

УДК 621; 662.61

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

Концентраційні умови вимушеного запалювання летких при спалюванні біомаси

Наведено результати аналітичного дослідження умов утворення сумішей летких та повітря, які можуть вимушено займатися від іскри чи відкритого джерела вогню у холодних топках. Обґрунтовано доцільність стадійного змішування летких з повітрям при спалюванні біомаси.

Ключові слова: біомаса, леткі, запалювання.

Приведены результаты аналитического исследования условий образования смесей летучих с воздухом, которые могут вынужденно зажигаться от искры или открытого источника огня в холодных топках. Обоснована целесообразность стадийного смешивания летучих с воздухом при сжигании биомассы.

Ключевые слова: биомасса, летучие, воспламенение.

Вступ. У природному середовищі біомаса деревини в лісах та сільськогосподарських відходів на полях біологічно розкладається екологічно безпечно та відносно швидко, збагачуючи своїми рештками ґрунти для росту наступних поколінь рослин. При використанні біомаси для виробництва енергії переважно здійснюються термохімічні процеси (горіння, газифікація, піроліз), протікання яких супроводжується утворенням із чистої біомаси проміжних екологічно небезпечних продуктів, які при неналежній організації процесів можуть попадати у довкілля.

З екологічної точки зору основна проблема при спалюванні біомаси полягає у підвищеній емісії оксиду вуглецю та твердих часток. За нашими даними при спалюванні тюків соломи емісія CO досягає 6000...8000 мг/нм³, а твердих часток 320...1100 мг/нм³.

У димових газах від спалювання біомаси одночасно з мікрочастками присутні субмікронні частки золи та конденсованих смол, а також паротагазоподібні речовини, котрі уже в атмосферному повітрі перетворюються у малі рідкі та тверді частки. Попадаючи в атмосферу, субмікронні частки не осідають із повітря, а перебувають у ньому у вигляді аерозолу, що здатен проникати глибоко в легені, підвищуючи ризик серцевих та ракових захворювань серед населення [1].

Міністерством охорони навколишнього природного середовища України затверджені досить жорсткі нормативи викидів, які унеможливають подальше впровадження простих технологій спалювання біомаси з великою емісією забруднюючих речовин, перш за все твердих часток. Емісія твердих часток, не диференційованих за складом, не повинна перевищувати 150 мг/нм³ для установок із викидом часток до 500 г/год та менше 50 мг/нм³ при викиді часток понад 500 г/год [2].

Введені в Україні екологічні вимоги, що подібні до відповідних нормативів у провідній країні Європейського Союзу – ФРН, фактично забороняють впровадження нового обладнання зі значною емісією забруднюючих речовин, але для існуючого обладнання встановлено технологічні нормативи, які дозволяють його обмежену експлуатацію при викидах вище нормативних [3].

Емісію субмікронних часток 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 при спалюванні біомаси [1, 4]. У багатьох країнах існують державні програми досліджень щодо підвищення екологічної безпеки при спалюванні біомаси (наприклад, у

Данії та Швеції). Це свідчить про актуальність проблеми навіть у провідних із питань біоенергетики країнах.

Особливості процесів при шаровому спалюванні біомаси. Картину фізико-хімічних процесів, що відбуваються при спалюванні дрібнокускової біомаси в 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 речовини та гази змішуються з дуттьовим повітрям у топковому просторі над шаром палива. Концентрація компонентів у газовій суміші, а також температура її згоряння, можуть змінюватися у досить широких межах залежно від вологості палива та витрати повітря, що подається в зону горіння летких речовин. В результаті при утворенні багатой суміші може відбуватися займання летких речовин і їх згоряння у вигляді факела. У випадку утворення бідної суміші відбуваються об'ємні газофазові реакції окислення, швидкість протікання яких має експоненціальну залежність від температури реагуючих речовин. При низьких температурах та обмеженому часу перебування газів у топці не завжди завершується об'ємне вигорання, і тому незгорілі леткі речовини покидають топку, викликаючи забруднення поверхонь нагріву, втрату хімічної енергії палива і спричиняючи значну емісію забруднюючих речовин в атмосферу.

При створенні котельного обладнання та топкових пристроїв необхідно забезпечувати умови, сприятливі для повного вигорання летких речовин, які виділяються з біомаси, що спалюється. Топки поширених в Україні водогрійних котлів зі спалюванням традиційних палив (вугілля, природного газу), як правило, не мають футерування, і їх можна вважати холодними (тобто стінки топки мають температуру, нижчу від температури теплового самозапалювання сумішей горючих газів із повітрям і не сприяють запалюванню та підтриманню горіння). Температура самозапалювання становить для водню 530°C, оксиду вуглецю

610°C, метану 654°C, пропану 530°C [5]. При переведенні таких котлів на спалювання біомаси важливо створити умови, сприятливі для забезпечення займання та вигорання летких речовин, що важливо як для забезпечення енергетичної ефективності, так і екологічної безпеки обладнання.

В цій статті наведено результати аналітичного дослідження концентраційних умов спалювання біомаси з утворенням сумішей летких із повітрям, які можуть вимушено займатися у холодних топках від іскри чи відкритого джерела вогню.

Визначення концентрації горючих компонентів у суміші летких та повітря. Для спрощення аналізу приймаємо, що коксовий залишок та утворені леткі речовини згоряють в окремих зонах – зоні горіння коксового залишку на колосниковій решітці та зоні вигорання летких речовин поза шаром палива. Приймаємо, що повітря, необхідне для згоряння палива, подається двома потоками – в зону горіння коксового залишку та в зону горіння летких.

За даними [6] в лабораторних умовах при термолізі сухої деревини утворюються наступні продукти (у кг/кг): вугілля $g_c = 0,335$; швельгаз $g_g = 0,272$; смоли $g_t = 0,14$ та органічні кислоти $g_a = 0,028$; пірогенетична вода $g_{wp} = 0,225$. До летких речовин можна віднести продукти, що знаходяться в паро- та газоподібному стані в момент виділення, а саме: швельгаз, органічні кислоти, пірогенетичну вологу, а також смоли, які можна розглядати як частки рідини у вигляді аерозолу в паро- та газоподібних продуктах.

Для повного згоряння летких, що виділяються з 1 кг сухої деревини, теоретично необхідний об'єм повітря становить $V_{v,d}^0$, значення якого можна розрахувати за методикою [7] з використанням експериментальних даних [6] про вихід та елементний склад продуктів термолізу. При використанні 1 кг деревного палива із вмістом вологи W_r термолізу зазнає $(1 - W_r)$ кг сухої деревини, а тому для спалювання летких, що виділяються з 1 кг вологого палива, теоретично необхідний об'єм повітря становитиме:

$$V_v^0 = V_{v,d}^0 (1 - W_r). \quad (1)$$

Приймаємо, що спалювання летких здійснюється з коефіцієнтом надлишку повітря α_l . Для спалювання летких, що виділяються з 1 кг робочої маси палива, необхідно подати об'єм повітря:

$$V_a = \alpha_l V_v^0. \quad (2)$$

Можна припустити, що запалювання суміші летких з повітрям розпочинається із запалювання горючих газів, наявних у складі швельгазу. Характерною особливістю горючих газів є їх здатність до вимушеного займання від точкового нагріву, іскри або відкритого джерела вогню при температурах, нижчих від температури самозаймання [5]. За даними [6] швельгаз містить 32,4%об. CO_2 , 20,2%об. CO , 25,5%об. CH_4 , 18,8%об. H_2 , 2,0%об. C_nH_m , 1,1%об. N_2 .

У складі швельгазу горючими газами, що можуть займатися від іскри та ініціювати вигорання суміші усіх летких з повітрям, є водень, оксид вуглецю, метан та вищі газоподібні вуглеводні. Для спрощення подальшого аналізу умовно приймаємо, що всі вищі вуглеводні швельгазу представлені пропаном. Серед компонентів піролізних газів (швельгазу) певний об'єм займають двоокис вуглецю та азот. Їх присутність обумовлює розведення газової суміші і зниження концентрацій горючих компонентів та кисню.

Вода пірогенетична та волога палива знаходяться в стані пари. Вважаємо, що водяна пара не приймає участі в горінні, але її присутність призводить до розведення газової суміші і зниження концентрацій горючих компонентів та кисню.

Піролізні смоли разом із органічним кислотама знаходяться в дрібнокрапельному стані у вигляді аерозолу. Пара легкої фракції піролізних смол при доступі повітря спалахує від відкритого джерела вогню при температурі 55°C. При нагріві піролізних смол та кислот до 160°C з них випаровується легка фракція у кількості 10% від маси смол та кислот [8]. Якщо прийняти, що і в топці буде випаровуватися така ж кількість легкої фракції, то на 1 кг сухої деревини це буде становити 16,8 г. Якщо прийняти молекулярну масу легкої фракції смол та кислот рівною 80 [8], то її об'єм становитиме 0,0047 м³ на 1 кг сухої деревини або менше 3% від об'єму горючих газів швельгазу. Враховуючи незначний вміст легких компонентів

у піролізних смолах, їх об'єм та можливий вплив на ініціювання запалювання всіх летких враховувати не будемо.

При виконанні аналізу концентраційних умов запалювання летких з повітрям будемо розглядати швельгаз (піролізний газ), маса якого на 1 кг сухого біопалива становить g_g кг, і за даними хімічного аналізу має наступні об'ємні (мольні) концентрації газів: r_{CO_2} , r_{CO} , r_{H_2} , r_{CH_4} , $r_{C_3H_8}$, r_{N_2} . На основі положень молекулярно-кінетичної теорії газів [9] можна розрахувати об'єми кожного компонента швельгазу V_i , тобто V_{CO_2} , V_{CO} , V_{H_2} , V_{CH_4} , $V_{C_3H_8}$, V_{N_2} . Тут і далі за текстом газу та водяна пара вважаються ідеальними газами, а їх об'єми наводяться при нормальних умовах.

Якщо врахувати вміст вологи у паливі W_r , кг/кг, тоді на 1 кг робочої маси палива будуть виділятися наступні фактичні об'єми компонентів швельгазу: $V_{CO_2,W}$, $V_{CO,W}$, $V_{H_2,W}$, $V_{CH_4,W}$, $V_{C_3H_8,W}$, які можна розрахувати за формулою:

$$V_{i,W} = V_i(1 - W_r). \quad (3)$$

У суміші летких та повітря крім компонентів швельгазу буде водяна пара, утворена з пірогенетичної вологи вологого біопалива в кількості $g_{wp}(1 - W_r)$ кг на 1 кг робочої маси палива, волога палива у кількості W_r кг/кг, а також волога, внесена з дуттьовим повітрям. Об'єм водяної пари у суміші летких з повітрям буде становити:

$$V_{H_2O} = (g_{wp}(1 - W_r) + W_r + V_a \rho_a d) / \rho_{H_2O}, \quad (4)$$

де d – вміст водяної пари в дуттьовому повітрі, кг/кг; ρ_a – густина повітря як ідеального газу при нормальних умовах, кг/м³; ρ_{H_2O} – густина водяної пари як ідеального газу при нормальних умовах, кг/м³.

Об'єм кисню в суміші летких з повітрям буде становити:

$$V_{O_2,W} = 0,21V_a. \quad (5)$$

Об'єм азоту в суміші летких з повітрям складається з азоту піролізних газів та азоту дуттьового повітря:

$$V_{N_2,W} = V_{N_2}(1 - W_r) + 0,79V_a. \quad (6)$$

Таким чином, знаючи об'єми всіх компонентів суміші летких з повітрям, можна розрахувати її сумарний об'єм:

$$V_m = V_{CO_2,W} + V_{CO,W} + V_{H_2,W} + V_{CH_4,W} + V_{C_3H_8,W} + V_{H_2O} + V_{O_2,W} + V_{N_2,W}. \quad (7)$$

Для горючих газів можна розрахувати їх об'ємну концентрацію в суміші летких з повітрям:

$$r_{m,CO} = V_{CO,W} / V_m; \quad (8)$$

$$r_{m,H_2} = V_{H_2,W} / V_m; \quad (9)$$

$$r_{m,CH_4} = V_{CH_4,W} / V_m; \quad (10)$$

$$r_{m,C_3H_8} = V_{C_3H_8,W} / V_m. \quad (11)$$

Опираючись на наведену методику розрахунку з використанням даних [6] про склад летких, що виділяються з сухої соснової деревини, розраховані концентрації горючих газів у суміші летких із повітрям у залежності від робочого вмісту вологи в паливі W_r при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha_n=1,0$ (див. таблицю 1). Як відомо, суміш горючого газу з повітрям запалюється від джерела вогню, якщо концентрація горючого газу вище характерної для нього нижньої границі запалювання: для водню $r_{H_2}^{lel}=4\%$ об.; для оксиду вуглецю $r_{CO}^{lel}=12,5\%$ об.; для метану $r_{CH_4}^{lel}=5\%$ об.; пропану $r_{C_3H_8}^{lel}=2,37\%$ об. [5]. В ряді джерел відповідну концентрацію горючого газу в повітрі називають "нижня границя вибуху". Наведені в таблиці дані

свідчать, що навіть для сухих палив при $\alpha_n = 1$ концентрація жодного з горючих газів у суміші летких з повітрям не досягає нижньої границі запалювання.

Оцінка можливості запалювання суміші летких з повітрям. Необхідно з'ясувати, чи може запалюватися суміш горючих газів з повітрям, коли концентрація кожного з газів менше нижньої границі вибуху. Для кожного горючого газу в газовій суміші визначимо його відносну концентрацію запалювання $r_i^{r,lel}$ як відношення об'ємної концентрації газу $r_{m,i}$ до характерної для даного газу нижньої об'ємної концентрації запалювання r_i^{lel} , що відповідає запалюванню суміші даного газу з повітрям при стандартних температурних умовах та атмосферному тиску:

$$r_i^{r,lel} = r_{m,i} / r_i^{lel}. \quad (12)$$

За принципом адитивності для суміші n горючих газів з повітрям будемо визначати сумарну відносну нижню концентрацію запалювання $r_n^{r,lel}$:

$$r_n^{r,lel} = \sum_{i=1}^n r_i^{r,lel}. \quad (13)$$

Приймаємо, що суміш n горючих газів з повітрям може примусово запалюватися, якщо сумарна відносна нижня концентрація запалювання $r_n^{r,lel}$ дорівнює або більше одиниці:

$$r_n^{r,lel} \geq 1. \quad (14)$$

Таблиця 1. Концентрації горючих газів у суміші летких з повітрям при $\alpha_n = 1$

Вміст вологи у паливі, W_r , кг/кг	Концентрації горючих газів у суміші летких з повітрям, % об.				$r_n^{r,lel}$
	CO	CH ₄	H ₂	C _n H _m (в перерахунку на C ₃ H ₈)	
0	1,88	2,37	1,75	0,186	1,138
0,1	1,78	2,25	1,66	0,176	1,080
0,2	1,67	2,11	1,56	0,166	1,015
0,3	1,55	1,96	1,45	0,154	0,942
0,4	1,42	1,79	1,32	0,140	0,860
0,5	1,26	1,59	1,18	0,125	0,767
0,6	1,09	1,37	1,01	0,108	0,659
0,7	0,88	1,11	0,82	0,087	0,534

Результати розрахунків для суміші летких з повітрям при $\alpha_n=1$ показують, що сумарна відносна концентрація запалювання $r_n^{r,lel} > 1$ може досягатися для деревного палива із вмістом води менше 23% (див. таблицю 1).

При спалюванні горючих газів здійснюють їх стадійне змішування з первинним та вторинним повітрям. Швидкість поширення полум'я у сумішах горючих газів з повітрям зростає при певному зниженні коефіцієнта надлишку повітря та утворенні збагачених сумішей. Проте при значному зниженні надлишку повітря відбувається термічне розкладання вуглеводнів з жовтим світінням полум'я через появу частинок вуглецю. Жовте світіння з'являється при таких значеннях коефіцієнта надлишку первинного повітря: $\alpha' = 0,2$ для коксового газу; $\alpha' = 0,4$ для природного газу; $\alpha' = 0,58$ для бутану. При розробці інжекційних пальників приймають витрату первинного повітря, що відповідає $\alpha' = 0,6$ [5].

Розглянемо, як впливає зміна надлишку повітря на можливість запалювання горючих газів у суміші летких з повітрям. Значення нижньої відносної концентрації запалювання розраховували для сумішей летких з повітрям, які утворюються при значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_n=0,4...1,4$ при спалюванні деревної біомаси вологістю від 0 до 70%. Отримані результати, які наведено на рис. 1, показують, що при коефіцієнтах надлишку первинного повітря $\alpha_n > 1,2$ навіть при спалюванні сухого палива сумарна відносна нижня концентрація запалювання $r_n^{r,lel} < 1$, тобто при цих умовах суміш горючих газів летких з повітрям не може займатися (вибухати) від відкритого вогню чи іскри. Зі зниженням коефіцієнта надлишку повітря до $\alpha_n = 1,0$ сумарна відносна нижня концентрація запалювання $r_n^{r,lel} = 1$ може досягатися для палив із вмістом води 23%, і при подальшому зниженні коефіцієнта надлишку повітря сумарна відносна нижня концентрація запалювання $r_n^{r,lel} > 1$ може досягатися для палива з більшим вмістом води.

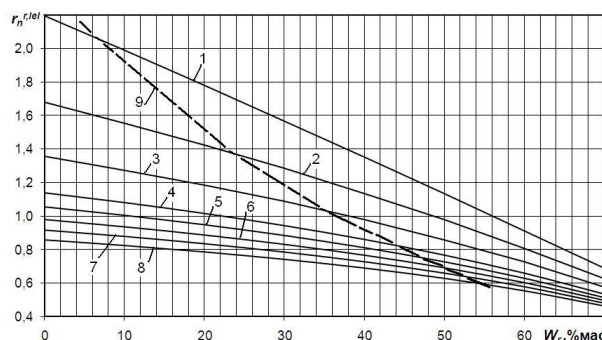


Рис. 1. Відносна нижня концентрація запалювання горючих газів у суміші летких з повітрям залежно від вологості палива W_r при коефіцієнтах надлишку повітря α_n : 1 – 0,4; 2 – 0,6; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,1; 6 – 1,2; 7 – 1,3; 8 – 1,4; 9 – лінія, що відповідає сумішам із вмістом кисню 12% об.

Протікання хімічних реакцій при запалюванні та горінні горючого газу в повітрі визначається як концентрацією горючого газу, так і концентрацією окислювача. При недостатній концентрації кисню суміш горючого газу з повітрям не запалюється, що й використовується при гасінні пожеж шляхом обмеження доступу повітря, подачею інертного газу або газових сумішей із низьким вмістом кисню. Визначимо мінімальну концентрацію кисню, при якій можливе запалювання суміші, що містить горючі гази, кисень та нереагуючі компоненти на основі наступних суджень.

Відомо, що багаті суміші горючих газів з повітрям не займаються при концентрації газу вище верхньої границі запалювання, що є характерною для даного газу. Верхня границя запалювання для водню в суміші з повітрям відповідає його об'ємній концентрації $r_{H_2}^{hel} = 74,2\%$ об., для оксиду вуглецю також $r_{CO}^{hel} = 74,2\%$ об., для метану $r_{CH_4}^{hel} = 15\%$ об., пропану $r_{C_3H_8}^{hel} = 9,5\%$ об. [5]. Розглядаючи суміш горючого газу з повітрям як суміш ідеальних газів, можна показати, що при концентрації горючого газу, що дорівнює його верхній границі запалювання, концентрація кисню в газоповітряній суміші становить $r_{O_2}^{min,H_2} = 5,4\%$ об. для суміші з воднем, також $r_{O_2}^{min,CO} = 5,4\%$ об. для суміші з оксидом вуглецю, $r_{O_2}^{min,CH_4} = 17,8\%$ об. для суміші з метаном, $r_{O_2}^{min,C_3H_8} = 19,0\%$ об. для суміші з пропаном.

Можна прийняти, що при концентраціях кисню нижче вказаних значень $r_{O_2}^{min,i}$ суміші, що містять даний горючий газ у концентрації, меншій верхньої границі запалювання, також не будуть займатися. Суміш летких з повітрям містить водень, оксид вуглецю, метан, пропан, які характеризуються різними значеннями як верхньої границі запалювання, так і мінімальної концентрації кисню, при якій його суміш із повітрям можна запалити.

Для визначення усередненого значення мінімальної концентрації кисню, при якій можливе запалювання суміші летких з повітрям, $r_{O_2}^{min,m}$, будемо опиратися на принцип адитивності для процесів, що протікають паралельно. Відносно концентрацію даного горючого газу в суміші летких з повітрям по відношенню до його верхньої концентрації запалювання визначимо за виразом:

$$r_i^{r, hel} = r_{m,i} / r_i^{hel} \quad (15)$$

Усереднене значення мінімальної концентрації кисню, при якій можливе запалювання суміші горючих газів летких з повітрям, $r_{O_2}^{min,m}$, будемо визначати за виразом:

$$r_{O_2}^{min,m} = \frac{1}{\sum_1^n \left(\frac{r_i^{r, hel}}{\sum_1^n r_i^{r, hel}} \cdot \frac{1}{r_{O_2}^{min,i}} \right)} \quad (16)$$

Розрахунок за формулою (16) для горючих газів, що містяться у летких із соснової деревини, дає значення $r_{O_2}^{min,m} = 12,0\%$ об. Можна вважати, якщо в суміші летких із повітрям концентрація кисню більше 12% об., то така суміш летких з повітрям запалюється у холодній топці від іскри або відкритого джерела вогню.

На рис. 1 нанесено штрихову лінію, що відповідає сумішам з концентрацією кисню 12% об., причому ліворуч і нижче від цієї лінії концентрація кисню більше 12% об. Утворення сумішей з відносним вмістом горючих газів $r_n^{r, hel} > 1$ та концентрацією кисню більше 12% об. відповідає області у лівому верхньому куті (рис. 1). При цьому максимальна вологість палива, при якій суміш

летких з повітрям може вимушено запалюватися в холодних топках, становить 35% мас., причому це можливо при значеннях коефіцієнта надлишку повітря, близьких до $\alpha_n = 0,8$. Для палива вологістю менше 35% область допустимих значень надлишку повітря α_n може розширюватися, причому для повітряно сухої деревини з вмістом вологи $W_r = 20...22\%$ допустимий діапазон надлишку повітря становить $\alpha_n = 0,6...1,0$, а для сухого деревного палива із вмістом вологи $W_r = 8...10\%$ мас. надлишок повітря може бути у більш широких межах: $\alpha_n = 0,5...1,1$. При вмісті вологи в паливі менше 35% мас. зниження надлишку повітря до значень $\alpha_n < 0,4...0,8$ буде призводити до унеможливлення запалювання суміші летких та повітря через недостатню концентрацію кисню.

При вологості палива понад 35% мас. та низьких надлишках повітря $\alpha_n < 0,8$ вимушене запалювання сумішей неможливе через нестачу кисню, а при надлишках повітря $\alpha_n > 0,8$ запалювання унеможливується через низьку концентрацію горючих газів у суміші летких з повітрям, що обумовлено значним вмістом водяної пари. Тобто при вмісті вологи в деревній біомасі більше 35% буде утворюватися збіднена суміш горючих газів летких з повітрям, яка не здатна до факельного згоряння із займанням від іскри чи відкритого полум'я, що здійснюється над сусідньою ділянкою колосникової решітки з палаючим коксовим залишком. Проте збіднені суміші летких та повітря можуть реагувати при високих температурах у футерованих топках за механізмом об'ємного вигорання, що буде розглянуто в окремій роботі.

Запалювання та горіння горючих газів летких при $\alpha_n < 1$ може призводити до зниження концентрації кисню або до його вичерпання із суміші. В результаті може створюватись безкисневе середовище з високою температурою, в якому піролізні смоли летких можуть зазнавати термічного розпаду з утворенням та емісією часток сажі та важких вуглеводнів. Для запобігання термічному розпаду піролізних смол та належній організації запалювання і вигорання всіх летких подачу повітря доцільно здійснювати у дві стадії – спершу подати повітря в кількості, що забезпечує створення багатой суміші і займання горючих газів, а після їх займання додавати повітря для досягнен-

ня прийнятних значень $\alpha_{л} \geq 1$ з метою забезпечення концентраційних та температурних умов, сприятливих для повного вигорання горючих газів, піролізних смол та кислот.

Висновки. 1. Запропоновано методику аналізу концентраційних умов вимушеного запалювання летких та повітря при спалюванні біомаси у холодних топках.

2. Проведено аналіз умов запалювання суміші повітря з леткими, що виділяються із соснової деревини. У холодних топках вимушене запалювання суміші летких з повітрям за рахунок іскри чи джерела відкритого вогню можна забезпечити при вологості палива до 35% при значенні коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{л} = 0,8$.

3. Для належної організації запалювання і вигорання всіх летких та запобігання термічному розпаду смол доцільно здійснювати стадійну подачу дуття: спершу подати повітря в кількості, що забезпечує створення багатой суміші і займання горючих газів летких, а після їх займання додавати повітря для забезпечення вигорання піролізних смол.

4. При спалюванні деревного палива із вмістом води більше 35% утворюється збіднена суміш летких з повітрям, яка нездатна до займання від іскри чи відкритого джерела вогню, що може призводити до значної емісії забруднюючих

речовин при спалюванні вологої біомаси в котлах із нефутерованими топками.

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. *Нормативи* граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел/ Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, наказ 27.06.2006 №309. // Міністерство юстиції України 1 серпня 2006р. № 912/12786.
3. *Жовмир Н.М.* Анализ нормативных требований к эмиссии загрязняющих веществ при сжигании биомассы // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т.34. – №1. – С. 77–86.
4. *The handbook of biomass combustion and co-firing* / Edited by Jjaak van Loo and JaapKorpeijan. – Earthscan, London – Sterling, VA, USA, 2008. – 442 p. (ISBN: 978-1-84407-249-1)
5. *Ионин А.А.* Газоснабжение: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
6. *Макаров А.С., Литвиненко Н.Н.* Топочное устройство для сжигания высоковлажных древесных отходов // Промышленная энергетика. – 1988. – №9. – С. 20–22.
7. *Тепловой расчет* котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
8. *Bridgwater A.V., Peacocke G.V.C.* Fast pyrolysis processes for biomass // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2000. – No.4. – P. 1–73.
9. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. – М.: Наука, 1979. – 512 с.

**XII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВІСТІ-2014**

ЕНЕРГЕТИЧНЕ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ • ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ, МАШИН • ПРОМИСЛОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД • СВІЛЛОТЕХНІКА
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ • КАБЕЛЬНО-ПРОВІДНИКОВА ПРОДУКЦІЯ • АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**XII МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ:
СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, 02660
Київ, Броварський пр-т, 15
(М) "Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua

ОРГАНІЗАТОРИ:
Міністерство енергетики
та вугільної промисловості України
Міжнародний виставковий центр

Технічний партнер: *Round Media*

**23-25
вересня**