

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ, ДОВКІЛЛЯ  
ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ  
ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВОЇ ЕКОЛОГІЇ  
ВСЕУКРАЇНСЬКА ЕНЕРГЕТИЧНА АСАМБЛЕЯ  
КОНСОРЦІУМ З РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

# **ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ**

*Збірник праць*

*За редакцією  
кандидата технічних наук  
О. І. Сігала*

КИЇВ  
ІВЦ АЛКОН  
2025

речовин і далі – до стадії горіння і газифікації вуглецевого залишку. Визначені температурні межі процесу виходу летучих речовин. Показано, що температура, при якій починається вихід летучих залежить від виду палива: Так із літературних джерел відомо, що вихід летучих залежить від віку палива і збільшується із зростанням віку палива. Так для бурого вугілля вихід летучих починається при температурі близько 170 °С, а для антрациту – близько 320 °С.

Дослідженням показано, що вихід летучих для пелет із деревини починається при температурі близько 220 °С. А для інших палив залежить від геологічного віку палива.

### **Список використаної літератури**

1. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Драгнев С. В. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Аналітична записка № 21 Біоенергетичної асоціації України. 2019. 40 с.

2. Lewis B., von Elbe G. Combustion, Flames and Explosions of Gases. 3<sup>rd</sup> ed. – Orlando, San Diego, New York, Austin, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto : Academic Press, 1987. 520 p.

3. Khitrin L. N. The Physics of Combustion and Exploding. Jerusalem, 1962. 365 p.

УДК 662.613.12:62.112

**А. Г. Колієнко, В. А. Загорулько**

*Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

## **ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА ГОРЮЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІОМАСИ**

Важливим в оцінюванні горючих властивостей біомаси є питання її вологості, оскільки для більшості котлів наявність вологи в паливі має негативний вплив на процеси горіння: збільшується точка роси, зростає об'єм продуктів згорання, погіршуються горючі характеристики палива. У ході ж збирання, перероблення і складування біомаси можливе її зволоження внаслідок контакту з атмосферною вологою.

Щойно зрублена деревина має вологість до 60% і більше, повітряносуха деревина після річної витримки в лісі має вологість близько 30–40%. Дані ж по вологості соломи відсутні.

Для визначення діапазону зміни вологості соломи було проведено експериментальне дослідження з визначення вологості соломи за різних умов її зберігання і зволоження. Дослідження виконувались згідно з методикою ГОСТ 54186-2010 (EN 14774-1:2009) [1], яка передбачає визначення вологості соломи за різницею маси до і після висушування зразка у сушильній шафі при температурі близько 105 °С.

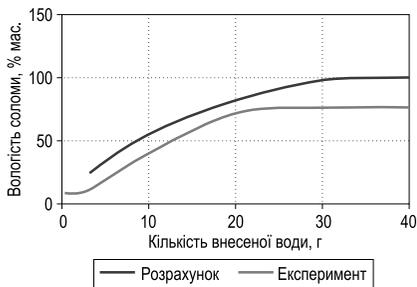
Моделювання різних умов зберігання соломи і зволоження повітря у якому знаходилась солома здійснювалось шляхом внесення до повітря розпиленої води із наступною витримкою соломи у зволоженому стані від 2 до 3 діб. На момент проведення досліджень з визначення вологості скраплена водяна пара по поверхні соломи і у чашці для визначення маси соломи була відсутня. Таким чином визначалась кількість вологи, яка була поглинута соломною. Кількість води, яку вносили до повітря і соломи поступово збільшували.

Основні результати досліджень наведені в таблиці. Кожний результат отриманий на основі 4–5-разових повторень досліджень.

*Таблиця*  
**Результати експериментальних досліджень вологості соломи**

№	Кількість внесеної води, г	Маса соломи, нетто г		Вологість, % мас. до маси вологої соломи	
		вологої	після висушування	згідно розрахунку внесеної води	згідно експериментальних даних
1	0	13,95	12,72	–	8,8
2	3	12,09	10,70	24,8	11,5
3	10	17,95	10,63	55,7	40,7
4	20	25,07	6,92	79,7	72,3
5	30	24,20	6,04	100	75,0
6	40	24,11	5,62	100	76,6
7	50	28,16	6,47	100	77,0

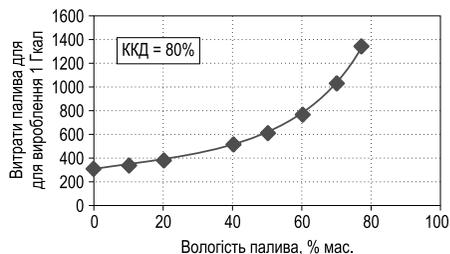
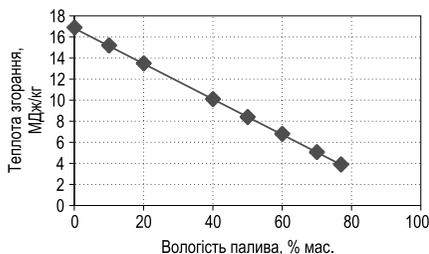
Як видно із таблиці абсорбційна здатність соломи по відношенню до водяної пари обмежує величину максимальної вологості на рівні



**Рис. 1.** Зміна масової вологості соломи залежно від кількості водяної пари у середовищі зберігання соломи.

суттєво погіршує горючі властивості біомаси, як палива (зменшення теплоти згорання, збільшення витрат теплоти на висушування, погіршення якості горіння, зменшення температури продуктів згорання).

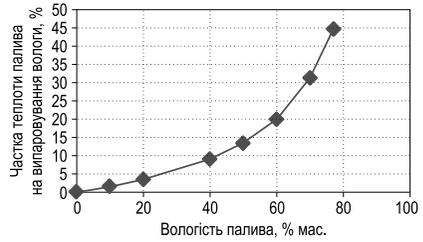
На рис. 2–4 представлено динаміка зміни основних характеристик процесу горіння залежно від вологості соломи. Теплота згорання соломи із збільшенням її вологості суттєво зменшується – з 15,2 МДж/кг за вологості 10% мас. до 3,9 МДж/кг – при вологості 77% мас.



**Рис. 2.** Графік залежності теплоти згорання на робочий склад і витрат соломи для вироблення 1 Гкал теплоти залежно від вологості.

Уже при збільшенні вологості до 30–40% мас. використання соломи у якості палива стає недоцільним. Разом із зменшенням теплоти згорання збільшуються витрати соломи для отримання одиниці теплоти. Так за умови 10%-ої вологості витрати соломи для котла потужністю 1 Гкал за год становлять близько 350 кг за год, а за максимально можливої вологості такі витрати зростають до 1350 кг за год, що суттєво збільшує логістичну складову вартості палива.

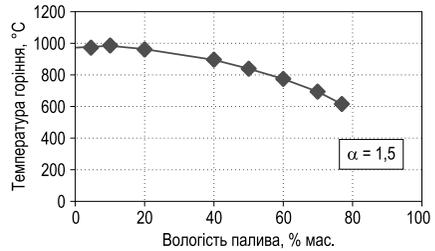
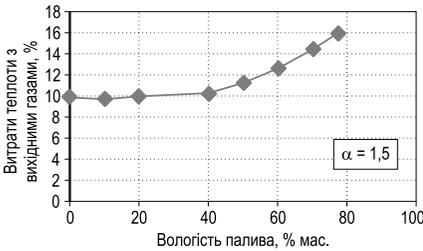
Разом із зменшенням теплоти згорання вологого палива має місце зростання тієї частини теплоти палива, яка буде витратитись на випаровування води, що міститься у паливі після попадання його до топки котла. Графік залежності таких витрат теплоти від вологості палива подано на рис. 3.



**Рис. 3.** Витрати теплоти палива на випаровування води.

Процес горіння вологої соломи супроводжується зниженням температури горіння і збільшенням втрат теплоти з відхідними газами. Збільшення вологості продуктів згорання у присутності сірчистого ангідриду призводить до необхідності підтримувати на виході із котла більшу температуру продуктів згорання, що спричинене властивістю сірчистого ангідриду збільшувати точку роси продуктів згорання. Це також збільшує втрати теплоти з відхідними газами.

Рис. 4 ілюструє зміну величини втрат теплоти з відхідними газами і зменшення дійсної температури горіння при збільшенні вологості соломи.



**Рис. 4.** Зміна втрат теплоти з відхідними газами і дійсної температури горіння у котлі при спалюванні соломи різної вологості.

Збільшення вологості біомаси спричиняє також зростання парникового газу  $\text{CO}_2$  при спалюванні палива, що пояснюється збільшенням об'єму продуктів згорання за рахунок зростання умісту в них водяної пари.

### Висновки

Аналіз характеристик процесу горіння біомаси залежно від її вологості показує, що у разі збільшення вологості біомаси характеристики процесу горіння суттєво погіршуються. Таким чином можна

зробити висновок, що внаслідок значної гігроскопічності соломи у логістичних схемах забезпечення об'єктів теплоенергетики біомасою необхідно обов'язково забезпечити зберігання і транспортування соломи у закритому і захищеному від атмосферної вологи просторі з метою запобігання збільшення вологості біомаси.

Характерні особливості є і при визначенні таких важливих показників процесу горіння біомаси, як екологічні показники викидів у атмосферу.

Це спричинене в першу чергу тим, що біомаса, як правило містить сірку у своєму складі, що призводить до наявності у складі продуктів згорання сірчистого ангідриду  $SO_2$ . Крім того, дійсні концентрації двох інших характерних токсичних інгредієнтів у складі продуктів згорання – оксидів азоту  $NO_x$  і монооксиду карбону  $CO$ , суттєво перевищують відповідні показники для такого палива, як, наприклад, природний газ.

Проблемним є і наявність хлору у складі біомаси. До складу соломи хлор попадає із ґрунту. Аналіз ґрунту різних районів Полтавської області підтверджує наявність у ньому зв'язаного хлору у кількості від 0,1 до 0,2% мас. Причиною наявності хлору є, очевидно, практика внесення мінеральних калійних добрив, основу яких становить хлорид калію.

При проходженні високотемпературної зони топки в присутності проміжних продуктів горіння і газифікації хлормістких може утворювати у продуктах згорання високотоксичні інгредієнти, такі як діоксини, а також токсичні фосгени  $COCl_2$ , хлорводневі сполуки

Підтвердженням того є значна хімічна активність хлору і його спроможність приєднуватись до ненасичених з'єднань, таких, як  $CO$ .

Для попередження утворення високотоксичних хлормістких з'єднань температура в топковому просторі паливоспалювального обладнання не повинна бути меншою за  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Але розрахунки дійсної температури горіння соломи показують, що навіть за умови спалювання абсолютно сухої соломи дійсна температура згорання у котлі не перевищує  $970\text{ }^\circ\text{C}$ , суттєво зменшуючись у ході збільшення вологості палива.

Суміш хлору з воднем, які присутні в соломі, може горіти з утворенням в продуктах згорання хлористого водню (парів соляної кислоти), що у свою чергу призводить до інтенсивної корозії поверхонь нагрівання котлів, особливо в умовах конденсації продуктів згорання.

Таким чином, використання соломи у якості палива, повинно супроводжуватись ретельними техніко-економічним обґрунтуванням, в