

Д. П. Кіндзера, М. П. Пелех, Р. Р. Госовський, А. Р. Кіндзера  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної інженерії

## ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОЗАТРАТ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКЦІЇ

© Кіндзера Д. П., Пелех М. П., Госовський Р. Р., Кіндзера А. Р., 2016

Розглянуто методи зменшення енергетичних затрат у технологічних лініях виробництва твердого біопалива, зокрема, на стадіях підготування грубостеблової біомаси до брикетування. Для зменшення енергозатрат процесу сушіння запропоновано зневоднювати біомасу фільтраційним методом. Узагальнюючи результати кінетики, гідродинаміки процесу сушіння та розрахунку корисної різниці між затраченою енергією на сушіння сировини та її нижчою теплотворною здатністю, визначено оптимальні параметри фільтраційного сушіння такого виду рослинної сировини для виробництва паливних брикетів.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, біопаливо, біомаса, брикетування, енергетичні затрати, оптимальні параметри.

D. P. Kindzera, M. P. Pelekh, R. R. Hosovskyy, A. R. Kindzera

## REDUCING ENERGY COSTS DURING PRODUCTION OF SOLID BIOFUEL AND IMPROVING QUALITY OF PRODUCTS

© Kindzera D. P., Pelekh M. P., Hosovskyy R. R., Kindzera A. R., 2016

The article deals with the methods of reducing energy costs in the process production lines of solid biofuels, particularly, in the preparation stages of biomass. To reduce the energy consumption of the drying process, filtration method of biomass dewatering was proposed. On the basis of summarizing the results of kinetics, hydrodynamics of drying process and calculation of the difference between the useful energy spent for drying raw materials and lower calorific value, optimum filtration drying parameters of this type of plant material for the production of fuel pellets was content.

**Keywords:** renewable energy, biofuel, biomass, briquetting, energy costs, optimal parameters.

**Постановка проблеми.** В умовах дефіциту традиційних паливно-енергетичних ресурсів та в період загострення світової енергетичної кризи пріоритетним напрямом є впровадження в енергетичні баланси країн відновлювальних джерел енергії. Сьогодні увагу приділяють отриманню твердого біопалива з біомаси та впровадженню його використання у промисловій та комунальній сферах [1]. Прикладами країн, де успішно використовують енергію біомаси, є Данія, Китай, Іспанія, Великобританія, а у Фінляндії та Швеції за рахунок біомаси виробляється до 25 % теплової енергії [2].

Збільшення обсягів власних енергетичних ресурсів завдяки використанню відновлювальних джерел енергії є актуальним завданням для України. Беручи до уваги великі земельні площі, зайняті лісовими масивами та сільськогосподарськими угіддями, очевидною є перспектива виробництва твердого біопалива з рослинної сировини [3]. Рослинні залишки, значну кількість яких становить грубостеблова біомаса соняшника та кукурудзи, а також відходи лісозаготівлі (гілки) та деревообробної промисловості (тирса, тріска, кора, кускові відходи), які утворюють величезний ресурс біомаси, не завжди підлягають раціональній утилізації, однак, зважаючи на високу теплотворну здатність, можуть бути використані для отримання твердого біопалива. В Україні за останні роки

вироблено біопалива еквівалентом 38 млн т у.п./на рік [4]. Проекти заміщення природного газу твердим біопаливом активно впроваджуються в теплоенергетичному секторі України.

Основними складовими грубостеблової біомаси та деревини є целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, вміст яких забезпечує високу теплотворну здатність біопалива з такого виду сировини. Лігнін є макромолекулярною речовиною, яка міститься в клітинних стінках та в міжклітинному просторі, зв'язує целюлозу та геміцелюлозу і надає їм міцності і жорсткості. Вміст лігніну у сортах деревини коливається від 16 до 33 %, у стеблах соняшника його міститься – 20,1 % [5, 10]. Саме високий вміст лігніну у біосировині дає змогу проводити процеси брикетування без зв'язуючих речовин і отримувати при цьому брикети високої міцності. Деревинні та грубостеблові відходи є складними об'єктами для енергетичного використання, оскільки часто характеризуються значним вологовмістом (до 60 %), низькою щільністю, значними габаритними розмірами, а для виробництва твердого біопалива сировина повинна бути максимально однорідною за своїм фракційним складом та вологовмістом. Це зумовлює необхідність введення в технологічний процес виробництва твердого біопалива процесів підготовки сировини до ущільнення, а саме подрібнення та сушіння.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для подрібнення рослинної сировини у промисловості використовують подрібнювачі різних типів: дробарки, млини, різальні та рубальні машини. На процеси подрібнення припадає близько 10–20 % загальних енергозатрат технологічної лінії виробництва твердого біопалива [4]. У роботах [6; 7] подано відомості стосовно оптимального розміру частин з різного виду рослинної сировини для отримання міцних брикетів, які знаходяться в межах 1...5 мм, водночас стебла соломи для брикетування можуть досягати 60 мм.

Для висушування подрібненої рослинної сировини найчастіше використовують барабанні та стрічкові сушарки. Такі сушарки є громіздкими, енергоємними, інтенсивність сушіння в них є низькою внаслідок малих значень коефіцієнтів тепловіддачі та невеликих відносних швидкостей руху теплового агента, потребують встановлення очисного обладнання для вловлювання дрібних часток, які виносяться із тепловим агентом [8–10]. На процеси сушіння в технологічних лініях виробництва твердого біопалива припадає близько 30–40 % загальних енергозатрат, а в випадках висушування сировини високого вологовмісту – до 70 %, і в середньому на цей процес витрачається 12–20 % біопалива, що виробляється на підприємстві [4, 11].

Пресування рослинної сировини є основним етапом виробництва твердого палива, яке реалізується за допомогою шнекових та поршневих пресів, конструкції яких постійно удосконалюються. Енергозатрати процесів пресування становлять 10–30 % загальних енергозатрат технологічної лінії виробництва твердого біопалива і залежать від типу обладнання та його конструктивних особливостей, фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей матеріалів, тиску пресування і температури матеріалу в зоні ущільнення [12].

Енергетичний аналіз технологічних етапів виробництва твердого біопалива показав, що усі стадії виробництва є енергозатратними; особливо великими затратами енергії характеризуються етапи підготовки сировини до брикетування, що впливає на енергоефективність виробництва загалом та собівартість продукції. Через недостатню кількість досліджень щодо підготовки грубостеблової чи деревинної біомаси до пресування частими є перевитрати енергії під час виробництва біопалива з такого виду сировини, а відпрацьовують режими роботи обладнання безпосередньо під час виробничого процесу, часто отримуючи при цьому паливо з низькими якісними показниками. Перелічені фактори суттєво стримують розвиток виробництва біопалива в Україні. Аналіз енерговитрат технологічних стадій виготовлення твердого біопалива показав, що сьогодні виникла потреба у дослідженнях, спрямованих на зниження енергоємності процесу переробки такого виду рослинних залишків на тверде біопаливо з одночасним підвищенням якісних показників продукції.

Автори робіт [4, 11–13] описують можливі шляхи зменшення енерговитрат під час виробництва твердого біопалива з одночасним покращенням енергетичних і якісних характеристик палива. Автори роботи [11] рекомендують проводити термовологісну обробку біомаси насиченою парою за температурою 120–150 °С (після процесів подрібнення та сушіння) безпосередньо перед

подачею на пресування, що дає змогу зменшити опір деформації біомаси та активувати лігнін. Для зменшення тиску пресування, а отже, і енергозатрат на процес ущільнення рекомендується додатково нагрівати матеріал у зоні ущільнення, що інтенсифікує процес плавлення лігніну і сприяє обпаленню зовнішньої поверхні брикетів [12]. Рекомендації стосовно температурних режимів процесів ущільнення рослинної та деревинної сировини змінюються в межах 90–300 °С, оскільки залежать одночасно від кількох факторів (типу обладнання, виду сировини з врахуванням вологості та фракційного складу, тиску процесу).

Знизити енерговитрати під час виробництва твердого біопалива можна перерозподілом потужностей обладнання в технологічній лінії, основні енергетичні витрати скерувавши на мікроподрібнення матеріалу в дезінтеграторах, а не на пресування [14]. Такий метод зменшення енергозатрат є недоцільним під час виробництва брикетів з сировини, що має високу початкову вологість, оскільки отримати брикети з високими якісними показниками не вдасться.

Шляхом зниження енергозатрат може бути заміна існуючих сушарок на обладнання іншого типу та реалізація процесу сушіння за оптимальних параметрів проведення процесу. Відомо, що фільтраційне сушіння, яке реалізується під час профільтрування теплового агента крізь шар дисперсного матеріалу, є одним з високоінтенсивних методів висушування дисперсних матеріалів, яке дає змогу підвищити інтенсивність сушіння, зменшити габарити і металомісткість установок, знизити питомі затрати теплоти і електроенергії, покращити якісні показники матеріалів, тому рекомендується нами для зневоднення подрібненої рослинної сировини [15].

Метою роботи є вивчення особливостей підготування біомаси до процесів брикетування з метою зменшення енергозатрат технологічних ліній виробництва твердого біопалива та отримання брикетів високої якості.

**Виклад основного матеріалу і обговорення результатів.** У результаті подрібнення біомаси на шоківій дробарці утворилася полідисперсна суміш, яку методом просіювання було розділено на фракції і визначено вміст кожної у загальній масі: мала фракція утворена частинами 0,08–0,315 мм (12,6 %); середня 0,315–2,5 мм (55 %); велика 2,5–5,0 мм (32,4 %). Розміри частин матеріалу відповідали рекомендованим розмірам для реалізації процесів брикетування з такого виду сировини.

Для зневоднення сировини використовували фільтраційний метод, реалізовували процес за різних температур та швидкостей агенту сушіння та висот шару матеріалу. Результати досліджень наведено на рис. 1.

Оскільки під час профільтрування агента сушіння крізь матеріал забезпечується омивання кожної частинки потоком останнього, то швидкості процесів масо- та тепловіддачі є високими, що дає змогу скоротити тривалість сушіння такого типу сировини порівняно з тривалостями висушування у сушарках інших типів, що, безумовно, зменшує енергозатрати. Окрім цього, фільтраційне сушіння проводили, використовуючи тепловий агент з низьким температурним потенціалом, що дало змогу зменшити енергозатрати на нагрівання останнього. На основі проведених розрахунків енергозатрат на реалізацію процесів фільтраційного сушіння за різних параметрів агенту сушіння та висот шару матеріалу запропоновано оптимальні параметри, за яких енерговитрати є мінімальними, а саме:  $H=130$  мм;  $\omega=1,74$  м;  $t=100$  °С.

Щоби оцінити вплив дисперсного складу сировини на енергозатрати процесу фільтраційного процесу, досліджували гідродинаміку профільтрування агенту сушіння крізь шари матеріалу заввишки  $H=130$  мм, утворені, відповідно, з малих, середніх та великих фракцій. Результати досліджень наведено на рис. 2.

Значення гідравлічних опорів порівнювали за швидкості профільтрування агента сушіння  $\omega=1,6$  м. Гідравлічний опір матеріалу, сформованого з малих, середніх та великих фракцій, становив відповідно 12,0; 10 та 8 кПа. Для зменшення енергозатрат на стадії сушіння запропоновано малу фракцію сировини подавати безпосередньо на брикетування, зважаючи на незначний її вміст у загальній масі матеріалу.

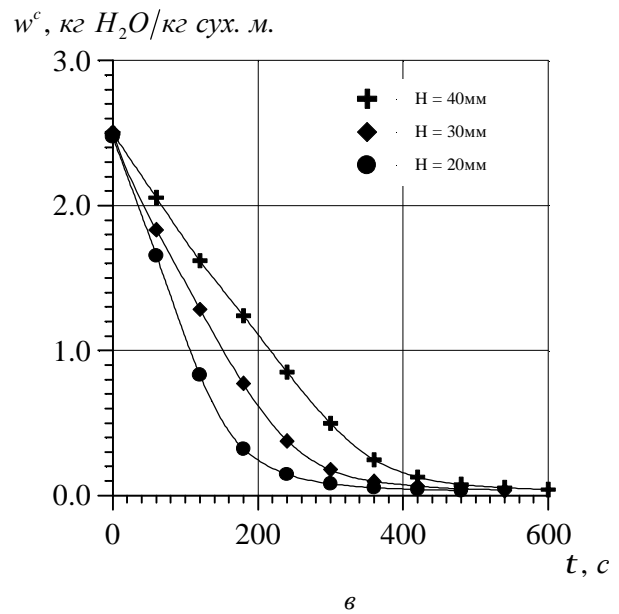
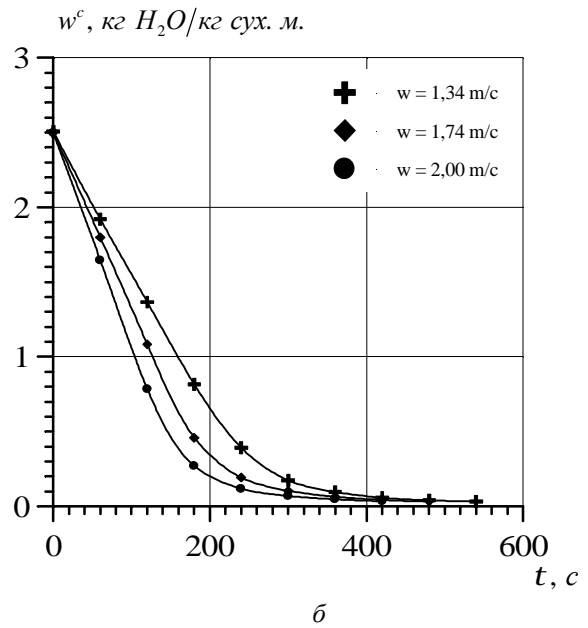
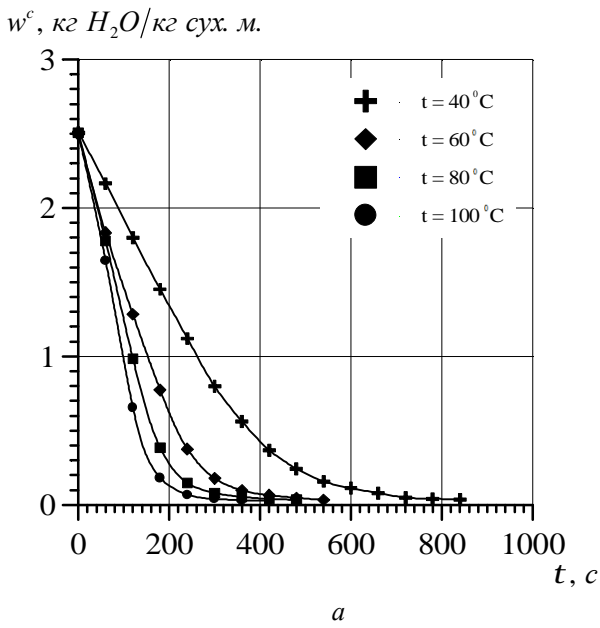


Рис. 1. Зміна вологовмісту біомаси в часі під час фільтраційного сушіння:  
 а – за різних температур ( $h = 30$  мм та  $\omega = 1,74$  м);  
 б – за різних швидкостей фільтрування теплового агента ( $t = 60$  °С та  $h = 30$  мм);  
 в – за різних висот шару ( $t = 60$  °С та  $\omega = 1,74$  м)

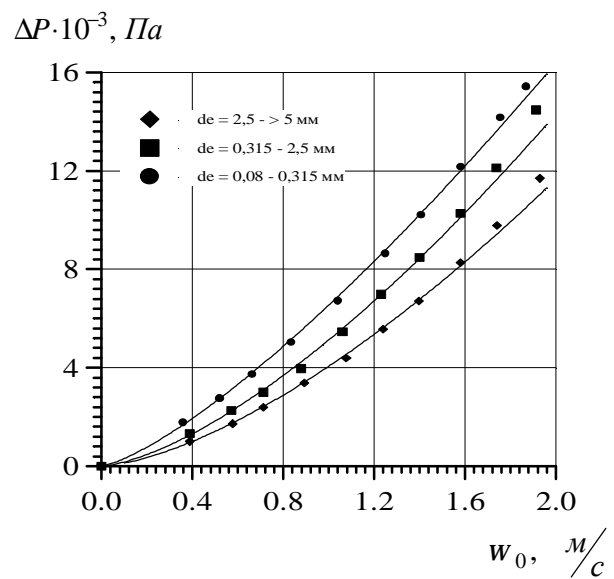


Рис. 2. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі подрібненої біомаси заввишки  $H = 130$  мм від фіктивної швидкості руху теплового агента

Часто перевитрати енергії на стадії сушіння можуть бути пов'язаними з пересушуванням продукту, тому їх можна уникнути, скоротивши тривалість сушіння до досягнення матеріалом оптимального вологовмісту. Оптимальним вологовмістом сировини можна вважати той, за якого нижча теплотворна здатність палива буде високою, а витрати енергії для його досягнення в процесі сушіння – мінімальними.

Досліджували нижчу теплотворну здатність сировини в межах зміни вологовмісту, що відповідають технологічним вимогам процесу виробництва твердого біопалива, а саме від 0,2 кг/кг до 0,04 кг/кг. За вищих вологовмістів відбувається “руйнування” виробів, зумовлене внутрішнім тиском вологи під час стиснення.

Залежність зміни нижчої теплотворної здатності від вологовмісту сировини зображено графічно на рис. 3, крива 1. Нами були проведені розрахунки затрат енергії для висушування і за результатами розрахунків побудовано графічну залежність (рис. 3, крива 2).

Нами було розраховано корисну різницю  $q_{кор}$  між затраченою енергією на сушіння матеріалу та його нижчою теплотворною здатністю залежно від їх вологовмісту. За результатами розрахунків побудовано графічну залежність (рис. 4). Крива енергетичних затрат на сушіння є параболою, що має екстремум на значенні, яке відповідає максимальній корисній різниці  $q_{кор}=8,93$  за вологовмісту  $w^c = 0,12 \text{ кг } H_2O/\text{кг сух. м.}$ , який можна рекомендувати для підготовки сировини до процесу брикетування з метою зменшення енергозатрат на стадії сушіння.

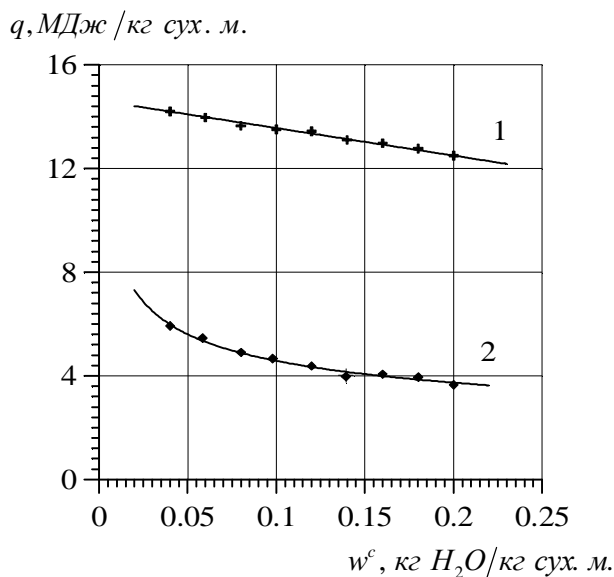


Рис. 3. Залежність нижчої теплотворної здатності (крива 1) і затрат теплоти на сушіння сировини (крива 2) від вологовмісту

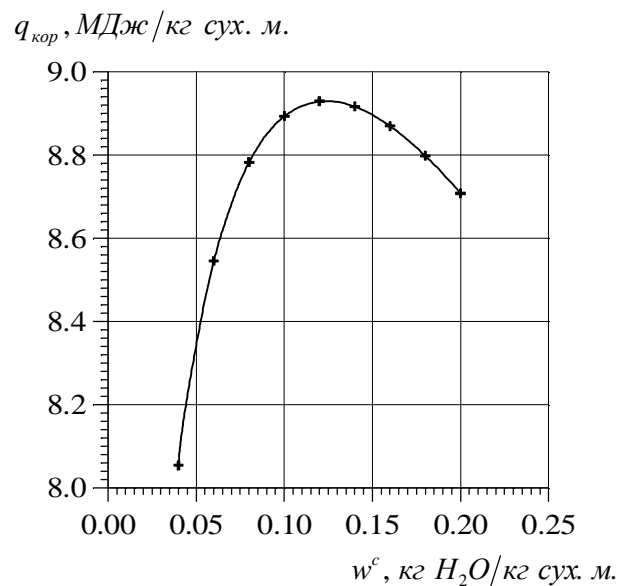


Рис. 4. Корисна різниця між нижчою теплотворною здатністю і затраченою енергією на сушіння від кінцевого вологовмісту сировини

З подрібненої та висушеної біосировини було виготовлено брикети за допомогою пресового обладнання двох типів: поршневого та шнекового пресів за тисків 10МПа. Дослідження якісних показників біопалива показало, що щільність брикетів, отриманих за допомогою шнекового пресу, була дещо вищою, що пояснюється наявністю послідовних етапів перетворення сировини у зонах шнеку. Тому для отримання брикетів вищої щільності за допомогою механічних пресів додатково підігрівали матрицю та пуансон до температури 100 °С (температуру визначали за допомогою пірометра), оскільки за такої температури починається плавлення лігніну, що сприяє зміцненню брикетів. Отримання брикетів високої міцності дає змогу знизити енерговитрати процесу пресування завдяки зменшенню кількості біосировини, що подається на повторне пресування.

**Висновки.** На основі проведених розрахунків енергозатрат на реалізацію процесів фільтраційного сушіння за різних параметрів агента сушіння та висот шару матеріалу запропоновано оптимальні параметри, за яких енерговитрати є мінімальними, а саме:  $H=130$  мм;  $\omega=1,74$  м;  $t=100$  °С. Визначена максимальна корисна різниця під час фільтраційного сушіння біомаси становить  $q_{кор}=8,93$  і досягається за вологовмісту  $w^c=0,12$  кг  $H_2O$ /кг сух. м., рекомендованого для процесу брикетування.

1. *Renewables 2011 Global Status Report [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN-21\\_GSR2011.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN-21_GSR2011.pdf).* 2. Поліщук О. В. *Розвиток альтернативної енергетики в Україні: стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / О. В. Поліщук // Сайт журналу «Енергоринок». – Режим доступу до ресурсу: <http://www.er.energy.gov.ua/doc.php?f=2582>.* 3. Гелетуха Г. Г. *Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине / Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Олейник Е. Н. // Альтернативная энергетика. – 2003. № 5. – С. 48–53.* 4. Снежкін Ю. Ф. *Енергетичний аналіз технологій виробництва твердого біопалива / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, М. М. Безгін, І. В. Степчук / Міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів обладнання харчових та хімічних виробництв» (8–12 вересня 2014 року): Одеса: ОНАХТ, 2014.* 5. Голубев В. А. *Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов: дисс. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2014. – 160 с.* 6. *Міністерство аграрної політики України: рекомендації щодо технологій збирання та використання пожнивних решток [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.minagro.com.ua](http://www.minagro.com.ua).* 7. *Интернет-ресурси: <http://press-briket.blogspot.com>, <http://brikk.info>, <http://bioesurs.com>, [bricket.com.ua](http://bricket.com.ua).* 8. Кіндзера Д. П. *Визначення оптимальних параметрів сушіння подрібнених стебел сояшника для виробництва паливних брикетів / Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Госовський Р. Р. // Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2015. – Вип. 47, Т. 2. – С. 194–198.* 9. Снежкін Ю. Ф. *Интенсификация сушки фрезерного торфа в торфобрикетном производстве / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, А. А. Хавин // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 196–198.* 10. Снежкін Ю. Ф. *Розробка енергоефективного палива на торф'яній основі / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, Л. Й. Воробйов, О. О. Харін // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 41–45.* 11. Снежкін Ю. Ф. *Аналіз енерговитрат стадії термовологісної обробки біомаси в технологіях виробництва твердого біопалива / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, М. М. Безгін, І. В. Степчук // Одес. нац. акад. харч. технологій. – О., 2015. – Вип. 47, Т. 2. – С. 198–203.* 12. Трошин А. Г. *Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы / А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев, И. А. Тельнов, С. И. Завинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/8 (45). – С. 36–41.* 13. Федоренко И. Я. *Оптимизация процесса прессования кормов в гранулы и брикеты по критерию энергетических затрат / И. Я. Федоренко, В. В. Садов // Технологии и средства механизации сельского хозяйства. Вестник АГАУ. – 2014. – № 2 (112). – С. 114–119.* 14. Бунецький В. О. *Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пеллет або брикетів // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. – 2011. – Вип. 10. – С. 328–340.* 15. Атаманюк В. М. *Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст]: монографія / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.*