УДК: 674.047.3

ЗАКОНОМІРНОСТІ КОНВЕКТИВНОГО НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО СУШІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОРІД ДЕРЕВИНИ

Шапар Р.О.¹, канд. техн. наук, Гусарова О.В.², канд. техн. наук., Корінчук Д.М.³, канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, ст. наук. співр., вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, email: r.sh@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6448-8760>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, email: o.v.husarova@nas.gov.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7622-9168>³Інститут технічної теплофізики НАН України, ст. наук. співр., вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, email: ntps@i.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7752-4345><https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.5>

Визначено шляхи інтенсифікації процесу зневоднення енергетичних порід деревини для одержання твердого біопалива та вплив на процес сушіння режимних параметрів сушильного агента, розмірів та форми сировинного матеріалу, питомого навантаження на сушильну поверхню.

Определены пути интенсификации процесса обезвоживания энергетических пород древесины для получения твердого биотоплива и влияние на процесс сушки режимных параметров сушильного агента, размеров и формы сырьевого материала, удельной нагрузки на сушильную поверхность.

The ways of intensifying the process of dehydration of energetic wood species to obtain solid biofuel and the influence on the drying process of the mode parameters of the drying agent, the size and shape of the raw material, and the specific load on the drying surface are determined.

Бібл. 23, рис. 5.

Ключові слова: сушильне обладнання, верба, низькотемпературне конвективне зневоднення, подрібнення. τ – час; t – температура; d – вологовміст сушильного агента; V – швидкість руху сушильного агента; g – питоме навантаження сировини; W^c – вологість сировини по відношенню до абсолютно сухої маси; L – лінійний розмір зразка.

Постановка і аналіз проблеми. Останні десятиліття характеризуються прогресуючим виснаженням традиційних видів енергоресурсів і чіткою тенденцією до збільшення використання твердого біопалива, зокрема деревинних рослин, як альтернативного джерела відновлювального енергетичного ресурсу [1–3].

Деревина та енергетика – два поняття, які нерозривно пов'язані та взаємно доповнюють один одного. Невпинний розвиток біоенергетики у всьому світі визначається збільшенням переробки біомаси, а обсяги енергетичної деревини, що вирощують на спеціальних плантаціях і переробляють на тверде біопаливо (дерев'яна щепка, гранули, пелети, брикети), складає вже помітну частку в загальному енергобалансі багатьох країн світу, в тому числі й в Україні. Використання відновлюваних джерел енергії стало особливо актуальним і нагальним у зв'язку з підписанням у 1997 році Кіотського протоколу зі скорочення викидів парникових газів у атмосферу.

Для отримання твердого біопалива використовують швидкозростаючі енергетичні культури: вербу, тополь, осіку – як «чисті» види, так і їхні гібриди [4], вільху, ялину європейську, модрина європейську, японську та гібридну, сосну звичайну та дуб червоний, міскантус [5,6,7].

В Україні лідерами з вирощування енергетичної деревини, зокрема верби, є Львівська, Івано-Франківська, Рівненська, Волинська області. Нещодавно до лідерів долучились аграрії Київщини. Технологія вирощування енергетичної верби (рис. 1) складається з кількох етапів. Перший збір врожаю, як правило, проводять на четвертий рік після закладання плантацій. Надалі періодичність зрізання біомаси здійснюють один раз у 2...3 роки, а при сприятливих умовах й кожен рік [1,4,5,7].

Крім дерев, для енергетичних потреб використовують сільськогосподарські трав'янисті рослини та їхні відходи, що дають велику кількість біомаси: кукурудзу, цукровий очерет, сою, рапс, слонову траву тощо [7].

Енергетичний аналіз технологічних етапів виробництва твердого біопалива з деревинних рослин показує, що всі стадії виробництва енергоємні, передусім стадія сушіння, і це відбивається на енергоефективності виробництва загалом, а, отже, і на собівартості кінцевої продукції.

На процеси сушіння в технологічних процесах виробництва твердого біопалива з деревинної біомаси витрачається до 70 % загальних енерговитрат і, в середньому, на зневоднення витрачається 12...20 % біопалива, що безпосередньо виробляється на підприємстві.

Сушіння вважається одним з найскладніших й енерговитратних тепломасообмінних процесів, у якому волога під дією теплоти перетворюється на пару, переміщується з глибини зневоднюваного матеріалу до його поверхні з подальшим переходом до сушильного агента.

Тепловолісні режими повинні забезпечити підвищення енергоефективності процесу та високу теплотворну здатність створюваного палива. За способом підведення теплоти розрізняють такі методи сушіння: конвективний, кондуктивний, радіаційний, сублімаційний та високочастотний. Найбільш поширений і використовуваний метод зневоднення під час створення твердого біопалива – конвективний [9].

У технологічному процесі виробництва паливних гранул, брикетів чи пелет з енергетичних деревинних рослин важливо забезпечити рівномірність подрібнення та зневоднення сировини до залишкової вологості в інтервалі від 5 до 10 %, тоді як, сировинний матеріал залежно від виду, клімату, походження та умов зберігання має природну вологість від 40 до 60 % і навіть 70 % на сиру масу.

Відповідно до [6, 10] під час сушіння деревини використовують високо- та низькотемпературні режими зневоднення. При використанні високотемпературних режимів як сушильний агент слугує перегріта пара за атмосферним тиском з температурою вище 100 °С. За низькотемпературних режимів сушіння в якості сушильного агента використовують повітря з температурою до 100 °С.

За температури сушильного агента в діапазоні 250...270 °С через екзотермічні процеси починається хімічне розкладання горючих складових частин сировини.

Аналіз літературних та Інтернет джерел показує, що є багато досліджень і розробок присвячених низькотемпературному сушінню пиломатеріалів [9–14], у тому числі з використанням теплового насосу [15,16], сушінню брикетів, гранул та пелетів з відходів підприємств лісного господарства [11, 17–20], але досліджень, присвячених низькотемпературному сушінню енергетичних порід деревини, обмаль.

На світовому ринку представлено сушильне устаткування різної потужності та конструкцій [17,19,21,22]. Для сушіння подрібненої сировини найчастіше використовують трубні, барабанні та стрічкові сушарки.

Прикладом високотемпературного устаткування є барабанні сушарки. Такі сушарки громіздкі, енергоємні, інтенсивність сушіння в них низька внаслідок малих значень коефіцієнтів тепловіддачі та невеликих відносних швидкостей руху теплового агента, потребують встановлення очисного обладнання для вловлювання дрібних часточок, що виносяться із тепловим агентом.

Рис. 1. Технологія вирощування енергетичної верби [8]

До низькотемпературних сушарок відносять стрічкові сушарки. Стрічкові сушильні комплекси відрізняються високою продуктивністю та низьким енергоспоживанням. Такі комплекси нескладні в керуванні, досить компактні, займають меншу, ніж барабанні сушарки площу, мають можливість регулювання питомого навантаження сировини на стрічку установки, до того ж, вони більш екологічні, для роботи обладнання не потрібна система аспірації, оскільки в процесі роботи немає сильного руху повітря і пил не розноситься.

З огляду на вищесказане, стає очевидним, що переважна кількість наукових робіт висвітлює дослідження процесу високотемпературного зневоднення енергетичних порід деревини. Водночас, досліджень з низькотемпературного сушіння, значно менше. Вважають, що сушіння за умов низької температури, порівняно з високотемпературним, менш енерговитратне та пожежобезпечне, забезпечує належну якість кінцевому продукту. Перевагу доповнює те, що на відміну від високотемпературного сушіння, зневоднення за низькими температурами сушильного агента, запобігає хімічному розкладанню летючих органічних сполук, а це дає змогу значною мірою знизити вміст шкідливих речовин у повітрі. Водночас, режим низькотемпературного зневоднення легко реалізувати на стрічкових сушильних установках.

Для виробництва твердого біопалива з енергетичних рослин необхідно ретельно вивчити властивості та зміни сировини під час технологічного процесу. Отже, дослідження процесів низькотемпературного сушіння енергетичної деревини, є актуальним і своєчасним завданням.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є визначення шляхів інтенсифікації процесу зневоднення енергетичних порід деревини. Для досягнення поставленої мети необхідно провести комплекс експериментальних досліджень з вивчення кінетики сушіння в умовах низькотемпературного зневоднення та визначити вплив на процес:

- режимних параметрів сушильного агента;
- розмірів та форми сировинного матеріалу;
- питомого навантаження на сушильну поверхню.

Методика та об'єкт досліджень. Вивчення кінетичних закономірностей процесу зневоднення здійснювали на експериментальному сушильному стенді, який укомплектовано сучасними приладами автоматизації та контролю і системою автоматичного збору й оброблення інформації одержаної під час проведення досліджень. Опис стенду та методика проведення експериментальних досліджень докладно викладено в [23].

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

Контрольну вологість до та 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.

Режим процесу зневоднення характеризується трьома параметрами сушильного агента: температурою, вологовмістом, швидкістю його руху. Під час дослідження впливу одного із параметрів на процес, решта були незмінними. Конструкцією робочої камери стенду передбачено можливість регулювання напрямку руху сушильного агента стосовно матеріалу (продувний й обдувний шар), а також зміну питомого навантаження сировини з метою подальшого використання результатів дослідів у стрічкових сушильних установках.

На підставі отриманих даних проводили порівняльний аналіз кінетичних і швидкісних характеристик сушіння зневоднюваного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Технологічний процес сушіння являє собою складну фізико-хімічну систему. При побудові опису технології сушіння необхідний комплексний підхід до проблеми, який неможливий без системного аналізу гідродинамічних, дифузійних і теплових процесів, а також ускладнених накладенням великої кількості явищ різної природи процесів.

Комплексний підхід до дослідження кінетичних закономірностей процесу сушіння припускає врахування всіх факторів, що впливають на тепло- і масообмінні процеси, що протікають під час зневоднення у конкретному сушильному агрегаті відповідно до виду та властивостей зневоднюваної сировини, які обумовлені формою зв'язку вологи з матеріалом, а також метою подальшої переробки та використання.

Процес сушіння складається з переносу теплоти й речовини усередині матеріалу (внутрішній тепло- і масообмін) і переносу теплоти й речовини від зневоднюваної часточки у навколишнє середовище (зовнішній тепло- та масообмін). Поєднання зовнішнього та внутрішнього тепло- і масообміну визначає кінетику процесу сушіння.

Дослідження впливу температури сушильного агента на кінетику вологобміну. Температура сушильного агента найбільш легко регульований параметр процесу сушіння. Підвищенням температури сушильного

агента досягається інтенсифікація зневоднення, час теплового впливу зводиться до мінімуму, що забезпечує економічність процесу.

На рисунку 2 надано результати експериментальних досліджень зневоднення енергетичної верби залежно від температури сушильного агента у вигляді кривих кінетики сушіння $W^c = f(\tau)$ та кривих швидкості сушіння $dW^c/d\tau = f(W^c)$.

Аналіз графічного матеріалу свідчить, що впродовж всього процесу видалення вологи здійснюється тільки у періоді спадної швидкості, характер кривих притаманний колоїдним капілярно-пористим матеріалам.

З підвищенням температури сушильного агента від 80 до 100 °С при зазначених умовах процесу, спостерігається інтенсифікація тепломасообміну, тривалість процесу скорочується до 25 %, величина максимальної швидкості сушіння в режимі сушильного агента 80 °С дорівнює 3,7 %/хв, в режимі 100 °С – 3,9 %/хв. Впродовж всього процесу темп зменшення величини швидкості рівномірно зберігається для обох досліджених режимів.

Дослідження впливу питомого навантаження на процес сушіння. Одним із технологічних прийомів підвищення продуктивності сушильної установки є збільшення питомого навантаження зневоднюваного матеріалу на сушильну поверхню. Змінювання навантаження сировини не вимагає великих енергетичних витрат і є найбільш простим у технічному виконанні, водночас, є резерви для інтенсифікації процесу сушіння.

Зрозуміло, що інтенсифікувати процес можна шляхом зменшення навантаження матеріалу на поверхню сушильної установки, однак у такому випадку це

приводить 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 у графічному вигляді наведено на рис. 3. Як бачимо, характер зміни кінетичних кривих властивий процесу, що здійснюється тільки в періоді спадної швидкості.

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

Криві кінетики вологообміну $W^c = f(\tau)$ показують, що збільшення питомого навантаження на сушильну поверхню у п'ять разів сповільнює тривалість процесу більш ніж втричі. Так, при навантаженні сировинного матеріалу $g = 0,77 \text{ кг/м}^2$ зневоднення триває 24 хв, при $g = 2,3 \text{ кг/м}^2$ – 54 хв, при $g = 4,0 \text{ кг/м}^2$ – 84 хв. Проте, збільшення навантаження позитивно впливає на продуктивність сушильної установки, сприяє збільшенню обсягів переробленої сировини та реалізується у сушильних установках стрічкового типу.

Із аналізу кривих кінетики швидкості $dW^c/d\tau = f(W^c)$ видно, що максимальна швидкість процесу 3,7 %/хв відповідає режиму сушіння з найменшим питомим навантаженням 0,77 кг/м². У міру збільшення питомого навантаження до 2,3 та 4,0 кг/м² 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 (криві 1, 3).

Рис. 2. Вплив температури сушильного агента на кінетику вологообміну,
 $V = 1,5 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря; $g = 4 \text{ кг/м}^2$: 1 – $t = 100 \text{ °C}$; 2 – $t = 80 \text{ °C}$

Рис. 3. Вплив питомого навантаження на кінетику вологообміну,

$V = 1,5 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря; $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – $g = 0,77 \text{ кг/м}^2$; 2 – $g = 2,3 \text{ кг/м}^2$; 3 – $g = 4 \text{ кг/м}^2$

Слід зауважити, що збільшення питомого навантаження матеріалу зменшує величину швидкості сушіння, головним чином, тільки на початковому етапі процесу. В результаті усадки матеріалу, в міру його зневоднення, висота й щільність шару зменшуються і 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 далі питоме навантаження матеріалу (відповідно і висоту шару) збільшують спеціальним пристроєм механічно.

Вплив способу подрібнення сировинного матеріалу на процес сушіння. Механізм тепло- і вологопереносу під час зневоднення енергетичної верби має свої особливості, що зумовлені характером взаємодії води з твердим каркасом, теплофізичними і структурно-механічними властивостями.

а) б) в)

Рис. 4. Фото зразків за розміром і геометричною формою

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. Під час проведення експериментів вербу подрібнювали на рівномірні за розміром і геометричною формою частинки наступним чином (рис. 4):

- шляхом стирання й ударної дії на зразки розміром $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$ (а);
- подрібнення різанням на зразки розміром $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$ (б);
- різання на циліндри $L = 10 \dots 15 \text{ мм}$ (в).

Порівняльний аналіз кривих кінетики сушіння $W^c = f(\tau)$ та швидкості $dW^c/d\tau = f(W^c)$ (рис. 5) показує, що процес сушіння також, як і в наведених вище результатах досліджень, проходить у періоді спадної швидкості відповідно до закономірностей видалення води.

Залежно від способу подрібнення величина максимальної швидкості при зазначених параметрах процесу розподіляється таким чином:

при подрібненні верби шляхом стирання й ударної дії на зразки розміром $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$ максимальна швидкість дорівнює $4,2 \text{ } \%/ \text{хв}$, при подрібненні різанням на зразки розміром $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$ і на циліндри $L = 10 \dots 15 \text{ мм}$ максимальна величина швидкості становить $3,7 \text{ } \%/ \text{хв}$ та $2,0 \text{ } \%/ \text{хв}$ відповідно.

Із графічних залежностей витікає, 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. Інтенсивніше сушіння зразків, подрібнених у такий спосіб, можна пояснити частковим порушенням цілісності клітинної структури та збільшенням поверхні випаровування вологи з матеріалу.

Висновки

Отже, за результатами теоретичних й експериментальних досліджень кінетики вологообміну в режимі низькотемпературного зневоднення енергетичної верби встановлено:

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

- 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 та легко реалізується на сушильних установках стрічкового типу.

Наведені результати забезпечують:

- одержання кінцевого матеріалу з низькою залишковою вологістю;
- інтенсифікацію зневоднення;
- скорочення тривалості процесу;
- мінімізацію витрат теплоти.

Посаднання встановлених умов і параметрів низькотемпературного сушіння забезпечує економічність процесу та одержання сушеної енергетичної верби з низькою та рівномірно розподіленою залишковою вологістю.

Використання такого матеріалу в технологічному циклі отримання біопалива гарантуватиме надійну роботу спалювального агрегату впродовж тривалого часу.

ЛІТЕРАТУРА

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. Kenney W.A. Multipurpose tree plantations and the sustainability of energy biomass production // J. Sustainable Forest. – 1993. – № 3. – P.105–119.
3. Шапар Р.О., Гусарова О.В., Корінчук Д.М. Низькотемпературне сушіння енергетичної деревини // Захист навколишн. середовища: енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й міжн. конгрес, 23-26 вересня 2020 р. м. Львів. – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2020. – С. 96.

Рис. 5. Вплив способу подрібнення на кінетику вологообміну,

$V = 1,5 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря; $t = 80 \text{ °C}$; $g = 4 \text{ кг/м}^2$:

1 – шляхом стирання і ударної дії $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$; 2 – подрібнення різанням $L = 20 \dots 30 \text{ мм}$;

3 – різання на циліндри $L = 10 \dots 15 \text{ мм}$

4. Фучило Я.Д., Ониськів М.І., Сбитна М.В. Біологічні та технологічні основи плантаційного лісовирощування: моногр. – Київ: ННЦ ІАЕ, 2006. – 394 с.
5. Кунцьо І.О. Гументик Я.М. Вирощування енергетичної верби як сировини для виробництва твердих видів біопалива в умовах лісостепу України // Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. – 2013. – Вип. 19. – С. 59–62.
6. Patrick Perre, Roger Keey. Drying of wood: principles and practices. Handbook of industrial drying. – 2014. – p. 797–846. – ISSN 978-1-4665-9665-8. – doi: 10.1201/b17208-44.
7. *Energy from field energy crops – a handbook for energy producers.* [Електронний ресурс]. URL https://www.codigestion.com/fileadmin/codi/images/ENCROP/Handbook_for_energy_producers_www_version.pdf (дата звернення 15.10.2020).
8. *Особливості вирощування та використання енергетичних культур.* [Електронний ресурс]. URL http://naas.gov.ua/upload/iblock/320/_%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE_2018.pdf (дата звернення 10.09.2019).
9. Edgars Vigants, Girts Vigants, Ivars Veidenbergs, Dace Lauka, Krista Klavina, Dagnija Blumberga. Analysis of energy consumption for biomass drying process // Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – 2015. – Vol. II. – p. 317–322. doi: <http://dx.doi.org/10.17770/etr2015vol2.625>.
10. Anna Vidlund. Sustainable production of bio-energy products in the sawmill industry. Licentiate thesis. Dept. of Chemical Engineering and Technology / Energy Processes KTH, Stockholm, Sweden. – 2004. – 57 p.
11. Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Dae Hyun Kim, Liang Yu. Simulation study for pneumatic conveying drying of sawdust for pellet production // Drying Technology. – 2014. – Vol. 32. – p. 1142–1156. – ISSN 0737-3937. – doi:10.1080/07373937.2014.884575.
12. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А., Петров М.С., Баженов А.А. Эффективные режимы низкотемпературной сушки пиломатериалов // Электронный архив УОЛТУ, [Електронний ресурс]. URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3855/1/Gorokhovskiy_i_dr.pdf (дата звернення 04.12.2018).
13. Заринов Ш.Г., Заринова Н.Ш. Энергетическая характеристика низкотемпературного процесса сушки листовенных пиломатериалов // Вестник КрасГАУ. – 2013. – №11. – С. 257–261.
14. Pat. CN101236048A China, IPC B27K1/00; F26B5/04; F26B7/00. Wood drying method / Songlin YI, Yongdong ZHou – CN200810100904A; appl. 26.02.2008; pub. 06.08.2008.
15. Kudra T. Energy performance of convective dryer // Drying technology. – 2012. – Vol. 30. – Iss. 11–12. P. 1190 – 1198. doi.org/10.1080/07373937.2012.690803.
16. Vasile Minea. Efficient energy recovery with wood drying heat pumps // Drying Technology: An International Journal. - 2012. - Vol. 30:14. – p. 1630-1643. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.701261>.
17. Krista Klavina, Aivars Žandeckis, Claudio Rochas, Alvydas Zagorskis Low temperature drying as a solution for sustainable use of biomass // Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“. 10 April 2014, Vilnius, Lithuania, 2014. – P. 1. ISSN 2029-2341 print / ISSN 2029-2252 online.
18. Jan-Olof Anderson. Energy and Resource Efficiency in Convective Drying Systems in the Process Industry. Doctoral thesis. – Luleå, Sweden. - 2014. – 122 p. - ISSN 1402-1544. ISBN 978-91-7439-872-4 (print). ISBN 978-91-7439-873-1 (pdf).
19. Trohin, A.H., Moisiey, V.F., Telnov, I.A. and 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). – С. 36 – 40. – ISSN 1729-3774.
20. Дахновська О.В., Снівак О.Ю., Єфремов Я.А. Експериментальні дослідження низькотемпературного сушіння відходів деревини в камерній конвективній сушарці // Збірник наукових праць вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вінниця, – 2015. – Вип. 1 (91). – С. 62–65.
21. Pat. CN104930577B China, IPC F24D3/18; F25B30/00. Double-effect heat supply device of low-temperature superconducting source heat pump – CN201510298155A; appl. 07.07.2015; pub. 10.04.2018.
22. Buhler [Електронний ресурс]. URL: <https://www.buhlergroup.com/europe/ru/7950.htm> (дата звернення 07.12.2018).
23. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ: Сік Груп Україна, 2018. – 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.

REGULARITIES OF CONVECTIVE LOW TEMPERATURE DRYING OF ENERGY SPECIES WOOD

Shapar R.O.¹, Husarova O.V.², Korinchuk D.M.³

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine.

email: r.sh@ukr.net,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6448-8760>

²*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine.

email: o.v.husarova@nas.gov.ua,

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7622-9168>

³*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine.

email: ntps@i.ua,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7752-4345>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.5>

The article presents an analysis of the technological stages of the production of solid biofuel from energy wood species, it is noted that up to 70% of the total energy consumption is spent on drying processes in technological processes. The urgency and advantages of low-temperature drying of such wood have been substantiated. It is noted in the work that the heat and humidity modes should ensure an increase in the energy efficiency of the process and a high calorific value of the resulting fuel.

The purpose of the article is to intensify the process of dehydration of energy wood to obtain solid biofuel, to determine the effect on the process of convective low-temperature drying of the operating parameters of the drying agent, the size and shape of the raw material, and the specific load on the drying surface.

Energy willow was used as an object for dehydration, the initial moisture content of which varied over a wide range from 45 to 60% per wet weight; dehydration was carried out until the material reached residual moisture content of 5...6%.

Studies on the effect of the temperature of the drying agent on the kinetics of moisture exchange prove that an

increase in temperature from 80 to 100 °C intensifies heat and mass transfer and reduces the duration of the process by up to 25%. The results of experimental studies of the effect of the specific load on the dehydration process showed that an increase in load has a positive effect on the productivity of the drying unit and increases the volume of processed raw materials. At the same time, the total duration of dehydration from the minimum load to the maximum increases by 3.5 times. It is noted in the work that a significant parameter of influence on the kinetics of drying and increasing the efficiency of the process is the method of grinding the 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% in comparison with the others considered.

The combination of the specified conditions and parameters of low-temperature drying provides an economical process and obtaining dried willow with low and evenly distributed residual moisture. The use of such material in the technological cycle of biofuel production guarantees the reliable operation of the combustion device for a long time.

References 23, figures 5.

Key words: drying equipment, willow, low temperature convective dehydration, grinding.

1. *Korzhov V.L.* [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], 2008. V. 6. P. 20–24. (in Ukr.)

2. *Kenney W.A.* Multipurpose tree plantations and the sustainability of energy biomass production. *J. Sustainable Forest.* 1993. № 3. P.105–119.

3. *Shapar R.O., Husarova O.V., Korinchuk D.M.* [Low-temperature drying of energy wood]. [Environmental Protection. Energy saving. Balanced nature management: a collection of materials of the 6th int. Congress], Lviv, Nat. Lviv Polytechnic University, 2020. P. 96. (in Ukr.)

4. *Fuchylo Ya.D., Onyskiv M.I., Sbytina M.V.* [Biological and technological bases of plantation afforestation: monograph]. Kiev: NNTs IAE, 2006. 394 p. (in Ukr.)

5. *Kuntso I.O., Humenyk Ya.M.* [Growing energy willow as a raw material for the production of solid biofuels in the forest-steppe of Ukraine]. [Scientific works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets]. 2013. № 19. P. 59–62. (in Ukr.)

6. *Patrick Perre, Roger Keey.* Drying of wood: principles and practices. Handbook of industrial drying. – 2014. – p. 797–846. – ISSN 978-1-4665-9665-8. – doi: 10.1201/b17208-44.

7. *Energy from field energy crops – a handbook for energy producers*. [Електронний ресурс]. URL https://www.codigestion.com/fileadmin/codi/images/ENCROP/Handbook_for_energy_producers_www_version.pdf (дата звернення 15.10.2020).
8. [Features of cultivation and use of energy crops]. Available at: http://naas.gov.ua/upload/iblock/320/_%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE_2018.pdf (in Ukr.)
9. *Edgars Vigants, Girts Vigants, Ivars Veidenbergs, Dace Lauka, Krista Klavina, Dagnija Blumberga*. Analysis of energy consumption for biomass drying process // Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – 2015. – Vol. II. – p. 317-322. doi: <http://dx.doi.org/10.17770/etr2015vol2.625>.
10. *Anna Vidlund*. Sustainable production of bio-energy products in the sawmill industry. Licentiate thesis. Dept. of Chemical Engineering and Technology / Energy Processes KTH, Stockholm, Sweden. – 2004. – 57 p.
11. *Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Dae Hyun Kim, Liang Yu*. Simulation study for pneumatic conveying drying of sawdust for pellet production // Drying Technology. – 2014. – Vol. 32. – p. 1142–1156. – ISSN 0737-3937. – doi:10.1080/07373937.2014.884575.
12. *Gorohovskij A.G., Shishkina E.E., Gorohovskij A.A., Petrov M.S., Bazhenov A.A.* [Effective modes of low-temperature drying of sawn timber], [UALTU electronic archive], Available at: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3855/1/Gorokhovskiy_i_dr.pdf (in Rus.)
13. *Zaripov Sh.G, Zarinova N.Sh.* [Energy characteristic of the low-temperature drying process of larch sawn timber], [KrasGAU Bulletin]. 2013. № 11. P. 257–261. (in Rus.)
14. *Pat. CN101236048A* China, IPC B27K1/00; F26B5/04; F26B7/00. Wood drying method / Songlin YI, Yongdong ZHou – CN200810100904A; appl. 26.02.2008; pub. 06.08.2008.
15. *Kudra T.* Energy performance of convective dryer // Drying technology. – 2012. – Vol. 30. – Iss. 11–12. P. 1190 – 1198. doi.org/10.1080/07373937.2012.690803.
16. *Vasile Minea*. Efficient energy recovery with wood drying heat pumps // Drying Technology: An International Journal. – 2012. – Vol. 30:14. – p. 1630-1643. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.701261>.
17. *Krista Kļaviņa, Aivars Žandeckis, Claudio Rochas, Alvydas Zagorskis*. Low temperature drying as a solution for sustainable use of biomass // Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“. 10 April 2014, Vilnius, Lithuania, 2014. – P. 1. ISSN 2029-2341 print / ISSN 2029-2252 online.
18. *Jan-Olof Anderson*. Energy and Resource Efficiency in Convective Drying Systems in the Process Industry. Doctoral thesis. – Luleå, Sweden. – 2014. – 122 p. – ISSN 1402-1544. ISBN 978-91-7439-872-4 (print). ISBN 978-91-7439-873-1 (pdf).
19. *Trohin, A.H., Moiseiev, V.F., Telnov, I.A. and 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). – C. 36–40. – ISSN 1729-3774.
20. *Dakhnovska O. V., Cpivak O. Yu., Yefremov Ya. A.* [Experimental studies of low-temperature drying of wood waste in a chamber convective dryer], [Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences]. Vinnytsia, № 1 (91). 2015. P. 62–65. (in Ukr.)
21. *Pat. CN104930577B* China, IPC F24D3/18; F25B30/00. Double-effect heat supply device of low-temperature superconducting source heat pump – CN201510298155A; appl. 07.07.2015; pub. 10.04.2018.
22. *Buhler*. Available at: <https://www.buhlergroup.com/europe/ru/7950.htm>.
23. *Sniezshkin Yu.F., Shapar R.O.* [Heat-mass exchange technologies for pectin-containing raw materials processing], [Sik Hrup Ukraine], 2018. 228 p. ISBN 978–617–7457–69–4 (in Ukr.)

Отримано 07.10.2020

Received 07.10.2020