

ей ретура. В представленной работе приведены основные перспективные конструкции таких грануляторов. Разработанные малогабаритные аппараты вихревого взвешенного слоя с переменным по высоте сечением рабочего пространства позволяют решить ряд проблем, которые описаны в статье [14].

Литература

1. Гельперин Н.И., Девидсон И., Харрисон Д. Псевдооживление. – М.: Химия. - 1974. – 728 с.
2. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: Физматлит. - 2010. – 288 с.
3. <http://www.everychina.com/site-vortex-granulator>
4. Better product quality // Nitrogen Fertilizer Finishing Nitrogen+Syngas 319. – 2012. - pp 52 – 61
5. Guignon B., Duquenoy A., Dumoulin E. D. Fluid Bed Encapsulation of Particles: Principles and practice // Drying Technology, No. 20. – 2002. - pp. 419-447.
6. Классен П.В. Основные процессы технологии минеральных удобрений. И.Г. Гришаев. – М.: Химия. - 1990. – 304 с.
7. А.с. 1554958 СССР, МКИ B01J2/16. Устройство для сушки и гранулирования жидких материалов / Б.С. Сажин, Б.П. Лукацкий, А.А. Полевич, А.В. Акулич, В.З. Павелко (СССР). – №4167541/31–26; заявл. 26.12.1986; опубл. 07.04.1990.
8. Патент №10288 А Україна, МПК 7 B01J2/16. Спосіб одержання гранульованого продукту / Є.В. Донат, М.П. Юхименко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №93111445; заявл. 31.03.1993; надрук. 25.12.1996.
9. Патент № 82754 Україна, МПК B01J2/16(2006.01) Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення // А.Є. Артюхов, В.І. Склабинський; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – заявл. 20.07.2006; опубл. 12.05.2008, бюл. №9.
10. Патент № 99023 Україна, МПК12 B01J 2/16, B01J 2/00 Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення // А.Є. Артюхов, В.І. Склабинський; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – заявл. 13.12.2010; опубл. 10.07.2012, бюл. № 13.
11. Патент на корисну модель №93649 Україна МПК B01J2/16 (2006.01). Пристрій для одержання гранул пористої структури / Артюхов А.Є., Фурса О.С., Москаленко К.В.– Заявлено 05.05.2014; Надрук 10.10. 2014, Бюл. №19.
12. Артюхов А.Е., Ляпошенко А.А., Склабинский В.И. Инерционно-фильтрующие сепараторы для очистки отходящих газов в вихревых грануляторах // Материалы научной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании». – 2010. - 67-69 с.
13. Артюхов А.Є. Гідродинамічні чинники грануляційних пристроїв із зниженою висотою польоту гранул. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Суми. - 2009. – 181 с.
14. Artyukhov A.E. Vortical type granulators in the chemical industry // Materials of scientific conference, staff and students of SSU. – 2006. - part 2, pp. 32-33.

УДК 66.047

КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ

Мосюк М. І., канд. техн. наук, асистент., Псюк Ю. Я., магістр., Рудей І. А., магістр
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

У статті наведені результати експериментальних досліджень основних фізичних характеристик подрібненої деревини (тирси), а також дослідження кінетики і динаміки та швидкості її фільтраційного сушіння.

In the article we see results of experimental studies of basic physical characteristics chopped wood (sawdust), as well as investigation of kinetics, dynamics and speed of filtration drying.

Ключові слова: подрібнена деревина, тирса, стаціонарний шар, кінетика, динаміка, тепловий агент, фільтраційне сушіння.

Вступ. Ситуація, що склалася на сьогодні в енергетичній і екологічній сферах, змушує світорієнтуватися на широкомасштабне використання екологічно-безпечних, відновлюваних та високопродуктивних енергоресурсів. Серед відновлювальних джерел усе більшого поширення набувають енергоносії біологі-

чного походження (відходи деревообробної промисловості, гілки, тріски, відходи сільського господарства, зокрема стебла соняшника, солома та інші), з яких виготовляють гранули або брикети [1, 2]. Під час спалювання брикетів не утворюються шкідливі гази, а викиди вуглекислого газу відповідають поглинутій його кількості під час фотосинтезу. Таким чином, паливні брикет є одним з найбільш екологічних видів палива.

Для використання відходів деревообробної промисловості як палива, її необхідно брикетувати або гранулювати. Однак, вологість цих відходів та гранулометричний склад в багатьох випадках не відповідає вимогам, які ставляться до сировини технологічним регламентом. Тому сировина проходить ряд технологічних процесів зокрема: подрібнення та сушіння. Рекомендована вологість сировини передбачена технологічними вимогами процесу брикетування або гранулювання становить 6 – 12%.

В даний час подрібнену деревину сушать у барабанних сушарках, трубах сушарках та сушарках киплячого шару. Внаслідок невисокої ефективності сушіння в цих сушарках собівартість брикетів є високою, тому їх застосування в промисловості і побуті обмежене.

Аналіз джерел літератури. Одним із високоефективних методів сушіння є фільтраційне, фізична суть якого полягає у профільтовуванні теплового агента в напрямку “шар вологого матеріалу – перфорована перегородка” під дією перепаду тисків [4]. Цей метод має ряд істотних переваг у порівнянні з традиційними: тепловий агент фільтрується крізь пористу структуру матеріалу, омиває кожну частинку шару, поверхня тепломасообміну при цьому наближається до сумарної поверхні всіх частинок, що дає змогу суттєво інтенсифікувати процес в першому та другому періоді сушіння. Дійсна швидкість фільтрування теплового агента крізь пористу структуру шару є значно вищою, ніж у барабанних сушарках, сушарках киплячого шару та трубах сушарках, і відповідно, коефіцієнти тепло- й масовіддачі є значно більшими, внаслідок меншої порізності, що дає змогу використовувати низькотемпературний тепловий агент, скоротити час сушіння і відповідно енергетичні затрати та виключити винесення дрібнодисперсної фракції за межі сушильної установки. Разом із цим втрати тиску в стаціонарному шарі матеріалу під час фільтраційного сушіння є меншими, ніж під час сушіння у псевдо зрідженому шарі [4]. В роботі [5], автором досліджена кінетика фільтраційного сушіння подрібненої «енергетичної» верби та встановлено, що температура теплового агента по висоті стаціонарного шару змінюється, внаслідок нагрівання шару, що призводить до зменшення інтенсивності сушіння нижніх шарів вологих частинок. Встановлено, що швидкість сушіння є тим вищою, чим вища температура і об’ємна витрата теплового агента. Визначено коефіцієнт внутрішньої дифузії залежно від температури теплового агента під час фільтраційного сушіння подрібненої «енергетичної» верби [5]. Проте наведені в цих роботах дослідження стосуються конкретних матеріалів та режимів тепломасообміну і застосувати їх для інших матеріалів є неможливо.

Аналіз джерел літератури також показав, що кінетика сушіння подрібненої деревини на сьогодні недостатньо досліджена, тому теоретичні та експериментальні дослідження процесів висушування подрібненої деревини є актуальною задачею.

Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібненої деревини.

Експериментальна частина.

Об’єктом дослідження виступала тирса – відходи деревообробної промисловості під час розпилювання ділової деревини, кількість якої становить приблизно 30 % від отриманого пиломатеріалу. Подрібнена деревина (тирса), це подовгасті частинки неправильної форми зокрема: подовгасті, округлі призматичні, циліндричні, овальні. Деревина на 70 % складається з целюлози і геміцелюлози і 27 % лігніну. Баланс хімічних речовин становить: 50 % вуглець, 6 % водень, 44% кисень, 0,1 % азот, тому відходи деревообробної промисловості є цінною сировиною для виготовлення паливних брикетів.

Таблиця 1 – Основні характеристики частинок тирси

фракція $\times 10^{-3}$, м	0-0,315	0,315-0,63	0,63-1,25	1,25-2,5	2,5-5
$G \cdot 10^3$, кг	3,26	10,71	28,04	51,55	5,56
%, мас	3,29	10,81	28,29	52,00	5,61
	0,17	0,51	0,82	2,1	3,7

G – маса фракції, кг; %, мас – масові відсотки кожної фракції, $d_{\text{ус}}$ – усереднений діаметр фракції, м;

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості тирси

Тирса деревна	Насипна густина, кг/м ³	Вологість, %	Характерні розміри частинок, мм
Суха	120-250	6 – 12	0,17 – 3,7
Із свіжозрубаної деревини	300 – 450	50 – 100	

Початкова вологість подрібненої деревини (тирси) залежить від різних факторів зокрема пори року зрізання стовбура, ґрунтів та інших та становить 50-120 %.

Експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібненої деревини проводились на експериментальній установці та за методикою наведеною в роботі [7-9]. Нами досліджувався вплив

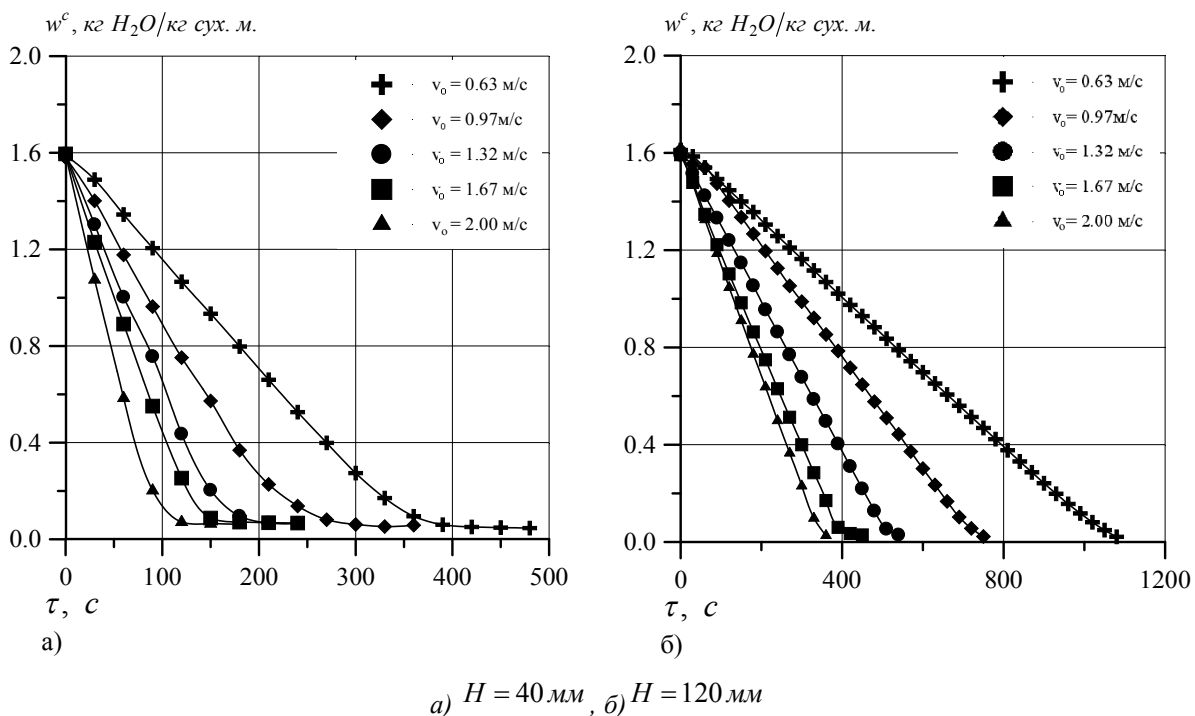
температури T , швидкості фільтрування теплового агенту v_0 і висоти шару матеріалу h на кінетику фільтраційного сушіння. Експериментальні дослідження наведені на рис. 1 у вигляді кінетичних кривих

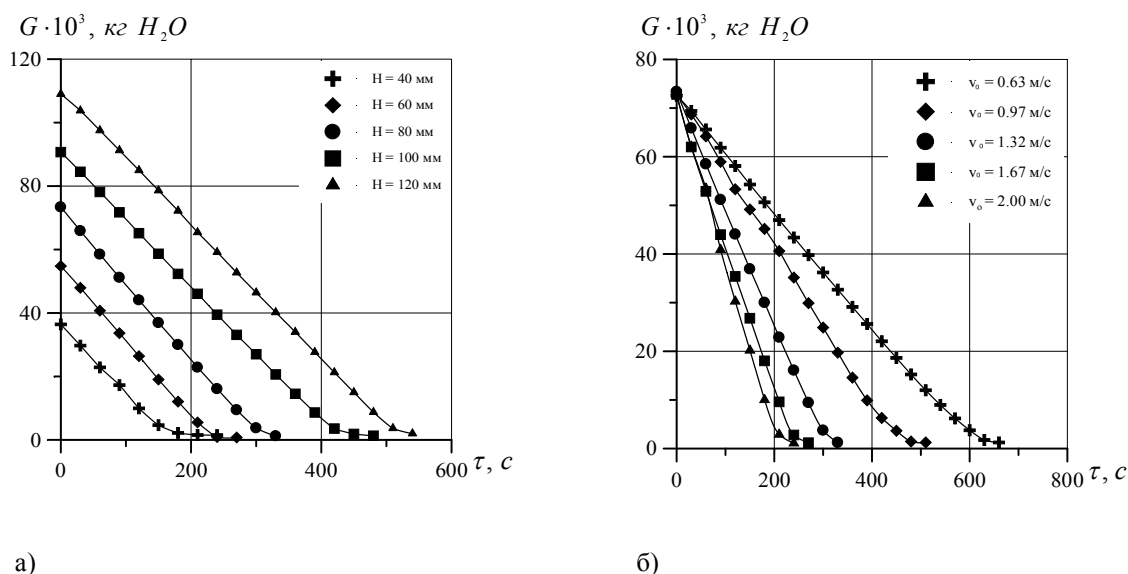
зміни вологовмісту w^c в часі τ .

З графічної залежності рис. 1 видно, що за однакової температури та швидкості фільтрування теплового агенту, тангенс кута нахилу прямолінійних ділянок кінетичних кривих зменшується, тобто чим менша висота шару матеріалу тим менший шлях фронту масоперенесення до перфорованої перегородки [8]. Аналіз графічних залежностей показує, що збільшення швидкості фільтрування теплового агенту дає змогу внести в шар більше теплоти, і відповідно випарувати більше вологи, тому тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки кінетичних кривих до осі абсцис зростає.

Аналізуючи кінетичні криві сушіння подрібненої деревини (див. рис. 1) можна зробити висновок, що фільтраційне сушіння характеризується двома основними етапами видалення вологи: періодом повного та часткового насичення теплового агенту вологою [10].

На рис. 2 наведена динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння подрібненої деревини у вигляді графічної залежності залишкової кількості вологи у шарі в часі залежно від параметрів теплового агенту та висоти шару.

Рис. 1 – Зміна вологості шару подрібненої деревини в часі ($T = 80^\circ \text{C}$)

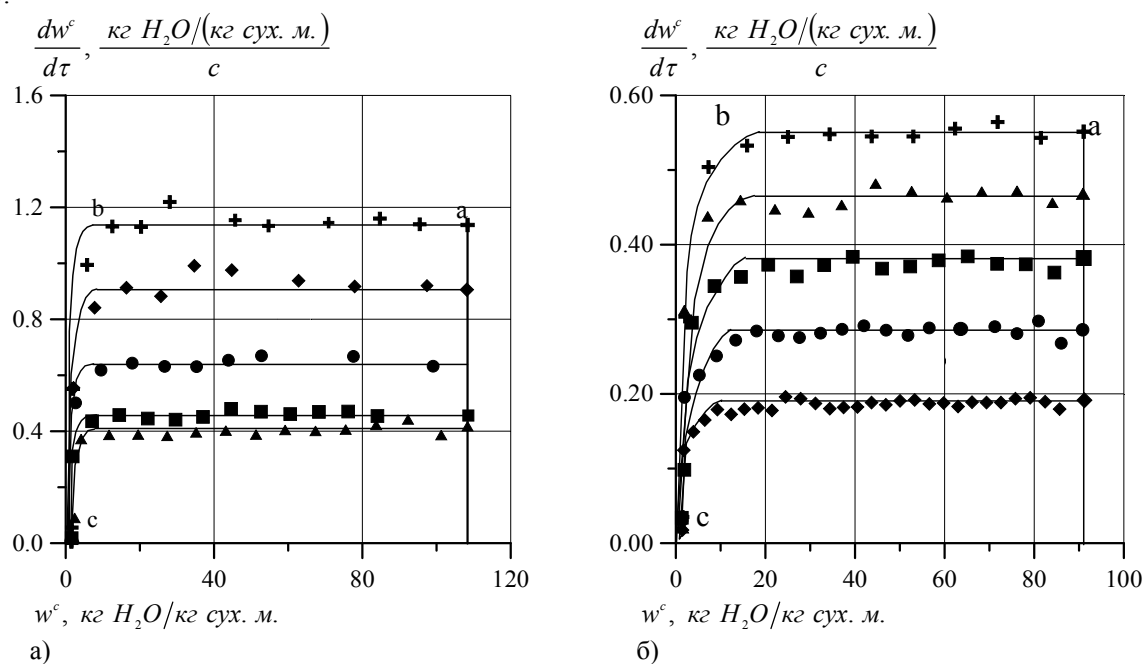


а) за різних висот шару ($v_0 = 1,32 \text{ м/с}$); б) за різної швидкості руху теплового агенту ($H = 80 \text{ мм}$).

Рис. 2 – Динаміка видалення вологи із шару матеріалу ($T = 80^\circ \text{C}$)

Аналіз рис. 2а показує, що кількість вологи, яка виноситься тепловим агентом із шару не залежить від висоти шару, про що свідчить паралельність прямолінійних ділянок кривих. На рис. 2б спостерігаємо динаміку видалення вологи яка визначається величиною сушильного потенціалу теплового агенту.

На рис. 3 показана залежність швидкості сушіння подрібненої деревини залежно від його вологовмісту.



а) за різних висот шару (40, 60, 80, 100, 120 мм) та параметрів теплового агенту ($T = 80^\circ \text{C}$, $v_0 = 1,67 \text{ м/с}$).

б) за різної швидкості руху теплового агенту (0,63, 0,97, 1,32, 1,67, 2,00 м/с) висоти шару матеріалу ($H = 80 \text{ мм}$) та температури теплового агенту ($T = 80^\circ \text{C}$).

Рис. 3 – Швидкість фільтраційного сушіння

Аналіз рис. 3а показує, що швидкість фільтраційного сушіння подрібненої деревини зростає із зменшенням висоти шару, це пояснюється тим, що зміну вологовмісту шару визначали ваговим методом в розрахунку на масу сухого матеріалу. Загальний вигляд кривих сушіння є аналогічний класичним кривим конвективного сушіння матеріалів. Однак у випадку фільтраційного сушіння фізичний зміст цих кривих має інше значення. Лінія "a – b" (рис. 3) характеризує період повного насичення теплового агента вологою, однак, сушіння тирси в цьому випадку може відбуватися як у першому, так і другому періоді сушіння. Точка "b" означає досягнення лобовою частиною фронту масообміну перфорованої перегородки. Лінія "b – c" характеризує період часткового насичення теплового агента вологою, і відповідно, зменшення висоти зони масообміну. Точка "c" означає, що вологовміст матеріалу досягнув кінцевої вологості. Як видно із рис. 3б швидкість фільтрування теплового агента змінюється в межах $v_0 = 0,63 - 2,00 \text{ м/с}$, тому швидкість сушіння також відповідно зростає 0,3 до 1,18 $\frac{\text{кг } H_2O}{(\text{кг сух. м.})/\text{с}}$, що пояснюється зростанням коефіцієнтів тепло- і масоперенесення.

Висновки. Досліджено кінетику та динаміку фільтраційного сушіння подрібненої деревини під час фільтраційного сушіння. Обґрунтовано існування двох етапів фільтраційного сушіння подрібненої деревини. Проаналізовано залежність фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента (сушильного потенціалу) і висоти шару матеріалу.

Література

1. Гелегуха Г.Г. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина 2 / Г.Г. Гелегуха, Т.А. Железна // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32. – № 4. – С. 94–100.
2. Максимів Ю. В. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі з деревної біомаси / Ю. В. Максимів // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.8. – С. 106–115.
3. Атаманюк, В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст]: монографія / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с
4. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі : автореф. дис ... канд. техн. наук : 06.01.03 / Мосюк Микола Іванович . – Львів : 2012 . – 22 с.
5. Шляхи підвищення енергоємності біопалива на основі торфу і біомаси / Д. М. Корінчук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2013. - № 761. - С.
6. Римар Т.І. Сушіння глини у нерухомому шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08. / Т.І. Римар; [НУ Львівська політехніка]. –Львів, 2008. – 19с.
7. Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепломасообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури [Текст]: Автореф.дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / І.О. Гузьова; [НУ Львівська політехніка]. –Львів: 2001, - 19 с.
8. Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов: дис...док.техн. наук: 05.17.08 / Ханьк Я.Н.–Л., 1992. – 426 с.
9. Станіславчук О.В. Сушіння пастоподібних матеріалів у нерухомому шарі [Текст]: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / О.В. Станіславчук; [НУ Львівська політехніка]. –Львів, 2007. – 20с.