Таблиця 2.1

Середнє значення густини рідких і твердих речовин

Речовина	Густина, кг/м^3
Вода прісна (t=4 °С)	1000
Вода морська	1030
Гас	830
Бензин	710
Нафта	800
Молоко	1030
Лід	900
Пісок	1500
Деревина:	
сосна	400
дуб	800
Залізо	7800

Мазут – це рідкий продукт темно-коричневого, іноді чорного кольору, залишок після відгонки із нафти чи продуктів її вторинної переробки бензинових, керосинових і інших фракцій. При первинній переробці нафти вихід мазуту становить більше половини із розрахунку на початкову нафту. У зв'язку з поглибленою подальшою переробкою нафти мазут у все більших масштабах перегоняють під вакуумом у більш легкі фракції.

Загалом мазути представляють собою суміш вуглеводнів (з молекулярною масою від 400 до 1000), нафтових масел (з молекулярною масою 500 – 3000 і більше), асфальтенів, карбенів, карбоїдів і органічних сполук, що містять низку металів, зокрема ванадій V, нікель Ni, залізо Fe, магній Mg, натрій Na і кальцій Ca. Відношення щільності мазуту до щільності води при 20 °С складає 0,95 – 1,06. Хімічний склад мазуту такий: вуглець (С) – 83...87 %, водень (Н) – 10...12 %, сірка (S) – 1...3,5 %, азот і кисень (N і О) – 0,2...1,9 %). Температура займання мазуту становить 91 – 355 °С. Під цим показником розуміють температуру, при якій у повітрі утворюється суміш парів пального й повітря, що починає горіти, якщо поруч знаходиться джерело вогню. Температура самозаймання мазуту лежить в межах 500 – 600 °С. Мазут втрачає плинність при температурах −5…+40 °С; для поширених марок 10…25 °С.

Мазут застосовується як паливо для парових котлів, котельних установок (котельне паливо) і промислових печей (наприклад, мартенів). Наразі це найпоширеніший вид палива, що використовується у житлово-комунальному господарстві. Крім того, мазут, як продукт нафтопереробки, має широке застосування в якості палива для електростанцій, кораблів, мобільних печей та ін. Мазут використовується для виробництва флотського мазуту, важкого моторного палива, машинних масел тощо.

Серед вуглеводнів мазут найдешевше паливо; він знаходить досить широке застосування у всіх сферах людської діяльності. Проте він за звичайних умов дуже в'язкий (200...700 сСт), тому його, як правило, підігрівають для зменшення в›язкості.

Для ефективного спалювання його *обов'язково* підігрівають перед подачею до рідкопаливних форсунок.

Зауважимо, що мазут шкідливий для здоров'я людини, навколишнього середовища та тварин, в основному із-за вмісту в ньому токсичних речовин, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні. Він може викликати шкіряні захворювання, захворювання дихальних шляхів і, в гіршому випадку, онкологічні захворювання. Крім того, мазут забруднює ґрунт, воду й повітря, що негативно впливає на екосистему.

Мазут в деяких випадках виступає у ролі матеріалу для одержання гудронів, полугудронів й машинних масел. Гудрон – це в'язка рідина чи твердий асфальтоподібний продукт чорного кольору; він містить парафінові, нафтенові та ароматичні вуглеводні (45 – 95 %), асфальтени (3 – 17 %), а також нафтові смоли (2 – 38 %). Гудрон використовується для дорожніх, покрівельних і будівельних бітумів, малозольного коксу, змащувальних масел, паливних газів, моторних палив, а також коктейлю Молотова. Завдяки високій в'язкості гудрон застосовується як ущільнювач й герметик.

Отже, основні види рідкого палива – бензин, гас і мазут мають саме широке застосування, і нафта як сировина для них потребує особливої уваги.

2.2. Нафта: визначення, властивості, видобуток, розповсюдження

Нафта (через тур. neft, от перс. нефт) – це горюча корисна копалина, яка являє собою складну суміш вуглеводнів різної молекулярної маси з невеликою кількістю органічних кисневих, сірчистих, азотних і деяких інших хімічних сполук, має вигляд густої оліїстої (маслянистої) рідини із специфічним запахом. Її забарвлення червоно-коричневе, чи жовто-зелене, чи чорне; іноді зустрічається безбарвна нафта. З іншого боку, нафта являє собою суміш рідких парафінових, нафтових і ароматичних вуглеводнів, у якій розчинені газоподібні та тверді вуглеводні.

Загалом нафта – це легко займиста рідина з температурою спалаху від −35 до +120 °С, яка залежить від фракційного складу та вмісту в ній розчинених газів. Її нижча питома теплота згоряння 43700 – 46200 кДж/кг. Вона розчинна в органічних розчинниках. У звичайних умовах нерозчинна у воді, але може утворювати з нею стійкі емульсії. Щільність нафти при 20 °С і 1 бару лежить у межах 830 – 895 кг/м^3. Легка нафта має щільність 831 – 850, середня 850 − 870, важка 871 − 895 і бітумна більше 895 кг/м^3.

Загальна формула нафти, виходячи з того, що вона – це сума молекул вуглеводнів, може бути подана у такому спрощеному вигляді

$$\Sigma\,(C_nH_{2n+2})_m + \Sigma(C_nH_{2n})_k + ...,$$

де n = 1, 2, 3… − кількість атомів вуглецю (карбону), а $2n+2$ = − кількість атомів водню (гідрогену) у молекулі певного вуглеводню; m і k − той чи інший вуглеводень.

Зазначимо, що вуглеводні з важкими молекулами мають дещо інші формули:

$$C_nH_{2n-2},\ C_nH_{2n-4},\ C_nH_{2n-6}\ \text{і т.д.}$$

Таким чином, нафта - це суміш хімічних сполук (кожна в певній кількості молекул) вуглецю і водню в різних співвідношеннях, які обумовлені особливістю нафтового родовища. Якщо в молекулах вуглеводнів n = 1– 4, то це гази, якщо n = 5 – 17 − то це рідини і якщо $n \geq 18$ − то це тверді речовини.

Наприклад, деякі хімічні формули вуглеводнів мають такий вигляд:

C_2H_6 – *етан;* C_8H_{18} – *ізооктан;* C_3H_8 – *пропан;*
$C_{15}H_{32}$ –*пентадекан;* $CH_3CH(CH_3)CH_3$ – *ізобутан.*

Нафта складається переважно з вуглеводнів з п’яти- і шестичленною структурою. У висококиплячих фракціях нафти трапляються і поліциклічні вуглеводні, які складаються з двох-чотирьох циклів (кілець). Елементний склад нафти (%): вуглець 80 – 88, водень 11,0 – 14,5, сірка 0,01 – 6,9 (рідко до 8), кисень 0,005 – 0,7 (рідко до 1,2), азот 0,001 – 1,8. Переважають малосірчисті нафти (до 0,5 % S), проте біля третини усієї нафти, що видобувається у світі, містить понад 1% S.

Оскільки нафта – це суміш вуглеводнів різної молекулярної маси (див. рис. 2.1), що мають різні, але близькі температури кипіння, то перегонкою її розділяють на окремі нафтопродукти. При цьому одержують не «чисті» речовини з однаковими молекулами, а фракції з певними інтервалами температур кипіння. При переробці нафти одержують світлі (дистилятні) продукти та, наостанок, мазут як залишковий продукт:

гази, $t_{кип}$ = 28 – 90 °С;
бензин, $t_{кип}$ = 90 – 200 °С;
лігроїн, $t_{кип}$ = 150 – 230 °С;
гас, $t_{кип}$ = 300 °С;
легкий газойль (солярове масло), $t_{кип}$ 230 – 350 °С;
важкий газойль, $t_{кип}$ = 350 – 430 °С;
мазут, $t_{кип}$ > 430 °С.

Вуглеводневий склад нафти неоднаковий в різних родовищах. В окремих родовищах домінують нафти переважно з бензиновими та гасовими фракціями. В інших переважають нафтенові вуглеводні – до 75%. Часто нафти характеризуються значним вмістом твердих вуглеводнів.

Кисневі сполуки містяться в нафті у вигляді нафтенових кислот і асфальтово-смолистих речовин; на їх частку приходиться понад 90 % кисню. До сірчистих сполук відносяться сірководень, меркаптани, сульфіди та ін. Азотні сполуки – це в основному гомологи піридина, гідрохіноліна тощо. Компонентами нафти, як відзначалося вище, являються також гази, розчинені у нафті, вода і мінеральні солі. Гази складаються із вуглеводнів, що містять у ланцюгу 1 – 4 атома вуглецю (див. рис. 2.1), але їх вміст не перевищує 3 % (по масі). Вміст золи (мінеральних речовин) зазвичай не більше десяти часток процента. В золі знайдено безліч елементів, зокрема Ca, Mg, Fe, Al, Si, V, Na і ін.

Гази	Світлі продукти			Мазут		
CH_4 – C_5H_{12}	Бензин	Гас	Газойль	Масла: легкі солярові	Масла: змащувальні (машинні)	Гудрон
Число атомів вуглецю						
1 – 5	6 – 10	11 – 13	14 – 17	18 – 25	26 – 35	36 – 60 і >
Середня молекулярна вага						
16 – 72	150	156 – 210		220	500	≥ 1000
Температура кипіння при нормальному тиску, °С						
100 200 250 300 400 500						

Рис. 2.1. Склад нафти у надрах (без кисневих, сірчистих і азотних сполук)

За щільністю нафти підрозділяються на три групи: легкі (870 кг/м^3), середні (871 – 910 кг/м^3) і важкі (понад 910 кг/м^3); на легкі приходиться біля 60 %, на важкі біля 6.

Температура застигання коливається від +30 до –60 °С і залежить від вмісту парафіну у нафті. Теплота згоряння лежить в межах 43700 – 46200 кДж/кг. Температура займання коливається від –35 до 120 °С в залежності від фракційного складу. За вмістом сірки нафти діляться на малосірчисті (до 0,5 % S), сірчисті (0,5 – 2 % S) і високосірчисті (понад 2 % S).

Сира неочищена нафта містить різноманітні домішки і не використовується безпосередньо (рис. 2.2). Видобувається з нафтових родовищ без будь-якої обробки. Нафта є компонентом сирої нафти. Вона розповсюджена в осадковій оболонці Землі; утворюється разом з газоподібними вуглеводнями зазвичай на глибинах понад 1,2 − 2 км. Поблизу земної поверхні нафта перетворюється в густу мальту, напівтвердий асфальт тощо. Поклади нафти і газу – це природнє скупчення рідких і газоподібних вуглеводнів в одному або кількох пластах-колекторах з єдиною гідродинамічною системою. У світі відомо понад 30 тис. родовищ нафти; із них 15 – 20 % газонафтові. Найбільше родовище нафти знаходиться у Саудівській Аравії (Гавар, 10140 млн.т). Значні скупчені запаси нафти, крім Саудівської Аравії, у Кувейті, Ірані та Іраку.

Запаси нафти в Україні становлять понад 84 млн т. Приблизно 80 % її території перспективні для розробки нафти і газу. Великі родовища нафти знаходяться на шельфі Чорного моря. У Східному нафтогазоносному регіоні зосереджено більше 51 % загальних запасів, у Західному та Південному – ~36 та 13 % відповідно, що на думку фахівців, вистачить Україні щонайменше на пів століття.

Нафта може бути піднята на поверхню різними способами. Інколи тиск навколишньої води чи газу виштовхує нафту в свердловину і на поверхню. При відсутності природного тиску нафта відкачується на поверхню насосами.

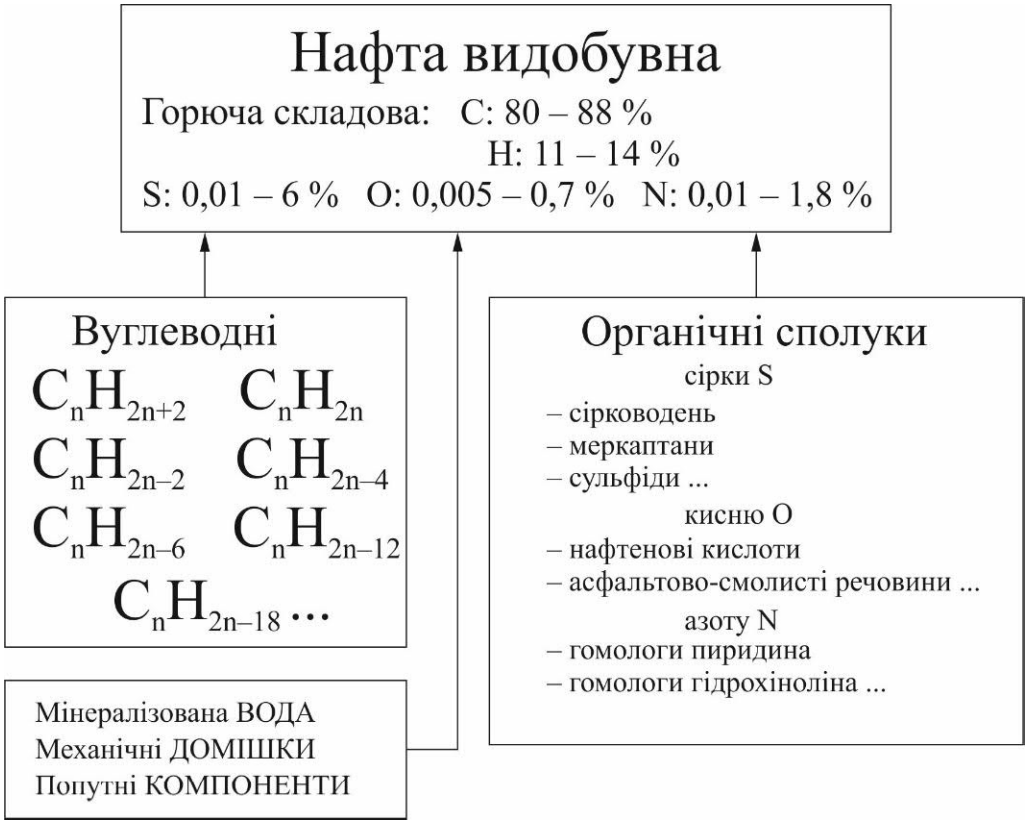


Рис. 2.2. Складові сирої нафти

Кількість газу, що знаходиться у нафті, часто несуттєва, щоб його було вигідно збирати та продавати, тому він спалюється у гирлі свердловини. Після видобутку нафта транспортується танкерами або перекачується по нафтопроводах до нафтопереробних заводів.

Перед переробкою із сирої нафти вилучають солі й воду. З цією метою на нафтопереробних заводах використовують електрознесолювальні установки. Після промивки невеликою кількістю прісної води та електрознесолення вміст вологи у нафті знижується до 0,05 – 0,2 % і хлоридів до 0,5 – 5 мг/л. Нафта після знесолення й зневоднення стає придатною для переробки.

Основним процесом переробки є перегонка, при якій із нафти відбираються в залежності від поставленої мети, наприклад, наступні нафтопродукти: бензин (авіаційний чи автомобільний), ракетне паливо, освітлювальний гас, дизельне паливо і, як залишок, мазут.

Перегонка нафти може здійснюватися, наприклад, за допомогою колони ректифікації. Нафтопродукти виходять у результаті термічного процесу, в якому від нафти за різних температур відокремлюються ті чи інші вуглеводні (відгони) в пароподібному стані. Потім вони конденсуються відповідно до температури випару. Одержують дистилятні палива – світлі нафтопродукти.

Для більш глибокої переробки нафти, тобто для одержання із фракцій легких (світлих) нафтопродуктів, застосовується крекінг (англ. Cracking, розчеплення). Це високотемпературна переробка нафти та її фракцій з метою отримання, як правило, продуктів меншої молекулярної маси − моторного палива, мастил тощо, а також сировини для хімічної і нафтохімічної промисловості.

Для видалення небажаних компонентів (сірчистих, смолистих і кисневих сполук та ароматичних вуглеводнів) нафтопродукти піддають очищенню за допомогою різних фізичних і фізико-хімічних методів.

2.3. Сорти нафтового палива

Найлегшим горючим нафтопродуктом являється бензин. В залежності від його підготовки для використання розрізняють авіаційний бензин й автомобільний.

Бензин – безбарвна рідина зі своєрідним запахом. Кипить при температурі ~ 80 °С. Більшість бензинів замерзає нижче – 60 °С. Бензин завдяки своїй симетричності є неполярною речовиною, тому не розчиняється у воді, проте утворює з нею азеотропну суміш з температурою кипіння 69,3 °С. Питома вага бензинів 700 – 780 кг/м³, температура спалаху нижче 0 °С. Оскільки пари бензину в повітрі при певній концентрації утворюють вибухову суміш, то їх зберігають у прохолодному місці за температури 15 – 20 °С, уникаючи прямого впливу сонячного світла. Товарний бензин зазвичай має термін зберігання понад 6 місяців.

Авіаційний бензин − це автомобільний бензин, підготовлений спеціально для використання в авіаційних поршневих двигунах, з октановим числом 80 − 145 RON (дослідницьке октанове число). Авіаційний бензин не має принципових відмінностей від автомобільного, але виготовляється з суворішими вимогами до певних характеристик. Він застосовується у двигунах внутрішнього згорання. Отримують авіабензин прямою перегонкою нафти, каталітичним крекінгом або риформінгом без додавання або з додаванням високоякісних компонентів, етилової рідини та різних присадок. Основою для класифікації авіаційних бензинів є їх антидетонаційні властивості, які виражаються в октанових числах та одиницях сортності.

Автомобільний бензин – це легке вуглеводневе паливо, що використовується у двигунах із примусовим (іскровим) запалення. Дані бензини відганяються при температурах 35 – 200 °С і обробляються таким чином, щоб отримати досить високе октанове число в межах 80 – 100 RON. Обробка здійснюється шляхом риформінгу, змішуванням з будь-якою ароматичною фракцією або шляхом добавки бензолу, а також з використанням інших присадок (наприклад, тетраетилового свинцю).

Бензин застосовується як паливо для карбюраторних й інжекторних двигунів як високоімпульсне ракетне паливо (Сінтін) та при виробництві парафіну, а також, як розчинник, горючий матеріал, сировина для нафтохімії тощо.

Марки автомобільного бензину: низької якості А-72, А-76, звичайної якості А-80, А-92, АІ-91, АІ-93, покращеної якості АІ-95, АІ-95 «Екстра».

До палива для реактивних двигунів бензинового типу відносяться всі марки легкого вуглеводневого палива, призначеного для використання в авіаційних газотурбінних двигунах, що відганяються при температурі 100 – 250 °С. Таке паливо виробляють шляхом змішування бензину з гасом або лігроїном. Для покращення характеристик до нього вводяться присадки, наприклад для зменшення температури замерзання.

Гас – це горюча сукупність рідких вуглеводнів, кількість атомів вуглецю в яких лежить в межах 8 – 16, а температура кипіння 150 – 200 °С; безбарвна або жовтувата рідина, питома вага 780 – 850 кг/м^3; температура спалаху 28 – 72 °С і самозаймання 200 – 400 °С (в залежності від тиску середовища); теплота згоряння 43000 кДж/кг; відганяється за температури 150 – 300 °С.

У багатьох сферах людської діяльності застосовується гас: від опалення, освітлення та приготування їжі до транспортних засобів і виробництва лакофарбових матеріалів. Гас також використовуються при випалі, наприклад, фарфорових виробів, та як паливо для фаєршоу. Він знайшов застосування при очищенні механізмів від різних нашарувань і обезжирювання поверхонь, щоб герметик чи фарба наносились рівномірно.

Часто гас використовується в фаєршоу як горюча речовина для створення полум’я. Це пов’язано з його відносно низькою вартістю і безпекою у використанні, а також гарною властивістю до горіння. Також гас добре вбирається в тканини й інші матеріали, що дозволяє фаєрщикам створювати різні ефекти вогню, наприклад, факели, що обертаються, або струмені вогню. Крім того, гас горить при відносно низькій температурі, що дозволяє фаєрщикам контролювати вогонь і створювати більш тонкі ефекти. Фаєрщики можуть заливати гас в різні інструменти, такі як смолоскипи, палички або колеса для створення полум›я. У деяких випадках можуть використовувати гас для ефекта видування вогню, наперед заливши його до рота. Вважається, що гас при цьому являється найнебезпечнішим по відношенню до рідкого парафіну чи лампового масла, які також інколи використовуються у фаєршоу. Однак найбільш суттєвим є те, що гас використовується як паливо в деяких типах двигунів з іскровим запалюванням, наприклад у двигунах сільськогосподарських тракторів та стаціонарних двигунах. Найбільш широко гас застосовують для виробництва реактивного палива та як компонент рідкого ракетного палива. Використовують його для різання металів, для побутових нагрівальних та освітлювальних приладів тощо. Гас із додаванням цетанопідвищуючих і протизносних присадок використовується як замінник зимового та арктичного палива для дизельних двигунів. Гас дуже гігроскопічний, тому його застосовують для очищення деталей і механізмів від іржі, старого мастила та ін.

Дизельне паливо (так звана «солярка») – це складна суміш парафінових (10 – 40 %), нафтових (20 – 60 %) і ароматичних (14 – 30 %) вуглеводнів і їх похідних середньої молекулярної маси 110 – 230, які википають при температурі 170 –

380 °С. Крім цих компонентів у різному відсотковому співвідношенні присутня вода, сірка, механічні та смолисті домішки, різні присадки й покращення. Нижча теплота згоряння становить біля 42000 кДж/м^3. За щільністю дизпаливо ділиться на літнє (~ 860 кг/м^3), зимове (не більше 840 кг/м^3) і арктичне (не більше ~ 830 кг/ м^3). У сучасному дизпаливі вміст сірки не перевищує 0,2 %. Температура спалаху 35 – 80 °С. Назва паливапоходить від його основного застосування – у дизельному ДЗВ.

Застосовуються дизельні палива різних сортів (друга назва – газойлі) переважно як паливо для дизельних двигунів внутрішнього згоряння. Розрізняють легкий газойль та важкий газойль. Легкий газойль – рідкий, легко плинний, не в'язкий; важкий газойль – слабов›язкий. Їх застосовують як форсуночне паливо, наприклад, в опалювальних установках.

Основні види дизельного палива та їх застосування:

– літнє (призначене для використання при температурах вище 0 °С);

– зимове (призначене для використання при низьких температурах, наприклад, –20 °С або нижче);

– арктичне (призначене для використання в екстремальних умовах за низьких температур).

Дизельне паливо класифікується як 1D, 2D і 4D. Низькошвидкісні стаціонарні агрегати використовують паливо 4D. Паливо 4D не підходить для більшості мобільного обладнання. Для дорожнього та мобільного обладнання використовується паливо 1D і 2D.

Вибір типу дизельного палива залежить від кліматичних умов і характеристик двигуна. Безпечне його зберігання і використання також мають важливе значення. Слід враховувати, що виробництво зимового палива дорожче, проте без попереднього підігріву неможливо використовувати літнє паливо при – 20 °С.

Основні споживачі дизельного палива – залізничний транспорт, вантажний автотранспорт і сільськогосподарська техніка, а також відносно невеликі морські та річкові судна. Крім того, дизельне паливо є резервним паливом на морських суднах для його застосування в зонах спеціального екологічного контролю.

Суднове малов'язке паливо (СМП), або суднове дизельне паливо (СДП) більш в'язке, ніж автомобільне дизельне паливо, але містить трохи більше сірки, що забезпечує добрі змащувальні властивості.

У суднових двигунах використовується таке бункерне морське дизельне паливо (Marine diesel oil – MDO):

– паливо ICO (ISO) 8217, клас (Class) DMB;
– британський стандарт (British Standard) 6843, клас (Class) DMB;
– аналогічні палива.

Змішувати дизельне паливо, навіть паливо Євро, від різних виробників вкрай не бажано. Справа в тому, що стандарт один, а ось пакети присадок – різні. І змішування може призвести їх до розбалансування якості продукту.

Дизельне паливо може не втрачати своїх якостей місяцями. Воно, зазвичай, зберігається до одного року, якщо, наприклад, тара герметична. Зрозуміти, що

пальне стало непридатним, по його вигляду і консистенції. Зіпсоване пальне стає густішим і набуває характерного неприємного запаху. На його поверхні можуть з›явитися сліди води чи забруднень.

Мазут (залишкове паливо) – це важкий нафтопродукт, який є кінцевим продуктом перегонки при атмосферному тиску і залишився після відділення з нафти легких фракцій (бензину, гасу, газойлю та ін.).

Він включає всі види палива (враховуючи ті, що виходять шляхом змішування), має кінематичну в'язкість понад 27,5 сСт. Його температура спалаху вище 500 °С та щільність не менше 900 кг/м^3. Він широко застосовується на суднах (після незначної переробки) і великих промислових нагрівальних установках як паливо для промислових печей або котлів.

Мазут – малозольне та майже безводне рідке паливо. У ньому міститься вуглецю 84 – 86 % і водню 11 – 12 %, вміст вологи не перевищує 3 – 4 %, а золи 0,5 %. Мазут має високу теплоту згоряння (39380 – 40200 кДж/кг).

Мінеральні домішки в мазуті в основному є водорозчинними солями, які входять до складу вихідної нафти і потрапляють до неї з буровою водою. При переробці нафти мінеральні домішки, що містяться в ній, концентруються в більш важких фракціях. Склад домішок у мазуті різний і залежить від якості вихідної нафти та методу її переробки. Мазут, що потрапив у водоймище і плаває, шкідливий для всього живого, тому що він виділяє ядовиті речовини і не пропускає кисень.

В енергетиці використовується мазут в основному трьох марок – 40, 100 та 200. Мазут класифікують за вмістом у ньому сполук сірки та за в›язкістю. За вмістом сірки розрізняють малосірчистий мазут – до 0,5 %, сірчистий – до 2% та високо-сірчистий – до 3,5 %; по в›язкості – малов›язкий і високов›язкий, що містить смолисті речовини та парафін. Найбільш в›язкі сорти мазуту мають температуру застигання 25-35 °С. У зв›язку з цим при спалюванні застосовується попереднє нагрівання в›язких мазутів до температури 80 – 150 °С.

При спалюванні найбільші труднощі викликають оксиди лужних металів і ванадію, що містяться в мазуті, які знижують температуру розм›якшення золи. Розм›якшена зола мазуту, осідаючи на поверхні нагріву, утворює щільні відкладення. Оксиди ванадію сприяють корозії поверхонь нагріву при температурах ~ 800 °С і більших [1].

Мазути поділяються також на два основні типи: мазути рідкі та густі. Рідкі мазути не потребують попереднього підігріву. Густі мазути для перекачування трубопроводами, розпилення та ефективного спалювання потребують попереднього підігріву.

Підігрітий мазут має невелику в›язкість, що полегшує його перекачування та розпилювання мазутною форсункою. При спалюванні мазуту необхідно його ефективно розпорошити за допомогою форсунки та ретельно перемішати з достатньою кількістю повітря, що сприяє швидкому запаленню та ефективному спалюванню.

Мазут застосовується як паливо для котелень і промислових печей, також застосовується при виробництві флотського мазуту, важкого моторного палива

для крейцкопфних малообертових дизелів (МОД) і бункерного палива. Зазвичай вихід мазуту становить приблизно 50 % від вихідної нафти. Наразі розроблено безліч методів подальшої переробки мазуту. Наприклад, виробляють відгін дистилятів з мазуту під вакуумом.

У сучасних суднових МОД використовується практично важке моторне паливо і лише в окремих випадках дизельне, оскільки останнє суттєво дорожче (приблизно на 35 – 50 %). Важке паливо (Heavy fuel oil – HFO) для МОД має в'язкість не більше 700 сСт при температурі 50 °С (7000 сек. Редвуда при температурі 100 град. F). Відповідно до сучасних вимог Міжнародної морської організації (IMO) граничний вміст сірки у ньому не перевищує 0,5 % по масі – при використанні його за межами районів контролю викидів (IMO Sulfur 2020). Паливо HFO одержують в основному добавкою в зневоднений малосірчистий мазут газойлю з подальшим ретельним перемішуванням.

Важке паливо виготовляється з важких фракцій нафти, які залишаються після отримання більш легких продуктів, таких як бензин та гас. Ці залишки очищуються для видалення домішок і поліпшення якості палива. Залежно від кінцевого продукту, важкі фракції можуть бути перероблені за допомогою процесів, таких як гідроочистка та гідрокрекінг.

Отже, *важке паливо* – це залишкове суднове паливо, що містить також і продукти з дистиляту та сірки не більше 0,5 %. Останнім часом понад 93 % суден у морі (за тоннажем) працювало на такому паливі.

2.4. Використання нафтового палива

Використання вироблених із нафти рідких вуглеводнів передбачає зберігання вказаних у попередньому розділі сортів палива, їх бункеровку по місцю вживання, кінцеву паливопідготовку, подачу до форсунок та спалювання, зменшення токсичних речовин у відхідних газах (продуктах згоряння вуглеводнів у повітряному середовищі) та відвід їх в атмосферу.

Широко застосовуються *нафтосховища* (англ. oil storage, нім. Erdöltank); це комплекс споруд для зберігання нафти і продуктів її переробки.

Через те, що *зберігання нафтопродуктів* у резервуарах супроводжується ризиками, ємність, яка використовується, повинна мати відповідні технічні параметри та засоби безпеки, наприклад, такі, як засоби боротьби з пожежою. У статті 21 Закону України «Про охорону праці» замовник резервуара повинен одержати дозвільні документи. Тільки тоді підприємство, дотримуючись усіх правил техніки безпеки, має право приступити до роботи з нафтопродуктами.

Матеріали, з яких виготовляються резервуари для нафтопродуктів, наступні:

– залізобетон, вважається найнадійнішим;
– сплави металів, мають бути нейтральним до нафтопродуктів;
– штучні матеріали, склопластик та металопластик для малих за розмірами каністр.

Найнадійнішими вважаються резервуари, що розміщені під землею. Найчастіше на АЗС для зберігання пального використовуються підземні двостінні резервуари.

На нафтобазі розміщуються автоестакади для відпускання нафтопродуктів в автоцистерни, розливні станції для розливу нафтопродуктів у бочки й бідони, тарні склади, де *зберігаються* в дрібній тарі розфасовані нафтопродукти, автомобільні ваги тощо.

Для транспортування нафти й нафтопродуктів використовують трубо-провідний, залізничний, водний (судна-бункерувальники) і автомобільний транспорт.

Термін зберігання нафтопродуктів залежить від сорту палива. Наприклад, дизельне паливо може зберігатися 6 – 12 місяців за оптимальних умов.

Доставка й передача палива, наприклад, на судно називається бункеровкою. Відповідно до замовлення старшим механіком паливо постачається судном-бункерувальником. Передача палива суворо контролюється обома сторонами і оформлюється нормативними документами. Комплекс відповідного суднового обладнання закріплений за 3-м механіком. Паливо з бункерувальника закачується у цистерни основного запасу, які, як правило, розміщуються у другому дні судна.

Практично будь-яке нафтове паливо (виключаючи високооктанові бензини та їх аналоги) перед подачею його до форсунок підлягає попередній підготовці, для цього слугують відповідні системи. Найбільш суттєвій підготовці піддається важке паливо, яке являється основним на морських транспортних суднах. Попередня підготовка включає підігрів, відстой, подальшій підігрів, сепарацію та подачу його у витратні цистерни. Але на цьому його підготовка не завершується. Для подачі палива до насосів високого тиску малообертового двигуна (МОД) слугує витратно-паливна система, в якій паливопідготовка завершується підігрівом та очищенням у фільтрі тонкої очистки (до 50 мкм).

На рис. 2.3 зображена спрощена схема системи подачі палива від витратних цистерн до паливних насосів високого тиску МОД. Згідно з сучасними вимогами до двигуна повинно підводитися важке паливо, а в окремих випадках дизельне (легке) паливо. А тому витратно-паливна система має у своєму складі витратну цистерну важкого палива і витратну цистерну дизельного палива.

Паливо із цистерни 1 через триходовий кран 2 з L-подібною пробкою надходить до одного з паливопідкачувальних шестеренних насосів 3, який з тиском біля 4 бар подає це паливо на всмоктування одного з паливних циркуляційних шестеренних насосів 4. Цей насос подає паливо з тиском 10 бар до підігрівача 5. Таким чином, працює по одному насосу. По два насоси встановлюється для надійності. То ж решта непрацюючих насосів є резервними. Байпасні клапани спрацьовують при тискові, що перевищує для підкачуючого насоса 4 бара, а для циркуляційного – 10 бар. У підігрівачі 5 паливо підігрівається до такої температури, при якій його в’язкість становить 15 сСт. Після підігріву паливо проходить через повнопоточний фільтр 6 тонкої очистки (50 мікрон), який розташовано безпосередньо перед входом до двигуна. Проте паливо поступає до насосів високого тиску через швидкозапірний клапан 7, який, у разі необхідності, забезпечить миттєву зупинку МОД. Паливна система забезпечує, при необхідності, роботу МОД і на дизельному паливі, або промивку системи цим паливом від важкого палива. Перехід на дизельне паливо може знадобитися, якщо судно передбачається вивести із експлуатації на тривалий час з холодним двигуном, наприклад, у зв’язку з докуванням чи значним ремонтом

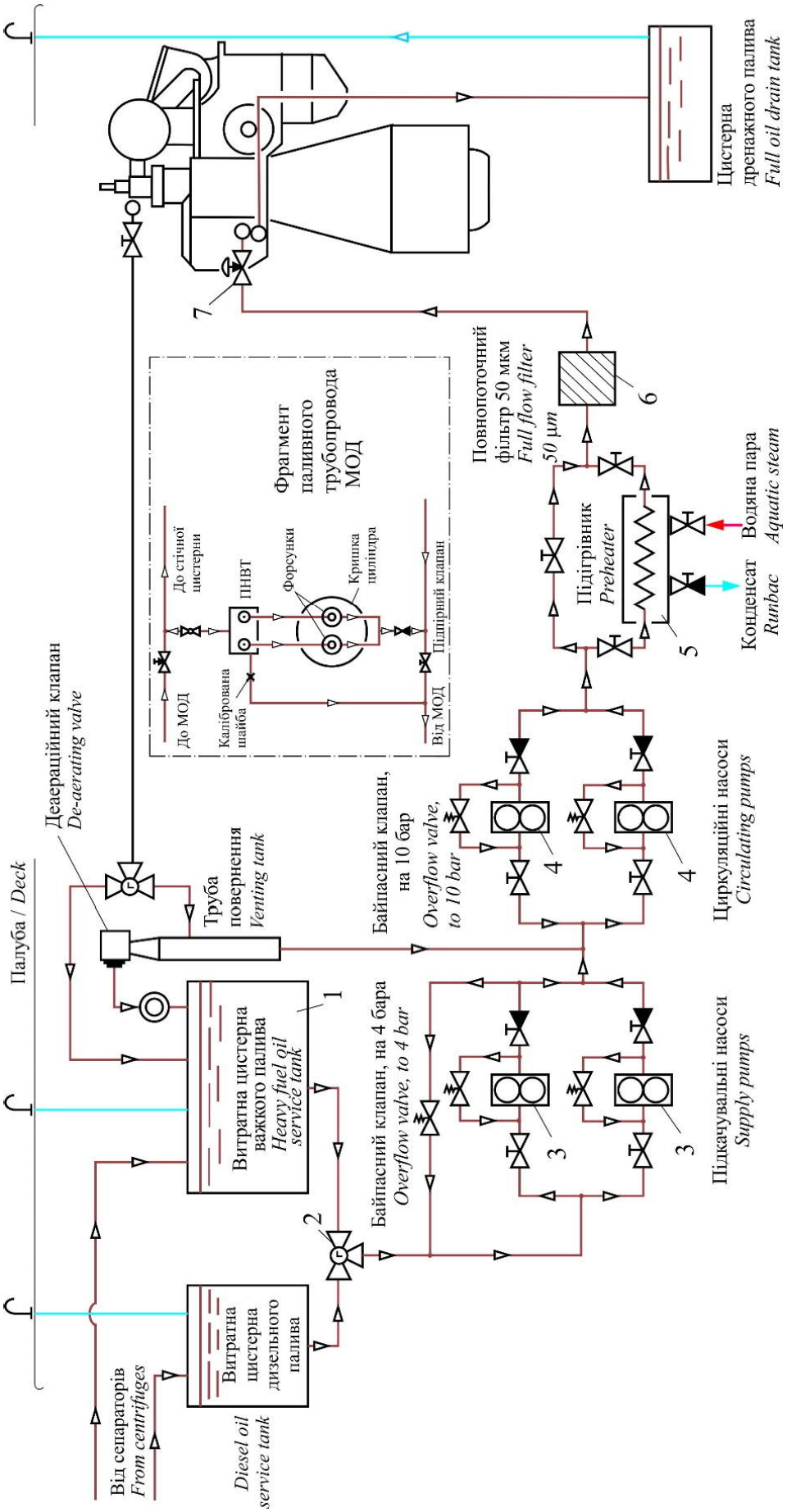


Рис.2.3 Спрощена схема системи подачі палива до МОД

у паливній системі або з зупинкою більш ніж на п’ять діб. Також такий перехід може бути обумовлений екологічними вимогами, наприклад, при проході судна через протоку Ла-Манш.

При спалюванні у повітряному середовищі вуглеводнів, які так чи інакше містять сірку у вигляді домішок, у відхідних газах наявні наступні елементи й сполуки: азот, кисень, вода та вуглекислий газ, а також оксиди сірки й азоту і при неповному згорянні монооксид вуглецю.

Крім того, можуть бути механічні тверді компоненти, хімічні сполуки різних елементів – в незначній кількості. Наприклад, у відхідних газах МОД, який споживає важке паливо зі вмістом сірки 3 % і має питому витрату палива ~ 170 г/ (кВт•год), міститься 76 % N_2, 13% O_2, 5,4 % H_2O і 2,5 % CO_2, решта 3,1 % – оксиди сірки й азоту та ін. Питомий вміст вказаних оксидів становить 14,3 г/ (кВт•год) – NO_x і 11 г/(кВт•год) – SO_x.

Очищення від оксидів сірки відхідних газів може бути здійсненне шляхом промивки їх водним розчином лугів, наприклад NaOH, у скрубері, розташованим у газоході відповідної, при наявності, однак не зовсім простої системи. Але практика показала, що доцільніше застосовувати палива з несуттєвим вмістом сірки (до 0,5 % у важкому паливі і до 0,1 % у дизельному). Інша річ стосується оксидів азоту NO_x. Вони утворюються при високій температурі горіння вуглеводнів (понад 1300 °С; у МОД у результаті циклічності процесів подачі палива і його згоряння – понад 1700 °С).

Справа у тому, що в камері згоряння МОД при високій температурі, яка триває соті частки секунди, молекули N_2 і O_2 в деякій кількості дисоціюють на атоми N (нітроген) і O (оксіген). Протікають, в основному, наступні хімічні реакції:

$$N_2 + O = NO + N;$$

$$N + O_2 = NO + O; \qquad 2NO + O_2 = 2NO_2.$$

Утворюється також незначна частка оксиду N_2O.

Частки оксидів азоту у відхідних газах МОД у режимі повного ходу становлять

NO_x	NO	NO_2	N_2O
100 %	94 %	5 %	1 %

Монооксид NO і діоксид NO_2 токсичні; вдихання живими організмами цих сполук уражає їх дихальні шляхи.

Досягнути емісії оксидів NO_x до ~ 14 г/(кВт~год) можна ускладнивши процеси згоряння шляхом вприску води у камеру згоряння або рециркуляцією частини відхідних газів тощо. Але сучасні вимоги більш жорсткі – допустима емісія біля 4 г/ (кВт•год). Цього досягається застосуванням реакторів селективного каталітичного відновлення азоту. Для нього одержують аміак NH_3, наприклад, вприскуючи водний розчин сечовини в газовипускний тракт, де протікає ендотермічна реакція між водою H_2O і сечовиною $CO(NH_2)_2$ при 400 °С:

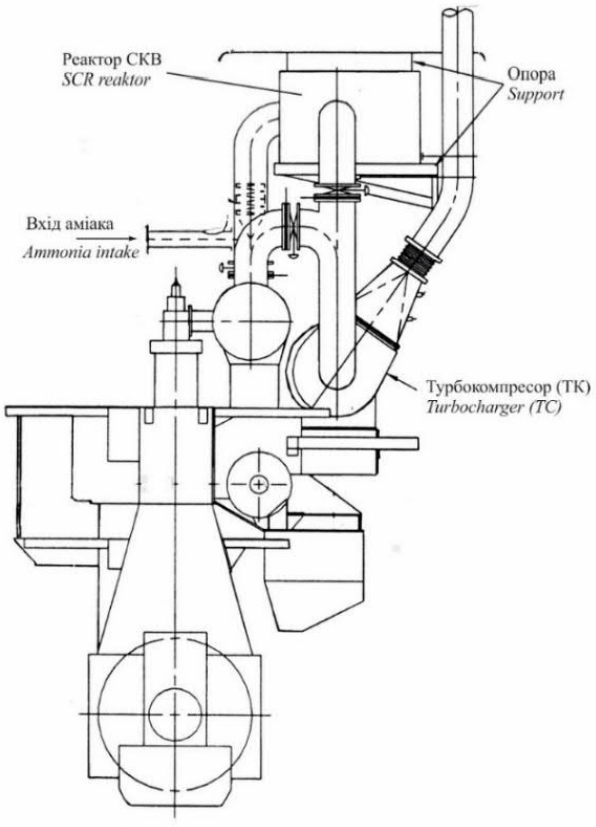
$$CO(NH_2)_2 + H_2O = 2\ NH_3 + CO_2.$$

На рис. 2.4 зображено схематично МОД з надбудовою, основним елементом якої є реактор селективного каталітичного відновлювання – СКВ (selective catalytic reduction – SCR), де нейтралізуються оксиди азоту NO_x. У реакторі при наявності каталізаторів, наприклад ціолітів, протікають реакції з використанням аміаку NH_3, в результаті яких одержується азот N_2 і вода H_2O:

$$6NO + 4NH_3 = 5N_2 + 6H_2O;$$
$$6NO_2 + 8NH_3 = 7N_2 + 12H_2O;$$
$$3N_2O + 2NH_3 = 4N_2 + 3H_2O.$$

Викиди NO_x вважаються однією з основних причин утворення фотохімічного смогу. З'єднуючись з парами води в атмосфері, вони утворюють азотну кислоту та, разом з оксидами сірки, являються причиною кислотних дощів. Загалом, вплив оксидів азоту і на фауну, і на флору є шкідливим. За допомогою певних заходів (наприклад, впорскування води в циліндр двигуна, або подвійною цикловою подачею тощо) знижують емісію оксидів азоту від 17 до 14 г/(кВт·год). І тоді двигун відповідає рівню екологічного впливу на довкілля Tier II (TII). Подальше зниження в суднових умовах оксидів азоту до ~ 4 г/(кВт·год) забезпечується шляхом використання аміаку – це рівень впливу на довкілля Tier III (TIII). Такий рівень задовольняє чинним вимогам.

Також на вказаному рисунку зображена спрощена схема газовипускної системи для МОД, тобто за турбокомпресором.



Конструктивна схема двигуна з надбудовою селективно-каталитичного відновлення (СКВ)

Схема газовипускної системи головного двигуна

Рис. 2.4. До питання зниження оксидів азоту у відхідних газах

Виключення із відхідних газів монооксиду вуглецю (угарного газу) CO досягається організацією якісного сумішоутворення палива й повітря та повного згоряння вуглецю, тобто повного окислення з утворенням діоксиду (вуглекислого газу) CO_2

Зауважимо, що використання вуглеводнів як палива неминуче супроводжується викидами основного парникового газу, що впливає на підвищення температури на Землі. Так що вуглеводні мають значний показник карбонізації. Однак на практиці це вважається не суттєвим. Зусилля спрямовані на зменшення викидів оксидів сірки та азоту. Проілюструємо, що дає зниження у відхідних газах NO_x на прикладі застосування аміака на транспортному судні.

Відхідні гази від малообертового двигуна представляють собою механічну суміш різних речовин у газоподібному стані, серед яких найбільше молекулярного азоту – приблизно 78 % за об'ємом, або приблизно 75 % за масою. Масове співвідношення між речовинами визначається кількістю повітря, сортом палива, вмістом сірки в ньому, витратою циліндрового масла та кількістю аміаку, використаному для нейтралізації оксидів азоту до певної міри. У табл. 2.2 наведені масові показники основних речовин у відхідних газах при специфікаційній потужності МОД до обробки їх аміаком та після у реакторі SCR – від 15 до ~ 4 г/(кВт·год) оксидів азоту при використанні важкого палива з умістом сірки 1,5 %. Числа для колонки «після» носять орієнтовний характер.

Що стосується «решта», то маються на увазі такі речовини як монооксид вуглецю, механічні домішки (пил, сажа, аерозолі, солі металів), аргон та інші інертні гази, що містяться у повітрі, тощо.

Таблиця 2.2

Уміст речовин у відхідних газах МОД при питомих витратах, в г/(кВт·год): палива 170 (у тому числі сірки ~ 2), циліндрового масла ~ 1 і повітря 8350

Речовини у відхідних газах	Питомий вміст, г/(кВт·год)	
	до	після
	реактора	
1. Азот N_2	6370	6380
2. Кисень O_2	1091	1095
3. Вуглекислий газ CO_2	574	574
4. Вода H_2O	460	467
5. Оксиди азоту NO_x	~ 15	~ 4
6. Оксиди сірки SO_x	5	5
7. Решта	5	5
Усього	8520	8530

* * *

Від видобутку нафти до використання рідкого палива

Нафта, попри зо все, є сировиною для виготовлення домінуючого на разі палива – рідинного з великою теплотою згоряння, незалишаючого твердих та рідких відходів після спалювання.

Характерні етапи для нафтового палива зображені на рис. 2.5.

Рис. 2.5. Виробництво нафтових палив

Питання для самоконтролю по розділу 2

1. Дайте визначення нафтовому паливу.
2. Які основні види рідкого палива?
3. Що означає «бензин АІ-95»?
4. Що таке «мазут»?
5. Що собою являє нафта?
6. Що таке «світлі (дистилятні) нафтопродукти»?
7. Які домішки містить сира нафта?
8. Які країни володіють найбільшими родовищами нафти?

Де знаходяться найбільш родовища нафти?

9. Що означає «перегонка нафти»?
10. Який термін зберігання товарного бензину?
11. Як виробляється паливо для реактивних двигунів?
12. Чим відрізняється застосування гасу від дизельного палива?
13. У чому полягає особливість використання важкого палива?
14. Яку шкоду несе сірка, що міститься у дизельному та важкому паливах?
15. З яких матеріалів виготовляються резервуари, в яких зберігаються нафтопродукти?
16. Назвіть склад паливно-витратної системи на сучасному транспортному судні.
17. Які хімічні реакції протікають в судновій системі відхідних газів з реактором селективного каталітичного відновлення азоту?
18. З яких хімічних речовин складаються відхідні гази суднових малообертових двигунів?
19. Чим відрізняється важке нафтове паливо від мазуту?

3. ПРИРОДНИЙ ГАЗ МЕТАН

Горючий газ будь-якого походження більш за все використовується як газоподібне паливо в різних сферах людської діяльності – в побуті, на виробництві тощо. Газоподібне паливо загалом – це суміш різних газів (горючих і негорючих). Основними горючими компонентами є водень (H_2), монооксид вуглецю (CO) та газоподібні вуглеводні: метан (CH_4), етан (C_2H_2), пропан ($CH_3CH_2CH_3$, або C_3H_8), бутан (C_4H_{10}); негорючі компоненти, в основному – це діоксид вуглецю (CO_2), азот (N_2) і кисень (O_2). Широко використовуються гази за таким поняттям як зріджений нафтовий газ (ЗНГ), або скраплений нафтовий газ (СНГ). Це очищений і підготовлений до використання нафтовий газ, переведений під впливом високого тиску в рідинний стан (переважна суміш пропану і бутану – пропан-бутан). Також його часто називають скрапленим вуглеводневим газом. Скраплення полегшує його зберігання та перевезення.

Різновид газоподібного палива цим не обмежується. На наш погляд, найбільшої уваги заслуговує природний видобувний газ метан – найпростіша органічна сполука вуглецю з воднем, досить поширена в надрах Землі та має низьку собівартість видобутку та постачання її споживачеві.

3.1. Застосування метану

Велика кількість метану використовується як зручне і дешеве паливо. Неповне спалювання дає вуглець у вигляді сажі, яка йде на виготовлення друкарської фарби і як наповнювач штучного каучуку. При термічному розпаді (без доступу повітря при температурі понад 1000 °C) одержують сажу і водень, який, зокрема, використовують для синтезу аміаку (NH_3). Метан дає можливість виготовлення великої кількості медикаментів, серед яких снодійні та антисептики. Він є основою для метанолу (CH_3OH) і формальдегіду, з яких виробляють добрива. Метан використовується як джерело водню у виробництві аміака, а також для отримання водяного газу (т.н. синтез-газу):

$$CH_4 + H_2O = CO + CH_2 ,$$

який застосовується для промислового синтезу вуглеводнів тощо.

Та більш за все метан використовується як паливо, наприклад, у двигунах внутрішнього згоряння, в котельнях та на теплоелектростанціях.

3.2. Визначення природного газу і його розповсюдження в земній корі

Видобутий *метан* – це сухе, практично беззольне паливо, з високою теплотою згоряння. Природний газ із газових родовищ майже повністю складається з метану (82 – 98 %), з невеликою домішкою етану (до 6 %), пропану (до 1,5 %) та бутану (до 1 %). У попутних нафтових газах вміст метану коливається у ширших межах (40 – 85 %), але у них міститься ще етан і пропан (до 20 % кожен). Природний газ ділять на газ із чисто газових родовищ та із газоконденсатних родовищ. Природний газ у місцях видобутку очищають від піску та інших домішок, осушують і трубопроводами направляють до споживачів.

Природний газ утворився одночасно з нафтою. Значна частина більш важких складових його розчинена в нафті, а частина, що складається переважно з легких компонентів, накопичується над рівнем нафти. Завдяки великій проникаючій здатності природний газ переміщається в пористих гірських породах на великі відстані від свого утворення і, накопичуючись, утворює суто газові родовища (див. рис. 1.1, розд.1).

Природний газ є корисною копалиною. У земних надрах (у пластових умовах залягання) природний газ переважно перебуває у газоподібному стані – як вигляді окремих скупчень (газові поклади), так і у вигляді газової шапки нафтогазових родовищ. Також природний газ зустрічається у розчиненому стані у нафті чи воді. За нормальних умов (101,325 кПа та 20 °C) природний газ знаходиться в газоподібному стані. Також природний газ може перебувати у кристалічному стані у вигляді природних газогідратів.

Глибина залягання газу становить від 800 метрів до кількох кілометрів. У надрах газ перебуває у мікроскопічних порожнинах (порах). Пори з›єднані між собою мікроскопічними каналами-тріщинами; цими каналами газ надходить з пор з високим тиском в пори з нижчим тиском до тих пір, поки не опиниться в свердловині.

В основному метан утворюється при анаеробному розкладанні органічних речовин, зокрема з целюлози. В природі (у земній корі) метан досить поширений; він утворює багато родовищ. До речі метан трапляється і у Всесвіті. Його виявлено в атмосфері планет Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун. Величезні озера рідкого метану є на поверхні Титана, найбільшого з природних супутників Сатурна.

Багато країн мають у своєму розпорядженні промислові запаси природного метану, що досить часто залягає поруч чи разом з нафтовими родовищами. Він являється поширеним газоподібним енергоносієм у США з початку 1940-х рр. В даний час основним джерелом газу для Великобританії та інших країн Північної Європи являються родовища Північного моря.

Запаси нафти та газу розвідані у більшості країн Південно-Західної Азії – Месопотамський прогин земної кори. Основні родовища знаходяться в Саудівській Аравії, Кувейті, Іраку, Ірані та ОАЕ. Крім того, великі родовища розвідані в країнах Малайського архіпелагу.

Значні родовища газу знаходяться в Росії. Найбільші з них в європейській частині – Оренбурзьке газове родовище, в азіатській – Уренгойське, Ямбурзьке, Заполярне та Ведмеже. Промислові запаси в останніх досягають 14 трлн м^3. Особливо важливого значення зараз набувають Ямальські газоконденсатні родовища.

Близько 75 % усіх відкритих родовищ США розташовано в межах трьох найбільших басейнах країни, зокрема родовища Монро і Воссон. Крім того, не мало родовищ газу є в Канаді, Південній Америці. Світовим лідером за обсягом зосередженого «блакитного палива» являється родовище Південний Парс/ Північне, яке розташовано в персидській Затоці.

Також значними запасами газу володіють й такі країни:

– Норвегія (продуктивні родовища на шельфі);
– Канада (є значні запаси газу, особливо на заході країни);

– Мексика (має великі родовища на шельфі Мексиканської (Американської) затоки);

– Алжир (досить значні запаси природного газу);

– Індонезія (досить значні запаси природного газу).

У 2018 році доведені запаси природного газу по країнах були зафіксовані на такому рівні:

24,2 % – Росія;
12,2 % – Катар;
11 % – Іран;
4,4 % – США;
4,4 % – Саудівська Аравія;
3,8 % – Туркменістан;
3,1 % – ОАЕ;
2,9 % – Венесуела;
2,8 % – Китай;
22,4 % – інші країни.

Перше газове родовище в Європі було відкрито лише у 1910 році, коли в передмістях Гамбурга була пробурена глибинна свердловина в пошуках питної води.

Початок розвитку газової промисловості в Україні припадає на 1924 рік, коли було виявлено й уведено в розробку Дашавське родовище. Воно розташоване поблизу селища Дашава у Львівській області. Наразі – це родовище і газосховище.

Станом на кінець 2020 року, загальний обсяг балансових запасів природного газу в Україні склав 719064 млн м^3; у Східному регіоні – 76,5 %, а у Західному та Південному – 14,2 % та 9,3 % відповідно. Найбільші поклади газу містяться в Харківській, Полтавській та Львівській областях. Також Україна має у своєму розпорядженні унікальні підземні газосховища (ПСГ).

Найбільше у Європі підземне газосховище знаходиться в Україні; це Більче-Волицько-Угерське ПСГ. Загалом газосховища України складаються з 13 об'єктів, проєктна потужність яких за активним газом становить біля 38 млрд м^3, з максимальною добовою продуктивністю 383 млн м^3/добу.

Розвідані запаси газу складають (в млрд т умовного палива):

світові – 180;
європейські – 70;
українські – 1,5.

Вважається, що найбільші запаси природного газу зосереджені у Росії – понад 24 % від світових.

Нині газ видобувається у всіх частинах світу, за вийнятком Антарктиди.

Світовий видобуток природного газу становить приблизно 4 трильони кубічних метрів. На першому місці за видобутком газу в світі знаходиться США, за ними йде Росія.

За прогнозами вичерпання планетарних запасів природного газу очікується у 2050 – 2055 рр.

3.3. Властивості метану

Природний газ (болотний, чи рудний газ) метан – це, з одного боку, горюча корисна копалина, що існує в газоподібному стані, з іншого, безбарвний газ без запаху та смаку, майже у двічі легший від повітря. У воді малорозчинний. На повітрі або в атмосфері кисню віг горить слабкосвітним полум'ям. Його суміш з повітрям або киснем вогне- та вибухонебезпечна. Вибухове горіння поширюється зі швидкістю 500 – 700 м/с. Проте при концентрації газу у повітрі до 4,4 % та після 17 % спалах газу неможливий.

Температура займання залежно від складу природного газу становить 450 – 645 °С, а температура випаровування / конденсації приблизно – 161,5 °С.

Природний газ є отруйним, тому його використання та зберігання вимагають обережності та дотримання правил безпеки. Газ може поширюватися в усьому доступному просторі, заповнюючи його рівномірно. На відміну від рідини та твердого тіла газ не утворює поверхні. На відміну від цих речовин, газ легко піддається стисканню.

Основним параметром для споживання як палива є енергетична здатність природного газу. Відносно до ГОСТ 5542-87 нижча теплота згоряння – 31821 кДж/ $м^3$ (7600 ккал/$м^3$). Фактично цей показник не опускається нижче 33500 кДж/$м^3$ і коливається в межах 0,5 – 0,8 % у вищу сторону.

При повному згорянні газу, якщо на одну молекулу метану приходиться дві молекули кисню, утворюється вуглекислий газ. При неповному згорянні при недостатній кількості кисню утворюється чадний газ (монооксид вуглецю CO) – смертельна отрута.

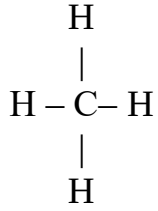
До складу природного газу входять більш важкі (від метану) вуглеводні – гомологи метану:

етан (C_6H_6);
пропан (C_3H_8);
бутан (C_4H_{10});
пентан (C_5H_{12}).

Він (газ) містить також інші речовини, які не є вуглеводнями:

водень (H_2);
сірководень (H_2S);
вуглекислий газ (CO_2);
азот (N_2);
гелій (He) і інші інертні гази.

У реакції поєднання (сполучення) метан не вступає, оскільки в його молекулі (CH_4) всі чотири валентності атома вуглецю повністю насичені:



Він є найпростішим представником вуглеводнів, а саме алканів – C_nH_{2n+2}.

При використанні в побуті та промисловості в метан (в газ) зазвичай додають одоранти (як правило меркаптани) – спеціальні речовини, що надають йому різкого неприємного запаху (специфічного запаху «газу»). Меркаптани (вони ж тіоли) – це гази, сірчисті аналоги спиртів. Наприклад, метилмеркаптан CH_3SH. Навіть при низькій концентрації вони дуже сильно пахнуть, нагадуючи запах тухлих яєць – сірководню H_2S, або кислої капусти. Це дозволяє виявити витоки метану, оперативно вжити відповідних заходів та запобігти вибуху й пожежі. У магістральних газопроводах транспортується неодоризований газ, оскільки одоранти належать до агресивних речовин, що спричиняють корозію стінок труб.

Метан має дуже низьку температуру кипіння, яка при атмосферному тиску становить – 164,5 °С, ще нижчу температуру плавлення – 182,5 °С; його щільність по відношенню до повітря 0,54 (20 °С), теплота згоряння 50080 кДж/кг. Метан – основний компонент природних (77 – 99 % по об'єму), попутних нафтових (31 – 90 %) і рудничного (34 – 40 %) газів; зустрічається у вулканічних газахє; неперервно утворюється при гнитті органічних речовин під дією метанутворюючих бактерій в умовах обмеженого доступу повітря (болотистий газ, гази полів зрошування).

В'язкість метану у газоподібному стані, як і всіх газів, дуже низька, що дозволяє його транспортувати у трубах на великі відстані без значних витрат.

Газ – це такий агрегатний стан речовини, при якому зв'язки між його частинками дуже слабкі, а самі вони рухливі, майже вільно, хаотично переміщаються в проміжках між зіткненнями, при яких різко змінюють характер свого руху. В'язкість (внутрішнє тертя) – одне з явищ перенесення, а саме властивість газів чинити опір переміщенню однієї частини відносно іншої. В результаті відбувається розсіювання у вигляді теплоти – роботи, що витрачається на це переміщення. Механізм внутрішнього тертя в газах полягає в тому, що молекули, які хаотично рухаються, переносять імпульс з одного шару в інший. Це призводить до вирівнювання швидкості руху різних його шарів. Характерно, що з підвищення температури в'язкість газів на відміну від рідин зростає. Пов'язано це з тим, що інтенсивність безладного теплового руху молекул при нагріванні збільшується, тобто вони переміщуються швидше. За стандартних умов в'язкість метану складає близько 0,01 МПа•с, що в 100 разів менше в'язкості води (1 МПа = 10 бар). Транспортування природного газу відбувається в основному магістральними газопроводами, а також розподільними газовими мережами, а при низьких температурах – і морським транспортом. Розподіл природного газу – це його переміщення з метою доставки споживачам.

Газотранспортна система України є другою в Європі і однією з найбільших у світі. Система складається із магістральних газопроводів (довжиною біля 38 тис. км в однонитковому врахуванні), розподільних систем, газосховищ, компресорних і газовимірювальних станцій (71 компресорна станція загальною потужністю 5405 МВт). Через систему газопроводів Україна здійснювала транзит газу в країни Європи. Пропускна здатність системи на вході складає 290 млрд $м^3$ на рік, на виході – 175. Транзит природного газу у країни Європи складав понад 140 млрд $м^3$ рік. Найважливішим новим магістральним нафтопроводом на території України є нафтопровід «Одеса – Броди», що став до ладу на початку XXI ст.

3.4. Особливості використання природного газоподібного палива

Сучасна газова промисловість України розвивається на базі родовищ Передкарпатської і Дніпровсько-Донецької нафтогазових областей та Причорноморсько-Кримської нафтогазоносної провінції. Споживання газу в Україні становить 30 – 32 млрд $м^3$ на рік, а видобуток стабілізувався на рівні 18 – 20 мрд $м^3$ на рік.

Пошуково-розвідувальні роботи являють собою складний і сталий набір операцій, у результаті яких визначається газове родовище. Газ видобувають з надр землі за допомогою мережі свердловин. Шпари розміщують біль-менш рівномірно на всій території родовища. Це робиться для рівномірного падіння пластового тиску в покладі. Оскільки газ знаходиться в земних надрах під високим тиском, для його видобутку застосовують, як правило, фонтанний спосіб.

Очищений природний газ широко використовується як високоекономічне паливо на електростанціях, у чорній та кольоровій металургії, цементній та скляній промисловості, у процесі виробництва будматеріалів і для комунально-побутових потреб, а також як сировина для отримання багатьох органічних сполук. Близько 90 % природніх газів використовуються як паливо і лише 10 % як хімічна сировина. Компонентний склад природного газу, що відпускається населенню, як приклад, може бути таким (у %):

метан.....	96 – 98;
етан.....	1,24 – 1,88;
пропан.....	0,3 – 0,57;
ізобутан.....	0,04 – 0,083;
н-бутан.....	0,04 – 0,09;
пентани.....	0,018 – 0,032;
гексани та вищі.....	0,001 – 0,004;
азот.....	0,7 – 0,82;
діоксид вуглецю...	0,05 – 0,021;
кисень.....	0,007 – 0,008.

Природний газ має суттєві переваги перед іншими видами палива завдяки дешевизні, високій теплоті згоряння, легкому транспортуванню і, що особливо важливо стосовно екології, має найнижчий ступінь карбонізації – 20 % (див. розд. 1).

Переваги використання газоподібного палива перед іншими полягають в наступному:

– для горіння газоподібного палива в топку немає потреби вводити великий надлишок окислювача, за рахунок чого коефіцієнт використання теплоти котла високий – понад 95 % (завдяки коефіцієнту надлишку повітря ~ 1,04);

– при згорянні газоподібного палива не утворюється небажаних продуктів сухої перегонки та сірчистих сполук, кіптяви й диму;

– легко транспортується газопроводами до віддалених споживачів і може зберігатися централізовано, наприклад, в підземних газосховищах;

– легко запалюється, практично за будь-якої температури навколишнього повітря;

– вимагає порівняно невеликих витрат при видобутку, а отже, має низьку собівартість;

– допускає зберігання як у стислому, так і у зрідженому вигляді;

– має високі протидетонаційні властивості;

– при згорянні не утворює конденсату, що забезпечує значне зменшення зносу деталей машин.

До недоліків використання газоподібного палива можна віднести:

– при певних концентраціях у повітрі токсично впливає на живі організми;

– легко утворює вибухову суміш з повітрям;

– легко проникає через нещільність у з›єднаннях та шпаринах;

– вимагає дотримання підвищених заходів безпеки під час роботи з ним.

Останнім часом суттєво збільшується кількість суден-газовозів, які перевозять природний газ у зрідженому (скрапленому) стані під атмосферним тиском. Спеціалізовані судна – LNG-танкери використовуються для далекого морського/океанського транспортування скрапленого природного газу (СПГ, англ. Liquefied Natural Gas – LNG). Альтернативою таким танкерами є підводні магістральні трубопроводи, але при відносно короткій відстані. Повний цикл застосування LNG-технологій передбачає завод із скраплення природного газу, танкери-газовози і термінали з регазифікації, враховуючі сховища газу в пункті прибуття. Все це суттєво впливає на споживчу ціну газу. Такими чином, завод і флот LNG, за високих капітальних вкладень, рентабельні тільки в дуже великомасштабних проектах з відповідно великим запасами газу і ринками збуту високої місткості.

У якості приклада, наведемо деяку інформацію стосовно поширеного використання природнього газу у побуті. Побутовий споживач – це фізична особа, яка використовує газ для власних потреб, у тому числі для приготування їжі, підігріву води та опалення своїх житлових приміщень, що не включає професійну та комерційну діяльність. Побутовий споживач в Україні є клієнтом компанії «Нафтогаз Україна»; він замовляє, купує, використовує, або має намір придбати чи замовити продукцію (природний газ) для особистих потреб, та сплачує за надані послуги щомісячно. За діючими наразі нормами споживання газу становить 5,4 м³ на одну особу на місяць за наявності газової плити в разі відсутності централізованого гарячого водопостачання та газового водонагрівача; 10,5 м³ на одну особу на місяць за наявності газової плити та газового водонагрівача.

***

Газовий ланцюг використання природного газу

Практичне використання горючого газу почалося відносно недавно – у першій половині XIX ст. Спочатку у Лондоні, а потім у Парижі, Нью-Йорку та інших світових столицях, а також в Одесі, Харкові й Києві з’явились газові горілки

для освітлення. Це був штучний газ від переробки кам'яного вугілля. Широке застосування у промислових масштабах природний газ знайшов лише у 20 – 30 роках XX століття. З того часу почалася переможна хода такого зручного газу по країнах майже усіх материків.

Сучасне споживання метану як основного природного газу може бути подано, наприклад, п'ятьма характерними етапами – ланками нерозривного ланцюга (рис. 3.1).

Рис. 3.1. Газовий ланцюг споживання природного газу метану

Питання для самоконтролю по розділу 3

1. Що собою являє природний газ?
2. Для чого використовується метан?
3. Що входить до складу природного газу, видобутого з родовищ?
4. Як утворюється природний газ?
5. Який регіон у світі має найбільші поклади природного газу?
6. У якому родовищі зосереджені найбільші поклади «блакитного палива»?
7. Які за обсягом (в $м^3$) світові розвідані запаси природного газу та які в Україні?
8. Який прогноз щодо вичерпання планетарних запасів природного газу?
9. Яка різниця між природним газом, болотним газом та рудним газом?
10. При яких концентраціях метану в повітрі він вибухонебезпечний?
11. Що таке «одоранти» (по відношенню до метану)?
12. Назвіть, приблизно, температури фазового переходу метану при атмосферному тиску.
13. Яка в'язкість метану по відношенню до води?
14. Де найбільші (або суттєві) поклади природного газу в Україні?
15. Де знаходяться найбільші у Європі підземні газові сховища?
16. З яких компонентів складається природний газ, що відпускається населенню?
17. Як транспортується природний газ через моря та океани?
18. Що таке «танкер-LNG»?
19. Хто такий побутовий споживач природного газу?
20. Приблизна норма споживання природного газу однією особою на місяць.

4. ЯДЕРНЕ ПАЛИВО

Особливість ядерного палива полягає у його величезній енергетичній цінності і не потребує при застосуванні кисню. Так, 1 кг урану-235 (U-235) еквівалентний спалюванню 2500 т вугілля. Із 1 кг уранового палива в сучасних реакторах виробляється 400 тис. кВт•год електроенергії. Якщо цей уран використовується повторно, то 1 кг може дати 7 млн. кВт•год. Розвідані запаси урану достатні щонайменше на 100 років.

4.1. Застосування ядерного палива

Наразі ядерну енергію використовують для виробництва електроенергії, а також в медицині, наукових дослідженнях, зокрема в космічних, і, звичайно ж, у сфері зброї.

Ядерна медицина використовує радіоактивні ізотопи для діагностики та лікування захворювань, таких як рак. Ядерна енергія застосовується для датування археологічних і палеонтологічних розкопок, для вивчення складу речовин і процесів. Ядерні батареї та двигуни використовуються на космічних кораблях для забезпечення енергії та для руху. Застосовується така енергія також для опріснення морської води в місцях з нестачею питної води. Крім того, ядерні технології використовуються для виявлення забруднення в річках й озерах, у виробництві промислових радіоактивних джерел. В особливому ракурсі стоїть питання про застосування «ядерки» у військовій сфері. Розробка й накопичення ядерної зброї – це одне з найсерйозніших застосувань ядерної енергії, що має великий вплив на глобальну безпеку. Проте найрозумніше використання ядерної енергії полягає у виробленні та застосуванні ядерного палива, в першу чергу на електростанціях.

На даний час у світі, й в Україні зокрема, ядерне паливо використовується в основному на атомних електростанціях. На думку фахівців, на таких електростанціях виробляється найдешевша електроенергія.

Атомна електростанція (АЕС) – ядерна установка для виробництва енергії в заданих режимах і умовах застосування, що розташовується в межах передбаченої проектом території, на якій для досягнення цієї цілі використовується ядерний реактор (реактори) та комплекс необхідних систем, пристроїв, обладнання й споруд з необхідними працівниками (персоналом). АЕС працює за принципом теплового двигуна, що використовує пароводяний цикл Ренкіна (зазвичай на насиченій парі). На рис. 4.1 зображена схема АЕС з водо-водяним ядерним реактором, який з парогенератором та деяким обладнанням знаходиться під біологічним захистом.

Вода насосом 1-го контуру прокачується через ядерний реактор, нагрівається від ядерного палива, далі надходить до парогенератора, охолоджується, віддаючи тепло воді 2-го контуру. Отримана в останньому насичена водяна пара витрачається на турбіну. Механічна енергія від турбіни йде на електрогенератор, від якого електричний струм подається споживачам. Відпрацьована в турбіні волога водяна пара перетворюється у воду в конденсаторі, через який прокачується охолоджувальна

вода із градирні, де теплота конденсації віддається навколишньому середовищу. Замість градирні може використовуватися природне чи штучне водоймище.

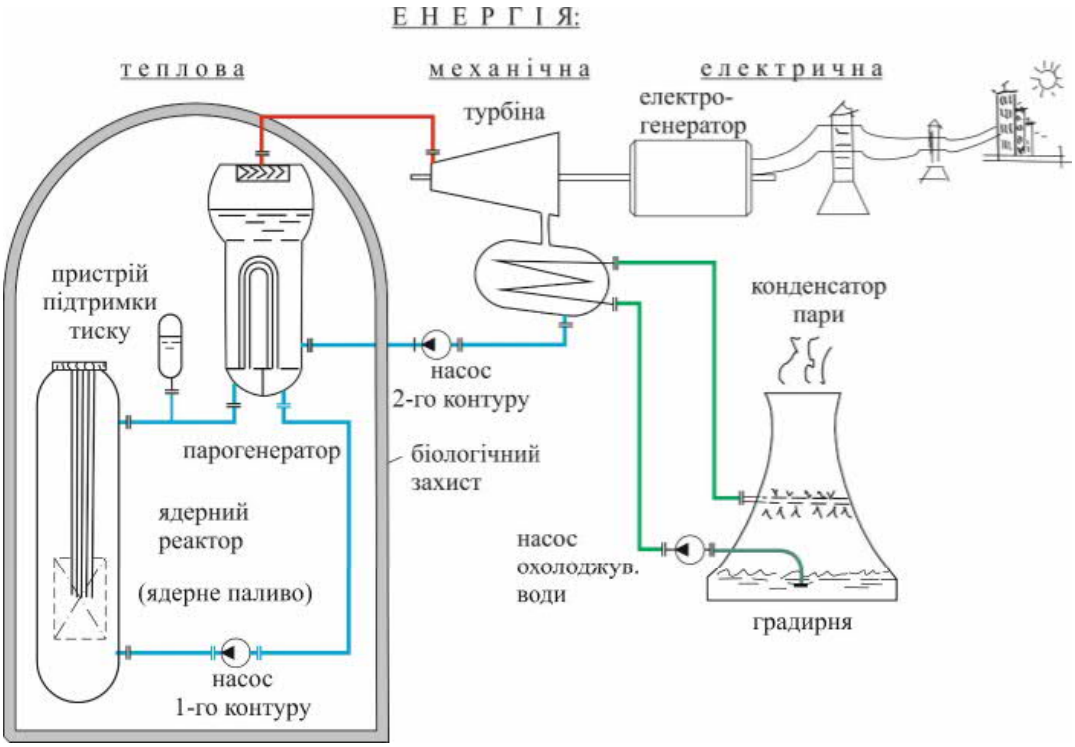


Рис. 4.1. Принципова схема атомної електростанції

Зараз у світі працює близько 400 атомних електростанцій. Вони забезпечують майже 10 % електроенергії, що виробляється на Землі. В Україні АЕС займають провідне місце, виробляючи біля 45 % електроенергії. Найбільше АЕС знаходилося у США. На 2021 рік у США працювало 93 ядерних реактори сумарною потужністю 95,5 ГВт, які виробляли біля 20 % електроенергії в країні.

Наразі найбільша у світі АЕС знаходиться в Японії: Kashiwazaki Kariwa.

Китай – єдина країна, яка не припиняла будівництво АЕС за останнє десятиліття – на відміну від інших країн.

У Китаї є дві великі ядерні енергетичні компанії:

– Китайська національна ядерна корпорація, що працює переважно на північному сході Китаю;

– Китайська генеральна ядерна енергетична група (раніше відома як China Guangdong Nuclear Power Group), яка працює переважно на південному сході Китаю.

Китай планує до 2030 року побудувати 30 ядерних реакторів. До середини XXI століття реактори на швидких нейтронах розглядаються як основна технологія із запланованою потужністю 1400 ГВт до 2100 року. Наразі Китай посідає 3 місце у світі, на яке припадає ~ 10 % світової ядерної енергії, що виробляється. На початок 2023 року в Китаї працювало 55 електростанцій потужністю 57 ГВт; 22 станції в стадії будівництва. Близько 5 % електроенергії в країні припадає на ядерну енергетику – альтернативну вугіллю через зростаюче занепокоєння щодо якості повітря та зміни клімату. Сформульована мета: 200 ГВт до 2035 року, що буде ви-

роблено додатковими 150-ма реакторами. Удосконалені водо-водяні реактори під тиском стануть основною технології в найближчому майбутньому.

У Франції атомна енергетика виробляє понад 70 % електроенергії. На середину 2020 р. Франція мала 57 діючих промислових ядерних реакторів сумарною потужністю 61,4 ГВт. За кількістю енергії, що виробляється на АЕС, Франція посідає друге місце в світі, а по часткі атомної енергії – перше. Країна є найбільшим експортером електроенергії в світі. Вона володіє технологіями по виробництву реакторів та утилізації відпрацьованого ядерного палива. Виробництво електроенергії перевищує власні потреби на 20 %. Надлишок йде на експорт.

Головними покупцями являються:

– Італія (найбільший імпорт електроенергії в Європі);
– Великобританія;
– Швейцарія;
– Іспанія.

Можливо, ближнім часом до них приєднається Німеччина, яка в свій час взяла курс на ліквідацію власної атомної енергетики. Як і інші країни, Франція дала перевагу водо-водяним атомним реакторам, хоча перші 8 реакторів у неї були газоохолоджувального типу.

Усі діючі реактори Франції діляться на три типи:

– 2 контури і три петлі, потужність 900 МВт (34 реактори);
– 2 контури і чотири петлі, потужність 1300 МВт, тип P4 (20 реакторів);
– 2 контури і чотири петлі, потужність 1450 МВт, тип N4 (4 реактора).

Франція імпортує природний уран. За останні 10 років це склало 88200 тонн: із Казахстану (27 %), Нігера (20 %) і Узбекістану (19 %), решта – з інших країн. Збагачення урану країна здійснює за власною технологією. Перевагу ядерній енергетиці Франція віддає, тому що практично немає нафти, газу, а вугільні ресурси майже вичерпані.

Атомна енергетика України бере свій початок з 1977 року, коли було введено в експлуатацію першій енергоблок Чорнобильської АЕС.

В Україні працює декілька атомних електростанцій. Зокрема, Південноукраїнська атомна електростанція (ПУАЕС), до складу якої входить 3 енергоблоки ВВЕР-1000, що вступили в експлуатацію в 1982, 1985 і 1989 рр., розташована у верхів'ях р. Південний Буг. Кожний енергоблок має номінальну електричну потужність 1000 МВт. Щорічне виробництво електроенергії на ПУАЕС перевищує 17 млрд кВт•год. Розпочате на станції будівництво 4-го блока на даний час законсервовано. Україна перевела свої атомні енергоблоки на ядерне паливо американського виробництва Westinghouse.

Іншою сферою використання ядерного палива є військові й цивільні кораблі. Це підводні човни, авіаносці та криголами. Застосування на транспортних суднах носило експериментальний характер (рудовоз «Отто Ган», ліхтеровоз «Олексій Косигін» та інш.); воно обмежується відсутністю відповідної портової інфраструктури. Загалом на сьогодні ядерне паливо стосовно суден доречне там, де потрібні величезні потужності, значний радіус дії (без дозаправки пальним) і необмежена автономність плавання. Для океанських субмарин ядерному паливу немає альтернативи.

На рис. 4.2 зображено продольний переріз (по діаметральній площині) судна з ядерною енергетичною установкою (ЯЕУ). Як виходить з рисунку, теплова енергія Е виділяється при розпаді урану-235. У даному випадку (див. праворуч, зверху) утворено два нові елемети (ізотопи ксенона Хе-138 і стронція Sr-95), ядра яких мають відповідно 138 і 95 нуклонів, та з'явилося 2 вільних нейтрони. Ядро урана-235 містить 92 протона та 143 нейтрона; загальна кількість нуклонів: 143 + 92 = 235.

Водяна пара, утворена завдяки теплоті від ядерного реактора, надходить до турбіни, яка через редуктор і валопровід обертає гребний гвинт.

Ядерний реактор з первинним біологічним захистом має значні розміри й вагу. Його розташовано близько до середини судна. Чергове перезавантаження реактора ядерним паливом здійснюється через декілька років. Відпрацьовані елементи, в яких внаслідок поділу урану-235 відбувалося виділення теплоти, розміщено тимчасово у спеціальному сховищі в межах вторинного біологічного захисту.

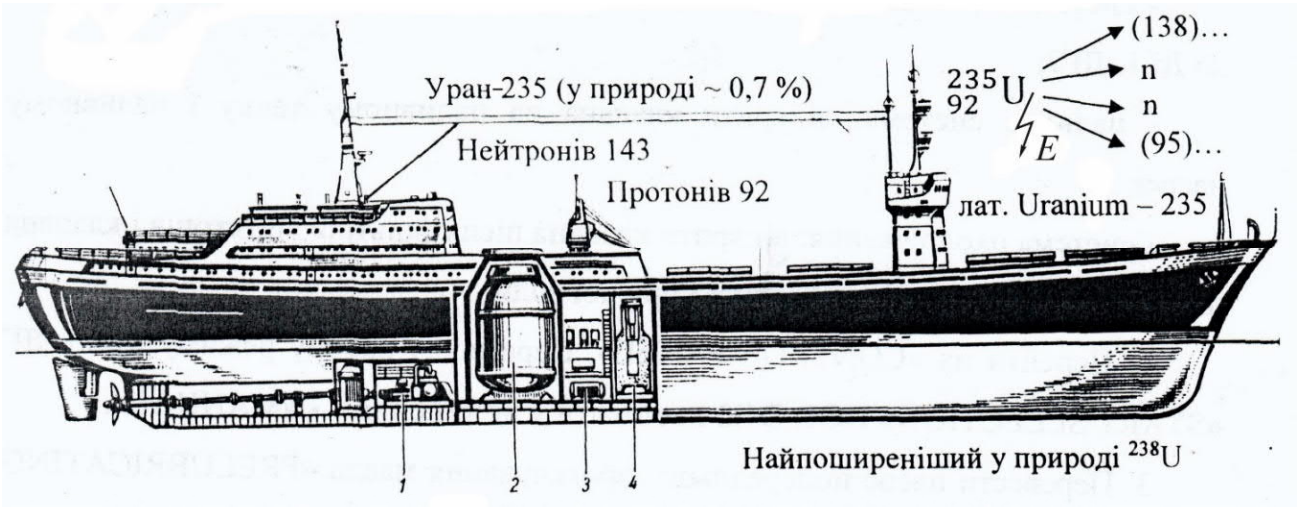


Рис. 4.2. Цивільне судно з атомною ядерною енергетичною установкою:
1 – машинне відділення; 2 – контейнер з реактором;
3 – відсік допоміжних механізмів; 4 – сховище відпрацьованих ТВЕЛів

Застосування на авіаносцях ядерної силової установки забезпечило високій «воєнний» рівень, небачений раніше на подібних суднах. Це завдяки необмеженій автономності корабля.

Найбільшого успіху у цьому напрямку досягли США. Високі тактико-технічні параметри притаманні серійним авіаносцям з ядерною силовою установкою типу–класу «Німіц» (англ. Nimitz – class aircraft carrier).

Основні характеристики цих кораблів:

– водотоннажність 98425 т;
– довжина 332,8 м;
– ширина 76,8 м;
– осадка 11,3 м;
– «двигуни» 2 ядерних реактора; Westinghouse A4W,

4 турбіни, 191000 кВт;
- швидкість ходу 31,5 вуз.;
- екіпаж 3200 чоловік + авіакрило 2450 чоловік;
- авіаційна група 85 – 90 літаків та гелікоптерів;
- час експлуатації реакторів без заміни енергоносіїв – близько 20 років.

Перший атомний багатоцільовий авіаносець класу «Німіц» було закладено 22 червня 1968 р. Будівництво тривало чотири роки; було побудовано 10 суден. Ця серія стала найбільшою в післявоєнний період. Вартість корабля – 2,3 млрд $, без вартості авіакрила (у цінах 1980 року).

Наразі в розпорядженні США є 11 великих атомних авіаносців, кожний з яких несе біля 80 винищ – увачів. Це найбільші у світі авіаносці з загальною площею палуби, яка в два рази перевищує аналогічну площу усіх авіаносців решти країн разом узятих.

Найпотужніший авіаносець у світі – це USS Gerald R. Ford. Оскільки це новітній корабель у складі флоту США, він також являється самим передовим серед авіаносців класу Ford. Побудова таких серійних кораблів ведеться з 2009 р.

Характеристики новітнього суперавіаносця ВМС США «Джеральд Р. Форд» (введений в експлуатацію 31.05.2012 р.):
- водотоннажність 112000 т;
- довжина 337 м;
- ширина 78 м;
- висота ~76 м;
- «двигуни» 2 ядерних реактора Bechtel A1B по 700 МВт;
- гвинти 4 шт.;
- швидкість ходу 30 вуз;
- екіпаж 4660 чоловік.

Діючий авіаносець ВМС Франції – «Шарль де Голь» (фр. Charles de Gaulle, R91); перший французький надводний корабель з атомною силовою установкою. Введений в експлуатацію у вересні 2000 року. Основні його характеристики:
- водотоннажність 42000 т;
- довжина 261 м;
- ширина 64 м;
- висота 75 м;
- «двигуни» 2 водо-водяних атомних реактора;
- потужність 56000 кВт;
- швидкість ходу 27 вуз;
- екіпаж 1200 чол. команда +
  600 чол. авіагрупа +
  100 чол. командування.

Атомні авіаносці мають лише США та Франція. Китай наразі приступив до побудови атомного авіаносця.

Крім авіаносців ядерними силовими установками оснащують підводні човни. Наразі у США налічується 67 підводних човнів; ще п’ять держав володіють атомними підводними човнами:

Росія	31 од.;
Китай	12 од.;
Велика Британія	10 од.;
Франція	10 од.;
Індія	1 од.

Австралія збирається стати першою у світі неядерною країною з атомними підводними човнами. Вона планує придбати у США до п'яти субмарин класу «Вірджинія». Перші три будуть поставлені на початку 2030-х років. Підводні човні не матимуть ядерної зброї, але матимуть атомну силову установку. Таким чином, Австралія стане лише сьомою країною з атомними підводними човнами.

Атомні реактори підводних човнів дещо відрізняються від реакторів атомних електростанцій. Так, наприклад, на радянських підводних човнах розміщували водо-водяні реактори на теплових нейтронах, в яких використовувалась високозбагачена по урану-235 (21 %) двоокис урану. Їх потужність лежала в межах 70 – 90 МВт.

Як підсумок цього підрозділу, зазначимо, що ядерне паливо, і малозбагачене (до 5 %), і високозбагачене (біля 21 %), застосовуються у все більших масштабах.

Основні його споживачі:

– атомні електростанції;
– військові кораблі: авіаносці і підводні човні.

4.2. Склад і структура ядерного палива

Існує всього декілька хімічних елементів, в яких можливий поділ ядер по ланцюговому механізму і які можуть слугувати ядерним паливом. Їх атоми повинні мати відносно великі та нестабільні ядра. Це елементи з великою кількістю нейтронів і протонів в ядрі, що робить їх нестабільними. Такі ядра можуть розпадатися, виділяючи енергію під час поділу. Ці елементи зазвичай мають високу атомну масу і знаходяться в нижній частині періодичної таблиці, в групі актинідів. Наприклад, плутоній (Pu), нептуній (Np).

Одним з найбільш застосованих елементів на атомних електростанціях і кораблях є уран, а саме його ізотоп-235.

Основою ядерного палива, що використовується в цивільних цілях , являється суміш ізотопів U-238 і U-235, яку одержують шляхом збагачення природного урану- 238. Ядерне паливо представляє собою хімічну сполуку урану з іншими елементами, наприклад, диоксид урану UO_2.

Це неорганічна бінарна хімічна сполука, речовина темно-коричневого, майже чорного, кольору. Його щільність 10,2 г/см^3, температура плавлення ~ 2800 °С; розчинається у кислотах, особливо в азотній. При нагріванні у повітрі перетворюється в триоксид UO_3.

Конструкційною основою ядерного палива в реакторі є тепловидільний елемент (ТВЕЛ), що складається, як правило, з оксиду урану і оболонки, яка ізолює паливний матеріал від охолоджувача (зазвичай ретельно очищеної води) і захищає його від корозій. ТВЕЛи збираються в теповидільні збірки (ТВЗ), які при завантаженні реактора вводяться в його активну зону.

Виробництво діоксиду урану UO_2 є ключовим процесом у ядерному паливному циклі. Він виробляється з різних сполук урану, таких як уранілнитрат, аміак–уранат, або оксид урану VI – UO_3, шляхом відновлення воднем до UO_2 при температурі біля 600 °С. Виробництво діоксиду урану складається з наступних етапів.

1. *Збагачення урану*. На першому етапі натуральний уран збагачують, тобто підвищують вміст ізотопу U-235 (перетворивши при цьому природні сполуки урану – уранові руди в газоподібний гексафторид UF_6 – див. підрозд. 4.6).

2. *Перетворення UF_6 в UO_2*. Збагачена по урану-235 сполуку UF_6 (див. підрозділ 4.6) перетворюється на UO_2 за допомогою різних хімічних реакцій, таких як реакція з водяною парою або з аміаком.

3. *Формування паливних гранул*. Отриманий порошок UO_2 перетворюється на гранули, які потім випалюють у високотемпературній печі для одержання міцних керамічних гранул.

4. *Виготовлення ТВЕЛів*. Паливні керамічні гранули укладаються в корозійностійкі трубки, які потім герметично закриваються (див. підрозд. 4.7).

Вони вставляються потім одна за одною в довгі металеві трубки, які складаються разом, утворюючи згадані вище ТВЗ. Одержаний таким чином діоксид урану і є паливом для ядерних реакторів. Це джерело теплової енергії для сучасних ядерних реакторів.

4.3. Уран і ядерні реакції

Уран (лат. Uranium) – радіоактивний хімічний елемент III групи періодичної системи хімічних елементів Д.І. Менделєєва. Природний уран складається із суміші трьох ізотопів: U-238 (99,281 %), U-235 (0,3712 %) і U-234 (0,007 %).

Уран відкритий у 1789 році німецьким хіміком М.Г. Клаптером. У металевому стані уран отриманий у 1841 році французьким хіміком Е. Пеліго. З 1942 року, після відкриття у 1939 році явища поділу ядер, уран став основним ядерним паливом.

Уран по кольору дуже схожий на сталь, легко піддається обробці. Щільність урану при 25 °С становить 19 г/см^3; температура плавлення і кипіння – відповідно 1132 і 3818 °С; теплопровідність – 28 вт/(м•К); питома теплоємність при 25 °С – 27,67 кДж/(кг•К). Ядра урану-235 діляться спонтанно, а також при захваті повільних (теплових) нейтронів і набагато рідше – при захваті швидких. Ядра урану-238 діляться при захваті тільки швидких нейтронів з енергіє не менше 1 МеВ. При захваті повільних нейтронів уран-238 перетворюється на плутоній-239.

На повітрі уран повільно окислюється з утворенням на поверхні плівки діоксиду UO_2. Він неквапно реагує з киплячою водою з утворенням оксиду UO_2 і водню H_2; розчиняється в соляній та азотній кислотах. Уран і його сполуки радіаційно і хімічно токсичні.

Уран одержують із уранових руд, які важко піддаються збагаченню.

Вельми важливим процесом у технології урану є збагачення його ізотопом U-235, вище природного вмісту в рудах, або виділення цього ізотопу у чистому вигляді, оскільки саме U-235 – основне ядерне паливо. Це здійснюється методом

газової термодифузії, відцентровими й іншими методами, основаними на різницях мас U-238 і U-235.

Для використання ядерного палива треба здійснити ядерну реакцію, а для органічного – хімічну. При хімічних реакціях молекули, що взаємодіють, обмінюються атомами, а при ядерних ядра обмінюються нуклонами. Вперше ядерну реакцію спостерігав британський фізик Ернест Резерфорд, бомбардуючи у 1917 році α-частинками ядра атомів азоту.

Згідно з домінуючою гіпотезою центр атома, чи ядро, заряджений позитивно, а електрони, що обертаються навколо цього ядра, заряджені негативно. Ядро і електрони притягаються один до одного з силою, яка урівноважується відцентровою силою орбітального руху електронів. Ядра атома складаються з нуклонів; одна частина з них – це протони, які заряджені позитивно, решта – нейтрони, які не мають заряду, тобто нейтральні.

Ядерний поділ (ядерну реакцію) важких елементів було відкрито у грудні 1938 року хіміками Отто Ганом й Фріцем Штрасеманом і фізиками Лізою Мейтернер й Отто Робертом Фрішем. Поділ важких ядер слугує джерелом енергії в ядерних реакторах і атомних бомбах. В реакторах використовується паливо на основі урану-235, внаслідок поділу якого виділяється енергія у вигляді кінетичної, що передається теплоносію. Отже, поділ важких ядер – екзотермічний процес, у результаті якого виділяється величезна кількість кінетичної енергії продуктів реакції, включаючи випромінювання.

Найбільше енергії (81 %) передається теплоносію при загальмуванні у ньому уламків поділу, що супроводжується підвищенням його температури. У табл. 4.1 наведені енергії і її частки продуктів поділу урану-235.

Таблиця 4.1

Розподіл енергії поділу ядра урану-235 між різними продуктами ядерної реакції (в МеВ)

1. Кінетична енергія уламків поділу	162	81 %
2. Кількість енергії нейтронів поділу	5	2,5 %
3. Енергія γ-випромінювання, яке супроводжує захват нейтронів	10	5 %
4. Енергія γ-випромінювання продуктів поділу	6	3 %
5. Енергія β-випромінювання продуктів поділу	5	2,5 %
6. Енергія, яка виноситься нейтріно	11	5,5 %
Повна енергія (Е)	~200	100 %

Оскільки енергія нейтріно виноситься безповоротно, то доступно для використання приблизно 188 МеВ.

Схематично ядерну реакцію зображено на рис. 4.3. Тут поділ ядра урану-235 на два уламки відбувається під дією теплового нейтрона. У кожному акті такої

реакції вилітає із цих уламків 2 чи 3, як правило, швидких нейтрона, що при наявності сповільнювача цих нейтронів забезпечує самопідтримний процес поділу. Він протікає з високою швидкістю і, як зазначалось вище, з виділенням енергії Е. Деяка частка нейтронів вилітає з запізненням.

Поглинаючи тепловий нейтрон, ядро урану-235 з високою ймовірністю перетворюється в збуджене, деформоване і нестійке ядро урану-236, яке відразу розпадається на два осколки – на два нові менші ядра будь-яких елементів. Для таких двох нових елементів сума порядкових номерів (зарядів) відповідає обов'язково порядковому номеру урану. Наприклад (згідно рис. 4.3), це ядра хімічних елементів криптону *Kr* і барію *Ba*. Крім того, можуть бути випущені γ-кванти, α- і β-частинки. Загалом, ядерні реакції урану-235 завдяки γ-квантам, α- і β-частинкам супроводжуються жорсткими відповідними випромінюваннями та потоком, як правило, швидких нейтронів.

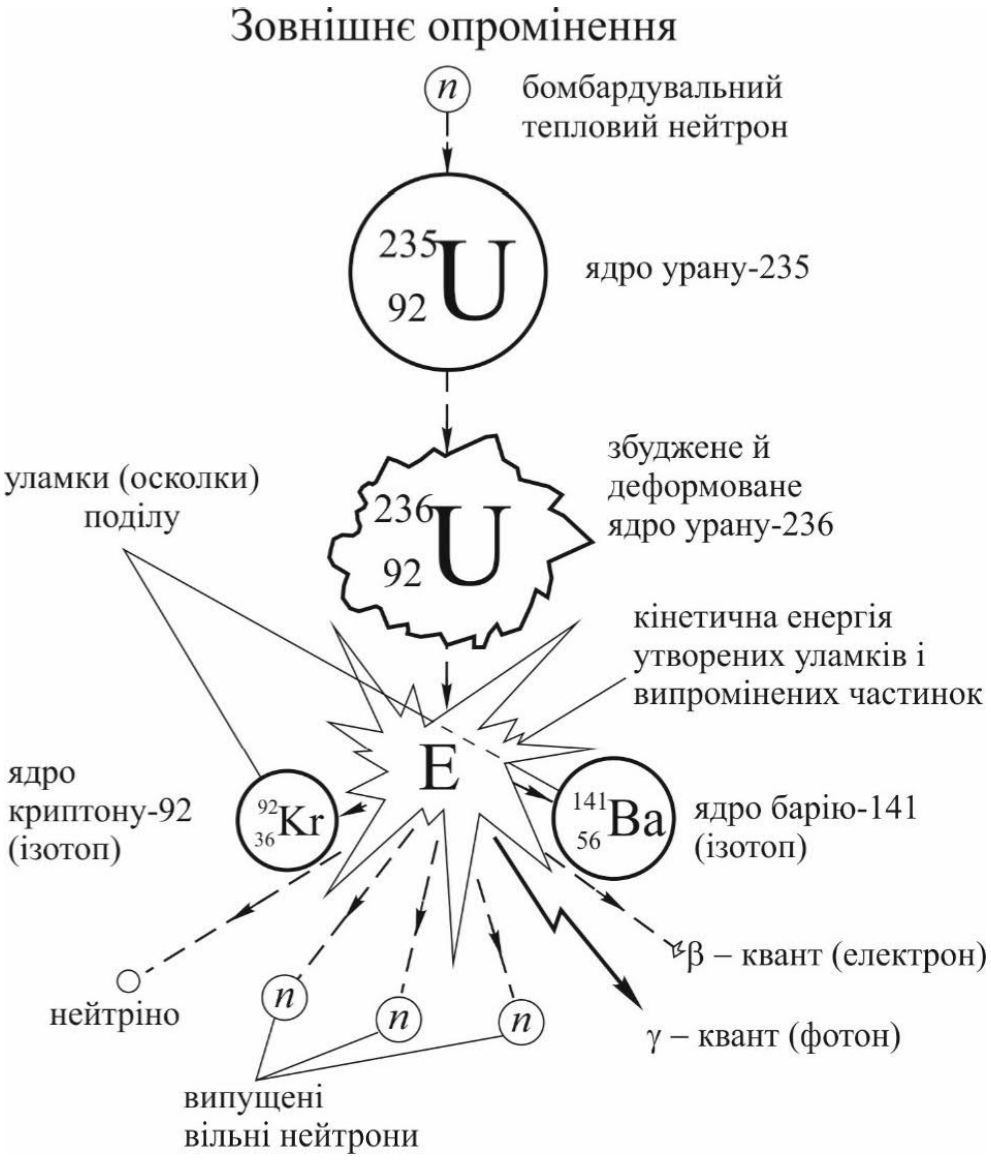


Рис. 4.3. Ядерна реакція поділу урану-235

При кожному поділі ядра випускається від 1 до 8 нейтронів, частіше всього 2 чи 3. Вважається, що їх кількість в середньому становить 2,4. Уламки і продукти їх радіоактивного розпаду зазвичай називають продуктами поділу. Поява декількох випущених вільних нейтронів при поділі ядра дозволяє одержувати ланцюгову ядерну реакцію. Це така послідовність одиничних ядерних реакцій, коли кожна з яких викликана частинкою, що є продуктом реакції на попередньому кроці послідовності. На рис. 4.4. зображена ланцюгова реакція поділу ядер урану-235 тепловими (повільними) нейтронами, які стають такими в наслідок руху в середовищі сповільнювача, стикаючись з його ядрами. Справа в тому, що швидкі нейтрони майже завжди відштовхуються від ядер урану-235, чи проходять крізь них не затримуючись. Теплові ж нейтрони поглинаються з високою ймовірністю цими ядрами, утворюючи збуджений уран-236.

Поділ ядер урану-235 дає уламки, які являють собою ядра різноманітних нових хімічних елементів (A_1, A_2, B_1, B_2, C_1,..., L_2; див. рис. 4.4.) – теоретично від водню-1($^{1}_{1}H$)до протактинію-231 ($^{231}_{91}Pa$)Проте уламки з малою та великою кількістю нуклонів у ядрі малоймовірні. Значна ж частота появи притаманна таким елементам, кількість нуклонів в ядрах яких лежить у межах між від 45 до 178, тобто приблизно від скандію-45 ($^{45}_{21}Sc$)до гафнію-178 ($^{178}_{72}Hf$) Значна кількість нових елементів мають нестабільні ядра, тобто вони радіоактивні з різними періодами напіврозпаду.

«Чистого» урану-235, як правило, не існує; зазвичай це суміш з ураном-238. Ядро останнього, поглинаючи, з певною ймовірністю, нейтрон, спонукає ланцюжок радіоактивних перетворювань:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \underset{\beta^-}{\rightarrow} ^{239}_{93}Np \underset{\beta^-}{\rightarrow} ^{239}_{94}Pu.$$

Нестабільне ядро урану-239 випускає електрон, перетворюючись на ядро нептунія-239, яке в свою чергу також випускає електрон і з'являється ядро з зарядом 94, тобто утворюється трансурановий елемент плутоній-239, який відноситься до вторинного ядерного палива. Вважається, що ядерний нейтрон може перетворюватися в протон, при цьому вилітає електрон і заряд ядра збільшується на одиницю. Тут відбувається β^--розпад. Ядерний протон, в свою чергу, може стати нейтроном, а позитивний заряд виноситься разом з позитроном. Заряд ядра стане на одиницю менше. Тут ми маємо справу з β^+-розпадом.

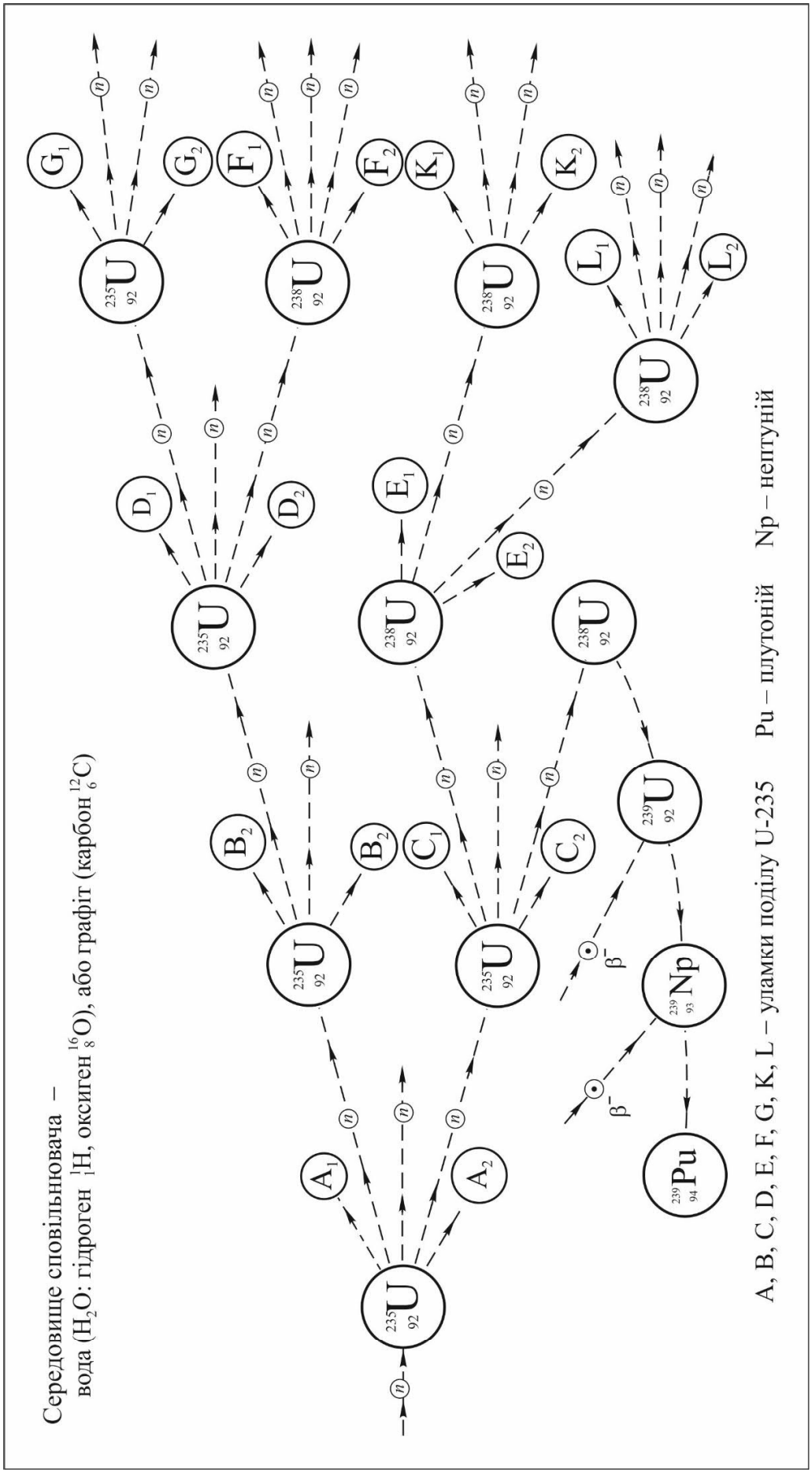


Рис. 4.4. Ланцюгова ядерна реакція урану-235

Для того, щоб зображена на рис.4.4 ланцюгова реакція відбувалася, потрібен сповільнювач нейтронів – речовина, яка відбиратиме енергію у швидких нейтронів і перетворюватиме їх у теплові.

У кожного нейтрона, що вилітає при поділі урану-235 з великою швидкістю, енергія в середньому 2 МеВ; це швидкий нейтрон. Теплові (повільні) нейтрони мають енергію 0,025 еВ і їх швидкість близька до швидкості руху атомів. При русі в середовищі сповільнювача швидкий нейтрон, стикаючись з його ядрами, перетворюється у тепловий. У якості сповільнювача використовуються речовини з малою атомною масою, тобто з легкими атомними ядрами. Це, в першу чергу, очищена вода, берилій та реакторний графіт.

Якщо забезпечувати сталу у часі кількість поділу урану-235, то теплова потужність усіх ядерних реакцій буде стабільною. Це досягається використанням речовини, яка здатна поглинати надлишок нейтронів. І ми маємо справу з ланцюговою керованою ядерною реакцією. У якості поглинача з великим перерізом (ймовірністю) поглинання нейтронів, використовується, наприклад бор у складі борної кислоти.

4.4. Водо-водяний ядерний реактор

Для використання ядерного палива необхідний пристрій, який називається ядерний (атомний) реактор (ЯР). У ньому здійснюється самопідтримна керована ланцюгова ядерна реакція ядер атомів важких елементів, яка супроводжується виділенням енергії. Перший ЯР був побудований у грудні 1942 року в США під керівництвом Е. Фермі. На 1978 рік у світі вже працювало біля тисячі ЯР різних типів. Складовими частинами будь-якого ЯР є активна зона з ядерним паливом, зазвичай оточена відбивачем нейтронів, теплоносій, система керування ланцюговою реакцією, радіаційний захист, система дистанційного керування і, для ЯР на теплових нейтронах, сповільнювач. Щоб реактор міг працювати, розміри його активної зони повинні перевершувати певну критичну величину, інакше ланцюгова реакція не розів'ється, оскільки більша частина нейтронів, що вилітають при поділі ядер, покинуть межі активної зони і втратяться, не визвавши поділ. Для зменшення втрати слугує відбивач.

У промислових і корабельних ЯР застосовується уран-235. Активна зона, крім збагаченого урану, містить обов'язково сповільнювач нейтронів; зазвичай це вода, яка, омиваючи ТВЕЛи, відводить від них теплоту – наслідок ядерної реакції. Таким чином, вода − це теплоносій і сповільнювач і ЯР називається водо-водяним. Відбивач потрібен, щоб якомога більше електронів залишалось у реакторі; матеріал відбивача, наприклад, нержавіюча сталь. Потужність ЯР керується стрижнями, які містять речовину, що активно поглинає нейтрони, наприклад берилій чи бор. Занурюючи в активну зону стрижні, теплову потужність ЯР зменшують, витягуючи – збільшують. Для таких стрижнів роблять отвори, що пронизують активну зону.

Після вигорання ядерного палива (зменшення кількості U-235), як правило, через декілька років, відпрацьовані ТВЕЛи виймають із реактора, а на їх місце

встановлюють нові. ТВЕЛи безпечні до завантаження в реактор, оскільки природня радіоактивність урану незначна. У процесі роботи, завдяки накопиченню уламків поділу урану, які є джерелом потужного γ-випромінювання, у ТВЕЛів з'являється дуже висока радіоактивність.

Для керування ЯР важливо те, що частина нейронів при поділі ядер вилітає із уламків з запізненням. Частка запізнілих нейтронів становить 0,2 – 0,7 %. У табл. 4.2 наведені дані щодо кількості вилетілих нейтронів при поділі тепловими нейтронами 1000 ядер первинного (U-235) і вторинного (Pu-239) палива.

Таблиця 4.2

Кількість нейтронів при поділі 1000 ядер

Хімічний елемент, ядро якого ділиться	Уран-235	Плутоній-239
Середня кількість нейтронів, що вилетіли: миттєвих запізнілих	 2416 16	 2862 6
Частка запізнілих нейтронів, %	0,68	0,22

Після зупинки ЯР у паливі продовжується виділенні енергії: спочатку головним чином за рахунок поділу запізнілими нейтронами, а потім, через 1 – 2 хв, головним чином за рахунок поділу запізнілими нейтронами трансуранових елементів, а потім через 1 – 2 хв, головним чином за рахунок β- і γ-випромінювання. Якщо до зупинки ЯР працював достатньо довго, то через 2 хв після зупинки виділення енергії (у частках виділення до зупинки) становить 3 %, через 1 год – 1 %, через добу – 0,4 %, через рік – 0,05 %.

Ядерний водо-водяний реактор має відносно нескладну будову. Його конструктивна схема зображена на рис. 4.5. Всередині міцного корпусу розміщені збірки ТВЕЛів, які з іншими пристроями утворюють активну зону і через які циркулює охолоджувальна вода, виконуючи роль і сповільнювача нейтронів, і теплоносія виділеної у ТВЕЛах енергії. Щоб вода не кипіла і тим самим її густина була однакова по всьому реактору (що забезпечує сталий електронний потік і рівномірне вигорання ядерного палива), всередині корпусу панує високий тиск – ~16 МПа (160 бар).

Вигорання ядерного палива характеризується сумарною енергією, що виділяється у реакторі на 1 тонну палива. У реакторах на низькозбагаченому урані (2 – 3 % U-235) ця енергія становить 20 – 30 ГВт•добу/т. Вигорання 1 ГВт•добу/т відповідає 0,1 % ядерного палива.

Вигоріле паливо заміняють відразу в усій активній зоні, або поступово, залишаючи в роботі ТВЕЛи різного «віку».

Кампанія ядерного реактора на теплових нейтронах, тобто період між перевантаженням палива, сягає 10 років і більше, а максимальний обґрунтований строк його служби не перевищує 60 років.

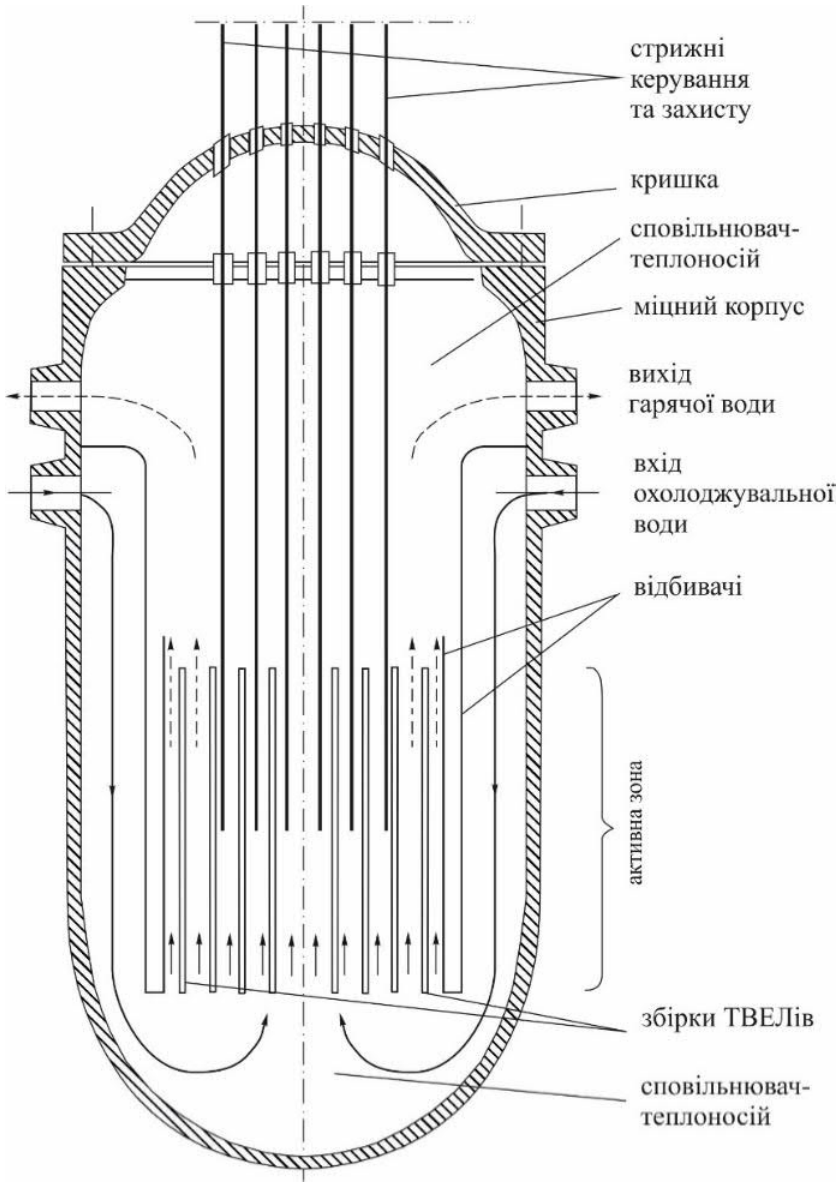


Рис. 4.5. Принципова конструктивна схема водо-водяного ядерного реактора під тиском

На рис. 4.6 зображено загальний вигляд водо-водяного реактора з вказаними габаритними розмірами ~ 19,1 × 4,5 м.

4.5. Природний уран, його розповсюдження

Уран у природі у чистому вигляді не зустрічається – він виступає компонентом руди і мінералів. Основна маса урану знаходиться у кислих породах з високим вмістом кремнію. Уран приблизно в 100 разів більш поширений, ніж срібло. Він характерний для гранітного шару та осадової оболонки земної кори. Зустрічається у природі в низьких концентраціях у ґрунті, гірських породах і воді та добувається в промислових масштабах із ураномістких мінералів. Уран енергійно мігрує в холодних і гарячих, нейтральних і лужних водах у формі простих комплексних іонів.

Відомо біля 100 мінералів урану; промислове значення мають 12 із них. У ході геологічної історії вміст урану в земній корі зменшився за рахунок радіоактивного розпаду. З цим процесом пов'язане накопичення в корі атомів свинцю (Pb) і гелію (He). Радіоактивний розпад урану відіграє важливу роль в енергетиці земної кори, який є суттєвим джерелом глибинного тепла.

Уран одержують із уранових руд. Це природні мінеральні утворення, що містять уран і його сполуки в концентраціях, при яких їх промислове використання можливе й економічно доцільне. Найбільше промислове значення мають оксиди урану – ураніт (UO_2) і його різновид (настуран й уранова чернь). Ураніт зазвичай утворює чорні, сірі або коричневі кристали, які помірно тверді та, як правило, непрозорі. По вмісту урану виділяються 5 сортів руд: дуже багаті руди (понад 1 % урану) − бідні (менше 0,1 %).

Найбільші поклади урану, з урахуванням резервних родовищ, мають Австралія й Казахстан. Запаси цих країн оцінюються у розмірі 6,14 млн тонн, із яких 28 % приходиться на Австралію і 15 % – на Казахстан.

4.6. Видобуток і збагачення урану

Видобуток урану відбувається в декількох країнах світу. Наприклад, у 2017 році було видобуто понад 59 тис. тонн урану. Міжнародними виробниками видобутку були Канада, Австралія, Намібія, Нігерія (разом ~ 45 %) та інші крани. Світовим лідером по видобутку урану був Казахстан; його частка у світовому видобутку становила біля 42 %.

Метод видобутку «Підземне вилужування урану» (ПВУ) застосовується, коли шар ураномісткої руди відділений зверху і знизу водостійкими пластами, наприклад, товстими шарами глини. Пласти запобігають проникненню підземної води до руди, яка залягає зазвичай на значній глибині − понад 400 м. При бурінні свердловини, за необхідністю, її герметизують бетонуванням. Створюється цементне кільце висотою від 70 до 100 м, хоча деякі свердловини бетонуються на всю висоту.

У свердловини заводяться товсті труби, через які нагнітається слабкий розчин, наприклад, сірчаної кислоти (H_2SO_4, концентрація 7 г/л).

Кислота, досягнувши рудного шару, починає вимивати, скажімо, оксид урану UO_3, і через труби відкачувальних свердловин виноситься продуктивний ураномісткий розчин сульфату урану UO_2SO_4 на поверхню.

При вимиванні протікає така реакція:

$$UO_3 + H_2SO_4 = UO_2SO_4 + H_2O.$$

Найбільш радіоактивний елемент радій-226 залишається у надрах землі. Саме тому такий спосіб видобутку урану вважається самим безпечним у світі, і ПВУ являється найпоширенішим методом видобутку урану.

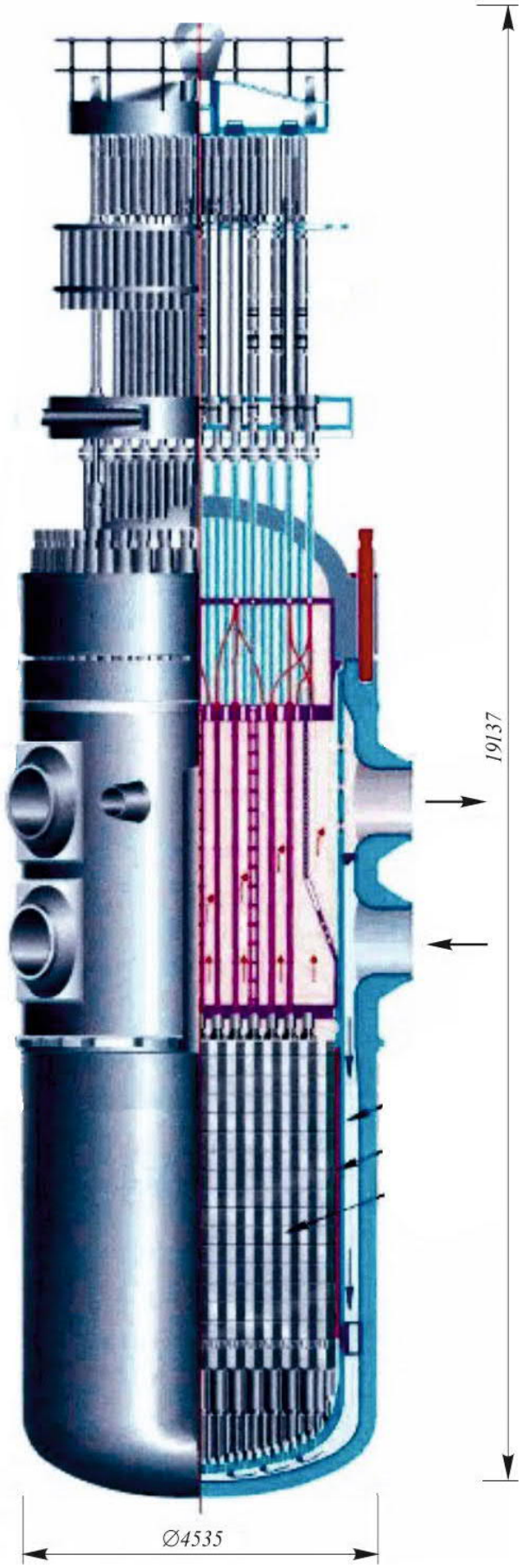


Рис. 4.6. Водо-водяний енергетичний реактор ВВЕР-1000

Видобуток урану в Казахстані проводиться тільки методом підземного свердловинного вилужування, який є не тільки самим екологічно безпечним, а й самим низьковартісним методом видобутку урану. Зараз значна частка урану, видобутого в Казахстані, експортується на світовий ринок, в першу чергу в Китай, а також у Францію, Канаду та інш.

Станом на 2018 рік уран видобували 20 країн з-поміж 170 членів МАГАТЕ

(Міжнародне агентство по атомній енергетиці; англ. IAEA – International Atomic Energy Agency).

Лідерами з видобутку урану уже продовж тривалого часу залишаються Каза. хстан й Австралія. Вони добували близько двох третин урану у світі. У 2022 році найбільша частка добутого урану прийшлась на Казахстан (21227 метричних тонн, 43 % світових постачань). За ним ідуть Канада (15 %) і Намібія (11 %).

Зауважимо, що Казахстан тривалий час збагаченням урану не займався. Він притримувався прозорої політики відносно атомної енергетики і прагнув до створення системи ядерної безпеки. Однак протягом останнього часу обставини змінилися. На даний час побудований в Казахстані у м. Усть-Каменогорськ Казахстано-китайський завод Ульба-ТВС вийшов на проектну потужність – 200 т низькозбагаченого урану у вигляді тепловидільних збірок. Усі збірки поставляються на атомні електростанції Китаю.

Хоча в Україні наявні значні запаси уранової руди і видобувається оксид урану, вона не має можливості виробляти ядерне паливо самостійно. На сьогодні в Україні нараховується 17 уранових родовищ, запаси яких становлять понад 114 тис.тонн. Вона посідає перше місце в Європі по цим запасам і одинадцяте в світі. Уранових спецдозволів в Україні чотири. Всі вони державні, належать державному підприємству «Східний гірничо-збагачувальний комбінат», яким управляє Міністерство енергетики. Цей комбінат – єдине в Україні підприємство (м. Жовті Води, Дніпропетровська обл.) по видобутку і переробці уранової руди, яке здатне повністю забезпечити потреби атомної енергетики країни у природному урані.

Як зазначено у підрозд. 4.3, природний уран складається в основному з ізотопів U-238 (99,281 %). Для того, щоб він став паливом, до нього треба додати ізотопи U-235, тобто збагатити і довести їх вміст щонайменше до 3 – 5 %, що становиться придатним для водо-водяних ядерних реакторів під тиском.

Збагачення урану – це технологічний процес збільшення частки ізотопу-235 у природному урані. В результаті розрізняють природний уран і збагачений (штучний) уран. Загалом, частка збагачення може лежати в межах 2–85 %. Якщо вона не перевищує 20 % − це низькозбагачений уран (англ. Low enriched uranium, LEU), а якщо вона в межах 20 − 85 % − це високозбагачений уран (англ. Highly enriched uranium, HEU). Для промислових реакторів (на теплових нейтронах) ця частка біля 5 %, що ілюструється на рис. 4.7.

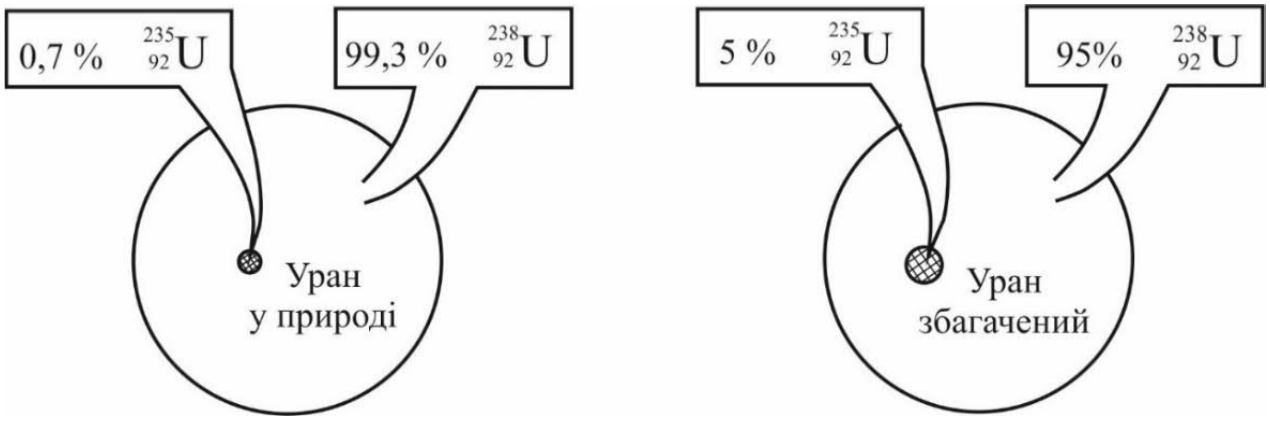


Рис. 4.7. Природний і низькозбагачений (штучний) уран

Уранове паливо одержують переробкою уранових руд. Вони являються природними мінеральними утвореннями, що містять уран і його сполуки. Сам по собі уран слаборадіоактивний. При його видобутку та переробці в атмосферу виділяється радон – високорадіоактивний газ, який представляє основну небезпеку для здоров'я працівників видобувних підприємств.

Видобуток може проводитися різними методами. Найбільш безпечним є гідравлічний, коли працівники гірничодобувної компанії по трубам вводять в руду лужні розчини, наприклад розчин на основі бікарбонату натрію, або, альтернативно, кислотні розчини. Завдяки цьому уран під землею відділяється від руди, а потім одержаний розчин викачується на поверхню.

Гідрометалургійна переробка полягає в подрібнені, вилуговуванні, сорбційному чи екстракційному вилученні урану з одержанням закисі-окисі урану (U_3O_8), диуранату натрію ($Na_2U_2O_7$) або диуранату амонію ($(NH_4)_2U_2O_7$). Далі переводять уран із оксиду в гексафторид UF_6, який у газоподібному стан використовуються для збагачення урану по ізотопу-235.

Гексафторид урану (інша назва – шестифтористий уран) – безкольорова або біла речовина. Дуже отруйна, надзвичайно їдка, роз'їдає будь-яку органіку з утворенням хімічних опіків. При $t > 50$ °C і $p \sim 1$ бар UF_6 перетворюється безпосередньо у газоподібну, дуже хімічно активну та шкідливу для фауни і людини речовину. Вона виробляється хімічним шляхом, наприклад, з'єднанням оксиду урану з фтористим воднем і газоподібним фтором. При контакті з повітрям утворює токсичні летючі сполуки фториду водню. Інтенсивно реагує з водою, сильними кислотами та органічними сполуками. Призводить до появи небезпеки пожежі та вибуху.

Збагачений уран одержують на спеціальних збагачувальних заводах. Це найбільш відповідальний, найенергозатратніший та вельми наукоємний процес виготовлення ядерного палива. Збагачення може здійснюватися різними методами, наприклад, методом газової термодифузії, чи центрифугуванням, чи електромагнітним тощо. Застосовують метод газової дифузії UF_6 через пористі мембрани-фільтри. Максимальне теоретичне розділення ізотопів при одноступеневому процесі визначається відношенням мас молекул газу UF_6 з атомами урану-238 і урану-235, яке дорівнює 1,00429. Тому необхідне багатоступеневе розділення. Більш ефективним являється метод, при якому летучі з'єднання урану UF_6 розкручуються до дуже високих швидкостей у газовій центрифузі.

Одна із можливих конструктивних схем зображена на рис. 4.8 – центрифуга типу Ціппе (Zippe)*. Вона складається з електродвигуна, ротора у твердому корпусі, що обертається повним періодом з високою швидкістю.

Концентричні газові труби, розташовані на осі ротора, використовуються для введення живильного газу (UF_6) і вилучення важчих і легших роздільних потоків. Основні особливості конструкції:

– циліндр у нижній частині має «голку», що спирається на виїмку у мінералі, твердість якого поступається тільки алмазу;

* Гернот Ціппе (нім. Gernot Zippe), 13 листопада 1917, Варнсдорф – 7 травня 2008, Відень) – австрійський інженер-механік, один із творців сучасної газової центрифуги.

− зверху циліндр має магнітний підшипник;
− циліндр розміщений усередині міцного корпусу, у якому панує вакуум.

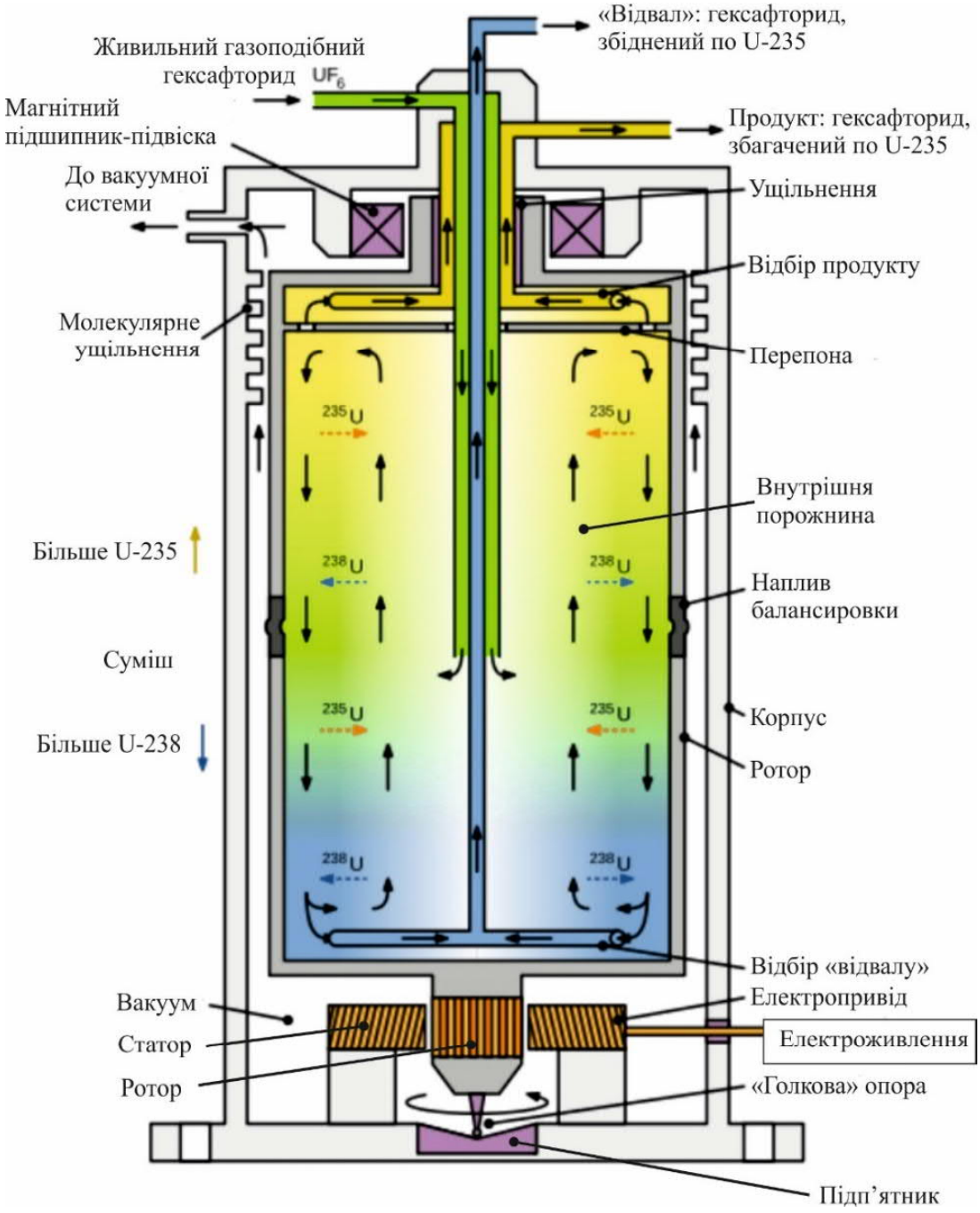


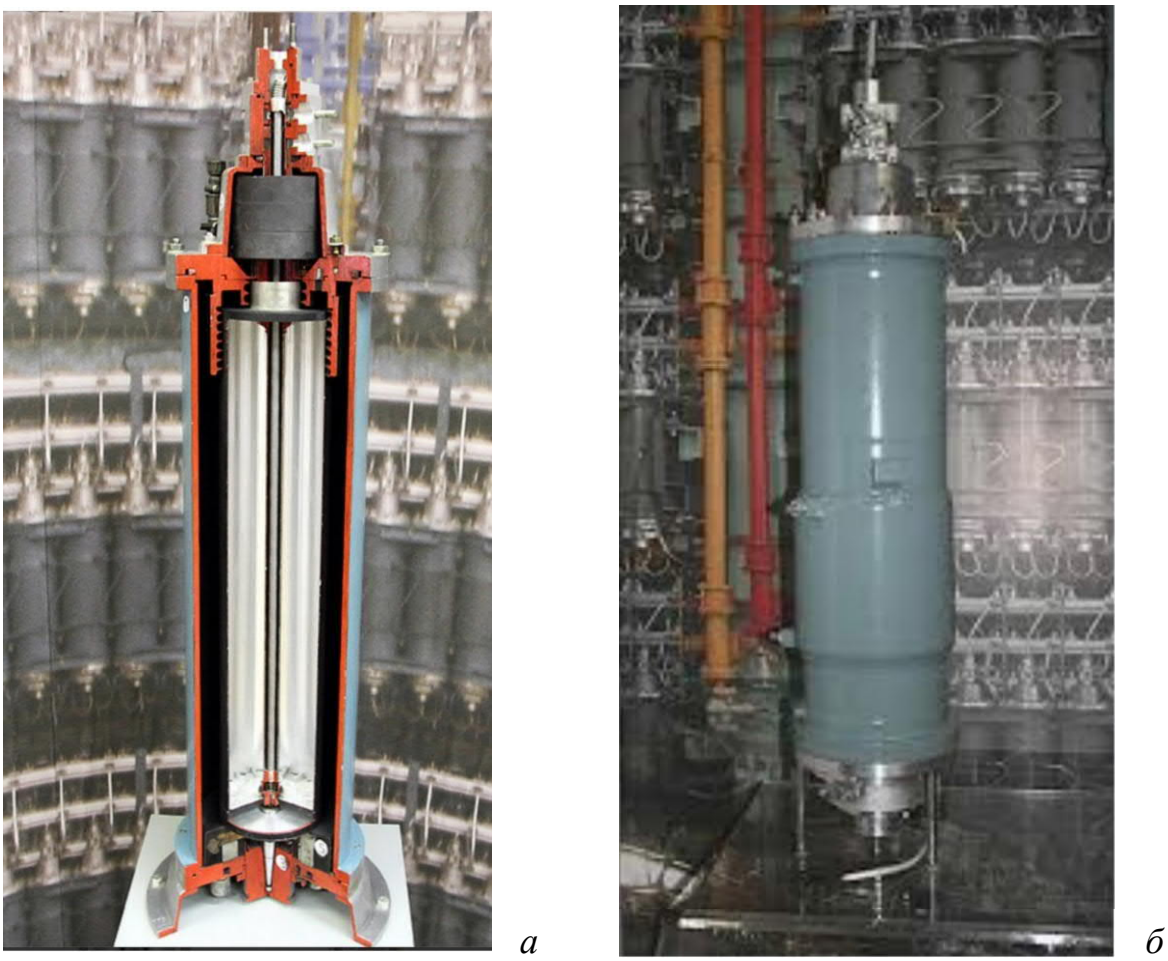
Рис. 4.8. Конструктивна схема газової центрифуги з протитечією

Принцип дії газової центрифуги полягає у наступному. Газ UF_6 находить у циліндр і разом з ним обертається з високою швидкістю − понад 1500 об/с (90000 об/хв). Між корпусом і циліндром − вакуум, саме це й дозволяє досягати вказаних швидкостей, завдяки майже повній відсутності тертя. Обертання газу створює сильну відцентрову силу, так що більш важкі молекули газу, які містять все більше атомів U-238, рухаються до зовнішньої сторони циліндра. Більш легкі молекули зі зростаючим вмістом U-235 збираються ближче до центру.

Сучасні центрифуги типу Ціппе являють собою високі циліндри, що обертаються навколо вертикальної осі (рис. 4.9). Вертикальний градієнт температур створює конвективну циркуляцію, яка піднімається в центрі й опускається на периферії ротора.

На практиці, оскільки існує обмеження щодо висоти (біля 4 м) однієї центрифуги, кілька центрифуг з'єднуються послідовно (рис. 4.10). Кожна центрифуга має один вхід і дві вихідні лінії, які відповідають легким і важким фракціям. Вхід кожної центрифуги − це вихід (легкий) попередньої центрифуг та вихід (важкий) наступного ступеня. Висока ступінь розподілу ядер урану досягається використанням поєднання газових центрифуг, зібраних у каскад, що дозволяє послідовно досягати високого збагачення урану-235.

Газ з ізотопами урану-238 виводиться у «відвал», а збагачена фракція з більш високим вмістом урану-235 переходить до наступної центрифуги, де процес повторюється і так до необхідної концентрації урану-235. Гексофторид UF_6, збагачений по ізотопу-235, переводять у диоксид UO_2, з якого виготовляють пігулки для ТВЕЛів.



а *б*

Рис. 4.9. Газова центрифуга для збагачення урану ізотопом-235:
а – переріз; *б* – зовнішній вигляд

Секція центрифуг живиться змінним струмом від електронного інвертора. При запуску він повільно нарощує частоту обертання до необхідної швидкості.

Агрегати працюють майже безшумно, дуже надійні, у непреривній роботі понад 30 років.

Збагаченням урану займається багато країн. Зокрема, на 2022 р. було збагачено урану компанією URENCO (Німеччина, Голландія, Англія) 14900 кг, що склало 30 % світового виробництва, компанією Orano (Франція) – 14 %, компанією CNNC (Китай) – 12 %.

4.7. Особливості ядерного палива

Ядерне паливо принципово відрізняється від інших видів палива, що використовується в даний час. Воно надзвичайно енергоємне, проте і вельми небезпечне для людини, що накладає низку обмежень на його використання із міркувань безпеки. По цій і багато інших причинах ядерне паливо набагато складніше у застосуванні, ніж будь який вид органічного палива. Воно потребує безліч спеціальних технічних засобів та організаційних заходів при його використанні, а також високу кваліфікацію персоналу, який має з ним справу. Як паливо найбільш широке застосування одержала кераміка – діоксид урану UO_2.

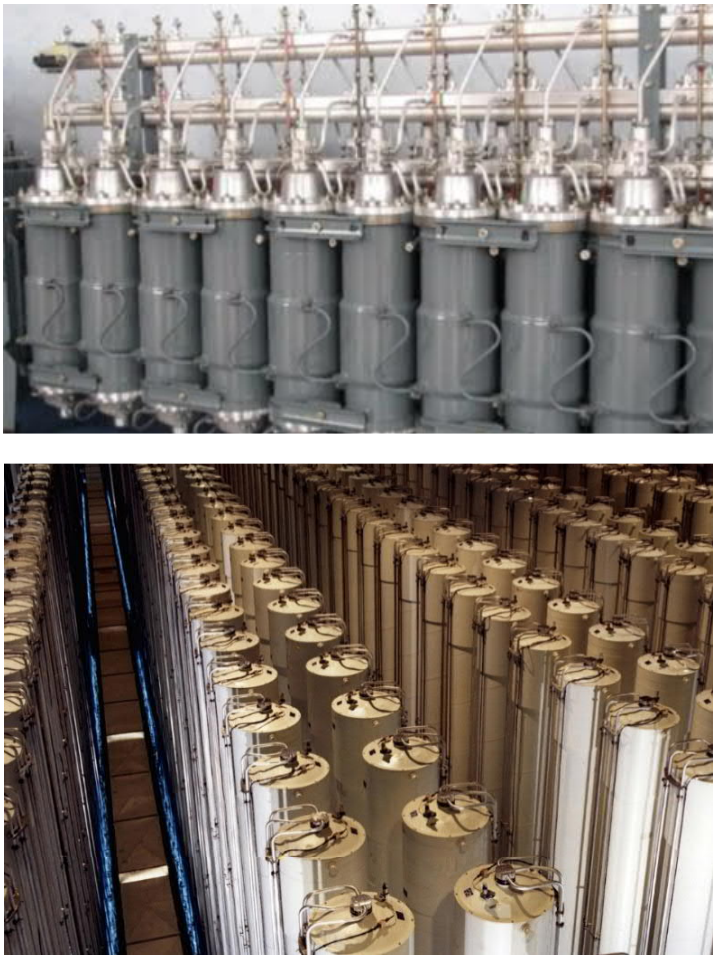


Рис. 4.10. Каскад (а) і поле (б) газових центрифуг для збагачення урану ізотопом-235

Її температура плавлення дорівнює 2800 °С, густина 10,2 г/см^2 . Діоксид урану хімічно пасивний. Його основний недолік – низька теплопровідність: 4,5 кДж/ (м•К). Ядерне паливо використовується в ядерних реакторах

у вигляд керамічних пігулок (див. рис. 4.11), які виготовляють на спеціальних збагачувальних підприємствах.

Кожна пігулка має висоту близько 1,5 см і діаметр близько 8 мм; вона важить усього декілька грамів. Одна пігулка палива для ядерного реактора вагою 4,5 грама дає 10^{10} Дж теплової енергії.

Рис. 4.11. Пігулки ядерного палива для реактора на теплових нейтронах

Набір пігулок біля 350 штук зазвичай вкладають в закриту відносно тонку трубку ТВЕЛа (зовнішній діаметр 9,1 мм, довжина 4 м).

Температура всередині ТВЕЛа може становити 600 – 2500 °С. Однак температура його оболонки (тонкої трубки), щоб запобігти його руйнуванню, не перевищує 300 – 600 °С. Основний параметр ТВЕЛа – глибина вигорання палива. В сучасних водо-водяних реакторах вона сягає 50 – 60 МВт•добу/кг за 4,5 – 5 років.

Трубки ТВЕЛів виготовляють із реконструйованого цирконію, який леговано 1 % ніобію (сплав Zr1Nb). Щільність сплаву 6,55 г/см^3, температура плавлення 1860 °С. Також може використовуватися нержавіюча сталь типу Х16Н15М3. ТВЕЛ зберігає свої геометричні характеристики у процесі тривалої експлуатації реактора.

Довга тонка цирконієва металева трубка, в середині якої знаходяться ядерні пігулки – це стрижні, які для зручності використання збираються в пучок – так звану паливну тепловидільну збірку (ТВЗ). Кількість стрижнів у одній збірці сягає декількох сотень, зазвичай біля 300 штук. На рис. 4.12 показана одна із можливих конструкцій ТВЗ.

ТВЗ за різними стандартами являє собою чотиригранний або шестигранний пучок ТВЕЛів. Це дуже важка конструкція, до тонни разом з каркасом. Водночас велика кількість збірок завантажується в реактор. Зазвичай кожні декілька років перезавантажують реактор ядерним паливом, тобто замінюють ТВЗ. Паливна

збірка – це конструкція, що заміняється. Так, наприклад, атомні реактори авіаносця «Німіц» (USS Nimitz) «заправлялись» ядерним паливом раз у тринадцять років. На рис 4.13 зображені дві шестигранні та одна чотиригранна (зверху праворуч) тепловидільні збірки сучасних ядерних реакторів.

Рис. 4.12. Контроль за якістю виготовлення паливної тепловидільної збірки

Протягом кампанії ядерного реактора (строк між перезавантаженнями активної зони) каркаси ТВЗ зношуються під дією теплових потоків і радіоактивного опромінення. Паливо в трубках «вигорає», тобто знижується концентрація урану-235. Стрижні керування й захисту все більше виводяться з активної зони. І нарешті настають такі обставини, коли потрібна теплова потужність реактора стає недосяжною. ТВЗ вважаються відпрацьованими. Їх виймають з реактора і на їх місце встановлюють нові.

Рис. 4.13. Пучки ТВЕЛів сучасних ядерних реакторів

Паливо на ядерні установки, що працюють, надходить завжди у вигляді ТВЗ, які завантажуються у реактор безпосередньо під час його роботи на місце тих, що вигоріли, або замінюються відпрацьовані збірки великими групами під час ремонту реактора. В останньому випадку при кожному новому завантаженні останнім часом все частіше замінюється третина палива і повністю змінюється його розташування в активній зоні: частково відпрацьовані − з периферії до центру, нові – до периферії.

У відпрацьованих ТВЕЛах міститься уран-238, залишки урану-235 та уламки поділу ядерних реакцій. Ці уламки – ядра нових різноманітних ізотопів з порядковими номерами менше 92. Домінують ізотопи елементів з непарними номерами в межах 31 – 61. Майже усі ізотопи нестабільні, а від так радіоактивні.

Відразу після вивантаження із реактора ТВЗ кожний відпрацьований ТВЕЛ у середньому містить 300000 Кюрі радіоактивних речовин, розпад яких призводить до саморозігріву зі значною температурою (на повітрі до 300°С) та створенню небезпечного рівня іонізуючого випромінювання. Тому вивантаження відпрацьованого палива із активної зони реактора ведуть під шаром води, розміщуючи його в спеціальний басейн витримки в безпосередній близькості від реактора. Вода захищає персонал від іонізуючого випромінювання, а самі збірки від перегріву. Через декілька років, коли саморозігрів ТВЗ скорочується до 50 – 60 °С, її достають із басейну і відправляють на сухе довготривале зберігання чи переробку. Непереробленні відходи радіаційно небезпечні протягом сотень тисяч років. Тому переробка з екологічної точки зору вважається доцільною.

Як зазначалося вище, при роботі ядерного реактора паливо вигорає не повністю (діляться на всі наявні ядра урану-235). Крім того, має місце процес відтворення окремих ізотопів плутонію. У зв’язку з цим вийняті з реактора ТВЕЛи можуть бути направлені на переробку для регенерації палива й повторного його використання, тобто на утилізацію відпрацьованого ядерного палива.

При цьому ТВЕЛи розрізають на частини і розчиняють в азотній кислоті. Потім розчин очищують від продуктів поділу та шматочків оболонки ТВЕЛів і виділяють чисті сполуки урану й плутонію. Далі оксиди PuO_2 і UO_2 використовуються для виготовлення нових ТВЕЛів, так що уран-235, як паливо, отримує повторне, друге «життя».

Наголосимо, що переробка відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) – процес, при якому шляхом хімічної обробки із відпрацьованого палива вилучають уран, плутоній і радіоактивні ізотопи. При розпаді урану утворюється багато нестабільних ізотопів інших хімічних елементів, у тому числі газоподібних. Ці продукти розпаду залишаються всередині ТВЕЛа. Крім продуктів розпаду залишається значна кількість урану-238, невелика кількість урану-235 і напрацьований у реакторі плутоній.

Задача переробки – мінімізувати радіаційну безпеку ВЯП, безпечно утилізувати компоненти, виділити корисні речовини і забезпечити їх подальше застосування. В даний час шукають методи з мінімізацією відходів, що простіше утилізувати. Плутоній, виділений при переробці відходів ядерних реакцій, може бути використаний у вигляді палива у суміші з оксидом урану. Для палива після достатньо

тривалої компанії майже дві третини приходиться на Pu-239 і Pu-241 і біля третини на Pu-240, внаслідок чого плутоній не може бути використаний для виготовлення надійних і передбачуваних ядерних зарядів (ізотоп-240 є забруднювачем).

Глобальною проблемою переробки ВЯП являється величезна кількість радіоактивних відходів – про що треба пам'ятати при плануванні застосовувати ядерні реактори.

Переробка й регенерація високорадіоактивних уламків поділу урану – складний і вартісний процес. Труднощі визиває також і поховання відходів. Вартість усіх цих заходів суттєво впливає на економічну ефективність застосування ядерного палива.

***

Від руди до ядерного палива

Ядерне паливо було освоєне людиною всередині минулого століття і зараз переможною ходою рухається в майбутнє, суттєво забезпечуючи нас найдешевшою електроенергією. Воно потребує пильної уваги і високої кваліфікації обслуговуючого персоналу на усьому шляху його створення й використання. На рис. 4.14 зображені в укрупненому вигляді основні етапи руху урану: від видобутку до використання та поховання його шкідливих відходів. Головним етапом для нього, як і для будь-якого іншого палива, є одержання теплової енергії, яку традиційним способом перетворюють в електричну.

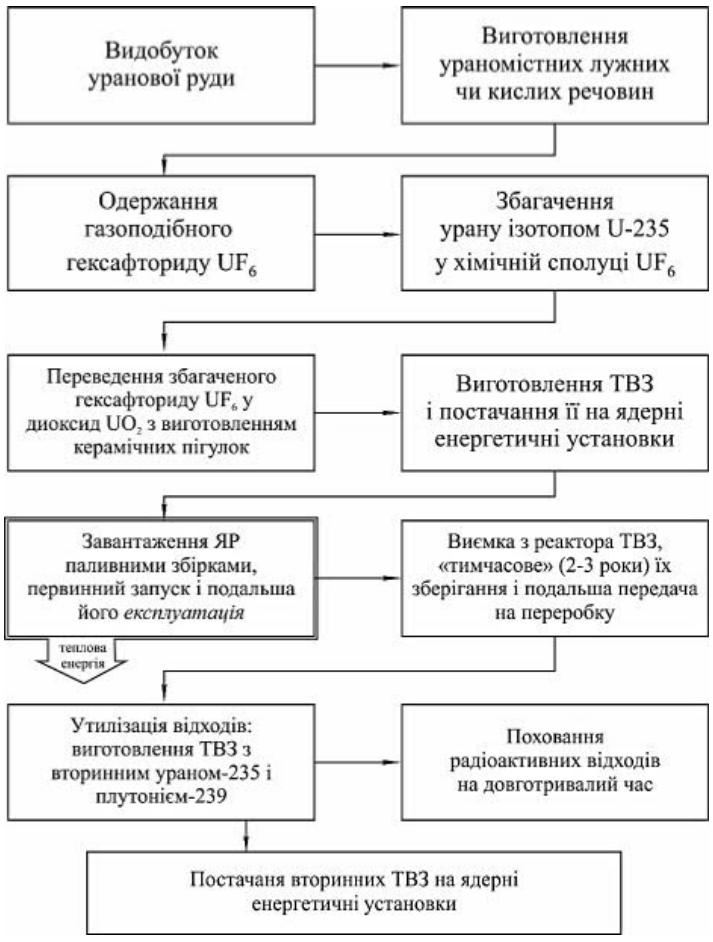


Рис. 4.14. Характерні стадії видобутку, виготовлення й використання ядерного палива та утилізації його відходів

Питання для самоконтролю по розділу 4

1. У чому полягає найголовніша відмінність ядерного палива від інших видів?
2. Основна сфера застосування ядерного палива.
3. Чому ядерне паливо не застосовується на транспортних суднах?
4. Яким чином кінетична енергія продуктів поділу урану перетворюється в електричну енергію (електричний струм)?
5. Чому до складу ядерного палива входить і ізотоп U-235, і ізотоп U-238?
6. Як виглядає діоксид урану UO_2?
7. Які ізотопи входять до складу природного урану?
8. У чому різниця між ядерними і хімічними реакціями при одержанні теплової енергії?
9. Що означає «водо-водяний реактор на теплових нейтронах під тиском»?
10. Суть керованої ланцюгової реакції поділу урану-235.
11. Яким чином у ядерному реакторі на теплових нейтронах утворюється трансурановий елемент плутоній-239 (який відноситься також до ядерного палива)?
12. Чому ядерне паливо у реакторі «вигорає» не повністю?
13. Які хімічні елементи наявні у нових і відпрацьованих тепловидільних елементах (ТВЕЛах)?
14. Чому відпрацьоване ядерне паливо радіаційно небезпечне?
15. Що собою являють тепловидільні збірки (ТВЗ) для сучасних ядерних реакторів?
16. Чому і як часто заміняють ядерне паливо (тепловидільні збірки – ТВЗ) у водо-водяних реакторах?
17. Що являється сировиною для ядерного палива?
18. У якій країні на даний час найбільший видобуток урану?
19. Чи видобуваються і переробляються уранові руди в Україні?
20. Як збагачують природний уран ізотопом-235?
21. Чому при збагаченні урану використовують гексафторид UF_6 у газоподібному стані?
22. Назвіть декілька країн, у яких збагачують уран.
23. Що собою являє керамічна пігулка ядерного палива?
24. Дайте визначення складовим тепловидільної збірки (як конструктивного елемента ядерного палива), а саме: трубкам ТВЕЛів, її каркасу.
25. Що таке «саморозігрів відпрацьованого ядерного палива»?
26. У чому полягає утилізація відпрацьованого ядерного палива?

5. ДЕРЕВНЕ ПАЛИВО

Зниження собівартості теплової та електричної енергії спонукає розширене застосування альтернативних видів палива, яке в окремих, часто специфічних, обставинах може являтися оптимальним в порівнянні з традиційними видами палива.

Спектр альтернативних палив, що розглядаються в даний час, досить широкий і включає зріджений природний газ, метанол, біодизель, аміак, водень та інші джерела енергії, що істотно відрізняються рівнем технологічної готовності. Однак, існує інше паливо, яке поки що залишається в тіні, хоча воно дозволило б у деяких випадках радикально покращити показники енергетичної та економічної ефективності судна.

До таких альтернативних палив можна віднести деревне паливо, яке виробляється (а не видобувається із надр Землі!) з непридатних для промислової обробки та застосування лісоматеріалів і відходів відповідного виробництва.

Деревина як паливо широко застосовувалось раніше в побуті; зараз використовується переважно вироблене з деревини паливо в різних галузях стаціонарної промисловості; цікавими можуть бути питання застосування такого альтернативного палива й на суднах.

Очевидно, що необхідними умовами для впровадження нового для суден палива є його доступність, яка передбачає наявність достатньої кількості відповідних виробничих і розподільчих потужностей, а також адекватної буферної інфраструктури. Важливе значення мають ціна та політика судновласника щодо використання різних видів палива, які у багатьох випадках вимагають значних модифікацій бортових систем, що призводить до збільшення їх складності й вартості.

За даними Регістру Ллойда (LR) у 2024 році було замовлено 600 суден, здатних використовувати альтернативні види палива, а кількість таких суден, що перебувають а експлуатації, суттєво (на 18 %) зросла та досягла 1860 одиниць [4].

Застосування різних альтернативних видів палива значною мірою визначається типом судна, його призначенням та особливостям експлуатації. Наприклад, судна з необмеженим районом плавання повинні мати на борту значний запас палива. Тому на відміну від каботажних суден для них вирішальну роль можуть відіграти такі фактори як щільність палива та його нижча робоча теплота згоряння (LHV), що визначають необхідний для забезпечення заданої автономності обсяг бункера.

При роботі каботажних суден у регіонах з розвиненою деревообробною промисловістю, де є значні кількості відходів виробництва, останні можуть бути використані як основне паливо в суднових енергетичних установках (СЕУ).

У такому разі доводиться зважати на певні обмеження, що накладаються особливостями цього палива на вибір типу СЕУ і пов’язаними в першу чергу з технологією перетворення хімічної енергії біомаси в ті форми (механічну, електричну або теплову), які необхідні на борту судна.

Концептуально існує дві можливості, засновані або на проміжній переробці деревини, або її прямому спалюванні.

Теоретично така переробка може включати піроліз з отриманням деревного газу (а також невеликої кількості рідкого біопалива), який може спалюватися безпосередньо в камері згоряння для отримання насиченої або злегка перегрітої пари, нагрівання термального масла та інших проміжних теплоносіїв, або піддаватися подальшому очищенню та фільтрації. Очищений деревний газ може бути використаний для отримання водню, біометану або безпосередньо подаватися в двопаливний двигун внутрішнього згоряння або газову турбіну. Зола та попіл, одержувані як побічний продукт, можуть бути перетворені за допомогою додаткового обладнання на деревне вугілля, що застосовується при виробництві сільськогосподарських добрив.

З урахуванням вищесказаного пряме спалювання деревних тріcок і/або спеціально перероблених для зручності будь-яких деревних відходів у котлах на біомасі в паросилових СЕУ, що раніше досить широко використовувалися на флоті, може бути доцільним.

5.1 Основні фізико-хімічні властивості деревини

Деревина, ксилема (від грец. xylon – дерево) – це, з одного боку, складна тканина деревних і трав'янистих рослин, що проводять воду та розчинені в ній мінеральні солі, з іншого – частина провідного пучка, що утворюється із прокамбію чи камбію. Вона складає основну масу стовбура, коренів і гілок деревних рослин. Отже, деревина – це природний матеріал рослинного походження.

Фізичні властивості деревини характеризуються її зовнішнім виглядом (кольор, блиск, текстура), щільністю, вологістю, гігроскопічністю, теплоємністю тощо. Деревина як матеріал використовується у натуральному вигляді (лісоматеріали, пиломатеріали), а також після спеціальної фізико-хімічної обробки. При цьому, як правило, з'являються відходи, які потребують утилізації або, що краще, переробки на деревне паливо. Інколи й натуральна деревина використовується як паливо.

Деревина містить вільну (в порожнинах кліток) і зв'язану (в оболонках кліток) вологу. Вологість визначається як (у %)

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100,$$

де m – початкова маса зразка;

m_0 – маса зразка в абсолютно сухому стані.

Щільність деревної речовини у всіх порід однакова (оскільки однаковий їх хімічний склад) і приблизно в 1,5 разу більше щільності води. Щільність деревини із-за наявності порожнин менша і коливається в значних межах в залежності від породи, умов росту, положення зразка в стовбурі. З підвищенням вологості щільність деревини збільшується. Для деяких порід деревини при вологості W = 12 % щільність (кг/м^3) складає:

дуб – 690; модрина – 660; береза – 630;

сосна – 500; осина – 495; ялина – 445.

Деревина має кілька ключових хімічних властивостей, що залежать від її складу, до якого входить целюлоза, лігнін, геміцелюлоза та екстрактивні речовини. Ці компоненти визначають здатність деревини до горіння, гниття, реакції з кислотами та лугами, а також взаємодії з іншими хімічними речовинами. Деревина, як органічна сполука, легко горить, утворюючи вуглекислий газ, воду та інші продукти горіння.

Целюлоза відповідає за міцність деревини; лігнін забезпечує жорсткість і стійкість до гниття; геміцелюлоза впливає на гнучкість та пластичність деревини; екстрактивні речовини (смола, дубильні речовини, жири та інші сполуки) впливають на хімічні властивості, колір, запах тощо. Основні хімічні компоненти деревини – целюлоза, лігнін і геміцелюлоза, які визначають її хімічну поведінку.

Деревина є легкозаймистим матеріалом, оскільки містить органічні сполуки, які горять під впливом високих температур. Деревина взаємодіє з кислотами, наприклад, розчинятися в них, а також змінює свої властивості під впливом лугів. Під впливом високих температур або хімічних речовин можуть утворюватися нові хімічні сполуки, такі як гази, смоли та інші продукти розпаду.

Целюлоза (вуглевод, полісахарид) – це стійка тверда речовина, нерозчинна у воді та звичайних органічних розчинниках (спирті, ефірі та ін.), білого кольору, без запаху та смаку. Вона складається із залишків молекул глюкози. Це природний полімер, полісахарид, волокниста речовина, головна складова частина оболонки рослинних кліток. У найбільшій кількості міститься у деревині, а також у волокнах бавовни, льону тощо. Вона виробляється організмами, синтезується біологічно шляхом приєднання молекул глюкози з втратою 1 молекули H_2O для кожного утвореного зв’язку.

Целюлоза являється горючою речовиною, температура розкладу 275, самозаймання і плавлення 467 °С.

З хімічної точки зору, лігнін – це складна органічна речовина нерегулярних біополімерів з розгалуженими макромолекулами, побудованими головним чином із залишків заміщених фенолоспиртів. Поряд з целюлозою є складовою частиною здерев’янілих тканин судинних рослин. Лігнін – це аморфна речовина від світло-жовтого до темно-коричневого кольору, густина 1,25 – 1,45 г/см^3, багата на вуглець. За певних умов використовується як недефіцитна зв’язуюча речовина при виробництві кам’яновугільних брикетів.

Хімічний склад деревини (поелементний) різних порід практично однаковий. Різниця між породами полягає в основному у щільності та міцності.

Хімічні елементи, що входять до деревини, наступні:

вуглець С……. 49 %;
кисень О……. 44 %;
водень Н …… 6 %;
азот N…….. 0,1...0,3 %;
кальцій Са та калій К….. 0,6...0,9 %;
натрій Na та магній Mg.. сліди,

а також неорганічні частинки − зола.

В основному деревина складається з таких речовин (приблизний відсоток за масою):

геміцелюлози – 42%
целюлози – 28% } разом це целюлоза, або холоцелюлоза – 70 %;
лігніну (суміш полімерів ароматичної природи) – 14…38 %;
екстраактивної речовини – 9,2 %;
золи – 0,8 %.

Загальна хімічна формула целюлози, як основної речовини деревини, така:

$$[C_6 H_7 O_2 (OH)_3]_n, \text{ або } (C_6 H_{10} O_5)_n ,$$

де n – ступінь полімеризації, який коливається в межах 1500 – 6000 і більше.

При горінні деревини і деревних матеріалів утворюються і виділяються: водяна пара (H_2O), теплота, діоксид (CO) і монооксид (CO_2) вуглецю. Крім того, утворюється в незначній кількості альдегіди, кислоти та різні гази. Речовини H_2O, CO і CO_2 − це стабільні молекули з міцними хімічними зв’язками.

Хімічну реакцію целюлози з киснем (тобто повного згоряння деревини) можна подати у такому спрощеному вигляді:

$$C_6 H_{10} O_5 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \uparrow E,$$

де E – енергія, що виділилася (екзотермічна реакція).

Енергія протягом хімічної реакції згоряння збуджує електрони в атомах газу, які, в свою чергу, випромінюють світло.

При нагріванні деревини до певної температури, спостерігаються наступні процеси:

120...150 °С − сушка деревини (випаровування води);

понад 250 °С − початок пірлізу деревини, тобто її розкладу на окремі речовини.

У результаті піролізу, тобто терморозкладу (сухої перегонки деревини при нагріванні до 450 °С), утворюються угарний газ CO, метан CH_4, водень H_2, вуглекислий газ CO_2 і вода H_2O; це паро- і газоподібні фракції.

Із деревини при нагріванні у повітряному середовищі із застосуванням інших речовин отримують деревний газ: 20 % − CO, 20 % − H_2, 10 % − CO_2 і 50 % − N_2. Внаслідок дещо інших процесів обробки деревини маємо піролізний газ: 8 % − етан; 24 % − скраплений газ пропан-бутан; 61,3 % − прямогонний бензин тощо.

5.2. Деревні тріски та пелети

Деревина − один із найпоширеніших видів палива з біомаси. Вона поставляється у вигляді колод, полін, тріски (подрібненої деревини) або так званих пелет, що являють собою гранульований вид твердого палива. Характеристики кожного

виду палива впливають на вибір типу котла. Колоди та/або поліна доступніші в сільській місцевості і найчастіше використовуються в невеликих системах, оскільки їх зазвичай завантажують у котел вручну. Гранули, як правило, виготовляють відповідно до певних станлдартів, що забезпечують сталість якості згоряння та властивостей, що визначають протікання процесів х зберігання, траспортування та використання. У зв›язку з цим, вони більш привабливі для широкого використання.

Паливні гранули, пелети (англ. pellets) − загалом це біопаливо; виготовляється із торфу, деревних відходів і відходів сільського господарства.

Деревні пелети − це, перш за все, альтернативне паливо, яке в останні десятиліття отримали широке розповсюдження в Європі, зокрема і в Україні. Ці гранульовані відходи деревообробки можна назвати концентрованими дровами. Завдяки високій щільності та низькій вологості вони мають більшу теплотворність. Ззовні − це продовгуваті (~ 30 мм) пігулки діаметром 6 або 8 мм (див. рис. 5.1, б); Їх вологість не перевершує 10 %, а процентний вміст мінеральних речовин, що обумовлюють кількість попелу та шлаків після згоряння, тобто зольність, не вище 1,5 %.

а *б*

Рис. 5.1. Деревні тріски (*а*) та пелети (*б*)

Пелети виготовляють шляхом пресування під високим тиском. Чимале застосування знайшли пелети, зокрема, із соняшникової лузги, соломи, відходів сосни тощо. Серед них найдешевші із соломи, із сосни − майже вдвічі дорожчі. На виготовлення пелет йде деревина різних порід. Виробництво паливних пелет не має на увазі використання клею, масла, інших сторонніх речовин для пресування. Отже, при їх спалюванні не виділяються шкідливі (токсичні) речовини.

Залежно від типу сировини використовуваної під час виробництва пелет, вони поділяються на такі види:

- деревні паливні гранули, одержані шляхом переробки кругляка твердих та м’яких порід дерев;

- пелети, одержані шляхом переробки соломи;
- пелети, отримані переробкою соняшникового лушпиння;
- пелети, отримані шляхом переробки качанів і стебла кукурудзи;
- торф'яні пелети.

Сучасне обладнання для виробництва якісних стандартизованих пелет з деревини та відходів деревообробки має складну систему подрібнення, очищення, сушки тощо. Виробництво гранул стандартних фракцій передбачає ретельний контроль на кожному кроці. У деревних пелетів загальний вихід летючих речовин становить приблизно 85 %. Нижча/вища теплота згоряння − 18120/21200 кДж/кг, що приблизно вдвічі менше, ніж для умовного рідкого палива (42707 кДж/кг). У порівнянні з натуральною деревиною пелети більш технологічні, зручніші у застосуванні автоматики, більш енергоємні.

Гранули, як правило, виготовляються відповідно до певних стандартів, що забезпечують сталість якості згоряння та властивостей, що визначають протікання процесів їх зберігання, транспортування та використання. Ці гранули мають більшу енергетичну щільність, ніж тріска, і займають менше місця при зберіганні. Хоча пелети зазвичай використовуються в невеликих котельних установках (до 200 кВт), у цьому відношенні немає певних правил, і існують більші котли, що підходять для пелет. Саме цими двома типами деревного палива можна обмежитися, розглядаючи практично можливі варіанти спалювання біомаси у суднових умовах та енергоємному промисловому виробництві.

Одним із найпопулярніших видів біопалива нині в Україні є деревна тріска, яка коштує відносно дешево. По теплоті згоряння 100 кг сухої тріски відповідають 31 кг нафтових залишків, 43 кг кам'яного вугілля, 50 кг сухого та 120 кг напівсухого торфу.

Деревна тріска (або просто тріска, скіпа) – це дрібно порізана деревина, яка використовується як паливо для опалення. Її отримують шляхом подрібнення деревної сировини, наприклад, за допомогою рубальних машин. Вона є більш стабільними енергоносієм, ніж інші види твердого палива, і може бути використана в автономних котлах. Крім того, тріска використовується для виробництва інших продуктів, наприклад, ДСП або паперу. Зазвичай тріска має розміри 2 х 2 або 3 х 3 см, а товщина має бути на половину меншою, але може бути довільних розмірів. Щільність залежить від виду деревини. Це найбільш стабільний енергоносій, порівняно з іншими різновидами твердого палива, адже його можливо заготовлювати впродовж усього року. При цьому, на відміну від стандартних дрів, тріска сумісна з автоматичними опалювальними котлами і має більш доступну ціну.

Світові стандарти виділяють наступні параметри, за якими класифікують тріску:

- рівень вологи;
- щільність;
- фракційний розмір;
- зольність.

Щільність може бути низька (до 160 кг/м^3), середня (160 – 250 кг/м^3) і висока (більше 250 кг/м^3). При рівні вологи більше 30 % значно зменшується теплотворність, починаються процеси гниття.

Точний розмір фракції важливий виключно власникам автоматичних котлів, адже великі шматочки деревини можуть вивести з ладу техніку. Паливна тріска, або тріска для опалення, має стандарт якості ДСТУ EN 15234-4:2013 Тверде біопаливо. Частина 4. Тріски деревні... (EN 15234-4:2012, ITD). Цей стандарт визначає вимоги до якості дерев›яних трісок для непромислового використання, такі як вологість, розмір фракцій, вміст попелу тощо.

Паливну тріску отримують після санітарної вирубки дерев та чагарників у парках, заповідниках, уздовж автобанів та залізничних колій – це збільшення площ плантацій рослин, що швидко ростуть, таких як міскантус, салекс, тополя тощо.

Сировину сортують, рубають у рубальних машинах, висушують, пакують і постачають споживачам або насипом (у самоскиді або тріскач), або упакованою в біг-беги.

Технологічні деревні тріски – бюджетне паливо для побутових котлів потужністю 15 – 50 кВт.

До переваг трісок перед іншими видами палива можна віднести такі:

– до тріски пред’являють мінімальні вимоги щодо сертифікації. Тріску можна зручно та недорого для споживача постачати або упаковувати в біг-беги, або насипом у самоскиді;

– швидко вирішується проблема утилізації відходів деревообробки;

– паливні тріски мають низьку собівартість;

– спалювання тріски майже в 3 рази вигідніше за інші енергоносії та види палива;

– за теплотворною здатністю тріски можна порівняти навіть із натуральною деревиною.

Найважливіші характеристики палива з біомаси, які мають бути зазначені в документації на його постачання, наведено у табл. 5.1.

У кожної європейської країни є свої внутрішні стандарти на тверде біопаливо, в тому числі і на пелети. Наприклад, в Австрії діє кілька наступних стандартів:

− ONORM M 7135 Вимоги до пелет. Даний стандарт описує якість пелет і брикетів. Пелети повинні бути виготовлені з натурального дерева. Використання зв’язуючих речовин не більше двох відсотків;

− ONORM M 7136 Вимоги до логістики пелет. Описується, яким чином повинно бути здійснено транспортування пелет тощо.

В Україні окремого держстандарту на пелети в даний час немає. Виробники випускають пелети по власноруч написаним ТУ. Контроль якості проходить у вітчизняних сертифікованих лабораторіях, де й отримують сертифікати. Використовується ДСТУ 8358: 2015 Брикети та гранули паливні з деревної сировини.

Таблиця 5.1.

Короткий опис основних фізичних характеристик палива з біомаси

Характеристика	Опис
Тепло згоряння	Теплота згоряння палива, що вимірюється в МДж/кг, або кДж/кг, або кВт-год/т, вказує на вміст енергії, що виділяється при повному згорянні. Розрізняють вищу та нижчу теплоту згоряння. Перша з них − це загальна енергія, що виділяється при згорянні, включаючи її частину, необхідну для випаровування води (що утворюється як продукт згоряння і що спочатку містилася в паливі), а друга − за винятком цієї частини
Вміст вологи	Вміст вологи у паливі виражається у відсотках від ваги вологого чи сухого палива. Вологість тріски може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від різних факторів, але в основному від того, наскільки витримана деревина. Гранули, як правило, мають вологість менше 10 %. Технічні умови на паливо з біомаси завжди містять прийнятне значення відносного вологовмісту
Об'ємна щільність	Об'ємна щільність − це маса палива, поділена на його об'єм, що включає також простір між частинками (тріскими або гранулами). Ця характеристика важлива для транспортування та зберігання палива
Енергетична щільність	Енергетична щільність палива виражає кількість енергії, доступної у певному об'ємі (наприклад, МДж/м^3). Від неї залежать обсяг паливосховища та частота поповнення запасу
Розмір частинок	Виробники котлів зазвичай вказують допустимі розміри частинок палива для обладнання, при яких забезпечується його якісне згоряння. Системи подачі палива спроектовані відповідним чином. Використання палива з частинками, розміри яких виходять за прийнятні межі, призводить до блокування паливоподачі. Для автоматичних систем особливо важливо, щоб паливо подавалося безперервно, без застрявання (у разі тріски) або руйнування (особливо пелет) з утворенням дрібних частинок, які можуть накопичуватися в паливному тракті
Кількість золи	Місткість золи вказується у відсотках від маси палива у сухому вигляді. Кількість золи, що утворюється, залежить від: – зольності палива; – ефективності спалювання; – наявності сторонніх домішок і включень деревної кори.

Національними та міжнародними організаціями зі стандартизації розроблено стандарти на паливо з біомаси. Вони охоплюють технічні вимоги до його фізичних та хімічних характеристик, які є важливими при спалюванні, обробці та зберіганні, а також процедури аналізу характеристик палива та продуктів згоряння.

Дотримання цих стандартів дозволяє уникнути проблем, пов›язаних з паливом (наприклад, неефективне згоряння, надмірні шкідливі викиди в атмосферу, засмічення системи паливоподачі або утворення конденсату в димоході).

Постачальники палива можуть виробляти його відповідно до єдиних технічних умов, аналітики можуть дотримуватися стандартних процедур, а розробники котлів та обладнання для спалювання можуть проектувати їх відповідно до цих стандартів. Виробники колів завжди наводять технічні умови, яким має відповідати паливо, що застосовується.

Європейським комітетом зі стандартизації (CEN, European Committee for Standardization) у рамках технічного комітету (CEN/TC 335 “Solid Biofuels and Pyrogenic Biocarbon”) розроблено низку стандартів для палива з біомаси, прийнятих Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO).

Деревні тріски зазвичай поставляється в «сирому» вигляді, тобто без сушіння. Залежно від сезону, породи дерев і методів обробки відносний вміст вологи в таких тріsках зазвичай становить 25 – 50 %. Вміст вологи суттєво впливає на її щільність й нижчу теплоту згоряння. Відповідні залежності, одержані на основі опублікованих даних [4, 5], зображні на рис. 5.2.

Згідно з нормами уряду Великобританії [10], середні значення нижчої теплоти згоряння та щільності деревної тріски можуть бути прийняті рівними 13,6 МДж/кг та 253 кг/м^3 відповідно. З цих значень, а також із співвідношень, показаних рис. 5.2., можна дійти висновку, що вміст вологи, що відповідає LHV = 13,6 МДж/кг, становить 29,5 %, а щільність − 30,8 %. Це дає підставу використовувати 30 % як середній вміст вологи (MC) для деревних тріsків при розрахунку кількості палива для котла на біомасі.

В цілому процес спалювання біомаси можна розділити на наступні послідовні етапи:

− попереднє нагрівання (до 100 °C): прогрів палива перед початком його сушіння;

− сушіння (100 − 150 °C): волога, що міститься в паливі, випаровується;

− піроліз (150 − 230 °C): піролітичне розкладання деревини, в процесі якого вона розпадається на рідкі смоли, чадний газ та газоподібні вуглеводні;

− газифікація сухого палива (230 − 500 °C): подальше розкладання сухого палива відбувається під впливом кисню, що надходить у котел з первинним повітрям для горіння;

− газифікація твердого вуглецю (500 − 700 °C): із твердого вуглецю під впливом вуглекислого газу, водяної пари та кисню утворюється монооксид вуглецю з утворенням видимого полум’я;

− окислення горючих газів (700 − 1400 °C): горючі гази, що утворилися на попередніх етапах, згоряють далеко від колосникових грат котла під впливом вторинного повітря, що подається в котел.

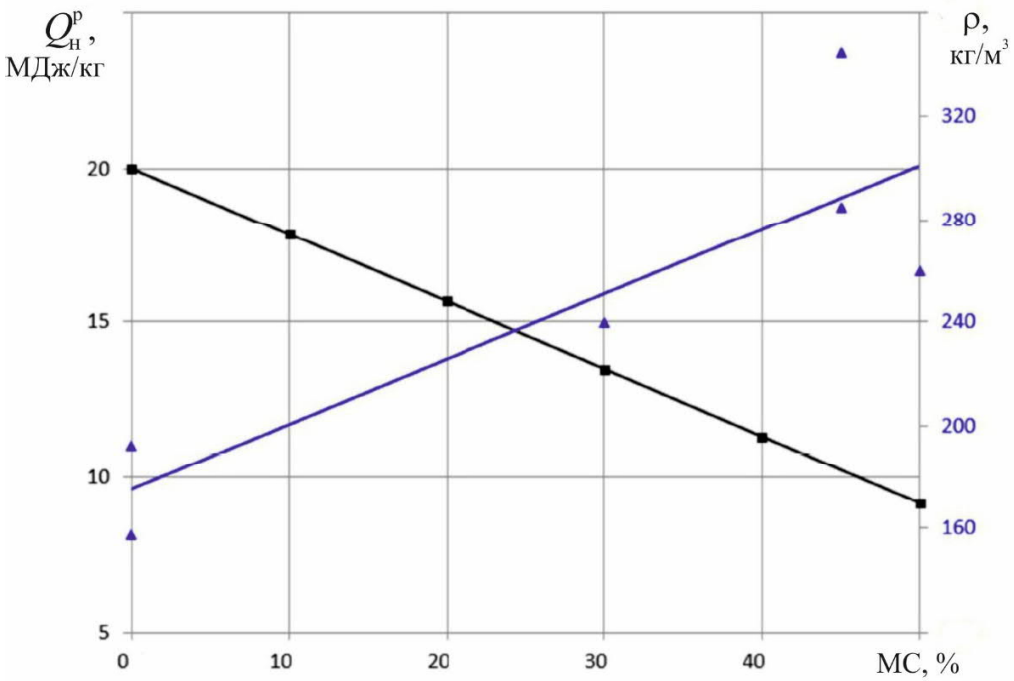


Рис. 5.2. Залежності нижчої теплоти згоряння ($Q_н^р$)і щільності деревних трісків (ρ) від їх відносного вмісту вологи (МС)

Однак варто відзначити, що нагрівання біомаси на перших двох названих етапах при зазначених температурах може супроводжуватися певною втратою цінних вуглеводнів (скипидару тощо) та деяким зниженням LHV палива.

Слід також врахувати, що утворення оксидів азоту NO_x починає швидко збільшуватись при середній температурі згоряння вище 1300 °С. Тому температуру згоряння слід підтримувати на рівні не більше 1200 °С. Тут слід зазначити, що вимоги щодо контролю NO_x, передбачені у Додатку VI до МАРПОЛ 73/78, поширюються на встановлені суднові дизельні двигуни з вихідною потужністю понад 130 кВт [6]. Більше того, згідно з правилами IMO Tier III викиди NOx не повинні перевищувати 2,0 − 3,4 г/кВт-год, що відповідає 555,6 − 944,4 мг/МДж або 900 − 1525 ‰. Згідно з [7] концентрація NO_x у газах, що відходять від котла на біомасі (наприклад, при його тепловій потужності 7,6 МВт), оцінюється в 83 мг/МДж, що суттєво нижче вказаних допустимих значень. Відповідно, можна зробити висновок, що для котлів на біомасі не потрібні жодні контрзаходи щодо зниження викидів NO_x.

Деревні тріски практично не містять сірки, і, отже, в димових газах котла на біомасі практично відсутні її оксиди SO_x [8]. Тому немає необхідності встановлювати додаткове обладнання (наприклад, скрубер) для видалення цієї шкідливої хімічної сполуки з димових газів.

Для запобігання утворенню сажі необхідно забезпечити якомога повніше згоряння, що досягається шляхом:

– забезпечення повної сухості біомаси перед тим, як паливо перейде на стадію піролізу. Це означає використання палива з правильним вмістом вологи

для котла або, у разі котла з рухомими ґратами, оптимізацію швидкості обертання грат, щоб паливо було повністю висушене;

– забезпечення необхідної кількості первинного і вторинного повітря для горіння, щоб забезпечити повну газифікацію біомаси і повне згоряння газів, що при цьому утворюються.

5.3 Доставка, зберігання та поводження з деревним паливом

Практичні аспекти доставки палива на борт судна визначаються кількома факторами:

– типом палива (тріски, пелети);
– можливостями доступу транспортних засобів до місця розвантаження;
– типом транспортних засобів та способом їх розвантаження.

Приклади можливих варіантів доставки деревної тріски та пелет з короткою характеристикою їх переваг та недоліків наведені в табл. 5.2.

Конструкція паливосховища залежить від вибору палива та способу його доставки, доступного простору на ділянці й будь-яких інших фізичних обмежень, а також розташування котла. Берегові запаси тріски можна зберігати в закритих складських приміщеннях з достатньою вентиляцією або на майданчиках, захищених від прямого впливу атмосферних опадів навісами. Гранули повинні зберігатися в закритих контейнерах або бункерах, що саморозвантажуються, оскільки підвищена вологість повітря може призвести до склеювання гранул.

Для візуального контролю залишку деревного палива в закритих сховищах зазвичай встановлюють одне або кілька оглядових стекол або вікон. Існують також ультразвукові або лазерні системи визначення його рівня, які забезпечують функцію дистанційного моніторингу та можуть бути підключені до системи керування для попередження оператора про необхідність поповнення запасу палива.

Спосіб подачі палива до котла залежить від виду палива та типу сховища. Деревні тріски зазвичай подаються в котел за допомогою шнекової системи, яка переміщає її з бункера, всередині якого працює мішалка, на колосники котла.

Спосіб подачі палива до котла залежить від виду палива та типу сховища. Деревні тріски зазвичай подаються в котел за допомогою шнекової системи, яка переміщає її з бункера, всередині якого працює мішалка, на колосники котла. Для систем великої продуктивності іноді використовуються скребкові ланцюгові конвеєри. У разі використання деревних гранул передбачається їх транспортування до котла за допомогою пневматичної системи, або подача самопливом з верхнього бункера або силосу.

Слід враховувати, що робота з деревним паливо та його зберігання пов›язані з певними ризиками для здоров›я та безпеки персоналу. Зокрема, монооксид вуглецю (CO), що виділяється паливом, може накопичуватися в герметичних ємностях (приміщеннях, бункерах) для його зберігання. Тому рекомендується встановлювати відповідні системи сигналізації у паливосховищі та в приміщенні установки. Крім CO, пелетні сховища можуть породжувати значну кількість сухого пилу, який при високій концентрації може спричинити вибух.

Таблиця 5.2

Огляд способів доставки деревного палива

Засіб доставки	Типові застосування	Переваги та недоліки
Бункер із пневматичним гнучким шлангом	Зазвичай гранули (пелети), але можуть використовуватися для перевезення тріски	Може доставляти великі обсяги, але потребує спеціальних транспортних засобів і вузлів підключення шлангів на паливосховище. Шланги можуть подовжуватися за рахунок приєднання додаткових секцій, що може бути потрібне в умовах обмеженого доступу до місця вивантаження. Інтенсивність подачі палива через шланг діаметром 100 мм не повинна перевищувати 12 т/год, щоб уникнути руйнування пелет під час їх розвантаження. Залежно від особливостей паливосховища, ця інтенсивність може знижуватися. Пневматичні системи можуть бути шумними та відрізнятися підвищеним пилоутворенням
Трейлер-самоскид	Пелети, тріски	Вантажні саморозвантажувальні автомобілі, причепи або напівпричепи з кузовом зазвичай широко доступні: вони швидко розвантажуються. Однак, потрібен хороший під›їзд автотранспорту та вільний простір для перекидання кузова. При цьому автомобіль зазвичай знаходиться вище за приймальний люк паливосховища (наприклад, заїхавши на рампу). Розвантаження самоскидів супроводжується значним рівнем шуму та пилоутворення
Трейлер з рухомим днищем	Тріски	Цей спосіб підходить для великих обсягів, але потрібен хороший під›їзд та достатньо місця для розвороту транспортних засобів. Вивантаження трісків відбувається з шумом та утворенням пилу

5.4. Котли, що працюють на біомасі

Порівняно з парогенераторами, що працюють на рідкому нафтовому паливі, котли, в яких спалюється деревина (пелети, тріски) , відрізняються низкою особливостей:

− більшими габаритними розмірами, як самого котла, так і необхідного простору навколо нього (доступ для очищення, системи подачі палива та видалення золи тощо);

− вони повільніше реагують на зміни потрібної теплової енергії. Коефіцієнт зниження потужності, який є показником здатності котла працювати ефективно і стійко при тепловій потужності, меншій, ніж її номінальне значення, у котлів на біомасі нижче, ніж у газових або мазутних аналогів;

− котельні установки, що працюють на деревних тріски або пелетах, потребують набагато більше місця через низьку енергоємність палива. З цієї причини необхідний доступ для підвезення деревного палива, придатний для великогабаритних транспортних засобів та/або частішого постачання;

− котли на біомасі виробляють летючу золу та тверді частинки, що може вимагати встановлення додаткового обладнання для боротьби з ними;

− розплавлена зола може утворити небажаний клінкер (шлак, що спікся) на колосникових гратках. Температура плавлення кремнезему (основного компонента золи) становить 1700 °C. При наявності хлоридів, зола може плавитися при температурі 773 °C, що цілком відповідає температурі згоряння в котлі.

Більшість промислових котлів на біомасі мають теплову потужність від 50 до 5000 кВт і призначені для виробництва тепла у вигляді гарячої води. Котли потужністю понад 1500 кВт виробляють пару, а ті з них, які використовують як теплоносій термальне масло, випускаються потужністю понад 3000 кВт.

Вибір котла на біомасі залежить від різних факторів, зокрема:

- необхідної теплопродуктивності;
- типу та характеристик палива;
- швидкості реакції котла на зміну потрібної теплової потужності;
- вимог щодо обмеження викидів.

Невеликі котли можуть мати вбудований паливний бункер, який потребує регулярного ручного завантаження деревними гранулами, але в більшості випадків паливо подається для спалювання за допомогою автоматичних паливоподатчиків (стокерів). Розрізняють стокери з верхньою та нижньою подачею палива. Конструкція цих пристроїв визначається такими факторами, як потужність котла, тип палива та його вміст вологи, а також гнучкістю управління подачею, необхідною для забезпечення ефективності процесу спалювання і зниження шкідливих викидів в атмосферу.

Існує два основних типи систем автоматичної подачі: шнекова та плунжерна. Перша з них заснована на використанні гвинтового механізму, який обертаючись переміщає паливо вздовж осі шнека. Великою перевагою такої системи є те, що паливо можна транспортувати у будь-якому напрямку (включаючи повороти та переходи між різними вертикальними рівнями), використовуючи

кілька послідовно розташованих шнеків. Це забезпечує більшу гнучкість при розміщенні котла та паливосховища. Однак системи зі шнековою подачею добре працюють тільки з паливом, що має відносно однорідну структуру за розміром, формою та вмістом вологи. Значні відхилення цих параметрів (від прийнятих при проектуванні значень) можуть призвести до засмічення тракту і порушення паливоподачі.

Іншим варіантом є гідравлічні плунжерні паливоподатчики, які в порівнянні зі шнековими системами, надійніші для великих котлів, оскільки вони можуть працювати з паливом з різними розмірами частинок та МС. Однак вони дорожчі за системи на основі шнеків і не можуть працювати більш ніж в одному горизонтальному рівні. Крім того, існує невеликий ризик займання гідравлічного мастила.

5.4.1. Котли з механічним топковим пальником

Пальники цього типу відносяться до стокерів з верхньою паливоподачею. Вони найчастіше використовуються для котлів невеликої потужності (30 − 50 кВт), але можуть використовуватись і для агрегатів потужністю до 1000 кВт. За допомогою шнека паливо подається на колосникові гратки, які можуть бути виконані також у вигляді чавунної труби (див. рис. 5.3).

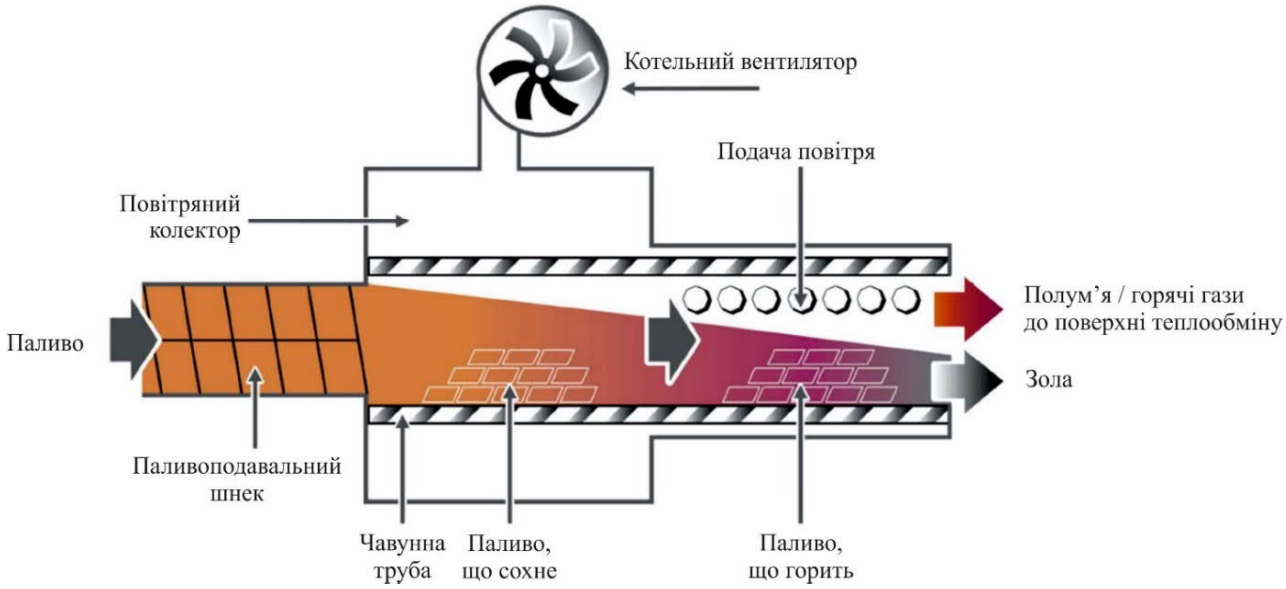


Рис. 5.3. Конструктивна схема котла з механічним пальником

Механічні пальники топки використовуються для подачі деревних тріски і пелет, МС яких становить менше 30 %. Невеликий розмір камери згоряння означає, що площа її вогнетривкого облицювання, яке відбиває тепло на деревне паливо і підсушує його, обмежена. Це робить цей тип котла більш чутливим до МС, але водночас посилює його реакцію на зміни потреби у теплі, порівняно з іншими котельними системами.

Зола, що утворилася в результаті згоряння деревини, скидається при подачі шнеком нового палива з колосникових гратків в зольник.

Первинне та вторинне повітря для горіння зазвичай подається одним вентилятором, що обмежує можливість підтримки нижчої (порівняно з зоною вторинного горіння) температури на колосникових гратках.

Котли такого типу відрізняються найпростішою системою автоматичної подачі палива та порівняно низькою вартістю. Однак, їх потужність дуже чутлива до змін МС та розміру тріски/гранул.

Якщо МС занадто високе, то можливе утворення чорного диму (сажі) через неповне згоряння. Невеликі котельні установки можуть не мати окремих вентиляторів первинного та вторинного повітря для горіння. Це ускладнює контроль температури горіння і може призвести до плавлення золи на колосникових гратках, а також ускладнює управління утворенням NO_x. Першу проблему можна запобігти, вбудувавши в колосникові гратки контур водяного охолодження, а другу − наприклад шляхом рециркуляції димових газів у камеру згоряння, для зменшення концентрації кисню.

5.4.2. Котли з рухомими колосниковими ґратками

У цих агрегатах, також відомих як котли зі ступінчастими або похилими колосниками, реалізовано принцип верхньої подачі палива. Їхня потужність широко варіюється від 10 до 10000 кВт.

Паливо подається на ряд похилих плоских панелей (також званих жаровими гратками), які рухаються зворотно-поступально, змушуючи паливо переміщатися по похилій поверхні у бік зольника (див. рис. 5.4).

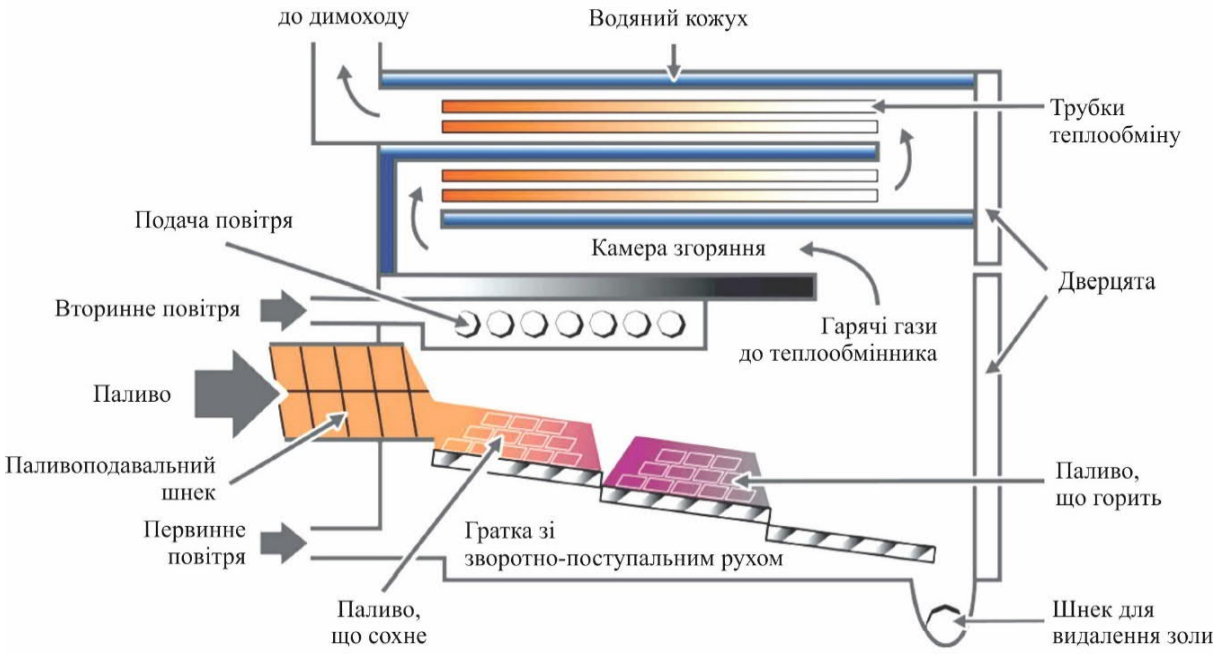


Рис. 5.4. Конструктивна схема котла з рухомими колосниковими гратками

Таке поступове переміщення палива означає, що етапи його горіння відбуваються в різних місцях колосникових граток. Це дозволяє краще контролювати загальний процес горіння. Рухливі колосникові гратки знижують

ймовірність утворення клінкеру на їх поверхнях, що дозволяє дещо пом'якшити вимоги до допустимого складу і характеристик біомаси.

Змінюючи швидкість руху колосникових грат, можна варіювати тривалість перебування в зоні сушіння, що забезпечує можливість використання в котлі палива з широким діапазоном МС (до 55 %). Це сприяє повному згорянню палива, запобігаючи утворенню сажі.

Простір всередині камери згоряння дозволяє ефективно використовувати здатність вогнетривкої футеровки відбивати тепло на паливо, що надходить, яке в цьому випадку може мати підвищений вміст вологи. Однак, хороша відбивна здатність футерування обумовлює уповільнення реакції котла на зміни потреби в теплі.

У котлах з рухомими гратками можна спалювати деревні тріски та пелети. Однак найчастіше використовуються тріски, оскільки вони дешевші, а їх МС, як правило, вище, ніж у деревних гранул. Біомаса подається в котел за допомогою шнекового або плунжерного паливоподавальника. Для підведення первинного та вторинного повітря зазвичай використовуються окремі вентилятори, що дозволяє гнучкіше керувати роботою котла.

Одним із прикладів такого типу котлів є конструкція, що передбачає спалювання біомаси на конічних рухомих колосникових гратках, які складаються з кількох кілець, що обертаються незалежно один від одного (див. рис. 5.5).

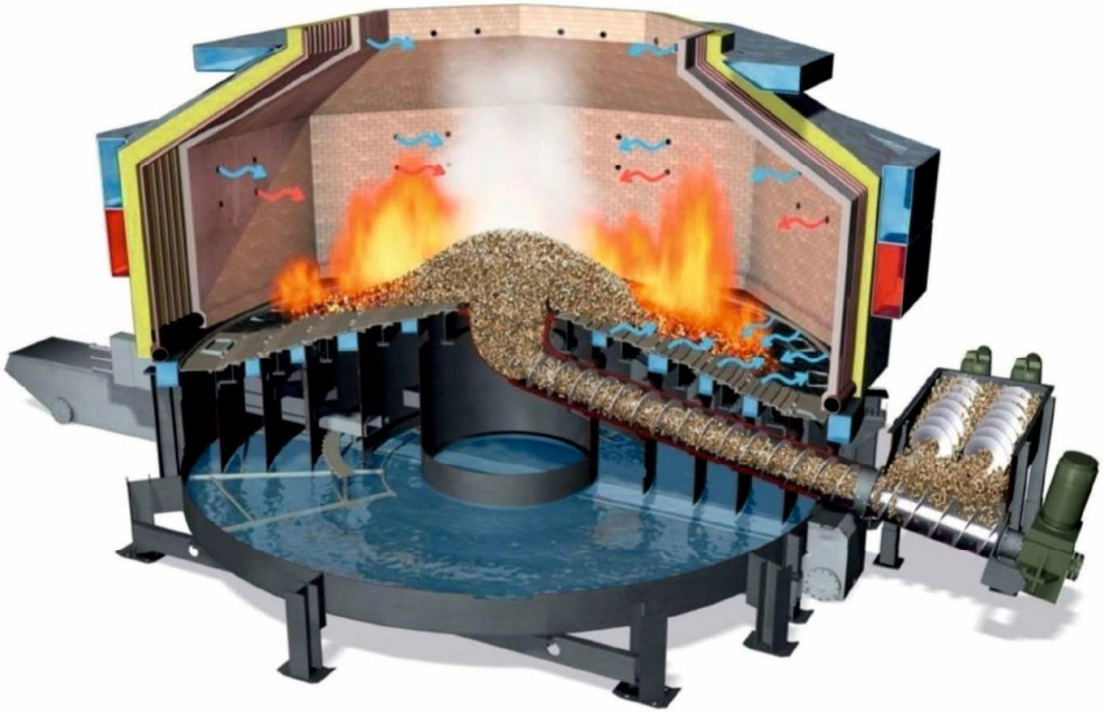


Рис. 5.5. Конструктивна схема котла з конічними рухомими колосниковими гратками

Кругла форма дозволяє повністю використовувати поверхню граток, не залишаючи застійних зон зі зниженою температурою. Паливо, яке може мати підвищену (до 65 %) вологість, безперервно подається шнековою системою до

вершини конуса і залишається на колосникових гратках до повного згоряння. Повертаючись у різні боки, колосникові кільця забезпечують рівномірний розподіл палива. Плавне регулювання їхньої швидкості обертання за допомогою частотно-регульованого електроприводу забезпечує ефективне стабільне горіння.

Низький рівень шкідливих викидів досягається завдяки рівномірній подачі первинного та вторинного повітря, що незалежно регулюється для кожного колосникового кільця. Подача з-під них первинного повітря, до якого може підмішуватися рециркуляційний димовий газ для підтримки оптимальної температури горіння, сприяє більш повному спалюванню палива. Повторне повітря подається в топку на трьох рівнях для забезпечення низького рівня викидів NO_x.

Швидкість обертання периферійного кільця граток, призначеного для збору золи та її допалювання за допомогою первинного повітря, що подається до неї, автоматично регулюється з метою мінімізації кількості вогнетривких частинок. Скребки, що обертаються, видаляють золу з цього кільця через наявні в ньому спеціальні отвори. Зола падає в піддон з водою, що знаходиться під колосниковими гратками. Таке рішення сприяє охолодженню золи, металевих елементів конструкції та підвищенню безпеки експлуатації котла.

5.4.3. Котли з нижньою паливоподачею

У котлах з нижнім завантаженням паливо подається шнеком у камеру згоряння з-під колосникових гратків. Паливо проштовхується вгору через перевернутий конус, утворюючи на колосникових ґратках купол, у якому відбувається горіння (див. рис. 5.6). У міру надходження палива зола падає з периферії купола в розташований нижче зольний бункер.

У котлах цього типу, які випускаються потужністю до 5000 кВт, можна використовувати деревні тріски та пелетне паливо, зазвичай із МС менше 30 %. Більшість із них мають окремі вентилятори первинного та вторинного повітря для горіння, що сприяє повному згорянню палива.

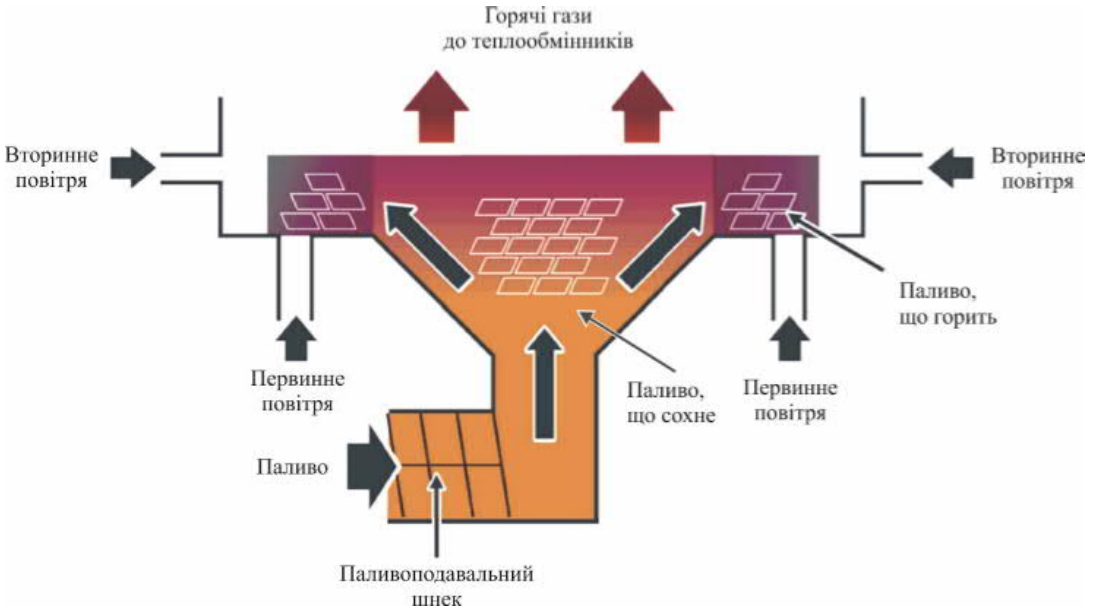


Рис. 5.6. Конструктивна схема котла з нижньою паливоподачею

Основними перевагами котлів з нижньою паливоподачею є простота конструкції та порівняно швидка реакція на зміни потреби в теплі. Однак вони можуть працювати лише на паливі, вологість і максимальний розмір частинок (фракцій) якого лежать у вузьких діапазонах.

5.4.4. Котли зі спалюванням палива у псевдозрідженому шарі

Спочатку застосування технології спалювання палива в псевдозрідженому шарі було обмежено великомасштабними котельними установками електростанції, але тепер випускаються відповідні котли порівняно невеликої потужності (до 500 кВт). Їх принцип роботи полягає в тому, що частинки палива зважуються і згоряють у шарі гарячого піску (або аналогічного матеріалу), який спочатку нагрівається мазутним або газовим пальником і псевдозріджується струменями повітря знизу. Це забезпечує безперервне перемішування палива з первинним повітрям і, отже, більш ефективне згоряння, що особливо важливо для палив низької якості з різним МС. Вторинне повітря для горіння подається у зону над псевдозрідженим шаром задля забезпечення повного згоряння (див. рис. 5.7).

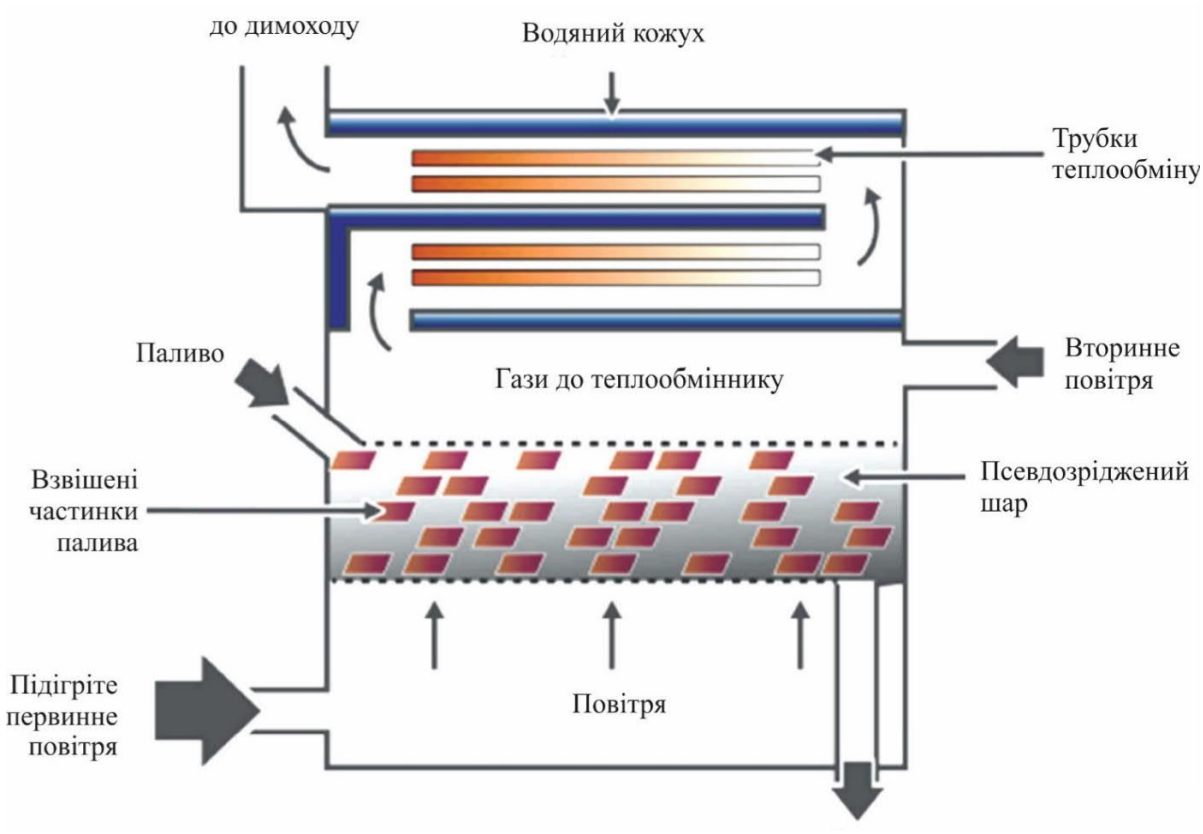


Рис. 5.7. Конструктивна схема котла зі спалюванням палива у псевдозрідженому шарі

5.4.5. Видалення золи та шлаку

Зола, що утворюється при спалюванні твердої біомаси, в ідеалі має складатися лише з негорючих мінеральних компонентів палива. На практиці зола містить кілька не згорілих органічних речовин, а також можливі забруднення (пісок, грунт).

Котельна зола поділяється на два типи:

− донна зола для котла на біомасі становить близько 98 % золи. Вона скупчується на колосникових гратках і, у міру надходження палива, падає з неї у вбудований зольник;

− летюча зола − це дрібна фракція, яка знаходиться у зваженому стані димових газів. Вона містить токсичні тверді частинки металів і їх солей, небезпечна для здоров›я та повинна уловлюватися з димових газів у процесі їх очищення з подальшою утилізацією відповідним чином.

Донна зола також має розглядатися як небезпечні відходи та підлягає звичайній утилізації – похованню на полігоні.

Шлак (або клінкер) – це склоподібний матеріал, який утворюється за умови перевищення температури плавлення золи. Температура плавлення золи залежить від складових палива. Зокрема, високий вміст хлоридів може значно знизити температуру плавлення золи та призвести до утворення клінкеру. Аналогічно, якщо температура на колосникових гратках стає занадто високою, наприклад, через сухе, ніж зазвичай, паливо або недостатньо швидке відведення тепла з котла, утворюється клінкер.

Клінкер може викликати проблеми з колосниковими гратками та компонентами системи золовидалення, такими як шнеки, що призводить до необхідності їх ремонту та порушення процесу нормальної експлуатації котельної установки. Конструкція котлів дозволяє уникнути утворення клінкеру в нормальних умовах шляхом регулювання температури на колосникових гратках. Деякі котли оснащені водоохолоджувальними гратками та/або рециркуляцією димових газів для обмеження температури на гратках.

5.4.6. Димоходи та шкідливі викиди

Система відведення димових газів для котла на біомасі повинна виконувати три функції:

− забезпечувати достатню тягу для видалення продуктів згоряння з котла за будь-яких умов експлуатації;

− підтримувати необхідну, відповідно до норм якості повітря, концентрацію продуктів згоряння;

− запобігати попаданню продуктів згоряння в житлові (або потенційно житлові) приміщення, щоб унеможливити створення там загрози для здоров’я людей.

Системи відведення відпрацьованих газів для котлів на біомасі зазвичай складаються з більшої кількості компонентів, ніж аналогічні системи для котлів, що працюють на нафтовому або газовому паливі.

Котли на біомасі завжди повинні працювати при меншому тиску в камері згоряння, ніж атмосферний, щоб горючі гази та продукти згоряння всередині котла не могли вийти в приміщення котельного відділення. Цей негативний тиск створюється за рахунок тяги в газовідвідному тракті, зокрема завдяки ефективній висоті вертикального димоходу. Зазвичай не рекомендується використовувати

додаткові вентилятори з примусовою тягою (димососи) понад тих, що встановлені в котлі, або як частину обладнання для зниження викидів (наприклад, циклонні уловлювачі сажі).

Довжина ділянки газовідвідного тракту між котлом та вертикальним димоходом має бути мінімальною. У димоході повинні бути передбачені точки доступу для його очищення, а також встановлені стабілізатори тяги та вибухозахисна панель. Вертикальний димоход повинен мати відкритий вихід в атмосферу, а також бути оснащеним зливом для відведення конденсату та дощової води.

Крім вуглекислого газу (CO_2) та водяної пари, основними викидами, які притаманні котлам на біомасі, є:

– монооксид вуглецю (CO);

– оксиди азоту (NO_x);

– тверді частинки (PM), включаючи летючу золу, солі, леткі органічні сполуки, сажу та органічні сполуки, що конденсуються.

Ці шкідливі викиди можна обмежити, головним чином, ретельно контролюючи умови згоряння. Однак існує компроміс між обмеженням температури згоряння для зниження викидів NO_x (наприклад, за допомогою рециркуляції димових газів) та забезпеченням повного згоряння для обмеження викидів CO, сажі та органічних сполук. Хімічні реакції та взаємодії між різними забруднювальними речовинами складні.

Невеликі котли потужністю до 300 кВт зазвичай не оснащуються спеціальним обладнанням для боротьби із забрудненням довкілля внаслідок спалювання біопалива. Більші котли часто оснащуються циклонними уловлювачами сажі, або вбудованими в котел, або окремим пристроєм, встановленим у газовідвідній системі перед вертикальним димоходом. Інші методи зниження викидів твердих частинок включають встановлення різних фільтрів (керамічних, електростатичних та ін).

Додаткове зниження викидів NO_x з великих котлів може бути досягнуто за допомогою обробки димових газів шляхом застосування систем селективного каталітичного (SCR) або некаталітичного (SNCR) відновлення азоту. Як правило, такі системи використовуються лише в котлах на біомасі, коли використовують забруднені деревні відходи.

Моніторинг викидів у атмосферу зазвичай проводиться, коли цього вимагають специфічні правила експлуатації (наприклад, плавання у зонах регульованих викидів, emission control areas – ECA). Зазвичай це стосується спалювання забруднених відходів деревини або установок з номінальною тепловою потужністю 1000 кВт і більше. Моніторинг може бути безперервним або періодичним, залежно від забруднюючої речовини, що підлягає моніторингу, та вимог компетентних наглядових органів. Для безперервного моніторингу викидів потребується оснащення котельної установки штатною системою моніторингу. Періодичний моніторинг потребує відбору проб представниками акредитованих організацій.

***

Від деревини до пелет, золи та добрив

Деревина як паливо почала застосовуватися людиною раніше будь-яких інших видів палива. На зміну деревини прийшли інші види палива, постійно відносно скорочуючи її споживання. Однак в даний час використання деревного палива характеризується черговим виплеском широкого застосування з сучасними системами автоматики цього дешевого альтернативного палива.

На рис. 5.8 зображено в загальному вигляді рух деревини від її заготовки до ліквідації відходів спалювання.

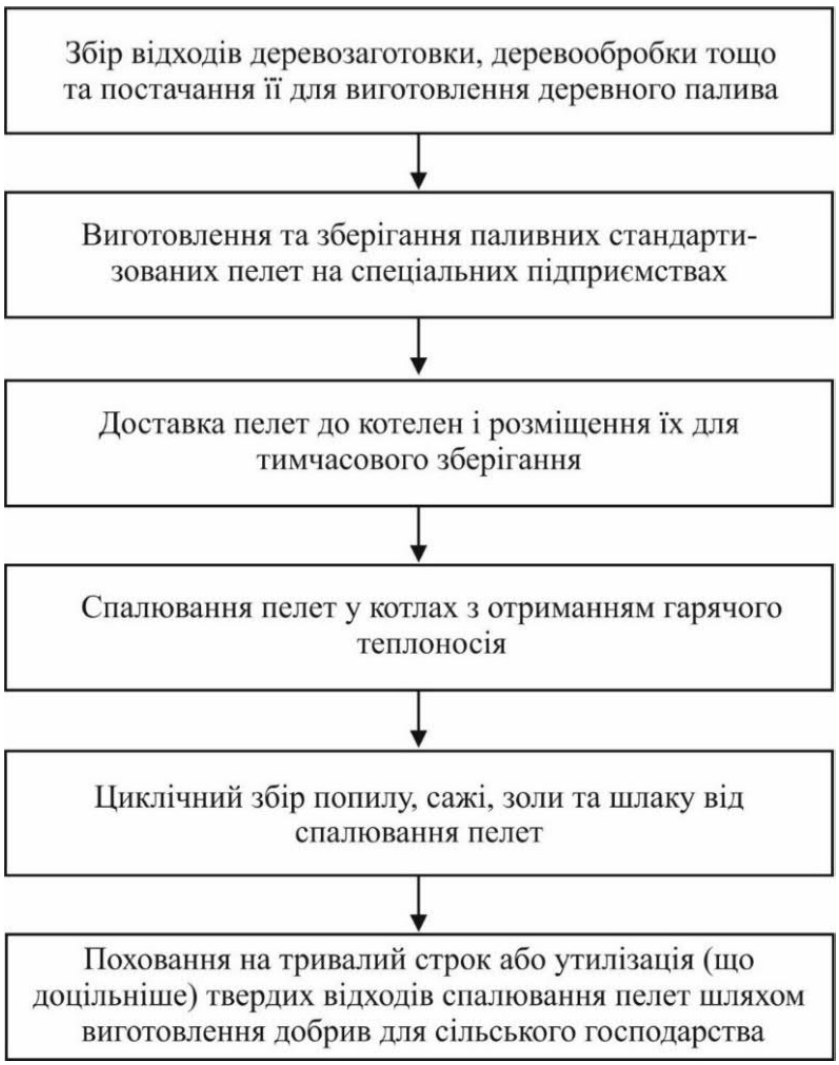


Рис. 5.8. Характерні стадії виробництва та застосування деревних пелет і утилізація відходів від їх спалювання

Питання для самоконтролю по розділу 5

1. Чому деревне паливо останнім часом називають альтернативним?
2. У яких випадках на суднах може мати перевагу деревне паливо?
3. Які хімічні елементи домінують в деревині?
4. З яких речовин складається деревина?
5. Що таке «целюлоза»?
6. Які речовини утворюються при повному згорянні деревини у повітряному середовищі?
7. При яких температурах відбувається сушка деревини, а при яких - піроліз?
8. Що таке «деревні тріски» і «пелети»?
9. Яким чином виготовляються паливні пелети?
10. Назвіть основні фізичні характеристики деревного палива.
11. Чому пелети виготовляють за певними стандартами?
12. Які послідовні процеси спостерігаються при спалюванні пелет?
13. Звідкіля беруться оксиди азоту NO_x у димових газах котлів, в яких спалюється деревне паливо?
14. Назвіть способи подачі пелетів до топки котла.
15. Охарактеризуйте будову котлів на біомасі:

− з механічним топковим пальником;

− з рухомими колосниковими гратками;

− з конічними рухомими гратками;

− з нижньою паливоподачею;

− зі спалюванням деревинного палива у псевдозрідженому шарі.

16. Назвіть шкідливі (токсичні) речовини у димових газах котла, що працює на деревному паливі.
17. Як запобігти шкідливим викидам від котлів, що працюють на деревному паливі?

6. АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА

До таких палив, як зазначалось у попередньому розділі, відносяться деревні тріски та пелети. В даний час у розробці знаходиться значна кількість інших палив, тобто альтернативних (від лат. Alternatus – інший). Комплексне використання альтернативної енергетики є частиною державної енергетичної політики всіх країн і веде до зниження їхньої енергозалежності.

Сучасні альтернативні палива, що відносяться до біоенергетики, є перспективними і для України. Наприклад, за підсумками 2020 року у біоенергетиці в України було заміщено 5,2 млрд м^3 газу при загальному споживанні близько 30 млрд м^3, що дозволило заощадити значні кошти. Перспективними видами біологічної паливної сировини в Україні є:

– відходи сільського господарства;

– відходи після сортування побутового сміття або спеціально вирощені енергетичні рослини;

– водна біомаса (спеціально вирощені водорості).

Україна як потужна аграрна країна, яка в останні роки отримує щорічно врожай зернових та олійних культур близько ста мільйонів тонн, має значний потенціал у цьому напрямі. «Наше майбутнє – це аграрна біомаса. Це те, чого у нас багато і що практично не використовується, – це солома, стебла кукурудзи, стебла соняшнику та пшениці», – зазначив голова Біоенергетичної Асоціації України Г. Гелетуха.

У Державному агентстві з енергоефективності та енергозбереження вважають, що потенціал заміщення газу за рахунок біоенергетики нині оцінюється у 37 млрд м^3 на рік.

До альтернативних джерел енергії відносяться аквазин, біометан, «бактеріальне» біопаливо, водовугільне паливо, дизель-паливо із переробленого сміття, диметиловий ефір, паливо із пластикових відходів і паливо з рослинної сировини.

6.1. Рідке та газоподібне альтернативне паливо

Останнім часом чимало точилось кривотлумачень щодо застосування нових невикопних видів палив, зокрема, аквазину, що, згідно з назвою, являє собою суміш води і вуглеводнів.

Аквазин – це високоефективне паливо, що виробляється шляхом змішування води з продуктами нафтопереробки, або з природним чи попутним газом за допомогою емульгатора, який не дозволяє розшаровуватися водно-бензиновій суміші. Таким чином, це стійка суміш. Аквазин служить замінником бензину, авіагасу та дизельного палива. Його переваги перед традиційними видами палива – знижений вміст шкідливих речовин і відсутність сполук свинцю у відпрацьованих газах.

Біометан одержують, переробляючи біогаз за допомогою новітніх технологій. Біометан також відомий як біоприродний газ або відновлювальний природний

газ-метан, який не має викопного походження, а виробляється з біогенних речовин і є компонентом біогазу. Для його виготовлення використовуються як природні, так і технічні методи. Це майже 100 % метан, що утворюється або шляхом збагачення біогазу, або шляхом газифікації твердої біомаси. Збагачений біометан не відрізняється від природного газу, тому його можна транспортувати й вживати таким же чином.

Біометан використовується для виробництва електроенергії та тепла на комбінованих теплоелектростанціях, газових теплових насосах, паливних елементах і як паливо для транспортних засобів.

«Бактеріальне» біопаливо одержують, застосовуючи штами бактерій і дріжджів, здатних виробляти бісаболен – органічну безкольорову рідинну речовину, що відноситься до роду терпенів (клас вуглеводнів), який використовується у парфумерії та для виробництва ароматизаторів. Випробування показали, що бісаболен може стати альтернативною сировиною для біосинтезу дизельного палива.

Біопаливо, отримане на основі використання бісаболену, має властивості, ідентичні дизельному паливу D2, але його структура набагато стійкіша до низької температури. На відміну від етанолу, який може використовуватися тільки як добавка до бензину, це паливо можна заливати у будь-яких кількостях безпосередньо в баки важкої техніки з дизельними двигунами та в баки реактивних літаків. «Бактеріальне» біопаливо на основі бісаболену менш агресивне по відношенню до трубопроводів і цистерн.

Водовугільне (водокутне) паливо – це суміш, яка на 60 – 70 % складається з тонкоподрібненого вугілля і на 29 – 39 % з води. Ще один відсоток посідають пластифікатори, які не дозволяють суспензії розшаровуватися на складові компоненти та підтримують її однорідність. Таке паливо є ефективним замінником газомазутного палива у децентралізованих системах виробництва електрики та теплоти.

Для виробництва розробленого понад 20 років тому водокутного палива ШКРП (штучного композитного рідкого палива) використана кавітаційна технологія обробки вугілля. Його подрібнюють спочатку до 2,0 мм, далі доподрібнюють в диспергаторі ультратонкого подрібнення до стану порошку. Після цього порошок змішується з водою та технологічними добавками і надходить у кавіатор, де відбувається доробка. Паливо, що одержується, характеризується такими показниками: калорійність – до 6000 ккал/кг, зольність – 1,0...1,5 %, плинність – 900...1000 сПз (сантипуаз) в діапазоні температур 20 – 70 °С, висока стабільність. Воно може зберігатися без руйнування фізико-хімічної структури понад 12 місяців. Висока калорійність водокутного палива досягається за рахунок попереднього збагачення вугілля, відмитого у флотаційних машинах, із вмістом золи до 2 – 3 % у твердій фазі та високою концентрацією вугілля до 70 – 75 %. Підвищення динамічної стійкості палива забезпечується спеціальними добавками, що створюють електростатичний бар'єр між частинками твердої фази, а також використанням твердої ультрадисперсної фази (менше 1,0 мкм).

Дизельне паливо із переробленого сміття – це вдала утилізація шляхом переробки органічних і біологічних відходів у рідке паливо. Види відходів для переробки: дерево та похідні (папір, тирса тощо); рослини та похідні; тканини, біовідходи, зіпсовані продукти; пластмаси всіх видів; гума, автопокришки; відходи тваринного походження, включаючи сіно, солому та стружку; лікарняні відходи; відходи рослинного походження, включаючи гній та послід тварин; відпрацьовані олії всіх видів, смоли, бітум, жири всіх видів, віск; відходи нафтогазового комплексу тощо. Переробка полягає в наступному. Попередньо осушений вихідний матеріал вступає в реакцію з каталізатором, і довгі молекули (вуглеводневі ланцюги) при температурі біля 390 °С змінюють форму, тим самим перетворюють сировину в дизельне паливо. Застосування каталізатора на основі глини та мінералів, що діє як сильна кислота, гарантує високий вихід продукції, високу якість і дозволяє проводити синтезування кінцевого продукту за низьких температур.

Диметиловий ефір (ДМЕ, C_2H_6O) – це простий ефір, що широко використовується на практиці. Його температура кипіння 25 °С. ДМЕ являє собою безбарвний газ, який при нормальних умовах в 1,63 разів важче повітря. Добре змішується з водою. Температура спалаху 41 °С і самозаймання 350 °С. Він може виготовлятися як з вугілля чи природного газу, так і з біомаси, але найбільше виготовляється із відходів целюлозно-паперового виробництва. Зріджується при невеликому тиску.

ДМЕ – паливо без вмісту сірки; вміст оксидів азоту у вихлопних газах на 90 % менше, ніж у бензину. Теплота згоряння ДМЕ близько 30000 кДж/кг, у класичного нафтового палива близько 42000 кДж/кг. Особливістю застосування є його вища окислювальна здатність (завдяки вмісту кисню), ніж у класичного палива.

Застосування диметилового ефіру не вимагає спеціальних фільтрів, але необхідна переробка систем живлення (установка газобалонного обладнання, коригування сумішоутворення) та запалення двигуна. Без переробки можливе застосування в LPG-двигунах при 30 % вмісту у паливі.

Паливо із пластикових відходів одержують наступним чином. Процес заснований на фракціоновій деполімеризації і схожий на крекінг сирої нафти. При температурі 400 °С (яка значно нижча за температуру при звичайному крекінг–процесі, такому як піроліз) довгі вуглеводневі ланцюжки піддаються поділу, потім випарюються і осаджуються в конденсаторі у вигляді дизельного палива. В основі лежить каталітичний піроліз. Як відомо, піроліз – це термохімічне розкладання речовини зі значним вмістом вуглецю. Оскільки пластикові відходи в природі розкладаються дуже повільно, то виготовлення із них палива – це вдала їх утилізація та ще й рентабельна.

6.2. Тверде альтернативне паливо з рослинної сировини

Дрова у вигляді шматків дерева зазвичай спалюються в печах, камінах, топках або багаттях для отримання теплоти, жару та світла.

Ваговий процентний склад будь-якої дров'яної маси приблизно однаковий. До нього входить до 90 % целюлози, 7...8 % супутніх вуглеводнів; решта (1...3 %) –

мінеральні речовини. Дрова мають порівняно невелику теплопродуктивність, підвищену вологість і малу щільність. Вони зручні тим, що містять мало золи (1 – 2 %), легко займаються і дають довге полум›я.

Вологість свіжозрубаних дров дорівнює приблизно 45 – 65 %; залежить від породи дерева, його віку та часу рубки. Чим молодше дерево, тим більше в ньому вологи. Взимку та восени дерева містять найменше вологи, тому ліс на дрова потрібно рубати в цей час. У висушених на свіжому повітрі протягом 1 – 1,5 років у дровах залишається близько 20 % вологи.

При опалювальні бажано, щоб тепловиділення відбувалося повільніше, але триваліший час. Для опалювальних цілей найкраще підходять дрова з листяних порід. Для печей і камінів використовують переважно дрова таких порід як дуб, ясен, береза, ліщина, тис, глід і т.п.

Показники теплотворної здатності дров різних порід деревини різко коливаються. В середньому нижча теплота згоряння становить ~ 15000 кДж/кг, а щільність коливається в межах 330 – 495 кг/м^3. Найлегші ялинкові дрова, найважчі грабові.

Паливні брикети (євродрова) – це спресовані відходи деревообробки (стружка, тріска), відходи сільського господарства (солома, лушпиння насіння соняшника, гречки) а також торфу. Вони мають досить широке застосування. Насамперед, використовуються для опалення приватних будинків у різних типах топок і печей, дров'яних котлах, камінах, при приготуванні їжі на грилі. Паливні брикети при горінні не іскряться, не виділяють чадний газ (CO), дають довге і рівне полум'я.

Матеріалом паливного брикету у повному обсязі є природна сировина. Сполучною речовиною є натуральний «живий» лінін, що міститься в клітинах омертвілої рослинної сировини. Після термічної обробки сировини у процесі виробництва євродрова не піддаються впливу грибків.

У порівнянні з природними дровами, євродрова, через більшу щільність, довше горять; через їх форму зручно і зберігати, і використовувати. Мають високу теплотворність. Вони дають у середньому вдвічі більше тепла, порівняно зі звичайними дровами. Вміст золи після згоряння брикетів у межах 1–3 %.

Виділяють 3 типи паливних брикетів:

– RUF-брикети у формі найбільшої цегли прямокутної форми;

– NESTRO-брикети циліндричної форми, іноді з радіальним отвором усередині;

– Pini&Kay-брикети, що мають 4, 6 або 8 граней з поздовжнім радіальним отвором усередині.

Суттєвим кроком у здешевленні альтернативного палива є вирощування біомаси на енергетичних плантаціях. Це передбачає створення спеціальних енергетичних плантацій з порід деревини і трави, що швидко ростуть, поблизу споживача енергії. У Швеції, наприклад, плантації верби на заболочених землях дають 25 т деревини з 1 га території на рік. Транспортні засоби, що працюють на генераторному паливі, дозволяють значно знизити викиди в атмосферу вихлопних і парникових газів, забруднених оксидами сірки, підвищуючи тим самим і

екологічність виробленого продукту. Адже деревне – паливо, як вважається, екологічно чисте, деревина не містить сірки, хлору та інших шкідливих для атмосфери елементів.

Також і для України притаманне є таке альтернативне паливо. Якщо Україна вирощуватиме енергетичні рослини хоча б на одному мільйоні гектарів деградованих земель, це дозволить замістити в еквіваленті до 5 млрд $м^3$ газу на рік.

Дочірня компанія НАК «Нафтогаз України» – «Нафтогаз тепло» повідомила, що розглядає питання про переведення ТЕЦ, що виробляють енергію з природного газу, на біосировину з очерету, або соломи.

Солома зернових і ріпаку, стебел кукурудзи, соняшнику тощо є основними складовими потенціалу біомаси в Україні. За складом вона відрізняється від деревних відходів і тирси значним вмістом летких речовин, низькою щільністю та невеликим часом горіння. Солома – висококалорійне паливо: кілограм соломи дає в середньому 3 кВт•год енергії. Це означає, що при спалюванні 3 кг соломи виділяється така ж кількість енергії, що і при спалюванні літра дизельного палива або кубометра природного газу.

Раціональним наразі є одержання палива із соломи шляхом брикетування. Щільність будь-яких брикетів, у тому числі і з соломи, досягає 1,4 кг/$дм^3$. Переробка соломи на брикети та пелети вирішує проблеми зберігання й транспортування сировини, що робить солому універсальним паливом. Складнощі у заготівлі та використанні також є. Наприклад, солома вимагає спеціального температурного режиму спалювання. При надто високій температурі солом›яна зола починає плавитися та утворює шар, схожий на клінкер, через який заклинюється механіка котла.

Кукурудза складна в плані заготівлі: восени, коли прибрано врожай, її стебло ще занадто вологе і його доведеться досушувати, а після зими рослина полягає, і зібрати стебла комбайном практично неможливо, а вручну – невиправдано дорого.

Лушпиння соняшника (лузга) – одне з найбільш економних твердих біопалив. За статистикою Мінагрополітики, на нього вже перейшло 60 % олійно-переробних підприємств України. Зольність лушпиння відносна невисока, лежить у межах 3 – 4 %.

У табл. 6.1 наведені характеристики твердого альтернативного палива з рослинної сировини.

Торф – органічна рихла гірська порода, яка знаходить використання як горюче корисне викопне. Він утворюється у процесі природного відмирання і неповного розпаду болотних рослин та тварин в умовах надлишкового зволоження й обмеженого доступу повітря. Компонентний склад органічної маси: водорозчинні речовини – 1...5 %, целюлоза – 4...10 %, гумінові кислоти – 15...50 %, бітуми – 2...10 %, легкогідролізні з’єднання – 20...40 %, лігнін – 5...20 %. У природному стані торф містить у собі 86...95 % води, а вологість сухого торфу складає 20...30 %. Питома вага останнього становить 150...200 кг/$м^3$. Він являє собою складну суміш органічних і мінеральних речовин. Органічні речовини містять водорозчинні

компоненти (1 – 5 %), бітум (2 – 10 %), сполуки, що легко гідролізуються, (20 – 40 %), целюлозу (4 – 10 %), гумінові кислоти (15 – 50 %) та лігнін (5 – 20 %). У верхньому торфі міститься мінеральних речовин небагато (1 – 5 %), а у низькому значно більше (12 – 20 %). Ці речовини визначають зольність торфу. Хімічний склад золи в основному представлений кремнієм, кальцієм, залізом і алюмінієм. Загалом торф – це складний, багатокомпонентний матеріал, і його склад може коливатися в залежності від типу торфу, місця розташування та умов його створення.

Таблиця 6.1

Показники твердого біопалива

Вид палива	Зольність, %	Теплота згоряння, кДж/кг	Щільність, т/м^3
1. Солома	–	10500 – 12500	–
2. Солома в тюках	–	14200	–
3. Пелети із соломи	4	16500 – 18800	0,7 – 0,9
4. Брикети із соломи	5,5	15400 – 21000	1,08
5. Стебло кукурудзи, качани	–	12500	–
6. Брикети із стебел кукурудзи, кочанів	3	18000	0,75 – 0,89
7. Стебло соняшника	–	12500	–
8. Брикети зі стебел соняшника	4,3	18100	0,85 – 0,89

Торф має безліч застосувань: в енергетиці як паливо для виробництва електроенергії, тепла на електростанціях або безпосередньо як джерело тепла для промислових, жилих і інших цілей; у садівництві й сільському господарстві в якості добрива; в хімічній технології й медицині тощо.

Основними видами використання торфу є отримання з нього торф’яного палива й хімічних продуктів, таких як гумінові препарати, барвники, целюлоза, бітуми, віск, парафін, етиловий спирт, оцтова кислота, щавелева кислота, кормові дріжджі, дьоготь тощо. Хімічні продукти з торфу одержують напівкоксуванням, газифікацією, мокрим обвуглюванням, екстракцією. З 1 тонни сухого торфу можна отримати 450 – 700 кг гумінових препаратів, 150 – 200 кг целюлози, 40 – 50 кг парафіну, до 45 кг етилового спирту і т.д.

Наприклад, торф застосовується в зерносушарках із теплообмінниками. Через досить високий рівень тепловіддачі його називають молодим вугіллям. Рівень зольності торфу дещо нижчий за вугілля, але все одно досить високий.

Торф широко розповсюджений на Землі. Близько 60 % усіх заболочених територій мають запаси торфу. По різним оцінкам, у світі від 250 до 500 млрд тонн торфу (у перерахунку на 40 % вологості).

Він покриває біля 3 % площі суші. При цьому у північній півкулі торфу більше, чим у південній. Заторфованість росте при русі до півночі і при цьому зростає частка верхніх торф›яників. Так,

у Німеччині площа торф›яників займає 4,8 %;

у Швеції – 14 %;

у Фінляндії – 30,6 %;

у Росії – 31,8 % у Томській області (Васюганські болота), 12,5 % у Вологодській області.

За оцінками канадської Peat Resources (2010 рік) на першому місці в світі по запасам торфу знаходиться Канада (170 млрд т), на другому Росія (150 млрд т). Індонезія є домівкою найбільших тропічних торф›яників у світі загальною площею понад 13 млн га, розташованих на трьох великих островах: Суматра, Калімантан і Папуа. Канада, Росія, США та Індонезія мають більше всього торф'яників у світі.

Торф знаходиться в одній ціновій групі з паливною тріскою та дровами. Як замінник газу, торф використовується в Західних і Північних регіонах України. Лідер із покладів цього палива – Рівненська область. Там зосереджена п'ята частина всіх торф'яних запасів країни. Крім того, проводиться видобуток торфу у Волинській, Львівській, Житомирській та Сумській областях.

* * *

Від сировинних відходів до раціонального палива

Альтернативне паливо виробляється та використовується тоді, коли традиційні палива більш дорогі. Крім того, кудись треба дівати відходи усякого виробництва, так що їх утилізація з виготовленням палива (якщо це можливо) стає прибутковою. Звичайно, це може бути при збігу певних обставин.

На рис. 6.1 показані одні з можливих етапів застосування альтернативного палива.

Рис. 6.1. Етапи застосування альтернативного палива

Питання для самоконтролю по розділу 6

1. Що таке «альтернативне паливо»?
2. У зв’язку з чим виникла потреба у пошуку альтернативного палива?
3. Перерахуйте відомі Вам альтернативні види палива.
4. Дайте характеристику водокутного палива.
5. Дайте характеристику дров як альтернативного палива.
6. Дайте характеристику паливних брикетів як альтернативного палива.
7. Дайте характеристику соломи як альтернативного палива.
8. Дайте характеристику лушпиння соняшника як альтернативного палива.
9. Дайте характеристику торфу як альтернативного палива.

7. ПАЛИВОПІДГОТОВКА

Паливопідготовка передбачає комплекс заходів щодо обробки, зберігання та підготовки палива перед спалюванням. Мета паливопідготовки – привести паливо у стан, на який розрахований топковий пристрій, зокрема, виключити шкідливий вплив різних домішок у паливі на топковий процес, забезпечити сприятливі умови для початку та подальшого протікання цього процесу, чим підвищити ефективність згоряння палива, підвищити вибухопожежобезпечність, забезпечити використання палива дешевих сортів.

7.1. Підготовка твердого палива до спалювання [11]

Вугілля від місць видобутку до теплогенеруючої установки зазвичай доставляється залізничним, водним або автомобільним транспортом.

Паливне господарство, наприклад, електростанція, що працює на вугіллі, складається з вагоноперекидачу, вугільного складу із запасом палива та системи конвеєрів, які зв›язують вагоноперекидач, склад, дробильний пристрій і бункерну галерею котельні.

Для попередження самозаймання паливо укладають у штабелі по марках і ущільнюють катками; для штабелювання застосовують бульдозери, вугленавантажники, вантажопідіймальні крани та інші механізми.

Вугілля, що може самозайнятися, витрачається насамперед. При зберіганні вугілля всіх сортів, крім антрациту, контролюють температуру всередині штабеля, яка повинна не перевищувати 60 °С.

Цикл підготовки твердого палива, а саме вугілля, до спалювання залежить від його марки та застосовуваної технології спалювання, але практично у всіх випадках вугілля попередньо сушать, подрібнюють до певного розміру частинок і в такому вигляді подають у топку котла.

Зазвичай підготовка твердого палива включає розвантаження, дроблення великих шматків, транспортування палива до котельного цеху, сушіння та подрібнення, подачу подрібненого й підсушеного палива до топкового пристрою. Системи підготовки водовугільних суспензій припускають дроблення вугілля, термообробку, змішування з водою та подрібнення у «мокрому» млині.

При одноступінчастому дробленні розмір вугілля зменшується до 15 – 60 мм. Якщо надходить вугілля зі шматками до 800 – 1000 мм, то встановлюють обладнання для двоступеневого дроблення палива. Для твердого палива деяких сортів (антрацитовий штиб, торф, відсіви кам’яного вугілля) дробарки на тракті паливоподачі не потрібні.

Підготовка твердого палива для спалювання його у факельних топках проводиться в пилоприготувальних установках. З палива, що надходить у котельню шматками різних розмірів, відокремлюють дрібне паливо, тріску-деревину, сталеві предмети, що потрапили (болти, гайки, цвяхи, обрізки заліза) та сірчаний колчедан. Наявність цих домішок у паливі виводить з ладу дробильно-млинове обладнання. Тому паливо проходить через електромагнітні сепаратори, механічні

щепоуловлювачі й уловлювачі колчедану, а потім попадає на транспортер, за допомогою якого розподіляється по приймальних бункерах дробильної установки. З бункерів котельні подрібнене (до розміру шматків 6 – 25 мм) паливо надходить у пилоприготувальну установку, де воно розмелюється у вугільний пил.

Підготовка твердого палива до переробки включає операції з усереднення гранулометричного складу (одержання зерен приблизно однакового розміру) та зменшення вмісту мінеральних домішок і вологи. Сукупність цих операцій називається збагаченням. При збагаченні отримують концентрат, зростки породи з паливом (проміжний продукт) і порожню породу. При цьому дещо зменшується вміст сірки у паливі, оскільки неорганічні сірчисті сполуки частково видаляються разом із породою.

Технологічна схема підготовки вугілля в зимовий період передбачає прийом вугілля та подачу його на розморожування, підсушування, підготовку необхідного фракційного складу.

У весняний, літній і осінній періоди зі складу вугілля надходить у бункер-сепаратор цеху підготовки, далі в дробарку, потім на ділянку підготовки фракційного складу. Сушарка використовується лише у разі надходження вугілля з вологістю понад 8 %.

Застосування топок з киплячим (псевдозрідженим) шаром дозволяє спростити схему підготовки твердого палива, відмовитися від приготування пилу при забезпеченні ефективного горіння з малим виходом токсичних речовин. Киплячий шар невибагливий до якості палива: в ньому успішно спалюють вугілля і вуглецевмісні відходи із зольністю до 70 % і відносно малозольні з вологістю до 60 %.

Підготовка деревини до спалювання включає декілька важливих етапів: очищення від пилу, забруднень та старого (фарбового, якщо є) покриття, висушування до оптимальної вологості (15 – 20 %) та правильне зберігання для уникнення повторного намокання. Також, для підвищення ефективності горіння та захисту від вогню, можна використовувати вогнезахисні просочення.

Етапи підготовки деревини до спалювання полягають в наступному.

1. *Очищення*. Перед спалюванням деревини її очищують від пилу, забруднень, лаку, фарби та жирних плям. Це робиться щітками, з крапками, шліфувальними машинками або за допомогою розчинників і миючих засобів.

2. *Висушування*. Деревину перед спалюванням Добре висушують, щоб уникнути виділення водяної пари, яка знижує ефективність горіння та сприяє утворенню смоли в димоході. Використовують різні види сушіння деревини: атмосферну, камерну, контактну, індукційну, ротаційну, радіаційну тощо. Часто віддають перевагу атмосферній сушці, хоча це потребує значного часу, однак економічно доцільно.

3. *Зберігання*. Зберігають дрова, тріски, пелети в сухому Та добре повітряному місці, уникаючи повторного промокання.

4. *Вогнезахисні просочення*. Для додаткового захисту від вогню та підвищення стійкості до біологічних пошкоджень використовуються вогнезахисні просочення.

5. *Вибір породи деревини.* Різні види деревини розрізняються характеристиками горіння. Наприклад, дуб і бук забезпечують довше горіння та більшу тепловіддачу, тоді як сосна дає жарке але нетривале полум'я.

6. *Розбивка на дрібні частини.* Дрова для топки печі краще розбити на дрібні частини коми щоб вони краще розпалювалися й горіли.

7. Використання розпалювача для кращого розпаювання вогню.

Деревні пелети перед спалюванням потребують підготовки, що включає зберігання у сухому місці, контроль вологості та, можливо, доопрацювання пелетного котла або системи пальника. Під час зберігання слід стежити за вологістю пелет. Надмірна вологість негативно впливає на процес згоряння та ефективність пелетного котла, за станом якого необхідно стежити, в першу чергу за його колосниками. Інколи виникає потреба у водяній парі чи водопідготовці для доведення вологості пелет до оптимального рівня.

Деревну тріску слід підготовувати, як і іншу деревину, до спалювання, щоб забезпечити ефективне та безпечне горіння. По-перше, необхідно її висушити, щоб вміст вологи був не більше 30 %. По-друге, тріску слід подрібнити (при необхідності) до розмірів, зручних для конкретного типу котла. Найкраще (найдешевше) висушувати тріску на відкритому повітрі, у штабелях, забезпечуючи хорошу циркуляцію повітря. Зазвичай подрібнюють тріску до розмірів, що відповідають вимогам котла, але, як правило, не більше 25х25х2 мм. Рекомендується зберігати тріску в штабелях, але не більше двох трьох тижнів, дотримуючись правил пожежної безпеки.

Підготовка *торфу* до спалювання передбачає висушування або ущільнення, щоб покращити його горіння. Торф може бути використаний, як паливо, наприклад у торфових брикетах. Для спалювання торфу потрібне його достатнє висушування, щоб досягти потрібної вологості, яка зазвичай не перевищує 40%.

Етапи підготовки торфу до спалювання полягають у наступному.

1. *Висушування*. Торф, як зазначалося раніше, має високий вміст вологи, що перешкоджає його спалюванню і знижує нижчу теплоту згоряння. Для досягнення потрібної вологості торф піддають висушуванню у спеціальних сушильних установках на відкритих майданчиках.

2. *Ущільнення.* Щоб покращити горіння та зберегти енергію, торф ущільнюють у брикети, пелети чи інші форми твердого палива. Ущільнений торф горить рівномірно, не виділяє кіптяви і великої кількості диму, не іскриться, що дозволяє його використовувати у всіх видах топок – не тільки в печах і котлах центрального опалення, але й у кімнатах (камінах). Завдяки ущільненню горіння триваліше. Приклад: один торф›яний брикет горить близько 6 годин. До речі, дві тонни торфу брикету по калорійності замінюють майже тонну вугілля.

3. *Видалення забруднень*. Торф перед спалюванням вичищають від сторонніх елементів, таких як гравій, каміння, рослинні залишки, що знижують викиди й сприяє якості горіння.

Стиснутий і висушений торф, так зване торф'яне паливо, є паливом переважно місцевим і на далекі відстані, як правило, не перевозиться через об›ємну вагу,

наявність у нього значної кількості баласту (води й золи), а також тому, що під час перевезення та, особливо, перевантаження якість торф›яного палива знижується (він кришиться).

У процесі підготовки торфу до спалювання суттєво змінюється його теплота згоряння. Так, наприклад:

- фрезерний (подрібнений) торф з вологістю 40 % – 11100 кДж/кг;
- грудковий торф з вологістю 30 % – 13100 кДж/кг;
- обвуглений торф – 14400 кДж/кг;
- торф'яні брикети – 15900...18000 кДж/кг.

7.2. Підготовка рідкого палива до спалювання [11]

В стаціонарних і мобільних енергетичних установках використовуються: мазут різних марок, мартенівське паливо, стабілізована нафта, солярове й сланцеве масло, легке паливо (гас, бензин). Найбільш поширеним паливом для спалювання в печах, промислових і енергетичних котлах є мазут, що характеризується значною в'язкістю, щільністю, вмістом високомолекулярних речовин і смол. Мазут може застосовуватися як основне паливо, тобто коли ТЕС або котельня працюють тільки на мазуті, як резервне паиво і лише для розпалювання (на пиловугільних ТЕС).

Доставка мазуту на електростанції та промислові котельні проводиться залізничним, водним, автомобільним транспортом й трубопроводами.

При доставці мазуту залізницею паливо зливається в приймально-зливні пристрої. Для зливу потрібен розігрів мазуту марки 40 (40В) до температури 30 °С і марки 100 (100В) до 60 °С.

До складу мазутного господарства входять:

– приймально-зливні пристрої;
– мазутосховища (приймальні та основні ємності);
– станція з насосами, підігрівачами, фільтрами;
– паромазутопроводи;
– система рідких присадок (ємності, обігрівачі, насос-дозатор);
– система пожежогасіння.

Рідке паливо перед спалюванням має пройти цикл спеціальної підготовки для забезпечення ефективного спалювання, надійності топкового пристрою та хвостових поверхонь нагріву, зменшення забруднюючих викидів. Підготовка включає наступні заходи:

– первинний підігрів для забезпечення в'язкості, необхідної при транспортуванні;
– фільтрація;
– обробка присадками;
– знесолення;
– забезпечення робочого тиску перед спалюванням;
– підігрів до в'язкості, необхідної для оптимальної роботи форсунок.

Первинний підігрів визначається умовами зливних і наливних операцій та транспортуванням мазуту, його в'язкістю. В'язкість мазуту залежить від температури, тому необхідно, щоб мазут був нагрітий до температури відповідно до умов його використання.

Фільтрування мазуту. Для очищення мазуту від механічних домішок використовуються фільтри грубого та тонкого очищення. Залежно від конструкції фільтри бувають щілинні, кулькові та сітчасті. Грубі сітчасті фільтри мають від 5 до 64 отворів на 1 $см^2$ фільтруючої поверхні, фільтри тонкого очищення – від 64 до 400 отворів на 1 $см^2$. Фільтри грубої очистки встановлюються перед паливними насосами, фільтри тонкої очистки – перед форсунками. Необхідний ступінь фільтрації рідкого палива визначається обладнанням мазутного господарства і типом форсуночних пристроїв. Зниження вимог до фільтрації не допускається, мінімальний розмір відфільтрованих частинок не повинен перевищувати 5 мкм.

Обробка присадками та знесолення. Мазут за хімічним складом є сумішшю високомолекулярних органічних, гетероорганічних і металоорганічних сполук. У структурному відношенні мазут є багатофазною дисперсною системою. До частинок дисперсної фази відносяться високоплавкі парафінові вуглеводні, карбени та карбоїди, тверді мінеральні домішки, глобули води, газові бульбашки. Осадження частинок дисперсної фази й утворення відкладень, призводить до певних труднощів на всіх стадіях транспортування, зберігання та спалювання мазуту. Карбоїди та мінеральні домішки викликають абразивний знос насосів, арматури та форсунок. Присутність глобул води ускладнює експлуатацію мазутного господарства, негативно впливає на повноту згоряння, дестабілізує процес горіння й може призвести до зриву факелу. Наявність у мазуті шкідливих домішок викликає генерацію похідних сполук, корозію та забруднення робочих поверхонь і зменшення теплопередачі. Для зниження негативних явищ, що виникають при використанні мазутного палива, його обробляють на нафтоперегінному заводі або безпосередньо перед спалюванням. Існують різні методи обробки мазуту: гідромеханічний, фізичний і хімічний.

Гідромеханічна обробка (ГМО) проводиться у спеціальних апаратах (ротаційних, струменевих, вібраційних та ін), що дозволяють створювати тонкодисперсну суміш мазуту з в'язкими відкладеннями та водою. В результаті ГМО вода та мазут перемішуються до мікроемульсії. Оскільки температура кипіння води значно нижча за температуру кипіння мазуту (280...320 °С), то при попаданні крапель мазуту в топкову камеру відбувається швидке випаровування емульгованої в паливі води, що призводить до мікровибуху крапель мазуту і до їх вторинного дроблення. При цьому факел більш рівномірно розподіляється в топковому просторі, зростає повнота і швидкість згоряння, вирівнюється температурне поле, знижується максимум температури в зоні горіння, внаслідок чого на 30...40 % зменшується утворення оксидів азоту. Вміст емульгованої води в мазуті рекомендується 6 – 12 % при дисперсності води 10 – 15 мкм.

До фізичних методів відноситься обробка палива магнітним, електричним, тепловим й іншими фізичними полями з метою підвищення його дисперсності,

стабільності та, зрештою, повноти згоряння. Для знесолення застосовують водне промивання мазуту. У мазут вводиться прісна вода, створюється водно-паливна емульсія, потім промивна вода, насичена солями (в основному лужних та лужноземельних металів), видаляється за допомогою відцентрових сепараторів.

Хімічний метод обробки мазуту полягає у використанні присадок. Присадки до мазуту мають різне призначення. Депресорні присадки покращують плинність мазуту. Як депресанти використовують кополімери етилену з вінілацетаном. Присадки, що диспергують, перешкоджають утворенню смолистих відкладень, підвищують повноту згоряння палива. Антикорозійні присадки взаємодіють компонентами продуктів згоряння і переводять їх у пасивний стан. При цьому на зовнішніх поверхнях нагріву котла утворюються пухкі відкладення, що легко видаляються; різко знижується швидкість корозії металу.

Для котельного палива використовуються, наприклад, рідкі присадки ВНДІ-НП-102 і ВНДІ-НП-106. Ці присадки знижують інтенсивність корозії, зменшують кількість і міцність золових відкладень, знижують в›язкість і поверхневий натяг мазуту, зв›язують атомарний кисень, сприяють випалюванню важких компонентів і зменшують коксоутворення.

Забезпечення робочого тиску перед спалюванням. Тиск рідкого палива вибирається, виходячи з необхідної дисперсності розпилення за необхідної одиничної продуктивності форсунки. Тиск мазуту перед форсунками умовно поділяються на низький (<0,7 МПа), середній (<3,5 МПа) і високий (>3,5 МПа). Необхідний тиск досягається використанням насосів різного типу та призначення (шестеренні, гвинтові, відцентрові консольні, багатосекційні рознімні).

Підігрів мазуту перед форсунками. Перед подачею рідкого палива до топки воно додатково підігрівається для забезпечення необхідної в›язкості (~ 15 сСт). Температура підігріву мазуту (t ~ 120...160 °С) визначається маркою мазуту та способом розпилювання. Пара на мазутопідігрівач надходить з відборів турбін або безпосередньо від котла з тиском до 1,6 МПа і температурою до 200 °С (насичена або слабоперегріта).

Використання нафти як палива чи хімічної сировини потребує її стабілізації.

Стабілізація нафти (англ. oil stabilisation) – це вилучення широкої фракції найбільш легких вуглеводнів, зазвичай від CH_4 до C_4H_{10}, і одержання стабільної нафти практично не здатний випаровуватися в атмосферу.

Отже, ефективне використання та збереження нафти потребує її стабілізації, тобто відокремлення легких фракцій, таких як пропан, бутан і бензин. Стабілізація нафти здійснюється методом гарячої сепарації або методом ректифікації. При гарячій сепарації нафту спочатку нагрівають до 40 – 80 °С, а потім подають в сепаратор. Легкі вуглеводні, що виділяються при цьому, відсмоктуються компресором і направляються в холодильну установку. Залишається стабілізована нафта. Процес зневоднення, знесолення та стабілізація нафти здійснюється на установках комплексної підготовки нафти.

Сланцеве масло (також сланцева нафта, англ. shale oil, керогена нафта) – нетрадиційна нафта, що одержують з гарячих сланців у результаті піролізу,

гідрірування чи термічного розчинення, при яких тверді залишки органічної матерії з горної породи перетворюється в синтетичні вуглеводні. Одержане сланцеве масло може використовуватися безпосередньо як паливо.

Використання замість електрогенераторів освітлювальних та обігрівальних гасових (керосинових) приладів – це зручно і вигідно. Вони не вимагають особливих умов встановлення, працюють без шуму, доступні за ціною та економічні. Гас у цьому випадку не потребує підготовки перед спалюванням.

Підготовка бензину до спалювання в двотактних двигунах, таких як бензопили, включає змішування його з маслом для забезпечення змащення та охолодження поршневої групи. Для бензопил зазвичай використовуються співвідношення 1:40 або 1:50 (одна частина масла на 40 або 50 частин бензину). Для цього використовується чиста ємність (для приготування паливної суміші). Масло повинно бути призначено саме для змішування з бензином.

Підготовка будь-якого рідкого палива безпосередньо перед спалюванням потребує його розпилювання (подрібнення) у повітряному середовищі.

Розпилювання палива та організація паливоповітряної суміші вважаються обов›язковими. Ці операції є найбільш відповідальними у низці заходів щодо підготовки рідкого палива до спалювання у факелі. Від якості розпилення й утворення горючої суміші залежить економічність і надійність процесу горіння при різних режимах роботи топкових пристроїв. Розпилювання палива здійснюється у форсунках, а організація паливоповітряної суміші у пальниках різних типів і конструкцій.

Основні типи форсунок, що використовуються в даний час в енергетиці – механічні та з розпилюючим середовищем. Механічне розпилювання відбувається при продавлюванні палива під значним тиском (1,0...2,0 МПа) через малий отвір (1...3 мм). Розпилююча частина відцентрової форсунки (головка) складається із трьох основних деталей. В одному диску відбувається дроблення палива на дрібні цівки, в іншому – цівки завихруються, в сопловій насадці паливо розпорошується.

У парових та пневматичних форсунках дроблення палива здійснюється за рахунок кінетичної енергії пари або повітря. У паро- та пневмомеханічних форсунках дроблення палива здійснюється шляхом одночасного впливу на нього механічного та парового завихрювачей. Конструктивно такі форсунки виготовляють двосопловими або двокамерними з одним вихідним соплом. У ротаційних форсунках дроблення і подача палива в топку здійснюється за допомогою склянки, що обертається.

Досконаліть спалювання рідкого палива залежить від якості його розпилювання, яке характеризується розподілом крапель за розмірами, середнім діаметром крапель, кутом розкриття (конусності) та далекобійністю струменя, щільністю зрошення.

7.3. Особливості підготовки газоподібного палива до спалювання [1, 11]

Газоподібне паливо – це суміш різних газів (горючих і негорючих). Основними горючими компонентами є водень (H), монооксид вуглецю (CO), метан (CH_4) і

газоподібні вуглеводні: етан (C_2H_2), бутан (C_4H_{10}), пропан (C_3H_8). Негорючі компоненти – вуглекислий газ (CO_2), азот (N_2) та кисень (O_2). Газоподібне паливо є одним із альтернативних видів пального для двигунів внутрішнього згоряння та основним для комунально-побутових потреб. Шкідливими домішками у газах є сполуки сірки, волога, механічні домішки та важкі вуглеводні. Вимірювання або зменшення їх вмісту в газовому паливі – основна задача при підготовці його до спалювання.

Вітчизняних (ексклюзивних) стандартів на скраплені нафтові гази (СНГ) в Україні немає. Є стандарти колишнього СРСР, які для країн СНД мають статус міжнародних: ГОСТ 27578-87 «Гази вуглеводневі зріджені для автомобільного транспорту» і ГОСТ 20448-90 «Гази вуглеводневі зріджені паливні для комунально-побутових потреб». ГОСТ 27578-87 передбачає випуск двох марок скраплених газів: ПА – пропан автомобільний, рекомендований до використання за температури до мінус 35 °С і ПБА – пропан бутан автомобільний, рекомендований за температури до мінус 20 °С.

СНГ має максимальний тиск 1,6 МПа, балони заповнюються ним не більше ніж на 90 % об›єму (враховується можливе теплове розширення газу). Решта (10 %) займає газоподібна фаза, яка використовується для пуску холодного двигуна.

Однак, як свідчить практика, в Україні для заправлення автомобілів використовується газ, призначений для комунально-побутових потреб згідно з ДСТУ 20448-90 «Гази вуглеводневі паливні». СПБТ – суміш пропан-бутану технічна, призначена для автомобілів, що обладнані газовим пристоєм. ДСТУ 20448-90 описує фізико-хімічні властивості газів різних марок, допустиму присутність основних компонентів і домішок. Стандарт також містить вимоги до безпеки та ін. Особливо враховуються відповідність встановленим нормам частки сірки, вільної води і суми ненасичених вуглеводнів.

Підготовка газоподібного палива до спалювання включає очистку, сушку та змішування з повітрям або іншим окисником. Ці процеси забезпечують стабільне горіння, зменшують шкідливий екологічний вплив і покращують ефективність отримання теплової енергії. Газ очищують частіше всього від сірки, вологи, небажаних вуглеводнів, які можуть негативно впливати на якість горіння та викликати корозію.

Природний або штучний газ (пропан, бутан і т.п.) за своїм фазовим станом найбільш підготовлений до спалювання, тобто достатньо подати його у повітряне середовище, підпалити й забезпечити стале горіння шляхом безперебійної подачі газу й повітря в топку чи камеру згоряння. Проте в процесі підготовки до спалювання треба запобігати утворення вибухової суміші на певних ділянках руху газу, забезпечувати пожаронебезпеку та якісне протікання процесів сумішеутворення й горіння з виключенням локального перевищення температури, щоб уникнути інтенсивного утворення оксидів азоту NO_x. Цим газоподібне паливо відрізняється від спалювання твердого та рідкого палива; в цьому його особливість.

Доставляється природни газ до споживача або у зрідженому стані водним, залізничним чи автомобільним транспортом, або у газоподібному трубопроводом. Останній спосіб транспортування є найдешевшим. Для приведення тиску газу до паспортних значень пальникових пристроїв застосовують газорегуляторні пункти (ГРП) або газорегуляторні установки (ГРУ).

Значення температури газу перед пальником також визначено паспортом останнього. При підземному прокладанні транспортних газопроводів температура газу стала, що зручно при автоматичному регулюванні процесу горіння. При наземному прокладанні газопроводів температура газу має сезонні коливання, тому доводиться вдаватися або до сезонного настроювання регуляторів горіння, або до ручного регулювання горіння з використанням сезонних режимних графіків. Перед подачею газу в транспортні магістралі він осушується до значення приблизно 10 г H_2O в 1 м^3 газу. Водяні пари, що містяться в газі, за певних умов сприяють утворенню гідратів, а при конденсації їх та низькій температурі утворюються крижані пробки. Тому перед спалюванням газу іноді потрібно організувати його сушіння або використовувати регуляторні станції для сепарації вологи.

Більшість природних газів (різних родовищ) не має шкідливих домішок; у багатьох попутних і синтетичних (доменних, коксових та інш.) їх дуже мало. Однак навіть при незначних концентраціях деякі домішки дуже токсичні та корозійноактивні. До цих домішок відносяться сірководень H_2S і сірковуглець CS_2. Видаляти їх можна шляхом промивання газу водою чи фільтруванням газу у вапняних або вугільних фільтрах. Крім сірчистих сполук, у паливному газі містяться ціаніди, переважно синильна кислота HCN. При згорянні HCN азот, що міститься в кислоті, окислюється з утворенням токсичних оксидів NO_x. Крім того, наявність HCN призводить до сильної корозії заліза, міді, цинку, олова та їх сплавів. Для очищення від HCN горючий газ пропускається через спеціальні фільтри, заповнені оксидами заліза.

Якщо на підприємстві використовується низько- або висококалорійний газ, що не відповідає за теплотою згоряння встановленим пальниковим пристроям, для підготовки газу необхідної якості проводиться змішання газів з різною теплотою згоряння. Можливість використання встановлених пальникових пристроїв для спалювання будь-якого газу оцінюється заздалегідь.

З метою своєчасного виявлення витоку газу його піддають одоризації, тобто надають йому різкого специфічного запаху. Гази одарують після їх очищення та осушення перед надходженням до магістрального газопроводу чи міської газової мережі в одоризаційних установках.Найбільш поширений одорант – етилмеркаптан (C_2H_5SH), який містить до 50 % сірки. Концентрація етилмеркаптану становить $16 \cdot 10^{-3}$ г на 1 м^3 газу. За такої концентрації запах газу в приміщенні буде добре відчутним при кількості його 1% об. Ця кількість газу в суміші з повітрям є вибухобезпечною, оскільки нижня межа вибуховості – 5 % природного газу у суміші з повітрям.

Тиск газу. При спалюванні газоподібного палива його тиск може бути низьким (менше 0,005 МПа), середнім (0,005...0,3 МПа) або високим (0,3...1,2 МПа). Вибір

тиску газу та повітря перед пальниковим пристроєм визначає оптимальність розподілу палива в окислювачі та якість сумішоутворення. Взагалі кажучи, з метою зменшення витрати енергії на власні потреби слід прагнути до мінімально можливого тиску. Однак для зменшення габаритів пальника та покращення процесів сумішоутворення та спалювання слід збільшувати тиск газу. Насправді рівень тиску пального газу обмежений тиском газу у транспортному газопроводі.

При переведенні перших котлів на газ вони або підключалися до ГРП побутового призначення, або до власних ГРП на тиск 0,002 МПа. На такий самий тиск проектувалися пальники. Зі зростанням потужності котлів тиск газу підвищували. В даний час паливовикористовувальні установки працюють на газі низького та середнього тисків (промислові й опалювальні котельні та котли ТЕС). Забезпечується постійний робочий тиск за допомогою ГРУ чи ГРП.

ГРУ монтують безпосередньо в приміщеннях, де розташовані паливні установки. ГРП розміщують поза приміщенням в окремій будівлі або в прибудові, в шафах, закріплених на стіні зовні приміщення або на окремій опорі, на даху приміщення тощо. Крім підтримки тиску газу, в ГРУ та ГРП проводиться очищення газу та зниження його тиску, здійснюється контроль за вхідним й вихідним тиском і температурою газу, відбувається облік витрати та захист від можливого підвищення або зниження тиску. Основне обладнання ГРУ та ГРП:

– регулятор тиску;

– запобіжний запірний клапан (ПЗК);

– запобіжний скидний клапан (ПСК);

– фільтр;

– контрольно-вимірювальні прилади (КВП);

– імпульсні трубопроводи, якими подаються імпульси тиску газу до регулятора, ПЗК, ПСК і КВП;

– скидні трубопроводи, якими газ відводиться в атмосферу від ПСК, продувних ліній тощо;

– запірні пристрої (засувки, крани);

– обвідний газопровід (байпас) для подачі газу до споживача під час ремонту основного обладнання ГРП (ГРУ).

ГРП, ГРУ можуть мати дві та більше ліній із встановленням на них всього комплекту перерахованого обладнання. Прокладання всіх газопроводів у межах ГРП і до котлів виконується наземним. Підведення газу від ГРП до колектора котельного відділення (поза будинком) проводиться по одній нитці.

Газове господарство. На ТЕС природний газ надходить одним магістральним газопроводом діаметром до 2 м. Газосховища для природного газу на ТЕС не споруджують.

Газ після газорегуляторної станції або ГРП надходить у два загальні газопроводи, кожен з яких забезпечує 70 % максимальної витрати. До котелень газ підводиться газопроводами, що відгалужуються від загального газопроводу. На лінії подачі газу до котельної установки встановлені пристрої для регулювання та вимірювання витрати газу. Газові лінії продувають із тупикових ділянок

через свічки, виведені за межі будівлі до місць, недоступних для перебування людей. Через ці свічки видаляють повітря перед розпалюванням котлів і газ при зупинці котлів. Газопроводи встановлюють з ухилом для видалення через конденсатовідвідники вологи, що накопичується.

Експлуатація газового господарства ведеться на основі «Правил безпеки в газовому господарстві» [1].

Сумішоутворення – це перемішування первинного повітря з горючим газом з метою отримання суміші, здатної займатися і горіти в камері топки. Інтенсивність і якість сумішоутворення (рівномірність розподілу палива в окислювачі) є основними факторами надійного та економічного його спалювання. Сумішоутворення залежить від типу та конструктивних особливостей пальникових пристроїв, які з цієї точки зору можна класифікувати наступним чином:

– газопальникові пристрої з попереднім сумішоутворенням;

– газопальникові пристрої дифузійного типу (з роздільним введенням пального газу та повітря в зону горіння);

– газопальникові пристрої комбінованого змішування, що поєднують у собі елементи першого та другого типів.

Розподіл газу у повітряному потоці може здійснюватися як струминним, так і відцентровим способом. Найбільшого поширення набули струменеві розподільники.У цьому випадку газ вводиться в повітряний потік через одну, частіше через декілька трубок або отворів супутно повітряному потоку або під кутом до нього. Для покращення якості сумішоутворення при супутній подачі газу й повітря їх потоки різко турбулізуються. Введення газу під кутом до повітряного потоку дозволяє отримати необхідну якість перемішування при менших швидкостях газу. Подача газу у повітряний потік тонкими струменями найбільш зручна для пальників котлів при спалюванні газу, оскільки у цьому випадку витрата газу значно менша від витрати повітря (на 1 $м^3$ природного газу витрачається близько 10 $м^3$ повітря). Швидкість повітря становить 20...40 м/с, а газу – до 100 м/с.

Максимальна глибина проникнення газових струменів у повітряний потік вибирається з урахуванням економічності спалювання Якість сумішоутворення забезпечується рівномірністю роздачі газу через отвори. Для цього глибина проникнення газових струменів має бути різною. Найкращі умови для змішування газу з повітрям забезпечуються у випадках, коли газовий струмінь потрапляє до області максимальних швидкостей повітряного потоку.

На якість сумішоутворення, крім діаметра газороздавальних отворів і глибини проникнення газових струменів, впливає також кількість газових струменів.При малій кількості струменів процес змішування погіршується через нерівномірний розподіл газу в повітряному потоці, при занадто великій їх кількості відбувається злиття окремих газових струменів, що також погіршує процес змішування. Якість сумішоутворення забезпечується як початковим розподілом газу у повітряному потоці, а й інтенсивністю масопереносу. При турбулентному русі потоків інтенсивно перемішуються повітря та газ і покращується якість змішування.

Турбулізація потоків досягається їх високими масовими швидкостями у прямоточних пальниках або закруткою повітря та газу.

Підготовка пропан-бутану (скрапленого нафтового газу – СНГ) до спалювання включає декілька етапів: зрідження, очищення та регулювання тиску.

Пропан-бутан – це суміш газів, які в звичайних умовах знаходяться в газоподібному стані. Щоб його можна було зберігати та транспортувати в балонах, його скраплюють під високим тиском, перетворюючи в рідину. Для забезпечення якісного згоряння і запобігання забруднення газового обладнання, пропан-бутан очищують від сірчистих сполук, лугу, води та інших домішок. Перед подачею газу в пристрій для згоряння (наприклад, плиту, газовий нагрівач або автомобільний двигун) його тиск регулюють до потрібного рівня, використовуючи спеціальні регулятори. Зберігається пропан-бутан в спеціальних цистернах, балонах і автоцистернах у зрідженому стані, тобто у рідкому вигляді; крім бутану і пропану, суміш містить невелику кількість інших компонентів. Пропан-бутан широко використовується як паливо для опалення, приготування їжі та як моторне паливо для транспортних засобів. Він зручний в застосуванні, оскільки температура кипіння 0 °С для бутану, – 44 °С для пропану і – 25 °С для скрапленого газу.

При спалюванні газів з низькою теплотою згоряння (доменного, генераторного тощо) обсяги повітря та газу в горючій суміші приблизно однакові. Для таких газів якісне сумішоутворення досягається шляхом закрутки пошарово потоків газу та повітря. При спалюванні висококалорійного газу поєднуються великі обсяги повітря з малими обсягами газу; в цьому випадку найкращий ефект змішування досягається при струминному введенні.

Питання для самоконтролю по розділу 7

1. Розкрийте поняття паливопідготовки.
2. В чому полягає особливість підготовки твердого палива до спалювання?
3. Назвіть етапи підготовки твердого палива до спалювання.
4. Які особливості підготовки рідкого палива до спалювання?
5. Назвіть етапи підготовки рідкого палива до спалювання.
6. Чим відрізняється підготовка газоподібного палива від твердого та рідкого перед спалюванням.
7. Що притаманне підготовці газоподібного палива до спалювання?

Література

1. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки систем газопостачання (54633). – Режим доступу: https://dnaop.com/html/54633/doc-НПАОП_0.00-1.76

2. Шостак , В.П. Системи суднових дизельних установок. Робочий зошит [Текст] / Навчальний наочний посібник // В.П. Шостак, А.І. Кісарова – НУК, 2021. – 128 с.

3. Abbasi T., Abbasi S.A., «Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. - Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, No. 3, 2010. – : 919-937 p.

4. Alternative-fuelled ship orders grow 50% in 2024. Available online: Alternative-fuelled ship orders grow 50% in 2024 | LR

5. A. Gendek, M. Aniszewska, K. Chwedoruk. Bulk density of forest energy chips. - Agriculture No 67 (Agricultural and Forest Engineering) 2016. – 101–111 p.

6. IMO “Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13”. Available online: http://www.imo.org/en/OurWork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/nitrogen-oxides-(nox)-–-regulation-13.aspx

7. Hamid Sefidari, Narges Razmjoo, Michael Strand. An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler. – Fuel 135 (2014). – 120-129 p.

8. V. Kažimírová, R. Opáth. Biomass combustion emissions. - Research in Agricultural Engineering: Vol. 62, 2016, Special Issue. – 61-65 p.

9. Wood Chips as a Biomass Fuel. Available online: http://www. pafuelsforschools.psu.edu/resources/Woodchips_Fuel_Factsheet.pdf

10. UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. Available online: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting -conversion-factors-2023

11. Google: інформаційно-пошукова система Інтернету. – Режим доступу: https://www.google.com

ЗМІСТ

Передмова....3

1. Загальні відомості про паливо....4
1.1. Що таке паливо простими словами....11
1.2. Питання для самоконтролю по розділу 1....11

2.Нафтове паливо....12
2.1. Розповсюдження нафтового палива....12
2.2.Нафта: визначення, властивості, видобуток, розповсюдження....14
2.3. Сорти нафтового палива....18
2.4 Використання нафтового палива....22
Від видобутку нафти до використання рідкого палива....28
Питання для самоконтролю по розділу 2....29

3. Природний газ метан....30
3.1.Застосування метану....30
3.2. Визначення природного газу і його розповсюдження у земній корі....30
3.3. Властивості метану....33
3.4. Особливості використання природного газоподібного палива....35
Газовий ланцюг використання природного газу....36
Питання для самоконтролю по розділу 3....38

4. Ядерне паливо....39
4.1. Застосування ядерного палива....39
4.2. Склад і структура ядерного палива....44
4.3. Уран і ядерні реакції....45
4.4. Водо-водяний ядерний реактор....50
4.5. Природний уран, його розповсюдження....52
4.6. Видобуток і збагачення урану....53
4.7. Особливості ядерного палива....59
Від руди до ядерного палива....63
Питання для самоконтролю по розділу 4....64

5. Деревне паливо....65

5.1. Основні хімічні властивості деревини....66
5.2. Деревні тріски та пелети....68
5.3. Доставка, зберігання та поводження з деревним паливом....75
5.4. Котли, що працюють на біомасі....77
5.4.1. Котли з механічним топковим пальником....78
5.4.2. Котли з рухомими колосниковими гратками....79
5.4.3. Котли з нижньою паливоподачею....81
5.4.4. Котли зі спалюванням палива у псевдорозрідженному шарі....82
5.4.5. Видалення золи та шлаку....82
5.4.6. Димоходи та шкідливі викиди....83
Від деревини до пелет, золи та добрив....85
Питання для самоконтролю по розділу 5....86

6. Альтернативні палива.....87
6.1. Рідке та газоподібне альтернативне паливо.....87
6.2.Тверде альтернативне паливо з рослинної сировини.....89
Від сировинних відходів до раціонального палива.....93
Питання для самоконтролю по розділу 6.....94

7.Паливопідготовка.....95
7.1. Підготовка твердого палива для спалювання.....95
7.2. Підготовка рідкого палива для спалювання.....98
7.3. Особливості підготовки газоподібного палива.....101
Питання для самоконтролю по розділу 7.....107

Література.....108

Шостак Володимир Павлович, Воінов Олександр Петрович,
Ґершанік Володимир Ілліч, Личко Богдан Михайлович,
Самохвалов Віктор Сергійович

ОСНОВНІ ПАЛИВА:
розповсюдження, використання

За редакцією проф., FRINA В.П. Шостака

Підписано до друку 26.08.2025 р.
Формат 60/84 1/8 Папір офсетний.
Гарнітура «Times New Roman». Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 12,9
Наклад 20 шт. Замовлення №07/2025
Виготовлювач: Ємельянова Т.В.
54001, Миколаїв, пров. Суднобудівний, 7
Тел.: (0512) 47-74-48, e-mail: printex_nik@ukr.net
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 6167 від 03.05.2018

CONTENTS

Preface 3

1. General Information on Fuel 4
What is Fuel in Simple Terms 13
Self-Assessment Questions for Chapter 1 13

2. Petroleum Fuel 14
2.1. Distribution of Petroleum Fuel 14
2.2. Oil: Definition, Properties, Extraction, Distribution 17
2.3. Types of Petroleum Fuel 22
2.4. Using Petroleum Fuel 28
From Oil Extraction to Liquid Fuel Combustion 36
Self-Assessment Questions for Chapter 2 37

3. Natural Gas (Methane) 38
3.1. Applications of Methane 38
3.2. Definition of Natural Gas and Its Distribution in the Earth's Crust 39
3.3. Properties of Methane 42
3.4. Specifics of Using Gaseous Natural Fuel 45
Natural Gas Utilization Chain 48
Self-Assessment Questions for Chapter 3 49

4. Nuclear Fuel 50
4.1. Applications of Nuclear Fuel 50
4.2. Composition and Structure of Nuclear Fuel 58
4.3.Uranium and Nuclear Reactions 59
4.4. Pressurized Water Reactor 65
4.5. Natural Uranium and Its Distribution 68
4.6. Uranium Mining and Enrichment 69
4.7. Characteristics of Nuclear Fuel 75
From Ore to Nuclear Fuel 81
Self-Assessment Questions for Chapter 4 82

5. Wood Fuel 84
5.1. Main Chemical Properties of Wood 89
5.2. Wood Chips and Pellets 89
5.3. Delivery, Storage, and Handling of Wood Fuel 98
5.4. Biomass-Fired Boilers 100
5.4.1. Boilers with Stoker Burner 102
5.4.2. Boilers with Moving Grate Systems 103
5.4.3. Boilers with Underfed Stoker 106
5.4.4. Boilers with Fluidised Bed Combustion 107
5.4.5. Ash and Slag Removal 108
5.4.6. Boiler Flue and Harmful Emissions 109
From Wood to Pellets, Ash, and Fertilizers 111
Self-Assessment Questions for Chapter 5 112

6. Alternative Fuels 114
6.1. Liquid and Gaseous Alternative Fuels 115
6.2. Solid Alternative Fuels from Plant-Based Materials 118
From Raw Material Waste to Efficient Fuel 123
Self-Assessment Questions for Chapter 6 123

7. Fuel preparation 125
7.1. Preparation of Solid Fuel for Combustion 125
7.2. Preparation of Liquid Fuel for Combustion 129
7.3. Specifics of Gaseous Fuel Preparation 135
Self-Assessment Questions for Chapter 7 142

References 143

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort

1. Allgemeine Informationen über Brennstoffe 4
Was ist Brennstoff in einfachen Worten 13
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 1 13

2. Erdölbasierte Brennstoffe 14
2.1. Verbreitung der Erdölbrennstoffe 14
2.2. Erdöl: Definition, Eigenschaften, Förderung, Verbreitung 17
2.3. Erdölbrennstoffarten 22
2.4. Anwendung der Erdölbrennstoffe 28
Von Ölförderung bis zur Verwendung flüssiger Brennstoffe 36
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 2 37

3. Erdgas (Methan) 38
3.1. Verwendung von Methan 38
3.2. Definition von Erdgas und seine Verbreitung in der Erdkruste 39
3.3. Eigenschaften von Methan 42
3.4. Besonderheiten der Anwendung von gasförmigen Brennstoffen 45
Verwendung skette von Erdgas 48
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 3 49

4. Kernbrennstoff 50
4.1. Anwendungen von Kernbrennstoff 50
4.2. Zusammensetzung und Struktur des Kernbrennstoffs 58
4.3. Uran und Kernreaktionen 59
4.4. Druckwasserreaktor 65
4.5. Natürliches Uran und seine Verbreitung 68
4.6. Gewinnung und Anreicherung des Urans 69
4.7. Eigenschaften des Kernbrennstoffs 75
Vom Erz zum Kernbrennstoff 81
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 4 82

5. Holz als Brennstoff 84
5.1. Wichtige chemische Eigenschaften des Holzes 89
5.2. Holzspäne und Pellets 89
5.3. Lieferung, Lagerung und Umgang mit Holzbrennstoffen 98
5.4. Biomassekessel 100
5.4.1. Kessel mit Schneckenvorschubbrenner 102
5.4.2. Kessel mit beweglichen Rostsystemen 103
5.4.3. Kessel mit Unterschubfeuerung 106
5.4.4. Kessel mit Wirbelschichtverbrennung 107
5.4.5. Asche- und Schlackenentfernung 108
5.4.6. Rauchabzüge und Schadstoffemissionen 109
Vom Holz zur Pellets, Asche und Dünger 111
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 5 112

6. Alternative Brennstoffe
6.1. Flüssige und gasförmige alternative Brennstoffe 115
6.2. Feste alternative Brennstoffe aus pflanzlichem Material 118
Von Rohstoffabfällen zu effizientem Brennstoff 123
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 6 123

7. Brennstoffaufbereitung 125
7.1. Aufbereitung fester Brennstoffe zur Verbrennung 125
7.2. Aufbereitung flüssiger Brennstoffe zur Verbrennung 129
7.3. Besonderheiten der Aufbereitung gasförmiger Brennstoffe 135
Fragen zur Selbstkontrolle zu Kapitel 7 142

Literaturverzeichnis 143

Dieses Material umfasst feste, flüssige, gasförmige und nukleare Brennstoffe. Der Verbreitung von Öl-, Gas- und Uranvorkommen als Rohstoffe für die wichtigsten Brennstoffe, die derzeit in großem Umfang zur Erzeugung von Wärmeenergie für weitere Anwendungen genutzt werden, wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Der Text enthält auch systematisierte Informationen über die moderne Produktion und Verwendung von Holz, einer seit der Antike bekannten kostengünstigen Energiequelle. Die Autoren hielten es für notwendig, den Lesern einige Informationen über die chemische Zusammensetzung von Brennstoffrohstoffen und Erdölprodukten sowie über Kernreaktionen in einem Druckwasserreaktor in Erinnerung zu rufen.

Das Material richtet sich an Studenten und Kadetten, die sich auf Wärmekrafttechnik, Schiffbau sowie See- und Binnenschifffahrt spezialisieren. Es wird auch für Fachkräfte in der stationären und maritimen Energietechnik nützlich sein, die in den Bereichen Konstruktion, Herstellung, Wartung und Betrieb von Brennstoff- und Energieanlagen tätig sind.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА