

УДК 621; 662.61

М.М.Жовмір, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Аналіз умов горіння сумішей летких з повітрям при спалюванні біомаси

Виконано аналіз умов горіння сумішей летких з повітрям з урахуванням вмісту горючих компонентів та кисню, адиабатної температури, їх здатності до вимушеного запалювання або об'ємного теплового самозапалювання. Визначено режимні та конструктивні заходи, що сприяють реагуванню сумішей летких з повітрям залежно від вмісту вологи в біомасі.

Ключові слова: біомаса, леткі речовини, запалювання, горіння.

Выполнен анализ условий горения смесей летучих с воздухом с учетом содержания горючих компонентов и кислорода, адиабатной температуры, их способности к вынужденному воспламенению или объемному тепловому самовоспламенению. Определены режимные и конструктивные мероприятия, которые благоприятствуют реагированию смесей летучих с воздухом в зависимости от содержания влаги в биомассе.

Ключевые слова: биомасса, летучие вещества, воспламенение, горение.

Вступ. При виробництві енергії з використанням біомаси переважно здійснюються термохімічні процеси (горіння, газифікація, піроліз), протікання яких супроводжується утворенням із чистої біомаси проміжних екологічно небезпечних продуктів, котрі при неналежній організації процесів можуть попадати в довкілля. З екологічної точки зору, основна проблема при спалюванні біомаси полягає у підвищеній емісії оксиду вуглецю та твердих часток. У димових газах від спалювання біомаси одночасно з мікрочастками присутні субмікронні частки золи та конденсованих смол, а також паро- та газоподібні речовини, які уже в атмосферному повітрі перетворюються у малі рідкі та тверді частки. Попадаючи в атмосферу, субмікронні частки не осідають із повітря і перебувають у ньому у вигляді аерозолі, що здатен проникати глибоко в легені, підвищуючи ризик серцевих та ракових захворювань серед населення [1].

Емісію субмікронних часток при спалюванні біомаси пов'язують із недосконалістю процесів горіння, особливо летких речовин. Уловлення субмікронних часток є технологічно складним та витратним, тому здійснення первинних заходів щодо удосконалення вигорання летких та запобігання їх виносу з топки є пріоритетним підходом для досягнення екологічно безпечного спалювання біомаси [1, 2].

Для забезпечення вигорання летких речовин при спалюванні біомаси рекомендуються такі заходи, як подача вторинного дуття та застосування підігріву дуттьового повітря, але не наводяться дані щодо доцільних умов їх застосування [2].

При створенні нового котельного обладнання та реконструкції існуючих котлів на спалювання біомаси актуальним завданням є поглиблене вивчення процесів, що відбуваються при горінні, з метою виявлення сприятливих умов для повного вигорання летких, що важливо як для забезпечення енергетичної ефективності, так і екологічної безпеки обладнання.

Найбільш поширеною технологією спалювання біомаси та твердих біопалив є спалювання у стаціонарному шарі, особливо у найбільш поширених котлах малої потужності. В роботі [3] описана картина фізико-хімічних процесів, що відбуваються при спалюванні дрібнокускової біомаси у шарі на рухомій колосниковій решітці. Також показано, що внаслідок термолізу біомаси фактично відбувається роздільне спалювання двох похідних із неї палив – летких речовин і коксового залишку та виконано аналіз температурних умов, що складаються при їх горінні. В подальшому було виконано аналіз концентрацій горючих компонентів та кисню, що формуються у суміші летких з повітрям при спалюванні біомаси, на основі якого виявлено умови, сприятливі

для вимушеного запалювання сумішей летких з повітрям [4].

Мета даної роботи полягає у тому, щоб, опираючись на отримані раніше результати щодо температурних та концентраційних умов горіння сумішей летких з повітрям, виконати детальний аналіз можливого характеру процесів реагування сумішей летких з повітрям при практично можливих значеннях вологості біопалива та надлишку повітря, обґрунтувати режимні та конструктивні заходи для належної організації спалювання летких речовин.

На рис. 1 графічно наведено залежність відносної нижньої концентрації запалювання горючих газів у суміші летких з повітрям $r_n^{r,lel}$ від вологості деревного палива W_r при зміні коефіцієнта надлишку повітря α_n у широкому діапазоні, яка отримана на основі результатів роботи [4]. В даній статті застосовуються ті ж самі визначення та позначення, що прийняті у роботі [4].

Поле графіка ділиться лінією $\alpha_n=1$ на дві області: сумішей, збагачених горючими компонентами $\alpha_n < 1$ (справа вгору), та сумішей, збіднених горючими компонентами $\alpha_n > 1$ (зліва вниз).

Лінія, що відповідає концентрації кисню у суміші летких з повітрям $r_{O_2}=12,0\%об.$, ділить поле графіка на область з високими концентраціями кисню $r_{O_2} > 12,0\%об.$ (зліва вниз) та область із низькими концентраціями кисню $r_{O_2} < 12,0\%об.$ (справа вгору). Раніше в роботі [4] було показано, що в області $r_{O_2} < 12,0\%об.$ вимушене запалювання сумішей неможливе.

Горизонтальна лінія, що відповідає утворенню сумішей з відносною нижньою вибуховою концентрацією горючих компонентів $r_n^{r,lel} = 1$, ділить поле графіка на область сумішей летких з повітрям із високим значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} > 1$ (зверху) та область сумішей з низьким значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} < 1$ (знизу). В роботі [4] було показано, що в області $r_n^{r,lel} < 1$ вимушене запалювання сумішей неможливе.

Взаємне перекриття утворених областей дозволяє виділити на графіку сім зон, у межах яких вказані величини мають однорідний характер.

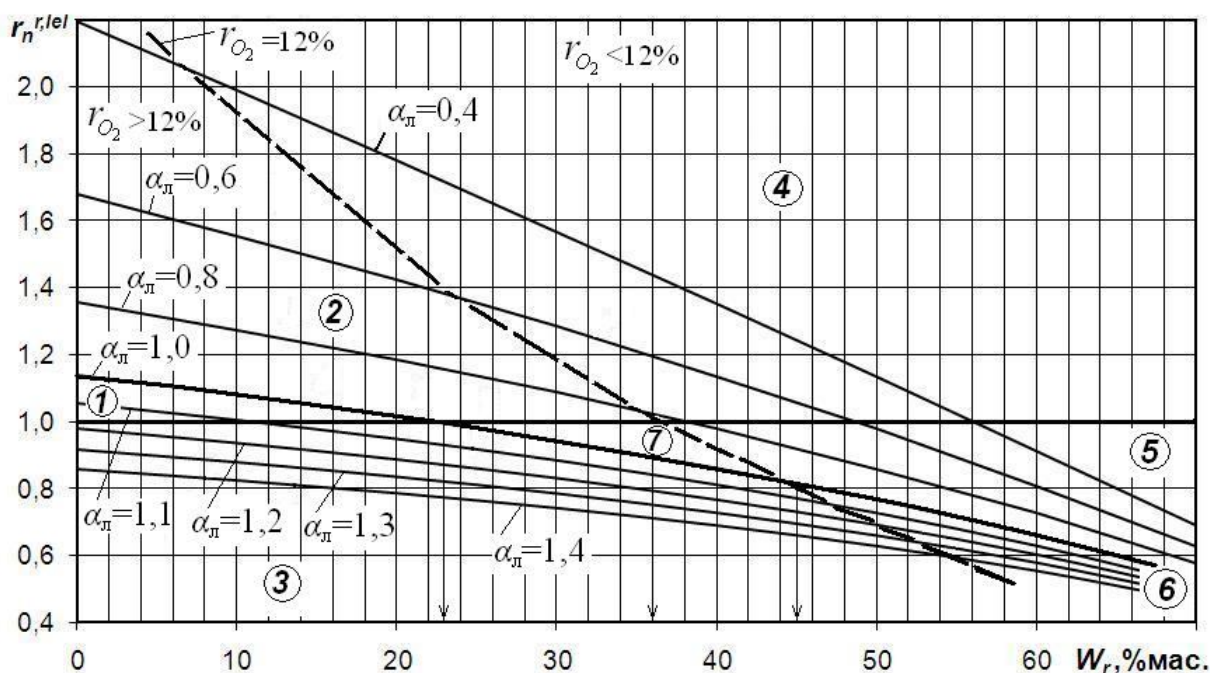


Рис. 1. Відносна нижня вибухова концентрація горючих газів у суміші летких з повітрям $r_n^{r,lel}$ залежно від вологості палива W_r при коефіцієнтах надлишку повітря у суміші з леткими α_n (в кружках цифрами від 1 до 7 позначені зони з однорідними властивостями сумішей).

Характеристика сумішей летких з повітрям за зонами.

Зона 1 – Суміші летких та повітря зі стехіометричним співвідношенням або з незначним надлишком повітря $1 < \alpha_{л} < 1,2$ характеризуються високою концентрацією кисню $r_{O_2} > 12,0\%$ об. та високим значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} > 1$, що здатні до вимушеного запалювання.

Зона 2 – Суміші летких з повітрям багаті горючими компонентами $\alpha_{л} \leq 1$, характеризуються високою концентрацією кисню $r_{O_2} > 12,0\%$ об., високим значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} > 1$. Суміші зони 2 здатні до вимушеного запалювання.

Зона 3 – Суміші летких з повітрям збіднені горючими компонентами $\alpha_{л} > 1 \dots 1,2$; характеризуються високою концентрацією кисню $r_{O_2} > 12,0\%$ об., але низьким значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} < 1$. З огляду на останню обставину можна вважати, що суміші зони 3 нездатні до вимушеного запалювання через надмірне розведення повітрям, а при високому вмісті вологи в паливі додається розведення водяною парою, утвореною при випаровуванні вологи палива.

Зона 4 – Суміші летких з повітрям багаті горючими компонентами $\alpha_{л} \leq 1$, характеризуються високим значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} > 1$, мають низький вміст кисню $r_{O_2} < 12,0\%$ об. і через це нездатні до вимушеного запалювання.

Зона 5 – Суміші летких з повітрям відносно багаті горючими компонентами $\alpha_{л} \leq 1$, характе-

ризуються низьким значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} < 1$ та низьким вмістом кисню $r_{O_2} < 12,0\%$ об. Суміші зони 5 нездатні до вимушеного запалювання через недостатню концентрацію горючих компонентів та кисню, що спричинене розведенням газової суміші водяною парою, утвореною із вологи палива.

Зона 6 – Суміші летких з повітрям збіднені горючими компонентами $\alpha_{л} > 1$, характеризуються низьким значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} < 1$, недостатньою концентрацією кисню $r_{O_2} < 12,0\%$ об. і нездатні до вимушеного запалювання через розведення газової суміші водяною парою, утвореною із вологи палива.

Зона 7 – Суміші компонентів летких з повітрям відносно багаті горючими компонентами $\alpha_{л} < 1$, характеризуються високим вмістом кисню $r_{O_2} > 12,0\%$ об., але низьким значенням відносної нижньої вибухової концентрації горючих компонентів $r_n^{r,lel} < 1$, які нездатні до вимушеного запалювання через недостатню концентрацію горючих компонентів.

В сучасних автоматизованих котельних установках спалювання біомаси різної вологості здійснюють із коефіцієнтами надлишку повітря від $\alpha=1,2 \dots 1,4$ до $\alpha=1,6 \dots 2,0$. Відомо, що значення адиабатної температури горіння сумішей має визначальний вплив на швидкість їх вигорання [5]. На основі результатів роботи [3] в таблиці 1 наведено значення адиабатних температур $t_{ал}$ горіння сумішей летких з повітрям при характерних значеннях вмісту вологи в біопаливі W_r та коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha_{л}$.

Таблиця 1. Адиабатна температура $t_{ал}$ горіння суміші летких з повітрям залежно від вмісту вологи в деревному паливі W_r та надлишку повітря $\alpha_{л}$

	$t_{ал}, ^\circ\text{C}$						
	$W_r=0\%$	$W_r=23\%$	$W_r=36\%$	$W_r=45\%$	$W_r=50\%$	$W_r=55\%$	$W_r=60\%$
$\alpha_{л} = 1,0$	1666	1372	1161	988	884	752	620
$\alpha_{л} = 1,4$	1388	1164	988	857	772	664	557
$\alpha_{л} = 1,6$	1275	1078	929	801	724	625	526

Характеристика процесів взаємодії летких з повітрям за зонами. З характеристики виділених зон можна зробити висновок, що суміші летких з повітрям здатні до вимушеного запалювання від відкритого джерела вогню або іскри в умовах, які відповідають зонам 1 та 2. В цих зонах утворюються суміші з високим значенням відносною нижньої вибухової концентрації горючих газів $r_n^{r,lel} > 1$ та концентрацією кисню більше 12%об. Максимальна вологість палива, при якій суміш летких з повітрям може вимушено запалюватися, становить 36%мас., причому це можливо при значеннях коефіцієнта надлишку повітря близьких до $\alpha_n=0,8$. Для палива вологістю менше 36% область допустимих значень надлишку повітря α_n може розширюватися, причому для атмосферно сухої деревини із вмістом води $W_r=20...23\%$ допустимий діапазон надлишку повітря становить $\alpha_n=0,6...1,0$, а для сухого біопалива (деревні гранули) із вмістом води $W_r=8...10\%$ мас. надлишок повітря може бути у більш широких межах: $\alpha_n=0,5...1,2$.

Якщо взяти до уваги температурні умови горіння суміші летких з повітрям (див. таблицю 1), то можна сказати, що помірно збіднені **суміші летких з повітрям, які відповідають зоні 1**, здатні до вимушеного запалювання, їх вигорання протікає з певним надлишком повітря $\alpha_n=1,0...1,2$ та високих температурах ($t_{ал}=1372...1550...1666^\circ\text{C}$), що є передумовою повного вигорання летких з мінімальним утворенням продуктів неповного згоряння.

Організація спалювання біопалив з утворенням сумішей, що відповідають зоні 1, можлива лише для гарантовано сухих біопалив із вмістом води до $W_r=23\%$, а саме: паливних гранул з деревини та сільськогосподарських відходів, у яких максимальний вміст води становить не більше 15%, та атмосферно сухих дров з рівноважним вмістом води близько 20-22%.

Багаті суміші, що відповідають зоні 2, здатні до вимушеного запалювання з досягненням високих адіабатних температур ($t_{ал}=1161...1372...1666^\circ\text{C}$). Можна припустити, що через нестачу кисню при $\alpha_n < 1,0$ горіння може супроводжуватися утворенням продуктів непов-

ного згоряння, головним чином оксиду вуглецю, а тому для самостійної реалізації такий процес непридатний.

Однак організація спалювання біопалив з утворенням сумішей, що відповідають зоні 2, в якості допоміжного заходу дозволяє забезпечувати вимушене запалювання летких з повітрям при зміні вмісту води в біопаливах у діапазоні $W_r=0...36\%$. Для запалювання летких речовин необхідно подавати первинне повітря із забезпеченням $\alpha_{п1}=0,8$, а після спалахування летких додавати вторинне повітря до досягнення експлуатаційних значень надлишку повітря з переходом характеру суміші до зони 3.

Збіднені суміші летких з повітрям, що відповідають зоні 3, нездатні до вимушеного запалювання ($r_n^{r,lel} < 1$). Перехід від квазірівноважної непрореагованої суміші летких з повітрям до розжарених продуктів згоряння може відбуватися завдяки протіканню об'ємних газофазових реакцій за механізмом об'ємного теплового самозапалювання сумішей горючих газів та окислювача при їх тривалому перебуванні в адіабатних умовах. Можливі механізми теплового самозапалювання вивчалися Н.Н.Семьоновим та Д.А.Франк-Каменецким стосовно суміші горючого газу з окислювачем [5]. В даному випадку слід розглядати процес об'ємного теплового самозапалювання суміші кількох горючих газів із повітрям. Відповідно до положень теорії об'ємного теплового самозапалювання тривалість реагування суміші визначається адіабатною температурою її горіння. Для зони 3 при значеннях $\alpha_n=1,0...1,4$ зі збільшенням вологості біопалива в діапазоні від $W_r=0\%$ до $W_r=45\%$ адіабатна температура горіння суміші летких з повітрям знижується від $t_{ал}=1550...1388^\circ\text{C}$ до $t_{ал}=988...857^\circ\text{C}$, залишаючись достатньою для протікання газофазових реакцій. При достатньо значному часі перебування таких реагуючих сумішей при високих температурах та завдяки достатній концентрації кисню можна забезпечити їх повне вигорання. Для забезпечення протікання такого процесу необхідно застосовувати топкові камери з футерованими стінками.

При збільшенні вологості біопалива до $W_r=45...55\%$ адіабатна температура горіння суміші летких з повітрям $t_{ал}$ зменшується нижче 800°C , що призводить до уповільнення хімічних реакцій окислення та неможливості їх завершення за прийнятний час перебування сумішей у футерованому топковому просторі. Підвищенню адіабатної температури горіння сприяє застосування підігретого дуттьового повітря, а тому для спалювання біопалив із вмістом води $W_r=45...55\%$ крім застосування топкових камер з футеруванням необхідно підігрівати дуттьове повітря.

Суміші, що відповідають зоні 7, також відносяться до області з високою концентрацією кисню ($r_{O_2} > 12,0\%$ об.) та високою концентрацією горючих компонентів ($\alpha_n < 1$), але нездатні до вимушеного запалювання ($r_n^{r,lel} < 1$). Утворення таких сумішей можливе при спалюванні біопалив із вмістом води $W_r=23...45\%$ у разі недостатньої подачі повітря ($\alpha_n < 1$) внаслідок порушень процесу горіння. Для сумішей зони 7 характерна висока адіабатна температура горіння $t_{ал}=988...1372^\circ\text{C}$. Можна припустити, що запалювання та вигорання таких сумішей також буде проходити за механізмом об'ємного теплового самозапалювання. На відміну від сумішей зони 3, суміші зони 7 збагачені горючими компонентами ($\alpha_n < 1$), а тому через нестачу кисню при їх газозафазовому вигоранні будуть утворюватися продукти неповного згорання. У зв'язку з цим при спалюванні біопалив слід уникати режимів роботи з утворенням сумішей летких з повітрям, що відповідають зоні 7.

Суміші летких з повітрям, що відповідають зонам 4 та 5, можна розглядати як леткі речовини з невеликим вмістом повітря, що нездатні до вимушеного запалювання. Розігрів таких сумішей можливий як за рахунок протікання хімічних реакцій, так і за рахунок теплообміну з розжареним футеруванням топкової камери. Через низький вміст кисню горіння таких сумішей буде неповним.

Для експериментальної перевірки висунутого припущення провели нескладний експеримент з нагрівом часток сухої паливної тріски ($W_r=20\%$)

та деревних гранул ($W_r=9\%$) у відкритій муфельній печі, нагрітій до температури 800°C . Леткі речовини спалахують над часткою майже зразу ж після її внесення у простір печі, але надходження повітря за рахунок конвекції є недостатнім. Осередок пасма летких речовин, що здіймається над часткою біомаси, прогріваючись, зазнає термічного розпаду з утворенням часток сажі. Спостереження показали, що утворені ниткоподібні частки сажі, переміщуючись з потоком газів, збільшуються у розмірі і досягають одного-двох міліметрів. Можна зробити висновок, що горіння багатих сумішей газоподібних летких речовин при низькій концентрації кисню супроводжується утворенням не тільки газоподібних продуктів неповного згорання, але і твердих часток.

При нагріві в муфельній печі часток паливної тріски з підвищеним вмістом води ($W_r=40\%$) леткі горючі речовини значно розведені водяною парою і, не спалахуючи, виходять з муфельної печі. Спалахування летких відбувалося з певним запізненням, коли леткі виходили з частки біомаси, що зазнала підсушування.

При організації спалювання біомаси слід уникати утворення сумішей летких з повітрям, що відповідають зонам 4 та 5, забезпечуючи вміст кисню $r_{O_2} > 12,0\%$ об. подачею достатнього обсягу дуттьового повітря з метою зміщення складу суміші до $\alpha_n=1,0...1,4$.

Суміші летких з повітрям, що відповідають зоні 6, утворюються при використанні біопалива з вмістом води $W_r > 45...55\%$ і містять достатньо кисню для повного вигорання летких речовин $\alpha_n > 1,0$, але його концентрація $r_{O_2} < 12,0\%$ об. недостатня для вимушеного запалювання. При $\alpha_n=1,0$ та $W_r=45\%$ адіабатна температура горіння суміші становить $t_{ал}=988^\circ\text{C}$, знижуючись до $t_{ал}=620^\circ\text{C}$ з підвищенням вологості палива до $W_r=60\%$. При практично застосовуваних надлишках повітря $\alpha_n=1,4$ сумішам цієї зони відповідають значення адіабатної температури горіння $t_{ал}=664...557^\circ\text{C}$ і нижче. Такі низькі адіабатні температури значно уповільнюють або й унеможливають запалювання летких за механізмом об'ємного теплового самозапалювання і

спричиняють їх транзитний вихід із топкового об'єму та емісію шкідливих продуктів піролізу біопалива в атмосферу.

При енергетичному використанні біопалив із вмістом вологи $W_r > 45 \dots 55\%$ слід уникати їх спалювання з утворенням сумішей, що відповідають зоні 6. Перш за все, це полягає у зменшенні вологості біопалив шляхом їх природного сушіння. При необхідності спалювання вологих палив, особливо при $W_r > 55\%$, доцільно застосовувати підігрів дуттьового повітря та обмежувати його подачу до значень $1,1 < \alpha_d < 1,2$ з метою підвищення адіабатної температури горіння до $t_{ад} = 800 \dots 900$ °С, а також забезпечувати достатній час перебування реагуючої суміші при високих температурах у футерованій топковій камері.

Висновки. 1. При вмісті вологи в біомасі до $W_r < 23\%$ суміші летких з повітрям здатні до вимушеного запалювання від іскри або джерела відкритого вогню при стехіометричних співвідношеннях або незначному надлишку повітря.

2. При вмісті вологи в біомасі до $W_r < 36\%$ суміші летких з повітрям здатні до вимушеного запалювання при подачі первинного повітря в обсязі, що забезпечує $\alpha_{д1} = 0,8$, а після запалювання можна подавати вторинне повітря до забезпечення експлуатаційного загального надлишку повітря.

3. При вмісті вологи в біомасі $W_r > 36\%$ суміші летких з повітрям нездатні до вимушеного запалювання, а їх реагування може відбуватися за механізмом об'ємного теплового самоzapalювання.

4. При вмісті вологи в біомасі $36\% < W_r < 45\%$ для забезпечення реагування суміші летких з повітрям за механізмом об'ємного теплового

самоzapalювання доцільним є створення адіабатних умов за рахунок футерування топкової камери.

5. При вмісті вологи в біомасі $45\% < W_r < 55\%$ для забезпечення реагування суміші летких з повітрям за механізмом об'ємного теплового самоzapalювання доцільним є створення адіабатних умов за рахунок футерування топкової камери та збільшення адіабатної температури за рахунок підігріву дуттьового повітря.

6. Біопалива із вмістом вологи $W_r > 55\%$ перед використанням доцільно витримувати для природного сушіння. При необхідності спалювання вологих палив, особливо при $W_r > 55\%$, доцільно застосовувати підігрів дуттьового повітря, обмежувати його подачу до значень $1,1 < \alpha_d < 1,2$ а також забезпечувати адіабатні умови реагування у футерованій топковій камері.

1. *Aerosols from biomass combustion*. T. Nussbaumer (Ed.) // International seminar at 27 June 2001 in Zurich (Switzerland) organized on behalf of International energy agency (IEA) Bioenergy Task 32: Biomass combustion and cofiring and the Swiss Federal Office of Energy, Verenum, Zurich, 2001. – 98 p. (ISBN: 3-908705-00-2).

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

3. *Жовмір М.М.* Теоретичні температури горіння біомаси та продуктів її термолізу // Відновлювана енергетика. – 2013. – №3(34). – С. 72–77.

4. *Жовмір М.М.* Концентраційні умови вимушеного запалювання летких при спалюванні біомаси. // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4(35). – С. 75–81.

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