

УДК 662.641

Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М.

Інститут технічної теплофізики НАН України

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДИХ БІОПАЛИВ З ТОРФУ І БІОМАСИ  
ЯК ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ МАЛОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Представлено порівняльний аналіз характеристик біопалив. Визначені умови та особливості використання палив з торфу деревинної і рослинної біомаси.

Представлен сравнительный анализ характеристик биотоплив. Определены условия и особенности использования топлив из торфа, древесной и растительной биомассы.

The comparative analysis of the characteristics of biofuels is presented. The conditions and characteristics of fuels from peat, wood and biomass.

Розвиток промисловості в цілому і промислових підприємств, як її складової частини, має важливе значення для економічного зміцнення України й підвищення добробуту її мешканців. Однак, слід зазначити, що на роботу промислових підприємств впливає ряд факторів, одним з яких є використання енергоресурсів як складової виробничого процесу і в цілях обігріву. Нестача власної сировинної бази енергоресурсів призводить до необхідності купувати їх, а це у свою чергу віддзеркалюється на собівартості продукції і, як наслідок, на її конкурентоспроможності. Енергетична залежність держави впливає на зовнішню політику й торгівлю знижуючи її економічний потенціал. За обмежених фінансових можливостей перехід до високо-

ефективних, енергозберігаючих ресурсощадливих технологій можливий з використання місцевих видів палива (дрова, торф, відходи), що при сьогоднішніх цінах на газ, мазут, вугілля та електроенергію є найдоступнішими видами палива (рис. 1).

Залучення місцевих палив до енергетичного балансу областей України має значний соціальний аспект, через скорочення відтоку коштів з місцевих бюджетів та забезпечення роботою значної частини населення.

Сучасні тенденції переведення котельного встаткування на використання місцевих альтернативних поновлюваних джерел енергії вимагають детального вивчення властивостей цих палив і розробки методик вибору палива з найбільш оптимальними теплотехнічними

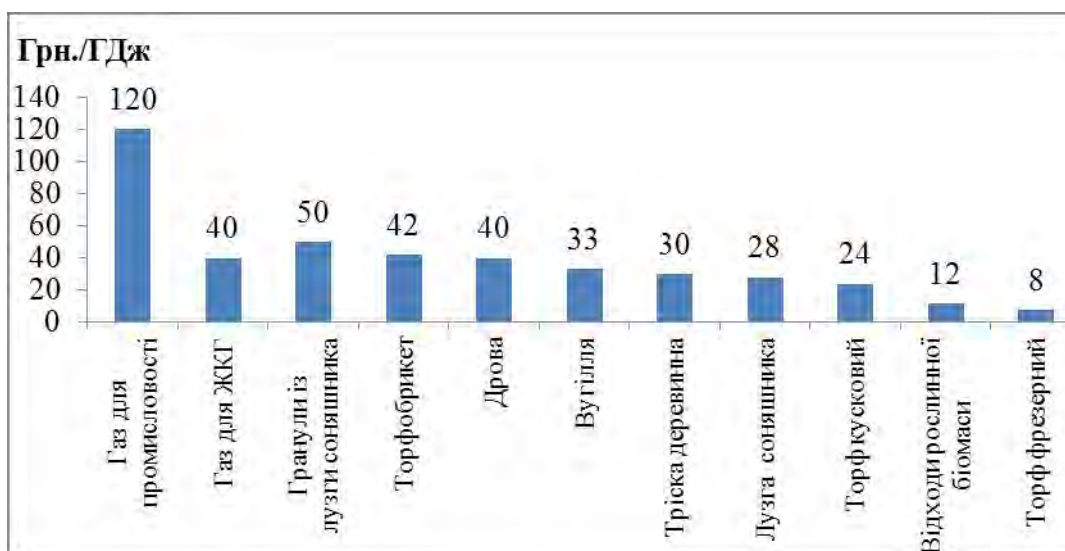


Рис. 1. Вартість палива в перерахунку на одиницю теплоти згорання.

й екологічними характеристиками для існуючих технологій спалювання.

Найчастіше у випадках переведення котелень на місцеві види палива використовуються палива на деревній основі, рідше солома, і в окремих випадках ще деякі палива на основі природної біомаси. Усі ці види біопалива є поновлюваними.

Разом із твердими біопаливами розглядається і торф. Хоча торф за походженням – біопаливо, що виникло із залишків рослин при їх частковому розкладанні в середовищі з надлишком води й нестачею кисню, але його відносять до повільно поновлюваних біопалив. Часто торф'яне паливо спалюють у котлах у суміші з деревною та рослинною біомасою (або по черзі), тому при виборі технології спалювання необхідно знати й враховувати відмінності у властивостях цих палив.

**Метою даної статті** є огляд і порівняльний аналіз основних характеристик альтернативних поновлюваних біопалив що можуть використовуватися в Україні як місцеві.

З точки зору технології спалювання й практичного використання найбільший інтерес представляють наступні характеристики палива: хімічний (елементний) склад, вологість, щільність, вихід летучих, зольність, плавкісні характеристики золи, вміст домішок у паливі (грунт, пил і т.д.).

Деревні палива за походженням сировини можна розділити на палива, отримані з лісу, з енергетичних лісопосадок і палива вторинно-

го використання. Якщо перші два типи палива можна віднести до екологічних, то третій таким не є. Сировина третього типу має просочення, фарбування й усякі включення (метал, скло, пластик і т.д.), тому його переробка ускладнена. Через наявні включення її здрибнювання вимагає спеціальних дробарок, підвищуються вимоги до котельного обладнання й відходів. Таким чином, використання палива третього типу можна скоріше назвати утилізацією відходів.

Інша можлива класифікація деревного палива – по ступеню його попередньої підготовки (покращення) Не покращеним вважається паливо, при виробництві якого сировина подрібнюється або пакується без зміни механічних властивостей. До цього виду палива відносять традиційні дрова, тріску, пресовані деревні відходи, відходи деревообробки (ошурки, стружка). Типові представники покращеного палива – деревні брикети й пелети.

Дерево, точніше оболонка деревної клітки, складається, в основному, із целюлози, лігніну й напівцелюлози. Завдяки великому вмісту вуглецю й водню теплота згоряння лігніну вище, ніж у целюлози або напівцелюлози. Дерево містить також небагато дьогтю, смол і фенолів, які за певних умов можуть із димових газів осідати на холодні поверхні нагрівання й димоходів з утворенням відкладень, які важко видалити.

В елементному складі деревного палива переважають три хімічні компоненти: вуглець

Табл.1. Елементний склад сухої маси біопалив [1-5]

Елемент, % на суху масу	Біомаса деревини		Солома і енергетичне сіно		Торф різного ступеня розкладання		
	Стовбур	Кора	Діапазон	Середнє значення	Низький	Середній	Високий
C	48...50	51 ... 66	45 ... 47	46	48 ...50	53 ... 54	58 ...60
H	6,0 ... 6,5	5,9 ... 8,4	5,8 ... 6,0	5,9	5,5 ... 6,5	5,0 ... 6,0	5,0... 5,5
O	38 ... 42	24,3 ...40,2	39 ... 41	40	38 ... 42	35 ... 40	30 ... 35
N	0,5 ... 2,3	0,3... 0,8	0,4 ... 0,6	0,5	0,5 ... 1	1 ... 2	1 ... 3
S	0,05	0,05	0,01...0,13	0,08	Сліди		
Cl	< 0,01	0,01...0,03	0,14...0,97	0,31	Сліди		

(С), водень (Н) і кисень (О), утворюючи в сумі близько 99% сухої маси (див. табл. 1). Вміст азоту (N) залишається звичайно нижче 0,2 %, сірки (S) – нижче 0,0 5% від сухої маси. Вміст сірки в паливі становить інтерес насамперед через виникнення сірчистих відходів, однак при її високому вмісті може виникати загроза низькотемпературної корозії в газоходах і димареві. Оскільки хлор (Cl) також може викликати корозію поверхонь нагрівання, важливо знати і його вміст у паливі. Хлор може створювати проблему при спалюванні, наприклад, тріски хвойних порід, якщо їх частка в паливі досить велика.

Хоча вміст важких металів у деревній масі не досягає небезпечних величин, у випадку жорстких вимог до охорони навколишнього середовища з ними слід вважатися. У різних частинах дерева містяться в малих кількостях нікель, миш'як, кадмій, хром, мідь, ртуть, свинець і цинк.

Поряд з деревним паливом використовується паливо рослинного походження, у тому числі енергетичне сіно й солома. Властивості біомаси рослин сильно залежать від місця вирощування, пори року й погоди, ґрунту й добрива. Наприклад, вміст хлору в рано прибраній соломі майже в 4 рази вище, ніж у пізній. Максимальний вміст хлору може досягати 0,97 %, і це впливає на корозію поверхонь нагрівання при спалюванні (табл. 1).

Близький до складу рослинної біомаси елементний склад торфу, до якого входять рослинні залишки, що частково розклалися, і гумус.

Співвідношення рослинної і гумусової складових визначають ступінь розкладання торфу, яка згідно ДСТ 28245-89 характеризується процентним вмістом у ньому безструктурної частини до загальної маси, що включає гумінові речовини й частки негуміфікованих залишків рослин. Найбільш важливі теплотехнічні характеристики торфу, а саме теплота згоряння, вологість, насипна щільність, вміст та елементний склад мінеральної частини залежать від ступеню розкладання торфу (табл. 2).

Розрізняють торф низького (менш 20 %), середнього (20-40 %) і високого (вище 40 %) ступеня розкладання. У закордонних країнах ступінь розкладання торфів визначається в основному за десятибальною шкалою Поста (The Von Post Scale of Peat Decomposition) і позначається символами Н1 до Н10. Торф ступеня розкладання Н1 є зовсім нерозкладеним рослинним матеріалом, а Н10 – торф, що повністю розклався. Наведена нижче таблиця 3 дозволяє порівняти результати по шкалі Поста й за ДСТ 28245-89.

**Компонентний склад** розглянутих біопалив. Усі розглянуті біопалива належать до твердих палив, що складаються із горючої частини й баласту. Співвідношення між цими складовими представляє собою компонентний склад біопалив. Баласт утворюють зола й волога. Зола і горюча частина (без вологи) утворюють суху масу палива. Такі характеристики біопалива як вміст золи, вологи, летучих і зв'язаного вуглецю можна виразити (рис. 2): в % на суху масу (С); в % на робочу масу (Р)

Табл. 2. Вплив ступеню розкладання торфу на склад робочої маси в % [2,4]

Складові частини	Низький ступінь розкладання (Н1 – Н2)	Середній ступінь (Н5 – Н6)	Високий ступінь (Н9 – Н10)
Целюлоза	15 ... 20	5 ... 15	–
Напівцелюлоза	15 ... 30	10 ... 25	0 ... 2
Лігнін	5 ... 40	5 ... 30	5 ... 20
Гумус	0 ... 5	20 ... 30	50 ... 60
Смоли	1 ... 10	5 ... 15	5 ... 20
Багаті азотом речовини	3 ... 14	5 ... 20	5 ... 25

Табл. 3. Ступінь розкладання за шкалою Поста і за ДСТ 28245-89

За шкалою Post	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
За ДСТ 28245-89, %	10	15	25	30	35	40	45	50	55	60

вологого палива; в % на горючу масу – (Г) беззольну суху масу. На рис. 2 показано розподіл компонентного складу для різних біопалив. Як видно частка золи та вміст горючої маси в кілограмі робочої маси палива може значно відрізнятись в залежності від вологості.

**Вологість палива** – величина змінна, тому в довідкових таблицях вміст золи й летучих прагнуть представляти в % на суху масу, але в практичних розрахунках у котельні використовують, в основному, в % на робочу масу вологого палива.

Вологість свіжої деревини зазвичай становить 40...60 % і залежить від багатьох факторів, у тому числі місця зростання, виду дерева,

пори року (під час росту влітку вище, узимку – нижче). Вологість окремих частин дерева також різна (табл. 4). Вологість рослинної біомаси також залежить від сезону. При збиранні зернових вологість соломи становить 30...60 %. Оскільки при зберіганні вологість знижується на 2...6 %, то для одержання придатної до спалювання соломи її треба забирати при вологості 20...25 %. Більш вологу солому треба підсушити до складування або на складі, це захистить її від самонагрівання і гниття під час зберігання.

Вологість торфу в покладі через особливості його утворення може сягати 80...85 %. Під час розробки його вологість знижують в

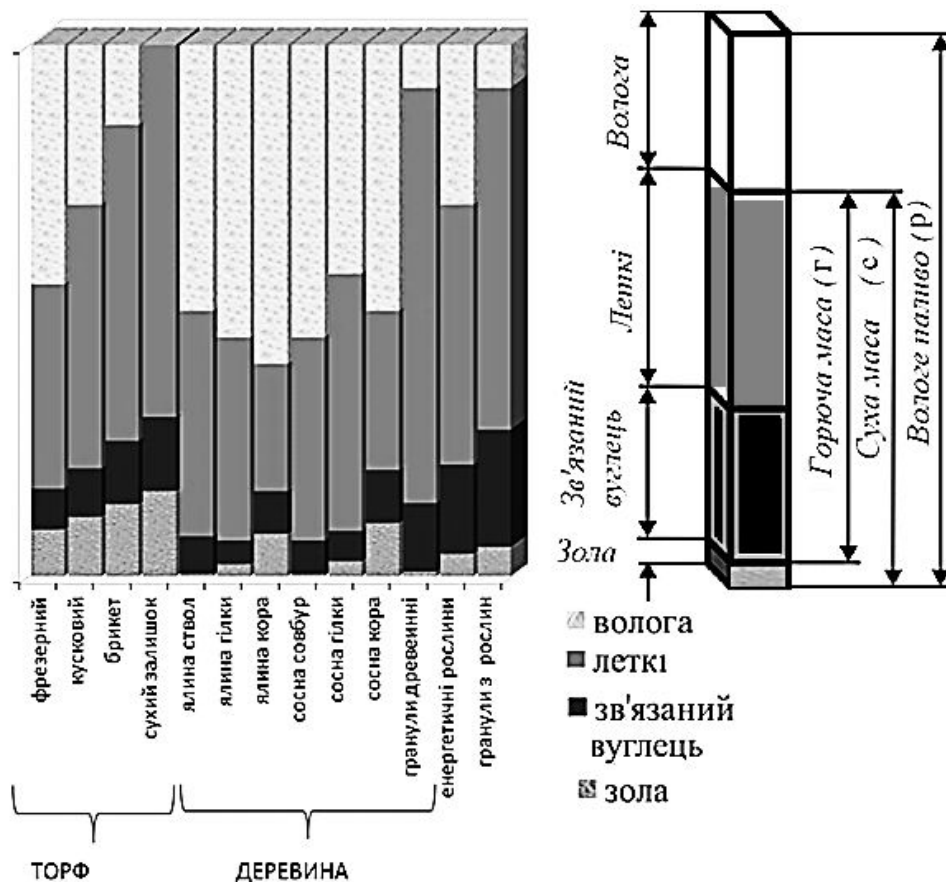


Рис. 2. Компонентний склад біопалив на 1 кг маси сировини.



Табл. 4. Вологість окремих частин деревини хвойних порід, [1, 3]

	Вологість на робочу масу, $W^P$ , %	
	Сосна	Ялина
Стовбур	45 ... 50	40 ... 60
Гілки	50 ... 56	42 ... 46
Верхівка	60	60
Кора	36 ... 67	38 ... 63

польових умовах до 50...35 % методами польового сушіння з періодичним фрезеруванням покладу – фрезерний торф, або в вигляді сформованих брикетів – кусковий торф.

Співвідношення між летючими і зв'язаним вуглецем в горючій масі палива визначають способи та технології спалювання. Співвідношення вуглецю в складі летучих і зв'язаного ( $C_{зв}$ ) визначає співвідношення тепла яке виділяється у факелі (топковому об'ємі) і шарі палаючого палива. Оскільки вихід летучих у дровах і інших біопаливах, таких як рослинна біомаса й торф, високий ( $V^C = 60...80\%$ ) (рис. 3), більша частина тепла при їхнім спалюванні виділяється в топковому об'ємі й, отже, для повного спалювання летучих потрібні топки великого об'єму.

Сумарний вміст горючих компонентів в паливі визначає його теплоту згоряння.

**Теплотою згоряння** називають кількість тепла, що виділяється при спалюванні одиничної маси палива. Теплота згоряння сухої маси дров мало залежить від типу деревини (табл. 5). Але, як видно з табл. 5, теплота згоряння кори та гілок листяних порід (береза, вільха) значно перевищує відповідні показники основної маси.

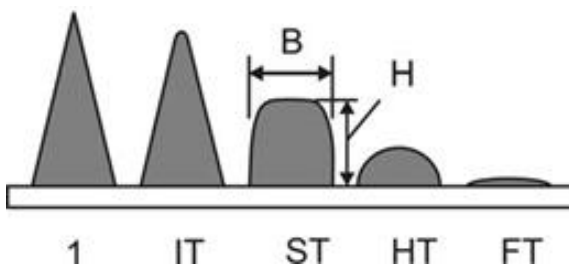


Рис. 3. Зміна форми стандартного конуса золи при його нагріванні.

Теплота згоряння рослинної біомаси, як і її елементний склад (табл. 1), не занадто відрізняються від відповідних показників для деревини (табл. 6). Вміст летучих у соломі коливається від 60 % до 70 %, що трохи нижче, ніж у деревних паливах, а зольність соломи вище, ніж у деревних палив, у сухій частині вона становить 4,5...6,5 %. Та, хоча за енергетичними показниками солома поступається деревині, з урахуванням типової вологості робочої маси соломи, що залишається нижче 20 %, її теплота згоряння майже така, як у тріски (типова вологість тріски 35...55 %).

Найбільша проблема при енергетичному використанні соломи – її низька щільність, у непресованої соломи вона всього 30...40 кг/м<sup>3</sup>, що здорожує транспортування й складування. Найчастіше солону поставляють у пресованому виді.

Торф належить до молодих палив гумусного походження і займає друге місце в ряду: рослини (деревина) – торф – буре вугілля – сланець – антрацит. При порівнянні складу й властивостей цих палив видно, що вміст вуглецю росте зі збільшенням ступеня розкладання (табл. 1). На паливо використовують торф високого ступеню розкладання. Він має високу насипну вагу і найменш гігроскопічний серед інших видів.

Виділяють наступні основні типи паливного торфу як палива, що відрізняються ступенем покращення основних показників: фрезерний, кусковий, торфобрикетний й гранули (табл. 7).

**Плавкісні характеристики золи біопалив** прямо впливають на роботу котла. Плавлення золи може викликати шлакування топки й виникнення щільних відкладань на конвективних

Табл. 5. Нижча теплота згорання сухої маси найпоширеніших типів дерева, МДж/кг [3, 6]

Тип дерева	Стовбур без кори	Кора	Стовбур з корою	Гілки і верхівка	Дерево
Сосна звичайна ( <i>Pinus sylvestris</i> )	19,31	19,53	19,33	20,23	19,52
Ялина звичайна ( <i>Picea abies</i> )	19,05	18,80	19,02	19,17	19,29
Береза пухната ( <i>Betula pubescens</i> )	18,68	22,75	19,19	19,94	19,30
Береза плачуча ( <i>Betula pendula</i> )	18,61	22,52	19,15	19,53	19,29
Вільха сіра ( <i>Alnus incana</i> )	18,67	21,57	19,00	20,03	19,18
Вільха чорна ( <i>Alnus glutinosa</i> )	18,89	21,48	19,31	19,37	19,31
Осика ( <i>Populus tremula</i> )	18,67	18,57	18,65	18,61	18,65

Табл. 6. Зольність і теплота згорання соломи різних зернових [2, 3]

Зернова культура	Зольність на суху масу, $A^C$ , %	Нижча теплота згорання сухої маси, $Q^C$ , МДж/кг	Нижча теплота згорання робочої маси при вологості 20 %, $Q^P$ , МДж/кг
Жито	4,5	17,0	13,6
Пшениця	6,5	17,8	13,8
Ячмінь	4,5...5,88	17,4	13,4
Овес	4,9	16,7	12,9
Солома	5,0	17,4	13,5

Табл. 7. Середні показники властивостей паливного торфу по даним [1,4]

	Вологість, %	Зольність, $A^C$ , %	Летучі в сухій частині, %	Теплота згорання робочої маси МДж/кг	Щільність робочої маси, кг/м <sup>3</sup>	Об'ємний енерговміст, МВт·год/м <sup>3</sup>
Фрезерний	48,5	15,1	68,6	9,6	341	0,89
Кусковий	38,9	14,5	68,9	11,9	387	1,27
Брикет	12,5	16	68,7	17,5	1150	6,20

поверхнях нагрівання, що особливо актуально в умовах України, при переведенні котельного обладнання на використання альтернативних палив.

Для визначення плавкісних характеристик золи існує ряд європейських стандартів: ASTM D 1857, ISO 540 і DIN 51730. За стандартом ASTM вимірюють зміну форми стандартного конуса золи при його нагріванні в окисному середовищі (рис. 3): 1 – вихідний стан, до початку нагрівання (верхівка конуса гостра); ІТ –

початок деформації, гостра вершина конуса округлюється; ST – точка розм'якшення, золотий конус сплющується так, що величина твірних зменшується до діаметра ( $H = B$ ); НТ – точка утворення півсфери, конус перетворюється в півсферу ( $H = 0,5 \cdot B$ ); FT – точка розтікання, рідка зола розтікається по поверхні.

Плавкісні характеристики деревної золи можуть коливатися в широких межах залежно від виду дерева, місця зростання, включень, що потрапили у паливо (наприклад із ґрунту).

Відрізняється й зола різних частин дерева. З літературних джерел відомо, що плавкісні характеристики деревної золи достатньо високі (табл. 8) [1,5].

Якщо для золи кори температура розм'якшення вище 1500 °С і не викликає шлакування топки й колосника, то для золи ошурок і тріски вона нижче, і щоб уникнути проблем шлакування необхідно строго витримувати режим горіння.

Температура плавлення золи рослинної біомаси може бути значно нижчою, ніж у золи деревних палив (табл. 8) розм'якшення золи соломи жита, вівса і ячменя починається при дуже низьких температурах (735...840 °С), що необхідно враховувати при виборі технології спалювання й налагодженні режиму горіння в топці.

Плавкісні характеристики золи торфу (табл. 8) у порівнянні з деревною золою досить низькі, але вищі за рослинну біомасу. Вміст і властивості золи торфу залежать від типу болота, умов утворення торфу, кількості й властивостей домішок (пісок).

Плавлення золи залежить від її мінерального складу, і навіть невеликі відмінності в

складі можуть суттєво впливати на плавкісні характеристики, відповідно за складом палива й золи практично неможливо передбачити плавкість золи.

Основні теплотехнічні характеристики твердих біопалив і торфу визначають на одиницю робочої або сухої маси. В той же час їх кількість часто вимірюють в об'ємних одиницях, тому є корисним представлення деяких характеристик (особливо теплоти згорання) на одиницю, за якою розраховується кількість палива, що надійшло. Такою одиницею у випадках тріски та фрезерного торфу може бути об'єм. Зв'язати теплоту згорання на одиницю маси й об'єму, можна через питому вагу (щільність) палива.

Обсяг палива, що надходить в котельню, доцільно вимірювати до складування за обсягом вантажівки і її заповнення. Слід зазначити, що під час перевезення щільність палива може трохи зрости, тобто при навантаженні вона менше, чим після прибуття в котельню.

У тому випадку якщо теплоту згорання визначають на одиницю маси вологого палива, при коливанні вологості цей спосіб подання даних може привести до відчутних неточно-

Табл. 8. Плавкісні характеристики золи біопалив [1,5]

Вид палива	Плавкісні характеристики, °С		
	Точка розм'якшення ST	Точка утворення півсфери NT	Точка розтікання FT
Тріска сосни в цілому	1225	1250	1275
Тріска відходів рубання	1205	1230	1250
Ошурки, сосна	1180	1200	1225
Кора, ялина	1550	1650	1650
Кора, сосна	1525	1650	1650
Торф фрезерний верховий	1080	1200...1375	1205...1430
Торф фрезерний низинний	1100...1190	1150	1200
Торф кусковий	1130...1340	1160...1380	1180...1470
Солома жита	840	1150	1330
Солома пшениці	1050	1350	1400
Солома ячменю	765	1035	1190
Солома вівса	735	1045	1175

стей. Неточність розрахунків теплоти згоряння тріски на одиницю маси сухої частини при вологості 35 % і можливій помилці її визначення  $\pm 5$  % не перевищує 1,7 %, при розрахунках на одиницю маси робочого палива – 9,24 %.

Корисно знати, що вміст сухої маси кубометра дров, тріски, торфу фрезерного або кускового практично не залежить від вологості. Отже, вимірюючи кількість палива, що надійшло у котельню (наприклад тріску) в одиниці об'єму й знаючи теплоту згоряння сухої частини цього об'єму, можна порівняно точно визначити його енергоємність без особливої необхідності точного виміру вологості.

Зважування кількості палива, що надходить і точний вимір його вологості не є, таким чином, єдиним способом визначення енергоємності. Для коректних розрахунків з початковим паливом перестав бути строго обов'язковим установка дорогого обладнання зважування вантажівок.

### Висновки

Запропонований порівняльний аналіз характеристик біопалив дозволяє зробити наступні короткі висновки.

В цілому розглянуті палива характеризуються великим вмістом летучих, що потребує для їх спалювання топків збільшеного об'єму. Співставлення показників теплоти згоряння, зольності, температур плавлення золи показало, що найприйнятнішим з місцевих біопалив є деревина, на другому місці іде торф низинний, і на останньому рослинна біомаса. Низька об'ємна теплота згоряння в випадку соломи, тріски та фрезерного торфу через низьку

насіпну щільність ускладнює використання цих палив, що потребує залучення заходів з ущільнення, тобто брикетування або гранулювання цієї сировини. Низька температура плавлення золи біопалива з рослин та високий вміст сірки та хлору потребує спеціальних низькотемпературних технологій спалювання або використання рослинної біомаси в композиції з іншими паливами з більшою температурою плавлення, наприклад з торфом.

Результати порівняльного аналізу характеристик біопалив можуть бути використані при виборі прийнятних місцевих видів палива для існуючих технологій спалювання, а також при виборі технологій спалювання наявних місцевих видів палива.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Alakangas E.* Properties of fuels used in Finland // VTT Espoo, 2000, p. 199.
2. *Гелетуха Г.Г.* Біомаса як паливна сировина / Г.Г. Гелетуха, М.М. Жовмір, Є.М. Олійник, С.В. Радченко. // Пром. теплотехніка. – 2011. – Т.33, № 5 – С. 76 – 84.
3. *Alakangas E.* Properties of wood fuels used in Finland // VTT Espoo, 2005, p. 100.
4. *Снежкін Ю.Ф.* Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси / Ю.Ф. Снежкін, Д.М. Корінчук, В.А. Михайлик. – К.: Поліграф-Сервіс, 2012. – 212 с.
5. *Alakangas E.* Solid and Liquid Biofuels Markets in Finland // VTT Espoo, 2006, p. 96.
6. *Nurmi, J.* Heating values of above ground biomass of small-sized trees. Acta Forestalia Fennica. // Tampere, 1998, p. 30.

Получено 13.08.2012 г.