УДК 674.047.3

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОСЛИН ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Р.О. Шапар, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник

О. В. Гусарова, кандидат технічних наук., науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: r.sh@ukr.net

Анотація. *Представлено аналіз етапів виробництва твердого біопалива з енергетичних рослин та відзначено, що на процеси сушіння в технологічних процесах витрачається до 70 % загальних енерговитрат. Обґрунтовано актуальність і переваги низькотемпературного сушіння.*

Мета дослідження – інтенсифікація процесу зневоднення енергетичних рослин, визначення раціональних параметрів сушильного агента та умов зневоднення.

Як об'єкт зневоднення використано енергетичну вербу, сушіння здійснювали до досягнення матеріалом залишкової вологості 5...6 %.

Дослідженнями впливу температури сушильного агента на кінетику вологообміну встановлено, що підвищення температури від 80 до 100 °С сприяє інтенсифікації тепломасообміну і скорочує тривалість процесу до 25 %. Збільшення питомого навантаження позитивно впливає на продуктивність сушильної установки і підвищує обсяги переробленої сировини. Загальна тривалість зневоднення від мінімального навантаження до максимального зростає в 3,5 рази. У роботі відмічено, що істотним параметром впливу на кінетику сушіння і підвищення ефективності процесу є спосіб подрібнення сировинного матеріалу. Найінтенсивніший режим відповідає способу подрібнення верби шляхом комбінування стирання і удару. При такому способі подрібнення тривалість сушіння скорочується від 15 до 25 % порівняно з іншими розглянутими.

Поєднання встановлених умов і параметрів низькотемпературного сушіння забезпечує економічність процесу й отримання висушеної верби з низькою і рівномірно розподіленою залишковою вологістю.

Ключові слова: ***сушильне обладнання, верба, низькотемпературне конвективне сушіння, подрібнення***

Актуальність. В умовах енергетичної кризи в Україні, як і у всьому світі, спостерігається збільшення площ спеціальних плантацій для вирощування швидкозростаючих енергетичних порід деревини: верби, тополі, осики, вільхі, сосни звичайної, міскантуса тощо, як альтернативної сировини в технології створення

біопалива (дерев'яна щепа, брикети, пелети, гранули) [1,2,3]. В Україні енергетичну деревину, зокрема вербу, вирощують у багатьох областях: Львівській, Івано-Франківській, Рівненській, Волинській, а нещодавно – і в Київській [2].

Використання відновлюваних джерел енергії стало особливо актуальним у зв'язку з підписанням у 1997 році Кіотського протоколу зі скорочення викидів парникових газів в атмосферу. Отже, дослідження процесів сушіння енергетичної деревини є важливим та своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз технологічного процесу виробництва біопалива з деревини доводить енергоємність та низьку енергетичну ефективність всіх стадій, особливо сушіння, і це негативно відбивається на експлуатаційних показниках загалом, і на собівартості кінцевої продукції. Так, на процеси сушіння у виробництві біопалива з деревинної біомаси витрачається до 70 % загальних енерговитрат і, в середньому, на зневоднення до 20 % біопалива, що безпосередньо виробляється на підприємстві.

Під час створення твердого біопалива найбільш поширеним методом зневоднення є конвективний [4]. Тепловологісні режими сушіння повинні забезпечити підвищення енергоефективності процесу та високу теплотворну здатність створюваного палива.

При виробництві твердого палива з енергетичних рослин важливо забезпечити рівномірність подрібнення та рівномірність зневоднення сировини до залишкової вологості не вище 10 %, При цьому, сировина залежно від виду, кліматичних умов та зберігання має природну вологість від 40 до 70 % на сиру масу.

Проведені нами дослідження з визначення вологості верби показали характер її зміни впродовж року (рис. 1). Як бачимо, із настанням весни збільшується сокорух і вологість зростає, а у холодну пору року вологість верби зменшується. З точки зору технології виготовлення твердого біопалива, різати вербу доцільно, коли вологість найменша. Крім того, збирання біомаси комбайном полегшується на промерзлому ґрунті.

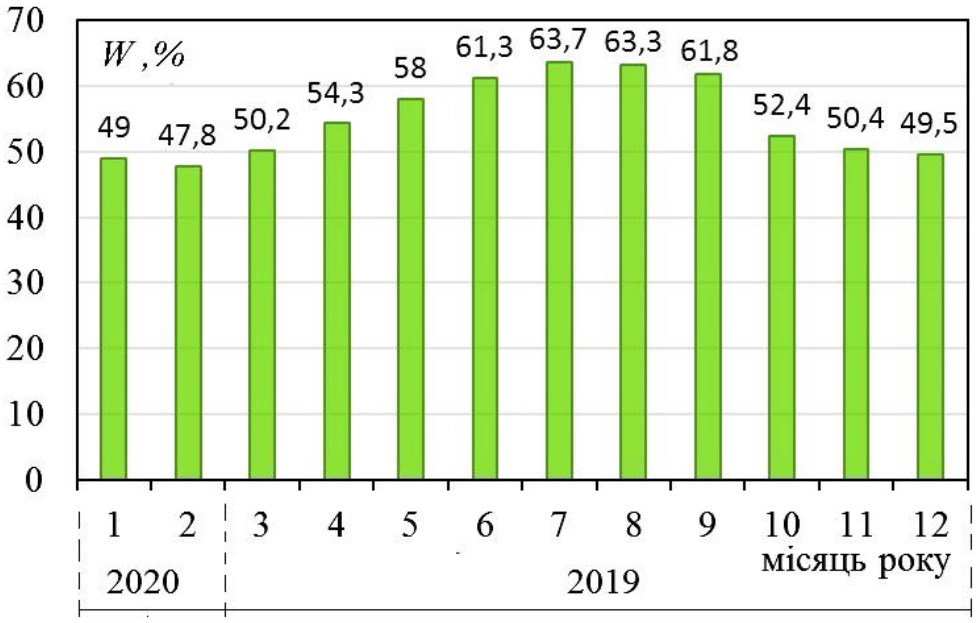


Рис. 1. Зміна вологості енергетичної верби протягом року

У світовій практиці для сушіння деревини використовують високо- та низькотемпературні режими зневоднення [2,3,4]. Переважна кількість наукових робіт висвітлює дослідження процесу високотемпературного зневоднення енергетичних порід деревини, тоді як досліджень з низькотемпературного сушіння значно менше.

При використанні високотемпературних режимів як сушильний агент слугує перегріта пара при атмосферному тиску з температурою вище 100 °С. При температурі сушильного агента в діапазоні 250...270 °С за рахунок екзотермічних процесів чиниться хімічне розкладання горючих складових сировини.

При низькотемпературних режимах сушіння в якості сушильного агента використовують повітря за температури до 100 °С. Сушіння за умов низької температури, порівняно з високотемпературним, забезпечує належну якість сировині, менш енерговитратне та пожежобезпечне. Перевагу доповнює те, що зневоднення за низькими температурами сушильного агента запобігає хімічному розкладанню летючих органічних сполук, а це дає змогу значною мірою знизити вміст шкідливих речовин у повітрі. Режим низькотемпературного зневоднення легко реалізувати на сушильних установках стрічкового типу.

Аналітичний огляд наукової літератури та патентних джерел вітчизняних і

зарубіжних авторів показав, що багато науковців досліджують низькотемпературне сушіння пиломатеріалів [3,4], у тому числі з використанням теплового насосу [5], сушіння брикетів, гранул або пелетів з відходів підприємств лісного господарства [6,7], але досліджень, присвячених низькотемпературному сушінню енергетичних порід деревини, обмаль.

Для сушіння подрібненої енергетичної сировини найчастіше використовують трубні, барабанні та стрічкові сушарки різної потужності й конструкцій [4,5,8]. Прикладом високотемпературного устаткування є барабанні сушарки, а низькотемпературного – стрічкові сушильні комплекси, які відрізняються високою продуктивністю і низьким енергоспоживанням, надійністю, простотою обслуговування.

Для здійснення низькотемпературного зневоднення подрібнену сировину, рівномірно розподіляючи, безперервно подають до зони сушіння на стрічку з боковими обмежувальними пластинами, які запобігають випадінню матеріалу зі стрічки. Для регулювання висоти зневодненого матеріалу сушильна стрічка обладнана спеціальним механізмом. Сировинний матеріал постійно продувається гарячим повітрям по ходу свого руху, причому температуру теплоносія залежно від особливостей технології сушіння можна змінювати, підтримуючи певний температурний рівень процесу [8].

Для виробництва твердого біопалива з енергетичних рослин необхідно ретельно вивчити властивості сировини та їх зміну в ході технологічного процесу.

Мета дослідження – встановлення кінетичних закономірностей сушіння енергетичних порід деревини, визначенні способу інтенсифікації процесу. Для досягнення мети поставлено завдання: провести експериментальні дослідження з вивчення кінетики сушіння в умовах низькотемпературного зневоднення; обґрунтувати раціональні параметри зневоднення.

Матеріали і методи дослідження. Експериментальні дослідження з кінетики зневоднення енергетичних рослин проводились у 2019-2020 роках у відділі тепломасопереносу в теплотехнологіях ІТТФ НАН України на експериментальному сушильному стенді, який укомплектовано сучасними приладами автоматизації,

контролю та оброблення інформації. Конструкцією робочої камери стенду передбачено зміну питомого навантаження з метою подальшого використання результатів дослідів у стрічкових сушильних установок. Детальний опис стенду та методика проведення експериментальних досліджень викладено в [9].

Як об'єкт зневоднення обрано енергетичну вербу. Вихідна вологість під час проведення експериментів варіювалась у діапазоні від 45 до 60 % на сиру масу, зневоднення завершували після досягнення матеріалом залишкової вологості 5…6 %.

Контрольну вологість до і після дослідів визначали висушуванням до абсолютно сухої маси за ДСТУ-П CEN/TS 14774-2:2012. Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту вологи висушуванням у сушильній шафі. Частина 2. Спрощений метод визначання загальної вологи.

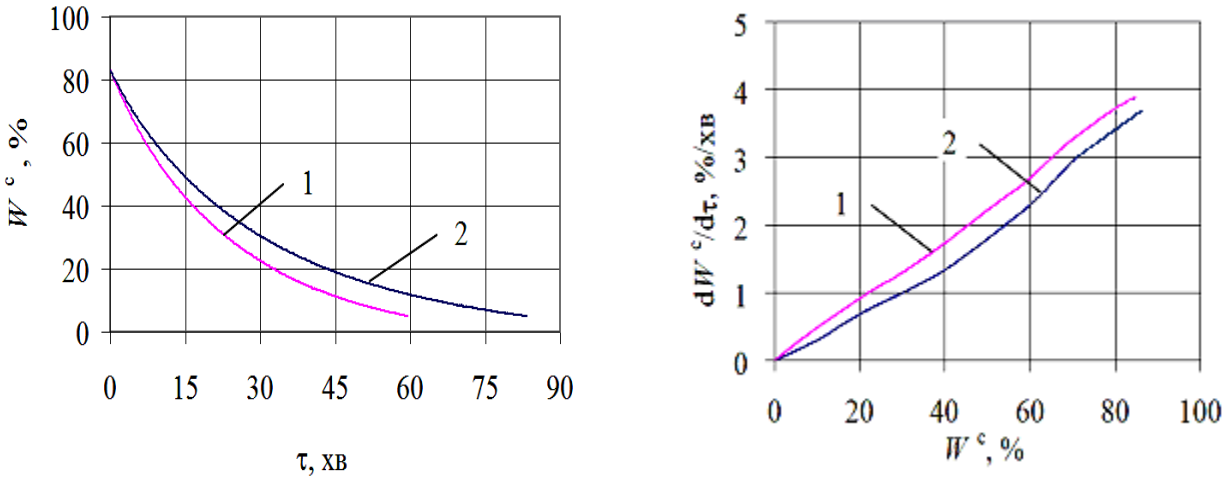
На підставі отриманих даних проводили порівняльний аналіз кривих кінетики сушіння $W^c = f(\tau)$ та кривих швидкості сушіння верби $dW^c/d\tau = f(W^c)$.

Результати дослідження та їх обговорення. Сушіння – складний комплекс явищ, що розвиваються як всередині зневоднюваного матеріалу, так і в середовищі сушильної камери. Під час зневоднення вологих матеріалів відбуваються взаємозалежні процеси тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом. Під дією теплоти волога, що міститься у висушуваному матеріалі, перетворюється на пару і переноситься з глибини до поверхні, а далі до сушильного агента.

Домінуючим параметром, що впливає на інтенсивність процесу зневоднення є температура сушильного агенту: чим вона вища, тим інтенсивніше проходить вологообмін та відповідно вища швидкість процесу.

Узагальнюючи результати експериментальних досліджень зневоднення енергетичної верби залежно від температури сушильного агента (рис. 2) бачимо, що характер кривих кінетики сушіння (*а*) та швидкості (*б*) сушіння, властивий колоїдним капілярно-пористим матеріалам. Період постійної швидкості відсутній, видалення вологи здійснюється лише у періоді спадної швидкості. Підвищення температури сушильного агенту від 80 до 100 °С при зазначених умовах процесу, сприяє інтенсифікації тепломасообміну, тривалість процесу скорочується до 25 %,

величина максимальної швидкості зневоднення в режимі сушильного агенту 80 °С дорівнює 3,7 %/хв, в режимі 100 °С – 3,9 %/хв. Упродовж всього процесу темп зменшення величини швидкості рівномірно зберігається для обох досліджених режимів.



а *б*

Рис. 2. Вплив температури сушильного агента на кінетику (а) та швидкість (б) вологообміну, *V* = 1,5 м/с, *d* = 10 г/кг с. п., *g* = 4 кг/м^2:

1 – *t* = 100 °С, 2 – *t* = 80 °С

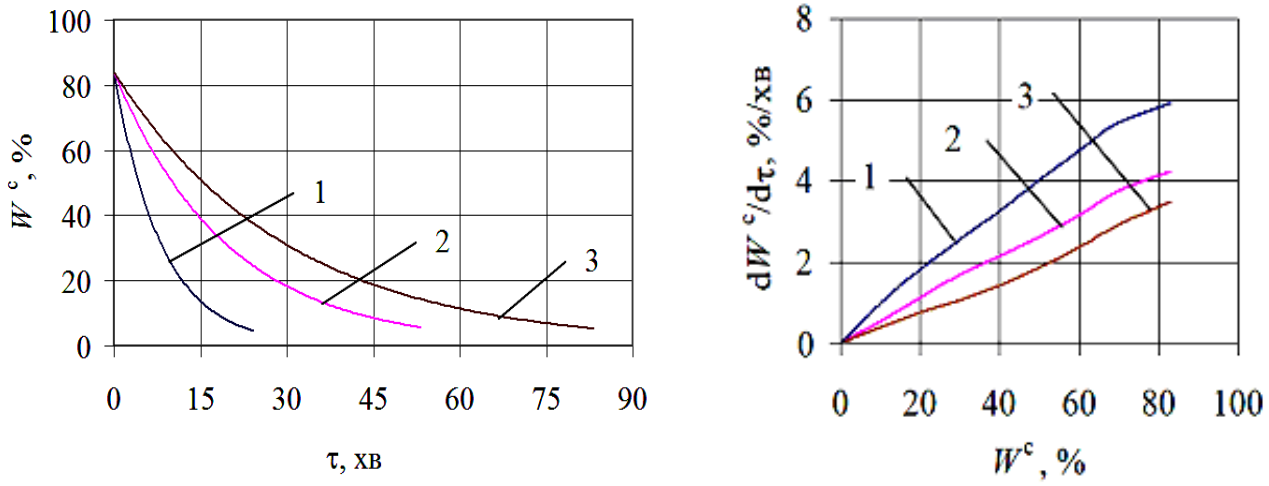
Для підвищення продуктивності сушильної установки доцільним є збільшення питомого навантаження зневоднюваного матеріалу на сушильну поверхню. Змінювання навантаження досліджуваної сировини при використанні стрічкової сушарки не вимагає великих енергетичних витрат і є найпростішим у технічному виконанні, водночас є можливість для інтенсифікації процесу сушіння.

Безумовно, що інтенсифікувати процес можна за рахунок зменшення навантаження матеріалу на сушильну поверхню, однак у такому випадку це призводить до зниження продуктивності сушильної установки. Тому може йтися лише про збільшення навантаження зневоднюваного матеріалу, але правильно організоване.

Результати експериментальних досліджень щодо впливу питомого навантаження на процес зневоднення наведено на рисунку 3. Як бачимо, характер

зміни кінетичних кривих притаманний процесу, що здійснюється тільки в другому періоді спадної швидкості.

Досліджуваний діапазон величини питомого навантаження зневоднюваної сировини: g = 0,77…2,3…4,0 кг/м^2 відповідає висоті подрібненої верби в один шар, три і п'ять шарів відповідно.



а *б*

Рис. 3. Вплив питомого навантаження на кінетику (*а*) та швидкість (*б*) вологообміну, *V* = 1,5 м/с, *d* = 10 г/кг с. п., *t* = 80 °С:

1 – g = 0,77 кг/м^2, 2 – g = 2,3 кг/м^2, 3 – g = 4 кг/м^2

Криві кінетики вологообміну (рис. 3, *а*) показують, що збільшення питомого навантаження на сушильну поверхню у п'ять разів сповільнює тривалість процесу. Так, при навантаженні сировинного матеріалу g = 0,77 кг/м^2 зневоднення триває 24 хв, при g = 2,3 кг/м^2 – 54 хв, при g = 4,0 кг/м^2 – 84 хв. Проте, збільшення навантаження позитивно впливає на продуктивність сушильної установки, сприяє підвищенню обсягів переробленої сировини.

Із аналізу кривих кінетики швидкості (рис. 3, *б*) видно, що максимальна швидкість процесу 3,7 %/хв відповідає режиму сушіння з найменшим питомим навантаженням 0,77 кг/м^2. У міру збільшення питомого навантаження до 2,3 та 4,0 кг/м^2 швидкість процесу дорівнює 4,1 %/хв та 6,0 %/хв відповідно. Загальна тривалість зневоднення від мінімального навантаження до максимального при зазначених параметрах процесу зростає у 3,5 рази (рис. 3, *а*, криві 1,3).

Слід зауважити, що збільшення питомого навантаження матеріалу зменшує величину швидкості сушіння, головним чином, тільки на початковому етапі процесу. У результаті усадки матеріалу, в міру його зневоднення, висота і щільність шару зменшуються та матеріал легше пронизується теплоносієм, швидкість процесу прискорюється. Крім того, у стрічкових сушарках процес організовують таким чином, щоб на початку процесу сушіння висота сировинного матеріалу була якомога мінімально доцільною відповідно до умов і параметрів зневоднення та типу сушильного агрегату, а в подальшому питоме навантаження матеріалу (відповідно і висоту шару) збільшують механічно спеціальним пристроєм.

Механізм тепло- і вологоперенесення під час зневоднення енергетичної верби має свої особливості, що зумовлені характером взаємодії вологи з твердим каркасом, теплофізичними і структурно-механічними властивостями.

Технологічним процесом виробництва біопалива з енергетичних рослин передбачено подрібнення сировинного матеріалу перед сушінням.

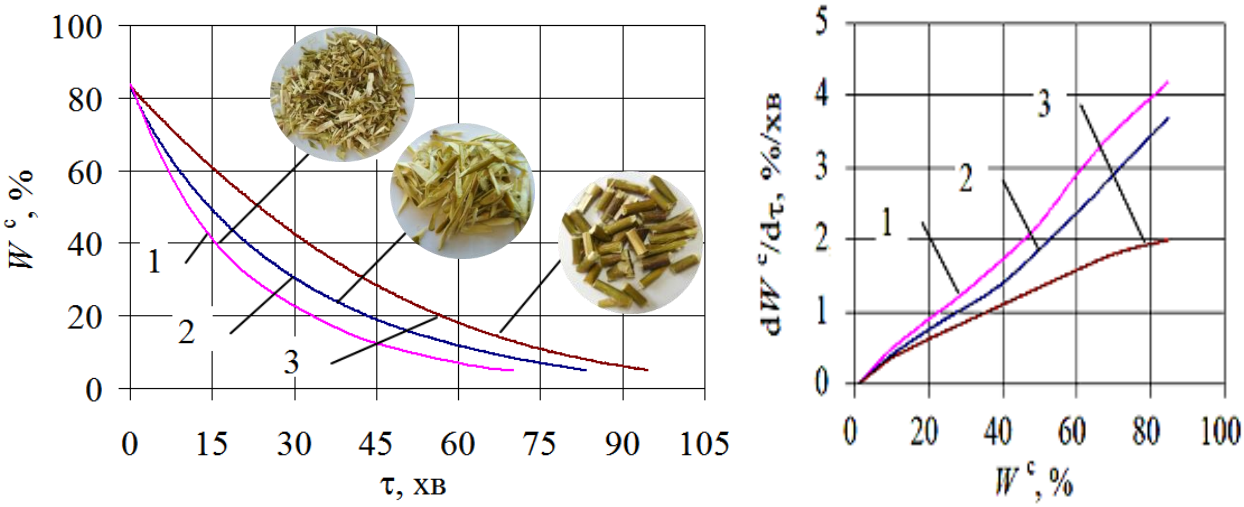
Нашими експериментальними дослідженнями доведено, що суттєвим параметром впливу на кінетику сушіння і підвищення ефективності процесу є спосіб подрібнення сировинного матеріалу. При проведенні експериментів вербу подрібнювали на рівномірні за розміром і геометричною формою частини так (рис. 4, *а*):

- шляхом стирання і ударної дії на зразки розміром L = 20…30 мм (крива 1);
- подрібнення різанням на зразки розміром L = 20…30 мм (крива 2);
- різання на циліндри L = 10…15 мм (крива 3).

Порівняльний аналіз кривих кінетики сушіння (рис. 4, *а*) і швидкості (рис. 4, *б*) показує, що процес сушіння, як і в наведених вище результатах досліджень, також проходить у періоді спадної швидкості відповідно до закономірностей видалення вологи.

Залежно від способу подрібнення величина максимальної швидкості розподіляється так м (рис. 4, *б*): при подрібненні верби шляхом стирання і ударної дії максимальна швидкість дорівнює 4,2 %/хв, при подрібненні різанням і на

циліндри максимальна величина швидкості становить 3,7 %/хв та 2,0 %/хв відповідно.



а *б*

Рис. 4. Вплив способу подрібнення на кінетику (а) та швидкість (б) вологообміну, *V* = 1,5 м/с, *d* = 10 г/кг с. п., *t* = 80 °С, *g* = 4 кг/м^2:
1 – шляхом стирання і ударної дії, 2 – подрібнення різанням,
3 – різання на циліндри

Кінетичні криві свідчать, що найінтенсивніший режим відповідає способу подрібнення верби шляхом стирання й ударної дії з максимальною швидкістю 4,2 %/хв, при цьому, тривалість сушіння скорочується від 15 до 25 % порівняно з іншими дослідженими способами подрібнення. Більш інтенсивне сушіння зразків, подрібнених у такий спосіб, можна пояснити частковим порушенням цілісності клітинної структури та збільшенням поверхні випаровування вологи з матеріалу.

Висновки і перспективи. Базуючись на результатах теоретичних й експериментальних досліджень з вивчення кінетики сушіння в умовах низькотемпературного зневоднення енергетичної верби, обґрунтовано раціональні параметри процесу і встановлено:

- вплив температури сушильного агента. Визначено, що з підвищенням температури від 80 до 100 °С спостерігається інтенсифікація вологообміну, тривалість процесу скорочується до 25 %;

- вплив питомого навантаження на сушильну поверхню установки. Показано, що, незважаючи на те, що збільшення питомого навантаження сповільнює

видалення вологи на початковому етапі зневоднення, проте позитивно відбивається на продуктивності сушильного обладнання, сприяє підвищенню обсягів переробленої сировини;

- вплив способу подрібнення енергетичної верби. Доведено, що подрібненням шляхом комбінації стирання і ударної дії досягається інтенсифікація зневоднення, скорочення процесу від 15 до 25 % порівняно з дослідженими способами.

Результати експериментальних досліджень застосовуються до сушильних установок стрічкового типу. Встановлені умови та параметри низькотемпературного сушіння забезпечують інтенсифікацію й економічність процесу та одержання сушеної енергетичної верби з низькою і рівномірно розподіленою залишковою вологістю.

Використання низькотемпературного сушіння енергетичних рослин у технологічному циклі отримання біопалива, як альтернативного джерела теплоти, гарантуватиме надійну роботу спалювального агрегату впродовж тривалого часу, забезпечуючи екологічну чистоту технології та скорочуючи викиди парникових газів у навколишнє середовище. З огляду на дефіцит і зростання вартості традиційних енергоресурсів напрям розвитку технології виробництва твердого біопалива є перспективним і доцільним.

Список використаних джерел:

1. Коржов В.Л. Значення біомаси дерев у процесі оптимізації енергетичного балансу України. Наук. праці Лісівничої акад. наук України: зб. наук. праць. 2008. Вип. 6. С. 20–24.

2. Шапар Р.О., Гусарова О.В., Корінчук Д.М. Низькотемпературне сушіння енергетичної деревини. Захист навколишн. середовища: енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й міжн. конгрес, (м. Львів, 23-26 вересня 2020 р.). Львів: Нац. ун-т „Львівська політехніка”, 2020. С. 96.

3. Energy from field energy crops: a handbook for energy producers. URL https://www.codigestion.com/fileadmin/codi/images/ENCROP/Handbook_for_energy_producers_www_version.pdf (дата звернення 15.10.2020).

4. Jan-Olof Anderson. Energy and Resource Efficiency in Convective Drying Systems in the Process Industry: doctoral thesis / Luleå, Sweden, 2014. 122 p.

5. Vasile Minea. Efficient energy recovery with wood drying heat pumps. Drying Technology: An International Journal. 2012. Vol. 30:14. P. 1630-1643.

6. Trohin A.H., Moisiev V.F., Telnov I.A., Zavinski S.I. Development of processes

and equipment for the production of fuel pellets from biomass. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2010. № 8/45 (3). P. 36–40.

7. Krista Kļaviņa, Aivars Žandeckis, Claudio Rochas, Alvydas Zagorskis Low temperature drying as a solution for sustainable use of biomass. „Science – FutureofLithuania”: proceedingsofthe 17th Conferencefor Junior Researchers. (Vilnius, Lithuania, 10 April 2014). Vilnius, 2014. P. 1.

8. Stela Engineering GmbH. URL: https://stela.in.ua/p1104488-strichkova-susharka-dlya.html. (дата звернення 20.10.2020).

9. Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини: монографія. Київ: Сік Груп Україна, 2018. 228 с.

References

1. Korzhov, V.L. (2008). Znachennia biomasy derev u protsesi optymizatsii enerhetychnoho balansu Ukrainy [The value of tree biomass in the process of optimizing the energy balance of Ukraine]. Science works of the Forestry Academy Sciences of Ukraine: Coll. Science papers. 6, 20–24.

2. Shapar, R.O., Husarova, O.V., Korinchuk, D.M. (2020). Nyzkotemperaturne sushinnia enerhetychnoi derevyny [Low-temperature drying of energy wood]. Environmental Protection. Energy saving. Balanced nature management: a collection of materials of the 6th int. congress. (Lviv), 96.

3. Energy from field energy crops – a handbook for energy producers. Available at:https://www.codigestion.com/fileadmin/codi/images/ENCROP/Handbook_for_energy_producers_www_version.pdf.

4. Anderson, Jan-Olof. (2014). Energy and Resource Efficiency in Convective Drying Systems in the Process Industry. Luleå, Sweden, 122. ISSN 1402-1544. ISBN 978-91-7439-872-4 (print). ISBN 978-91-7439-873-1 (pdf).

5. Minea, Vasile. (2012). Efficient energy recovery with wood drying heat pumps. Drying Technology: An International Journal, 30:14, 1630-1643. http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.701261.

6. Trohin, A. H., Moisiev, V. F., Telnov, I. A., Zavinski, S. I. (2010). Development of processes and equipment for the production of fuel pellets from biomass. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 8/45 (3), 36–40. ISSN 1729-3774.

7. Krista Kļaviņa, Aivars Žandeckis, Claudio Rochas, Alvydas Zagorskis (2014). Low temperature drying as a solution for sustainable use of biomass. Proceedingsofthe 17th Conferencefor Junior Researchers „Science – FutureofLithuania“. (Vilnius). P. 1. ISSN 2029-2341 print / ISSN 2029-2252 online.

8. Stela Engineering GmbH. Available at: https://stela.in.ua/p1104488-strichkova-susharka-dlya.html.

9. Sniezhkin, Yu.F., Shapar, R.O. (2019). Teplomasoobminni tekhnolohii pererobky pektynovmisnoi syrovyny [Heat-mass exchange technologies for pectin-containing raw materials processing]. Kyiv: Sik Hrup Ukraine, 228. ISBN 978–617–7457–69–4.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СУШКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСТЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА

Р. А. Шапарь, Е. В. Гусарова

Аннотация. ***П****редставлен анализ этапов производства твердого биотоплива из энергетических растений и отмечено, что на процессы сушки в технологических процессах расходуется до 70 % общих энергозатрат. Обоснована актуальность и преимущества низкотемпературной сушки.*

Цель исследования – интенсификация процесса обезвоживания энергетических растений, определение рациональных параметров сушильного агента и условий сушки.

В качестве объекта обезвоживания использована энергетическая ива, сушку осуществляли до достижения материалом остаточной влажности 5...6 %.

Исследованиями по влиянию температуры сушильного агента на кинетику влагообмена установлено, что повышение температуры от 80 до 100 °С способствует интенсификации тепломассообмена и сокращает продолжительность процесса до 25 %. Увеличение удельной нагрузки положительно влияет на производительность сушильной установки и увеличивает объемы переработанного сырья. Общая продолжительность обезвоживания от минимальной нагрузки до максимальной возрастает в 3,5 раза. В работе отмечено, что существенным параметром влияния на кинетику сушки и повышения эффективности процесса является способ измельчения сырьевого материала. Наиболее интенсивный режим соответствует способу измельчения ивы путем комбинирования стирания и удара. При таком способе измельчения продолжительность сушки сокращается от 15 до 25 % по сравнению с другими рассмотренными.

Сочетание установленных условий и параметров низкотемпературной сушки обеспечивает экономичность процесса и получение высушенной ивы с низкой и равномерно распределенной остаточной влажностью.

Ключевые слова: ***сушильное оборудование, ива, низкотемпературная конвективная сушка, измельчение***

ANALYSIS OF THE PROCESS OF ENERGY PLANTS DRYING DURING THE PRODUCTION OF SOLID BIOFUELS

R. Shapar, O. Husarova

Abstract. *The article presents an analysis of the stages of production of solid biofuels from energy plants and notes that the drying processes in technological processes consume up to 70 % of total energy consumption. The relevance and advantages of low-temperature drying are substantiated.*

Aim: intensification of the process of dehydration of energy plants, determination of rational parameters of the drying agent and dehydration conditions.

Energy willow was used as an object of dehydration. Drying was carried out until the material reached a residual moisture content of 5...6 %.

Studies on the effect of drying agent temperature on the kinetics of moisture exchange

have shown that increasing the temperature from 80 °C to 100 °C enhances heat and mass transfer and reduces the process duration to 25 %. Increasing the specific load has a positive effect on the productivity of the drying plant and increases the amount of processed raw materials. The total duration of dehydration from the minimum load to the maximum increases by 3.5 times. The paper notes that a significant parameter of the impact on the kinetics of drying and increase the efficiency of the process is the method of grinding raw material. The most intensive mode corresponds to the method of grinding willow by combining abrasion and impact. With this method of grinding, the drying time is reduced from 15 % to 25 % compared to those considered.

The established conditions and parameters of low-temperature drying provide intensification and efficiency of the process and obtaining dried energy willow with low and evenly distributed residual moisture.

Key words: ***drying equipment, willow, low-temperature convective drying, grinding***