

УДК 631.57: 534.014.3

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-14

**АНАЛІЗ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПОДРІБНЕННЯ
РОСЛИННИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВІДХОДІВ**

Купчук Ігор Миколайович, к.т.н., доцент
Токарчук Олексій Анатолійович, к.т.н., доцент
Гонтар Володимир Григорович, аспірант
Дідик Андрій Михайлович, студент
Вінницький національний аграрний університет

Ihor Kupchuk, PhD of Eng., Associate Professor
Oleksii Tokarchuk, PhD of Eng., Associate Professor
Volodymyr Hontar, Postgraduate
Andrii Didyk, Student
Vinnytsia National Agrarian University

Незважаючи на окремі рішення, що були схвалені Урядом України, щодо вирішення проблем ефективного та екологічно безпечного поводження з твердими відходами, зокрема тими, що накопичуються в результаті господарської діяльності агропромислового комплексу держави, практична їх імплементація задекларованих Урядом заходів, на сьогоднішній день, знаходиться на низькому рівні. Серед низки стримуючих факторів, в ролі основних можна виділити: відсутність об'єктів централізованої утилізації та економічно доступної для малих об'єктів господарювання техніко-технологічної бази переробки відходів, неефективність контролю за навколишнім середовищем та необхідної практики управління.

Разом з тим, відходи рослинного походження не завжди знаходять застосування, хоч і є цінною сировиною, яку можна використовувати, як сировину для виробництва паливних гранул, що дозволить значно зменшити енергетичну залежність підприємства. Невід'ємною частиною технологічного циклу переробки рослинних рештків на паливні брикети є підготовка біомаси до брикетування з метою забезпечення потрібних розмірів частинок.

Враховуючи стратегічну важливість формування матеріально-технічної бази для забезпечення високоефективної переробки сільськогосподарських відходів рослинного походження, а також високі енерговитрати, якими відзначається традиційна підготовка біомаси до брикетування, виникає потреба в проведенні досліджень спрямованих на вирішення проблеми енергоефективного подрібнення структурно-неоднорідних матеріалів, у тому числі з високими показниками вологовмісту, що і обумовлює актуальність статті. Таким чином, з метою досягнення високих показників ефективності процесу подрібнення відходів рослинного походження було встановлено перспективні шляхи зниження енергоемності цього процесу на основі енергетичного балансу вібраційної дробарки роторного типу та аналізу зв'язків між елементами розробленої структурної блок-схеми енергетичного балансу технологічної системи «Вібраційна-роторна дробарка – оброблюване середовище».

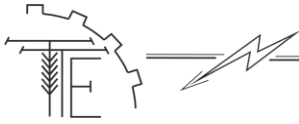
Ключові слова: подрібнення біомаси, технологічна система, енергетичний баланс, витрата потужності, опір технологічного середовища.

Ф. 8. Рис. 1. Літ. 10.

1. Постановка проблеми

До числа ключових завдань внутрішньої та зовнішньої політики України відносять збереження навколишнього середовища та його складових, а забезпечення екологічної безпеки визначене, як один із основних напрямів державної політики в сфері національної безпеки України. В цілому, державна екологічна політика спрямована на вирішення існуючих екологічних проблем, що є джерелом негативних екологічних, соціальних та економічних наслідків, а також на попередження їх виникнення й поширення тощо [1].

Ратифікація Угоди про асоціацію України з Європейським Союзом (ЄС) від 16 вересня 2014 року [2] ввела ряд зобов'язань України, серед яких особлива увага зосереджена на розробці концепції переходу до більш енергоефективного і екологічно безпечного виробництва. Одним із



стратегічно важливих аспектів її практичної реалізації є вирішення проблеми нагромадження відходів, у тому числі від виробництва продукції сільського господарства. Враховуючи ці зобов'язання, Міністерством економічного розвитку і торгівлі було розроблено «Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 року», що була схвалена та затверджена Кабінетом Міністрів України відповідним Розпорядженням № 820-р від 8 листопада 2017 р. [3], а одним із напрямків її реалізації визначено розробку матеріально-технічної бази використання сільськогосподарських відходів рослинного походження для переробки в паливні брикети.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Невід'ємними складовими частинами технологічного циклу виробництва твердого палива, зокрема паливних гранул є підготовка біомаси до брикетування з метою забезпечення потрібних розмірів та вологовмісту вихідного продукту [4]. Оскільки відходи рослинного походження відносяться до структурно-неоднорідних матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками окремих анатомічних частин (вологовміст, твердість, крихкість тощо), це знижує енергоефективність застосування того чи іншого відомого способу руйнування [5] (наприклад, ударом, стиранням, різанням, розколюванням тощо) та зумовлює потребу в застосуванні кількох стадій подрібнення із використанням відповідного обладнання. Сушіння здійснюють з метою видалення вологи, та як наслідок, збільшення крихкості матеріалу, що дозволяє зменшити енергетичні витрати на його подальше руйнування в роторних та молоткових дробарках, що традиційно застосовуються на завершальному етапі означеного виробництва [6]. Таким чином, за даними енергетичного аудиту, що проводився в різний час вітчизняними та зарубіжними вченими, було встановлено, що найбільш енергетично затратними операціями при виробництві твердого біопалива є подрібнення (до 16%), сушіння (до 70%) та ущільнення (до 17%) [7, 8].

Враховуючи стратегічну важливість формування матеріально-технічної бази для забезпечення високоефективної переробки сільськогосподарських відходів рослинного походження, а також високі енерговитрати, якими відзначається традиційна підготовка біомаси до брикетування, виникає потреба в проведенні досліджень спрямованих на вирішення проблеми енергоефективного подрібнення структурно-неоднорідних матеріалів, у тому числі з високими показниками вологовмісту, що і обумовлює **актуальність** та практичну цінність досліджень за цим напрямком.

3. Мета та завдання дослідження

Таким чином, була сформульована мета досліджень, яка полягає у формуванні підґрунтя для подальшого зниження енергоємності процесу подрібнення сільськогосподарських відходів рослинного походження шляхом розробки структурної блок-схеми енергетичного балансу технологічної системи «Вібраційна роторна дробарка – оброблюване середовище» та аналізу її внутрішньо-системних залежностей та зв'язків.

4. Матеріали і методи

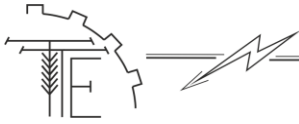
Розробка структурної блок-схеми енергетичного балансу технологічної системи проводилася із застосуванням методів узагальнення та системного підходу [9], ґрунтуючись на основних положеннях класичної теорії механічних коливань, теорії електроприводу, законів теоретичної механіки, теорії вібраційного подрібнення.

5. Викладення основного матеріалу

Ґрунтуючись на результатах досліджень вітчизняних [5, 6, 7, 8] та зарубіжних вчених [10] працюючих в галузі подрібнення сільськогосподарських матеріалів, на базі лабораторії кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету було розроблено структурну блок-схему енергетичного балансу технологічної системи «Вібраційна роторна дробарка – об'єкт обробки» (рис. 1).

Серед основних складових енергетичних параметрів технологічної до числа найбільш важливих, що визначають загальну енергоефективність перебігу технологічного процесу у вібраційному полі можна відмітити наступні:

- робота змушуючих сил або моментів;
- робота внутрішніх сил опору системи.



Потужність, яка витрачається безпосередньо на здійснення робочого процесу виражається в сумарній енергії, що передається робочому середовищу від виконавчих органів машини та може бути визначена із балансу потужності (рис. 1), представленого у вигляді:

$$N_{PS} = N_{KO} + N_P, \quad (1)$$

де N_{PS} – сумарна потужність, яку споживає електродвигун дробарки від мережі, кВт; N_{KO} – енергія, яка витрачається на подолання сил корисного опору технологічної системи, кВт; N_P – енергія, що витрачається на процес подрібнення, кВт.

Потужність, що постачається з електромережі до електродвигуна можна знайти використовуючи вираз [5, 10]:

$$N_{PS} = 3UI\cos\beta, \quad (2)$$

де U – величина напруги в мережі, В; I – сила струму, А; $\cos\beta$ – коефіцієнт потужності, що залежить від коефіцієнта завантаженості двигуна β та визначається співвідношенням моменту опору до крутного моменту на валу електродвигуна [8]:

$$\beta = \frac{M_0}{M_{кр}}. \quad (3)$$

Потужність корисного опору витрачається для подолання внутрішніх сил, які складаються із сил реактивного та дисипативного опору, що протидіють рухові виконавчих органів вібраційної технологічної машини, а також компенсації інших енергетичних втрат структурними елементами привода машини:

$$N_{KO} = N_E + N_D + N_{RO} + N_{DO}, \quad (4)$$

де N_E – втрати потужності в електродвигуні, кВт; N_D – втрати потужності в приводі, кВт; N_{RO}, N_{DO} – потужність, відповідно, що витрачається для подолання реактивних опорів та компенсацію дисипаційних втрат.

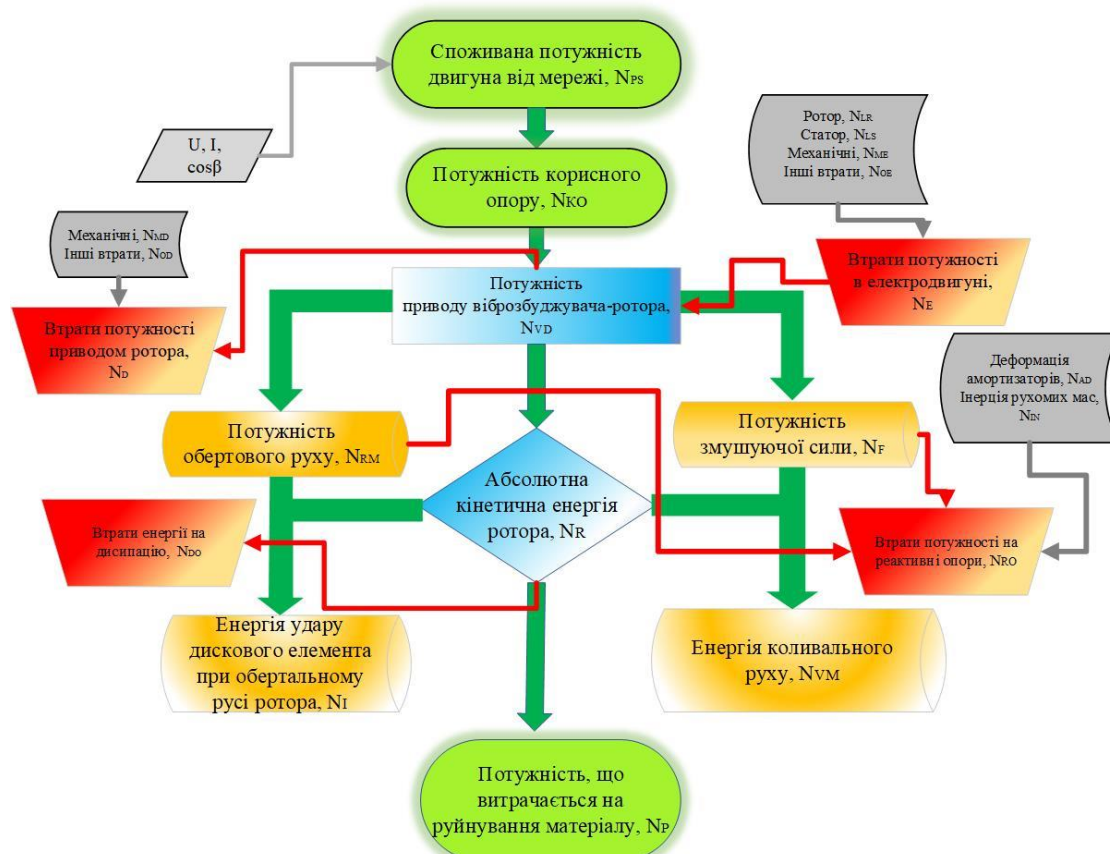
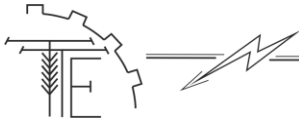


Рис. 1. Енергетичний баланс технологічної системи
«Вібраційна роторна дробарка – об'єкт обробки»

Втрати потужності в електродвигуні (N_E) складаються із різного роду неповоротних втрат енергії електричного та електромеханічного характеру та можуть бути виражені у вигляді рівняння:

$$N_E = N_{LR} + N_{LS} + N_{ME} + N_{OE}, \quad (5)$$



де N_{LR} , N_{LS} – відповідно, втрати в роторі та статорі електродвигуна, кВт; N_{ME} – механічні втрати на приведення в рух обертових частин електродвигуна (тертя, інерція тощо), кВт; N_{OE} – інші експлуатаційні втрати електродвигуна (до 5 % від N_{PS}) [10].

До втрат потужності в приводі (N_D) можна віднести механічні втрати (N_{MD}) на подолання сил інерції та тертя між рухомими деталями приводу, а також додаткові неповоротні втрати енергії N_{OD} (до 5 % від N_{PS}). Приведення в обертовий та коливальний рух виконавчих органів та складових частин потребує потужності, частина якої втрачається при подоланні реактивного опору середовища та компенсацію втрат механічного та електромеханічного характеру з одночасною трансформацією в інші форми (тепло, кінетична енергія пружин тощо):

$$N_{DV} = N_F + N_{RM} + N_D + N_E + N_{RO}, \quad (6)$$

де N_{DV} – потужність приводу вібробудувача-ротора, кВт; N_F – потужність змушуючої сили, що є головним джерелом генерування вимушених коливань технологічної системи, кВт; N_{RM} – потужність на роторі (обертальна складова), кВт. При цьому, з урахуванням енергетичних втрат (N_D , N_E , N_{RO}) системи, виконавчий орган машини (ротор) набуває кінетичної енергії від обертального та коливального руху, яка після часткового розсіювання в технологічному середовищі (дисипації) витрачається на процес подрібнення:

$$\begin{cases} N_R = [N_F + N_{RM}] - N_{DO} \\ N_{Pf} = N_I + N_{VM} \\ N_R \cong N_{Pf} \\ N_R \geq N_{Pmin} \end{cases}, \quad (7)$$

де N_R – абсолютна кінетична енергія ротора, Дж. N_I , N_{VM} – відповідно енергія удару та знакозмінних навантажень, що фактично надається матеріалу, Дж; N_{Pf} – повна фактична енергія, що надається матеріалу, Дж; N_{Pmin} – теоретична енергія руйнування матеріалу, Дж; $N_R \geq N_{Pmin}$ – умова подрібнення.

Потужність, яка витрачається безпосередньо на руйнування матеріалу:

$$N_P = 2,7UI \cos \left(\frac{M_0}{M_{кр}} \right) - [N_{LR} + N_{LS} + N_{ME} + N_{MD} + N_{RO} + N_{DO}]. \quad (8)$$

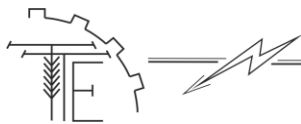
6. Висновки та перспективи подальших досліджень

Таким чином, за результатами проведених досліджень було розроблено структурну блок-схему енергетичного балансу технологічної системи «Вібраційна роторна дробарка – оброблюване середовище», на якій відображені основні складові енерговитрат та зв'язки між ними, що характерні для перебігу технологічного процесу подрібнення структурно-неоднорідних рослинних матеріалів, зокрема сільськогосподарських відходів. Подальший аналіз рівнянь балансу дозволяє зробити висновки, що зменшення енергоємності процесу технологічної системи можна досягти за рахунок:

- оптимізації дисипативних втрат потужності модернізацією конструктивних елементів машини з вибором найбільш доцільних способів силової дії на матеріал;
- зменшення реактивного опору середовища створенням умов для більш ефективного розділення повітряно-продуктового шару та своєчасної організованої евакуації готового продукту із робочої зони;
- зменшення механічних втрат потужності на подолання сил та моментів інерції під час приведення в обертовий рух ротора машини використанням віброприводів зі змінним ексцентриситетом.

Список використаних джерел

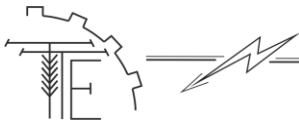
1. Матус С. А., Левіна Г. М., Карпюк Т. С., Денищик О. Ю. Аналітичний звіт «Базове дослідження стану та напрямів розвитку екологічної політики України та перспектив посилення участі організацій громадянського суспільства у розробці та впровадженні політик, дружніх до довкілля (період 2018-січень 2019)». Підготовлено на замовлення Міжнародного фонду «Відродження». Київ, 2019. 117 с.
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, від 27.06.2014 р. (ратифікована із Заявою Законом України від 16.09.2014 р. № 1678- VII). URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011/paran81#n81



3. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80%80> Управління відходами. Веб-сайт Міністерства екології та природних
4. Тимчак В. С. Ефективність інновацій комплексного використання відходів харчової промисловості : дис. ... канд. екон. наук : 08.00.03 / Житомирський національний агроекологічний університет. Житомир, 2016. 227 с.
5. Купчук І. М. Обґрунтування технологічної схеми та конструктивної реалізації вібраційного подрібнення сировини спиртового виробництва : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Вінницький національний аграрний університет. Вінниця, 2017. 227 с.
6. Kupchuk I. M., Solona O. V., Derevenko I. A., Tverdokhlib I. V. Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher. *Inmateh – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 55, No. 2. P. 111–118.
7. Нанка О.В. Напрямки підвищення ефективності процесу подрібнення зернових кормів. *Конструювання, виробництво, експлуатація сільськогосподарських машин*. 2015. Вип.45, ч. II. С. 152–157.
8. Нанка О. В., Бойко І. Г. Шляхи зниження енергоємності подрібнення зернових кормів та підвищення якості подрібнення. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. Збірник наукових праць БНАУ*. Біла Церква, 2012. Вип. 7. С. 55–58.
9. Гунько І. В., Галушак О. О., Кравець С. М. Аналіз технологічних систем. Обґрунтування інженерних рішень: навч. посіб. *Вінниця : БНАУ*, 2019. 216 с. ISBN 966-8271-77-7.
10. Kosse V., Mathew J. Design of hammer mills for optimum performance. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*. 2017. Vol. 215. P. 87–94.

References

- [1] М а т
- [2] Ughoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym Spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony, vid 27.06.2014 S (ratyfikovana iz Zaiavoiu Zakonom Ukrainy vid 16.09.2014 r. № 1678- VII) [Association Agreement between Ukraine, of the one part, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, of the other part, of June 27, 2014 (ratified by the Declaration of the Law of Ukraine of September 16, 2014) № 1678- VII]. zakon2.rada.gov.ua. Retrieved from http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011/paran81#n81 [in Ukrainian].
- [3] Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 08.11.2017 r. № 820-r. «Natsionalna stratehiia upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku» [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 8, 2017 № 820-r. «National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030»]. zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80%80> [in Ukrainian].
- [4] Tymchak, V. S. (2016). Efektyvnist innovatsii kompleksnoho vykorystannia vidkhodiv kharchovoi p
- [5] Kupchuk, I.M. (2017). Obgruntuvannia tekhnolohichnoi skhemy ta konstruktyvnoi realizatsii vibratsiinoho podribnennia syrovyny spyrtovoho vyrobnytstva [Substantiation of the technological scheme and constructive realization of vibration crushing of raw materials of alcohol production]. S
- [6] Kupchuk, I.M., Solona, O.V., Derevenko, I.A. & Tverdokhlib, I.V. (2018). Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher. *Inmateh – Agricultural Engineering*, 55, 111-118 [in English].
- [7] Nanka, O.V. (2015). Napriamky pidvyshchennia efektyvnosti protsesu podribnennia zernovykh kormiv. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo, ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn [Directions for improving the efficiency of the process of grinding grain feed]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo, ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, manufacture, operation of agricultural machinery*, 2, 152-157 [in Ukrainian].
- [8] Nanka, O.V & Boiko, I.H. (2012). Shliakhy znyzhennia enerhoiemnosti podribnennia zernovykh kormiv ta pidvyshchennia yakosti podribnennia [Ways to reduce the energy consumption of grinding grain feed and improve the quality of grinding]. *Tekhnolohiia vyrobnytstva i pererobky produktii tvarynnnytstva. Zbirnyk naukovykh prats BNAU – Technology of production and processing of livestock products*. Z



- Collection of scientific works of BNAU, 7, 55-58 [in Ukrainian].
- [9] Hunko, I.V., Halushchak, O.O. & Kravets, S.M. (2019). *Analiz tekhnologichnykh system. Obgruntuvannia inzhenernykh risheh: navch. posib [Analysis of technological systems. Substantiation of engineering decisions : textbook]*. Vinnytsia : VNAU. 216 p. ISBN 966-8271-77-7. [In Ukrainian].
- [10] Kosse, V. & Mathew, J. (2017). Design of hammer mills for optimum performance. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, 215, 87-94 [in English].

АНАЛИЗ БАЛАНСА МОЩНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

Несмотря на некоторые меры, которые были одобрены Правительством Украины, по решению проблем эффективного и экологически безопасного обращения с твердыми отходами, в частности с теми, которые накапливаются в результате хозяйственной деятельности агропромышленного комплекса страны, практическая имплементация задекларированных Правительством мер, на сегодняшний день на низком уровне. Среди ряда сдерживающих факторов, в качестве основных можно выделить: отсутствие объектов централизованной утилизации и экономически доступной для малых объектов хозяйствования технико-технологической базы переработки отходов, неэффективность контроля за окружающей средой и необходимой практики управления.

Вместе с тем, отходы растительного происхождения не всегда находят применение, хотя и являются ценным сырьем, которое можно использовать в качестве сырья для производства топливных гранул, что позволит значительно уменьшить энергетическую зависимость предприятия. Неотъемлемой частью технологического цикла переработки растительных отходов на топливные брикеты является подготовка биомассы к брикетированию с целью обеспечения требуемых размеров частиц.

Учитывая стратегическую важность формирования материально-технической базы для обеспечения высокоэффективной переработки сельскохозяйственных отходов растительного происхождения, а также высокие энергозатраты, которыми отмечается традиционная подготовка биомассы к брикетированию, возникает потребность в проведении исследований направленных на решение проблемы энергоэффективного измельчения структурно-неоднородных материалов, в том числе с высокими показателями влагосодержания, что и обуславливает актуальность статьи.

Таким образом, с целью достижения высоких показателей эффективности процесса измельчения отходов растительного происхождения было установлено перспективные пути снижения энергоемкости этого процесса на основе энергетического баланса вибрационной дробилки роторного типа и анализа связей между элементами разработанной структурной блок-схемы энергетического баланса технологической системы «Вибрационная-роторная дробилка - обрабатываемую среду».

Ключевые слова: измельчение биомассы, технологическая система, энергетический баланс, расход мощности, сопротивление технологической среды.

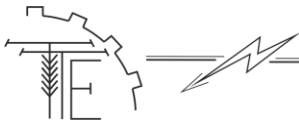
Ф. 8. Рис. 1. Лит. 10.

ANALYSIS OF THE POWER BALANCE OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR GRINDING AGRICULTURAL PLANT WASTE

Despite some decisions approved by the Government of Ukraine to address the problems of efficient and environmentally sound solid waste management, in particular those that accumulate as a result of economic activity of the agro-industrial complex of the state, their practical implementation of measures declared by the Government is currently low. levels. Among a number of deterrents, the main ones include: lack of centralized recycling facilities and economically accessible for small facilities technical and technological base of waste processing, ineffective environmental control and the necessary management practices.

However, vegetable waste is not always used, although it is a valuable raw material that can be used as a raw material for the production of fuel pellets, which will significantly reduce the energy dependence of the enterprise. An integral part of the technological cycle of processing plant residues into fuel briquettes is the preparation of biomass for briquetting in order to ensure the required particle size.

Given the strategic importance of the formation of material and technical base to ensure highly efficient processing of agricultural waste of plant origin, as well as high energy consumption, which marks the traditional preparation of biomass for briquetting, there is a need for research to solve the problem of energy efficient grinding of structurally heterogeneous materials. high moisture content, which determines the



relevance of the article. Thus, in order to achieve high efficiency of the process of grinding waste of plant origin, promising ways to reduce the energy consumption of this process based on the energy balance of the vibratory crusher rotor type and analysis of relationships between elements of the structural block diagram of the energy balance of the technological system "Vibration-rotor crusher - the processed environment".

Key words: biomass grinding, technological system, energy balance, power consumption, resistance of technological environment.

F. 8. Fig. 1. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Купчук Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Токарчук Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологічні процеси та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: tokarchuk@vsau.vin.ua).

Гонтар Володимир Григорович – аспірант за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380683260329, bulbashka31@gmail.com).

Дідик Андрій Михайлович – студент магістратури за спеціальністю 208 «Агроінженерія» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380972830537, anddidyk99@gmail.com).

Купчук Игорь Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Токарчук Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и оборудование перерабатывающих и пищевых производств» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: tokarchuk@vsau.vin.ua).

Гонтар Владимир Григорьевич – аспирант по специальности 133 «Отраслевое машиностроение» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380683260329, bulbashka31@gmail.com).

Дидик Андрей Михайлович – студент магистратуры по специальности 208 «Агроинженерия» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380972830537, anddidyk99@gmail.com).

Ihor Kupchuk – Ph.D, Senior Lecturer of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380978173992, kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Oleksii Tokarchuk – PhD, Associate Professor of the Department of "Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: tokarchuk@vsau.vin.ua).

Volodymyr Hontar – postgraduate in specialty 133 «Sectoral Mechanical Engineering» of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380683260329, bulbashka31@gmail.com).

Andrii Didyk – Master's student majoring in 208 "Agroengineering" of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380972830537, anddidyk99@gmail.com).