

УДК 621; 662.61

М.М.Жовмір, канд.техн.наук (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Теоретичні температури горіння біомаси та продуктів її термолізу

Розглянуто формування зон термолізу, вигорання летких та вигорання коксового залишку при шаровому спалюванні біомаси. Наведено результати розрахункових досліджень щодо визначення теоретичних температур горіння біомаси та продуктів її термолізу – коксового залишку та летких речовин залежно від вологості вихідної біомаси та коефіцієнта надлишку повітря; обґрунтовано доцільні значення температур та коефіцієнта надлишку повітря у зонах.

Рассмотрено формирование зон термоліза, выгорания летучих и выгорания коксового остатка при слоевом сжигании биомассы. Приведены результаты расчетных исследований по определению теоретических температур горения биомассы и продуктов ее термоліза – коксового остатка и летучих веществ в зависимости от влажности исходной биомассы и коэффициента избытка воздуха; обоснованы целесообразные позонные значения температур и коэффициента избытка воздуха.

Вступ. Як показує досвід країн ЄС, одним із основних шляхів скорочення споживання традиційних викопних палив у системах теплопостачання є використання біомаси та біопалив. За літературними даними техніко-економічний потенціал власних ресурсів біомаси, доступної для енергетичних потреб у країнах ЄС-27, становить 157 млн т н.е./рік, з яких ресурси деревного походження становлять 67%. Використання власних ресурсів біомаси в країнах ЄС уже становить 48% від потенціалу [1]. У 2010 р. для виробництва теплової енергії споживалась біомаса в обсязі 70,2 млн т н.е., що забезпечувало 11% у виробництві тепла в Європі [2].

В Україні при сучасних обсягах господарської діяльності ресурси біомаси, доступної для енергетичного використання, становлять 13,6 млн т н.е., причому деревна біомаса становить лише 1,14 млн т н.е. (8,4%), а ресурси біомаси сільськогосподарських культур досягають 10,3 млн т н.е. (71%). Значне переважання ресурсів сільськогосподарської біомаси є істотною відмінністю ресурсної бази біоенергетики в Україні у порівнянні з країнами ЄС. Це є наслідком того, що переважна частина території країни, яка знаходиться в зонах Степу та Лісостепу, зайнята в сільськогосподарському виробництві.

Незважаючи на переважання ресурсів сільськогосподарської біомаси, в Україні експлуатується лише біля 30 котлів зі спалюванням цілих тюків соломи та її річним обсягом споживання до

25-30 тис. т, хоча виробництво таких котлів потужністю від 150 до 860 кВт освоєне вітчизняними підприємствами. Застосування потужних соломоспалювальних котлів обмежується тим, що в сільських поселеннях та невеликих містах відбувається децентралізація систем теплопостачання. В багатьох поселеннях припинено опалення цілого ряду будівель виробничої та соціальної сфери, а об'єкти, що ще потребують опалення, переводяться на автономні малопотужні котли потужністю до 100 кВт, які не підпадають під юрисдикцію Держгірпромнагляду. Крім того, існує загальна проблема екологічно безпечного спалювання біомаси, особливо цілих тюків соломи, яка полягає у підвищеній емісії продуктів неповного згорання та твердих часток, що пов'язують із неналежною організацією спалювання летких речовин [3, 4].

Орієнтація на котли невеликої потужності характерна і для Австрії, де в системах теплопостачання експлуатується 51470 котлів зі спалюванням біопалив, з них потужність більше 1 МВт мають лише 314 котлів. Кількість котлів до 100 кВт становить 49158 шт., з них на дровах і трісці експлуатується 28000 котлів, а на гранулах – 21960 котлів. Останнім часом щорічно вводилося 2560 нових котлів для спалювання дров і паливної тріски, а також 5200 котлів для спалювання гранул [5]. Можна сказати, що спалювання гранульованої біомаси є переважаючою тенденцією.

Відповідно до стандарту EN 14961-2 промислові (побутові) деревні паливні гранули, що

виробляються із чистої деревини без кори, поділяють на класи АІ, АІІ, В. Такі гранули призначаються для використання у печах і котлах потужністю до 300 кВт, що використовуються для опалення в побуті, опалення невеликих будівель у промисловості та соціальній сфері. Вимогам до гранул із сільськогосподарської сировини, що призначаються для спалювання в опалювальних котлах, присвячена розробка проекту стандарту prEN-14961-6 "Non-woody pellets for non-industrial use".

Основною технологічною та екологічною проблемою при спалюванні твердих біопалив є підвищена емісія забруднюючих речовин, особливо твердих часток [4]. Технологічна проблема при використанні соломи та гранул, вироблених із неї, полягає в тому, що при їх спалюванні формується зольний залишок, що спікається при відносно низькій температурі і блокує подальше пересування та горіння палива у топковому пристрої. Це явище інколи спостерігається і при спалюванні деревних гранул, що не відповідають вимогам EN 14961-2. Причину цього явища пов'язують з відносно низькими температурами початку розм'якшення золи соломи при 720-750°C (різні джерела дають дані в діапазоні від 720 до 900°C) та її переходу в рідкий стан при 950-1000°C [6], що значно нижче температур, які досягаються у шарі палаючих гранул.

У зв'язку з цим залишаються актуальними дослідження процесів горіння біомаси та біопалив з метою створення технологій та надійного обладнання для екологічно безпечного спалювання доступних у нашій країні видів біомаси та біопалив.

Особливості процесів при шаровому спалюванні біомаси. Основні закономірності горіння твердих палив детально розглянуті у багатьох роботах [3, 7, 8]. В котельних установках малої потужності та опалювальних котлах значне поширення мають шарові процеси спалювання біомаси на колосникових решітках з нижньою подачею дуттєвого повітря – на рухомих решітках зі стаціонарним шаром палива, на нерухомих решітках із пересуванням шару палива під дією руху колосників, шурувальної планки чи подавального шнека. При спалюванні твердих палив із високим виходом летких речовин, зокрема біомаси, на колосниковій решітці та у просторі над нею форму-

ються зони, в яких протікають окремі характерні етапи горіння: зона термічної підготовки і виходу летких речовин; зона утворення суміші вивільнених летких та повітря і їх вигорання; зона вигорання коксового залишку, що утворився після виходу летких речовин.

В шарових процесах із супутнім та зустрічним рухом палива та повітря окремі етапи горіння не виділяють [8], вважаючи їх одночасними та просторово суміщеними, але при перехресному русі палива та повітря відбувається просторове розділення зон протікання окремих етапів. Карти фізико-хімічних процесів, що відбуваються при спалюванні дрібнокускової біомаси у шарі, що пересувається на колосниковій решітці, можна описати наступним чином. В результаті термічної підготовки палива відбувається його підсушування з виділенням водяної пари в топковий простір. Майже одночасно відбувається і термічний розпад біомаси (термоліз) із виділенням летких речовин. Леткі пароподібні речовини та гази змішуються з дуттєвим повітрям у топковому просторі над шаром палива. Концентрації компонентів у газовій суміші, а також температура її згорання можуть змінюватися в досить широких межах залежно від вологості палива та витрати повітря, що подається в зону горіння летких речовин. У результаті при утворенні багатої суміші може відбуватися займання летких речовин і їх згорання у вигляді високотемпературного факела. У випадку утворення бідної суміші відбуваються газозфазові реакції окислення, які протікають відносно повільно. За обмежений час перебування суміші в топці не завжди завершується її об'ємне вигорання і, можливо, тому незгорілі леткі речовини покидають топку, викликаючи забруднення поверхонь нагріву, втрату хімічної енергії палива і спричиняючи значну емісію забруднюючих речовин в атмосферу. При створенні топкових пристроїв необхідно забезпечувати умови, сприятливі для повного окислення летких речовин, що виділяються.

Після виходу летких речовин формується коксовий залишок, при його горінні виділяється енергія, частина якої використовується для підсушування і термолізу свіжої біомаси, що надходить на колосникову решітку. Залежно від товщини шару коксового залишку, розміру часток та

інтенсивності дуття по його висоті можуть формуватися окислювальні та відновлювальні умови. При підтриманні окислювальних умов по всій висоті шару на виході з нього будуть утворюватися переважно продукти повного згоряння, але коли по висоті шару окислювальні умови будуть змінюватися на відновлювальні, то в продуктах згоряння буде збільшуватися вміст продуктів неповного згоряння.

В роботі [9] експериментально визначено, що в окислювальних умовах вихід легких речовин із часток біомаси значно прискорюється у порівнянні з розрахунковими даними, отриманими за відомими залежностями, виведеними на основі дослідів термолізу палив в інертній атмосфері. Крім того експериментально встановлено, що тривалість періоду виходу легких є меншою, ніж періоду вигорання утвореного коксового залишку. Враховуючи ці особливості, можна вважати, що при русі шару палива із зони підготовки виходять два потоки проміжних палив – потік паро- та газоподібних легких речовин і потік часток коксового залишку, і в результаті відбувається просторова сегрегація зон горіння легких та коксового залишку. Утворені проміжні палива за своїми властивостями істотно відрізняються від первинної біомаси, і відповідно буде відрізнятися характер їх горіння та показники, що його характеризують.

В даній статті проведено аналіз відмінностей теоретичної (адіабатної) температури горіння вторинних палив – легких та коксового залишку, в порівнянні з її значеннями для первинного палива – біомаси при практично можливих значеннях її вологості. Значення теоретичних (адіабатних) температур горіння біомаси t_a , коксового залишку $t_{ак}$ та легких $t_{ал}$ визначали для умов використання холодного дуттєвого повітря при температурі 20°C, що є звичайною практикою в опалювальних та водогрійних котлах малої потужності. Перерахунки складу палива на робочу масу, розрахунок теплоти згоряння палива та теоретичної температури горіння виконували у відповідності з методикою [10]. Значення теоретичних температур горіння є визначальними при виконанні термохімічних розрахунків швидкості реакцій горіння та

часу вигорання, а також при обґрунтуванні доцільного розподілу дуттєвого повітря за зонами.

Теоретична температура горіння біомаси. Для виконання розрахункових досліджень приймали, що у вихідному біопаливі масова частка основних елементів палива на суху масу становить C_d, H_d, O_d, N_d , частка золи на суху масу становить A_d , а вміст вологи на робочу масу W_r . Теоретичну температуру горіння біомаси t_a розраховували залежно від загального коефіцієнта надлишку повітря α при різних значеннях вологості палива W_r на робочу масу.

Теоретична температура горіння легких речовин. Для виконання аналізу прийнято, що при термолізі сухої біомаси виділяються наступні легкі речовини: смоли, масова частка яких становить g_t від маси сухого палива, кислоти g_{ac} , суміш піролізних газів g_g , яку називають швельгазом, та пірогенетична волога $g_{вп}$. Після термолізу залишається певна кількість коксового залишку. В підсумку масова частка легких речовин, що виділилися з сухої біомаси, становить g_v та коксозольного залишку g_c . Значення цих величин певною мірою залежать від виду біомаси та умов процесу.

При розрахунках горіння легких речовин, крім власне легких речовин, що утворилися при термолізі сухої деревини, необхідно врахувати робочу вологу біомаси W_r , що випаровується при її термічній підготовці. Тоді масу вологих легких продуктів, що утворюються на 1 кг робочої маси палива $g_{v,w}$, можна визначити наступним чином:

$$g_{v,w} = W_r + g_v(1 - W_r). \quad (1)$$

Легкі речовини є сумішшю газоподібних та рідких палив. Розрахунки горіння рідких палив прийнято вести на 1 кг робочої маси палива, а для газоподібного палива – на 1 м³ його об'єму. В даному дослідженні обчислення проводилися в розрахунку на сумарну масу легких речовин. За хімічним аналізом швельгазу можна розрахувати вміст окремих елементів на його масу. Беручи до уваги вихід смол, кислот, швельгазу, пірогенетичної вологи та вміст елементів у кожній складовій, можна розрахувати вміст елементів на всю масу легких речовин, що виділяються при термолізі сухого біопалива: C_v, H_v, O_v, N_v .

Таблиця 1. Розраховані характеристики деревини, летких та коксового залишку на основі експериментальних даних [11]

Вихідна біомаса та продукти її термолізу	Вихід компонентів, кг/кг	Вміст елементів, % мас.				
		С	Н	О	N	А
суха соснова деревина	1,000	50,60	5,99	41,81	0,60	1,01
коксівий залишок	0,335	86,20	2,20	8,00	0,60	3,00*
смоли	0,14	71,00	6,90	21,60	0,50	
кислота	0,028	40,00	6,60	53,40	0,00	
швельгаз	0,272	39,20	5,90	53,70	1,20	
вода пірогенетична	0,225	0,00	11,10	88,90	0,00	
всі леткі продукти, включаючи пірогенетичну воду	0,665	32,67	7,90	58,84	0,60	0

* – в джерелі [11] дано 0,3%, що, можливо, є друкарською помилкою.

В просторі над шаром палива відбувається змішування летких, що виділилися з висушеного палива, та випаруваної води палива. Вміст елементів в утвореній суміші летких та випаруваної води біомаси можна визначити за наведеними нижче залежностями. При виведенні цих залежностей для спрощення розрахунків випарувану вологу палива W_r замінено на еквівалентну масу елементів Н та О в сухій масі палива, що приводить до неістотної похибки у визначенні теплотворної здатності отриманої суміші летких та води.

$$C_{v,w} = g_v C_v (1 - W_r) / g_{v,w}; \quad (2)$$

$$H_{v,w} = (g_v H_v (1 - W_r) + W_r / 9) / g_{v,w}; \quad (3)$$

$$O_{v,w} = (g_v O_v (1 - W_r) + 8W_r / 9) / g_{v,w}; \quad (4)$$

$$N_{v,w} = g_v N_v (1 - W_r) / g_{v,w}. \quad (5)$$

Приймаючи, що в просторі над шаром палива відбувається повне згоряння летких та використовуючи отримані за формулами (2)–(5) значення вмісту елементів у суміші летких та випаруваної води, виконували розрахунки їх теоретичної температури горіння $t_{ал}$ залежно від коефіцієнта надлишку повітря в зоні горіння летких речовин α_l при різних значеннях вологості вихідного палива W_r на робочу масу. В даному випадку коефіцієнт надлишку повітря α_l є відношенням фактичного об'єму повітря до теоретичного об'єму повітря, необхідного для повного згоряння летких.

Теоретична температура горіння коксового залишку. За результатами хімічного аналізу можна встановити вміст елементів у коксовому залишку на суху масу C_c, H_c, O_c, N_c, A_c . Можна прийняти, що в умовах топки вміст води в кок-

совому залишку дорівнює нулю. Приймаючи, що в шарі коксового залишку відбувається повне згоряння, виконали розрахунки теоретичної температури горіння для коксового залишку $t_{ак}$ залежно від коефіцієнта надлишку повітря α_k у зоні його вигорання.

Для виконання розрахункових досліджень використано експериментальні дані [11] про вихід та склад продуктів термолізу сухої соснової деревини. Розраховані з їх використанням характеристики сухої соснової деревини, летких речовин і коксового залишку наведено в таблиці 1. При виконанні розрахунків компонент швельгазу $C_n H_m$ прийнято як пропан.

На рис. 1 наведено розраховані значення теоретичної температури горіння біомаси соснової деревини, які демонструють загальновідомий факт про зменшення температури горіння палива при збільшенні його вологості та коефіцієнта надлишку повітря α . Отримані значення теоретичної температури можуть прийматися для випадку спалювання біомаси факельним способом або у циркулюючому киплячому шарі, коли не відбувається вираженої просторової сегрегації зон горіння летких та коксового залишку.

З даних, наведених на рис. 2, видно, що теоретична температура горіння коксового залишку зменшується зі збільшенням надлишку повітря, що є відомим стосовно всіх палив. З порівняння даних на рис. 1 та рис. 2 видно, що при однакових значеннях коефіцієнта надлишку повітря теоретична температура горіння коксового залишку є вищою в порівнянні з її значеннями для вихідної біомаси. При стехіометричних співвідношеннях

теоретична температура горіння для коксового залишку вища, ніж для сухої деревини, лише на 197 градусів, але зі збільшенням вологості вихідної деревини до 50% різниця теоретичних температур уже становить 693 градуси. Зі збільшенням коефіцієнтів надлишку повітря вказана різниця теоретичних температур горіння коксового залишку і вихідної біомаси зменшується.

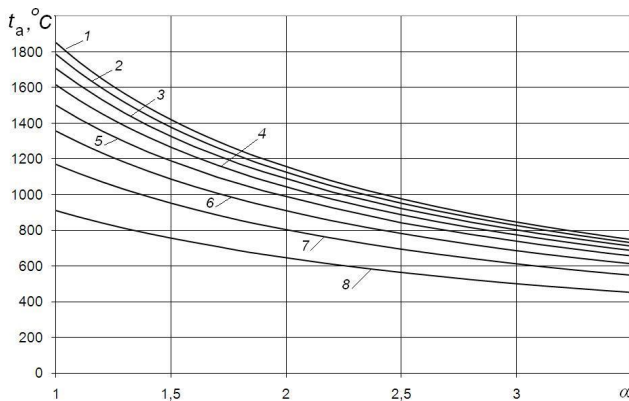


Рис. 1. Теоретична температура горіння деревини при реагуванні з повітрям, що має температуру 20°C, залежно від коефіцієнта надлишку повітря α при значеннях робочої вологості деревини W_r : 1 – 0%; 2 – 10%; 3 – 20%; 4 – 30%; 5 – 40%; 6 – 50%; 7 – 60%; 8 – 70%.

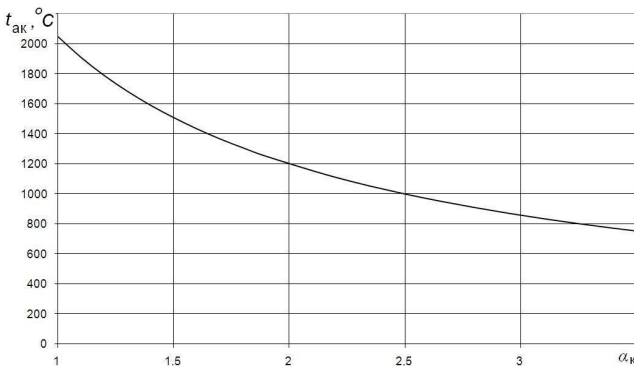


Рис. 2. Теоретична температура горіння коксового залишку деревини залежно від коефіцієнта надлишку повітря α_k .

Температура початку розм'якшення золи деревних палив знаходиться у діапазоні 1000-1200°C і для уникнення її проплавляння спалювання коксового залишку необхідно проводити при нижчих температурах. Враховуючи дані з рис. 2, можна зробити висновок, що спалювання коксового залишку деревного палива необхідно здійснювати при високих значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_k > 2-2,5$.

З певним наближенням отримані дані можна застосувати до прогнозування вигорання коксового залишку соломи. Температура початку

розм'якшення золи соломи та однорічних трав знаходиться у діапазоні 720-850°C. Для уникнення проплавляння золи спалювання коксового залишку соломи або гранул, пресованих із неї, необхідно проводити при ще нижчих температурах. Враховуючи дані з рис. 2, можна зробити висновок, що в цьому випадку підвищення коефіцієнта надлишку повітря навіть до $\alpha_k > 3,0$ може бути недостатнім і потребуватиме здійснення додаткових заходів для охолодження шару палаючих часток коксозольного залишку соломи.

Зважаючи на викладене, можна зробити висновок, що і при спалюванні деревного палива, і при спалюванні палив із соломи підігрівати дуттєве повітря для подачі у зону випалювання коксового залишку недоцільно.

На рис. 3 наведені розрахункові дані про теоретичну температуру горіння легких речовин при їх реагуванні з повітрям, що має температуру 20°C, в залежності від коефіцієнта надлишку повітря α_l при різних значеннях робочої вологості біомаси деревини W_r .

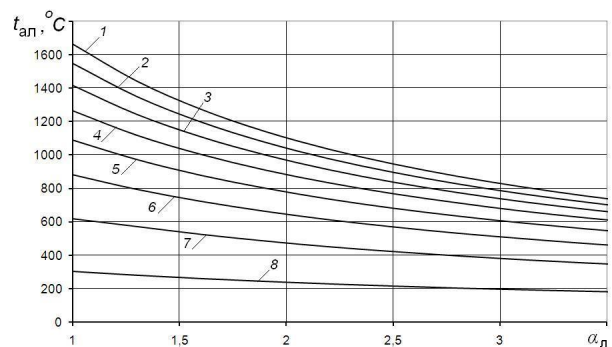


Рис. 3. Теоретична температура горіння легких залежно від коефіцієнта надлишку повітря α_l при значеннях робочої вологості деревини W_r : 1 – 0%; 2 – 10%; 3 – 20%; 4 – 30%; 5 – 40%; 6 – 50%; 7 – 60%; 8 – 70%.

З даних, наведених на рис. 3, видно, що зі зростанням вологості біомаси теоретична температура горіння легких зменшується. При стехіометричних співвідношеннях та вологості біомаси 60% і вище теоретична температура горіння легких становить менше 600°C, що ускладнює або й унеможливує організацію їх запалювання. Збільшення коефіцієнта надлишку повітря призводить до подальшого зниження теоретичної температури горіння легких.

З порівняння даних, наведених на рис. 1 та на рис. 3, видно, що при стехіометричних співвідношеннях теоретична температура горіння легких

нижча від теоретичної температури горіння вихідної деревини, зокрема для сухої деревини на 186 градусів. Зі збільшенням вологості вихідної деревини ця різниця збільшується і при вологості 50% досягає 652 градуси.

Зважаючи на теплообмін продуктів згоряння з поверхнями нагріву, фактична температура продуктів згоряння у топці є нижчою, ніж теоретична, а тому високі значення теоретичної температури горіння летких речовин є передумовою фактичного досягнення необхідної для їх вигорання високої температури. За даними [3] при температурі в топці до 800°C горіння біомаси супроводжується значною емісією оксиду вуглецю та поліароматичних сполук, а тому можна прийняти, що для екологічно безпечного спалювання летких температура в зоні їх вигорання має становити не менше 800°C.

З даних рис. 3 видно, що при застосуванні холодного дугтевого повітря при практично поширених робочих значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha=1,3-1,4$ досягнення теоретичної температури 800°C можливе при горінні летких, які виділяються з біомаси вологістю не більше 50% мас. При спалюванні більш вологого палива для досягнення теоретичної температури горіння летких 800°C необхідно подавати підігріте дугтеве повітря у зону їх горіння.

Для котельних установок малої потужності часто застосовуються режими горіння біомаси із загальним коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha \approx 2,0$ (вміст кисню в продуктах згоряння 10-13% об.) [4]. Отримані дані дозволяють стверджувати, що при таких значеннях коефіцієнта надлишку повітря необхідну температуру 800°C в зоні горіння летких можна забезпечити при вологості палива не більше 35%, а при надлишку повітря $\alpha=2,5-2,7$, який спостерігається при спалюванні цілих тюків соломи, вологість палива не повинна перевищувати 20%.

Висновки. 1. Показано, що в результаті термомолізу біомаси утворюються проміжні палива – коксовий залишок та леткі речовини, які за теоретичною температурою горіння значно відрізняються від вихідного палива.

2. Теоретична температура горіння летких речовин нижче відповідних значень для вихідної біомаси і знижується з підвищенням вологості палива та коефіцієнта надлишку повітря. Високу теоретичну температуру, що є передумовою вигорання летких, можна забезпечити при зниженні надлишку повітря та використанні більш сухих палив.

3. Теоретична температура горіння коксового залишку є вищою, ніж для вихідної біомаси. З метою уникнення проплавлення золи температуру в зоні його спалювання слід обмежувати, підтримуючи високий надлишок повітря, або ж здійснювати заходи для охолодження шару палиючих часток.

1. EUBIONET III-Solutions to biomass trade and market barriers // E. Alakangas, M. Junginger, J. van Dam, J. Hinge et al. // Renewable and sustainable energy reviews. – 2012. – V. 16. – P. 4277–4290.

2. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> – матеріали сайту Європейського комітету статистики.

3. *The handbook of biomass combustion and co-firing* / Edited by J. van Loo and Jaap Koppejan. – Earthscan, London – Sterling, VA, USA, 2008. – 442 p. (ISBN: 978-1-84407-249-1)

4. Жовмир Н.М. Анализ нормативных требований к эмиссии загрязняющих веществ при сжигании биомассы. // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34. – №1. – С. 77–86.

5. Voglauer B., Rathbauer J. Austrian Biomass boiler Manufacturers. Survey. – Austrian Bioenergy Centre GmbH, 2005. – 80 p. (www.abc-energy.at)

6. *Straw for energy production. Technology-Environment-Economy* / The Centre for Biomass Technology. L. Nikolaisen (Editor) // Danish Energy Agency, 1998. – 53p. www.ens.dk

7. Основы практической теории горения // В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов, М.Н. Кононович и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

8. Чмель В.М. Дослідження процесу горіння альтернативного палива в прямоочному шарі // Відновлювана енергетика. – 2011. – №4(27). – С. 85–92.

9. Жовмир Н.М. Исследование продолжительности периода выхода летучих при горении частиц древесины. // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. – №1. – С.93–98.

10. *Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод)*. Под ред. Н. В. Кузнецова – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

11. Макаров А.С., Литвиненко Н.Н. Топочное устройство для сжигания высоковлажных древесных отходов // Промышленная энергетика. – 1988. – №9. – С. 20–22.