

Мобільні і стаціонарні енергозасоби та їх елементи Mobile and stationary power units and their elements



УДК 621.891

Математичне моделювання трибологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах

В.А. Войтов, Б.М. Цимбал

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (м. Харків, Україна), ndch_khntusg@ukr.net

В статті представлено аналіз методів і моделей процесів тертя та зношування при абразивному та корозійно-механічному зношуванні. Приведено математичне моделювання трибологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах. Отримано математичну модель залежності загальної швидкості зношування від швидкості зношування під навантаженням, швидкості зношування від негативного впливу абразиву та рівню активної кислотності середовища. Встановлено, що найбільший вплив на швидкість зношування має рівень активної кислотності рН та вміст абразивних частинок у рослинній сировині для виробництва паливних брикетів.

Ключові слова: математичне моделювання, абразивність, швидкість зношування, сумісні матеріали, екструдер, абразивність, кислотність, лужність.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. В Україні та в Світі виробництво твердого палива з рослинної сировини, яка є відновлювальним джерелом енергії, є перспективним напрямком.

Для виробництва твердого палива використовуються рослинні відходи сільськогосподарського та лісного виробництва. З цієї сировини отримують тверде паливо шляхом пресування шнековим пресом. В зв'язку з тим, що рослинна сировина у своєму вмісті має значний рівень абразивності та кислотності, який призводить до корозійно-абразивного зношування шнека та філь'єр екструдера, збільшення ресурсу шнека та філь'єр, підвищення зносостійкості екструдерів для виробництва твердого палива є перспективним. Тому математичне моделювання трибологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах є актуальним завданням.

Дослідження виконувались у рамках «Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 роки»,

затвердженою постановою Кабінета Міністрів України №243, від 1 березня 2010 р.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі авторів [1] представлені моделі кінетики зношування нафтохімічного обладнання, яке схильне до корозії. Вони характеризують залежність швидкості зношування тільки від температури та тиску при різних агрегатних станах середовищ, але не враховують абразивне зношування та активну кислотність середовища.

В роботі [2], яка досліджує довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні, одержано математичну модель корозійної стійкості металів і сплавів у розчинах хлориду натрію залежно від його концентрації. Проведені дослідження дозволили на базі даних електрохімічних вимірювань прогнозувати кавітаційну стійкість матеріалів, тобто встановити взаємозв'язок між корозійною $\Delta V_{кор.}$ та кавітаційною зносостійкістю $\Delta V_{заг.}$:

$$\Delta V_{заг.} = C \Delta V_{кор.}^n, \quad (1)$$

де C і n – емпіричні коефіцієнти.

Модель описує багатоциклове поверхневе корозійно-втомне руйнування при впливі корозії на сумарний механо-хімічний знос, але не враховує негативний вплив абразивних часток у

сировині та сумісність матеріалів, з яких виготовлені трібосистеми.

Авторами робіт [3-5] була змодельована залежність корозійного зношування арматури залізобетонного елемента від інкубаційного періоду та концентрації хлоридів. Ці моделі є винятковим випадком та не є універсальними, бо враховують дію тільки хлоридів.

В роботі [6] розглянута модель корозійного зношування виду:

$$\frac{d\delta}{dt} = V_0 + m\sigma_u, \quad (2)$$

де δ – глибина корозійного зношування; t – час; V_0 – швидкість корозії ненапруженого металу; m – коефіцієнт, який враховує вплив напруженого стану на швидкість корозії; σ_u – інтенсивність напружень.

Також існує аналогічна модель [7], яка враховує вплив напруження на швидкість електрохімічної корозії.

Ці моделі не враховують ряд факторів, а саме негативну дію абразивних частинок та зміну середовища.

Модель, яка відображена в роботі [8] характеризує величину швидкості корозійно-механічного зношування, яка лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем, але не враховує абразивність технологічного середовища.

Кузьменко А.Г., Білокур А.П. та Вишневецький О.А. запропонували в роботі [9] модель інтенсивності лінійного зношування від основних факторів, включаючи розмір абразивних частинок, але авторами не враховується твердість абразивних частинок.

Основними чинниками, що впливають на знос конвеєра на думку авторів, є питомий тиск на нього та абразивність сировини, що представлено у вигляді математичної моделі в роботі [10], але вона не враховує середовище роботи конвеєру.

Математична модель, яка запропонована в роботі [11], описує міграцію продуктів корозії, враховує кінетику швидкості корозії сталей від розчинності оксиду заліза Fe_2O_3 при заданих рН, температуру і коефіцієнт масопереносу. Ця модель не враховує дію абразивності нерозчинних оксидів заліза.

Модель абразивного зношування, яка представлена в роботі [12], характеризує процес, при якому глибина проникнення абразивного середовища залежить від геометрії трібоелемента, прикладеного нормального навантаження, а також механічних властивостей матеріалів трібоелементів.

Автори роботи [13] розглядають загальне зношування як суму негативного впливу корозії матеріалу та механічної дії зовнішніх сил і не враховує дію абразивних часток.

Моделювання процесів протікання крапкової корозії авторам роботи [14] дозволило отримати модель, яка описує швидкість зношування від рівня активної кислотності рН, швидкість реакції під дією різниці потенціалів середовища та трібоелементів.

Мета досліджень – розробити математичну модель, корозійно-абразивного зношування поверхонь тертя модельних трібосистем екструдера та оцінити вплив негативних факторів на швидкість зношування.

Викладення основного матеріалу. Під час експлуатації екструдерів відбувається складний процес корозійно-абразивного зношування. При цьому загальна швидкість зношування буде залежати від швидкості ковзання, навантаження, швидкості зношування під негативним впливом абразиву та рівню активної кислотності середовища, шорсткості. Загальна залежність від перерахованих факторів буде мати вигляд:

$$I_{заг.} = I_{сер.} + I_{абр.} + I_{шор.}, \quad \text{мкм/год}, \quad (3)$$

де $I_{сер.}$ – швидкість зношування під дією середовища, мкм/год; $I_{абр.}$ – швидкість зношування під дією абразиву, мкм/год; $I_{шор.}$ – швидкість зношування під дією шорсткості, навантаження та швидкості ковзання, мкм/год.

Рослинна сировина з якої виробляються паливні брикети має певний рівень активної кислотності рН та активної лужності рОН. Активна кислотність рН сировини характеризує силу водню та означає концентрацію іонів водню (H^+), тобто термодинамічну активність іонів гідроксонія. Активна лужність рОН характеризує силу гідроксид-іонів. В нейтральному середовищі концентрації іонів водню (H^+) і гідроксид-іонів (OH^-) однакові і складають 10^{-7} моль/л, тобто середовище має нейтральний вплив на процес зношування. При додаванні до води кислоти сила іонів водню збільшується, а сила гідроксид-іонів відповідно зменшується. При додаванні луги - навпаки, зростає сила гідроксид-іонів, а сила іонів водню зменшується. Коли (H^+) > (OH^-) розчин є кислотним, а при (OH^-) > (H^+) – лужним [15]. З урахуванням параметра, який враховує структуру сполучених матеріалів у трібосистемі та їх сумісність між собою $\alpha_{вт}$, 1/м, [16] швидкість зношування під дією середовища буде мати вид:

$$I_{сер.} = Q(pH - pOH)^2 = Q[pH - (14 - pH)^2] = Q(2pH - 14)^2, \quad \text{м/с}, \quad (4)$$

де Q – коефіцієнт який враховує сумісність матеріалів має вигляд:

$$Q = K_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad (5)$$

де K_1 – коефіцієнт пропорційності для середовища; α_1 – сумісність базових матеріалів у трібосистемі, 1/м; α_2 – сумісність підібраних матеріалів у трібосистемі, 1/м.

Рослинна сировина з якої виробляються паливні брикети має певний вміст абразивних частинок. Для оцінки форми твердих часточок з врахуванням радіусів контактних поверхонь автором роботи [17] було запропоновано критерій названий коефіцієнтом форми абразивної частинки:

$$K_a = \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(r_i)}, \quad (6)$$

де $M(n_i)$, $M(D_i - d_i)$ та $M(r_i)$ – математичне очікування відповідно для числа вершин, різницю діаметрів окружностей, описаних довкола контуру та вписаної в контур зерна та радіусів при вершині одиничного виступу.

Здатність абразивних часточок впроваджуватися в поверхневий шар та руйнувати його при русі наближено оцінюється по відношенню твердості абразиву H_a та випробуваного матеріалу H :

$$K_T = \frac{H_a}{H}, \quad (7)$$

Негативний вплив абразиву на швидкість зношування оцінюється за допомогою виразу:

$$I_{абр.} = K_2 \cdot K_a \cdot K_T \cdot A_{абр.}, \quad (8)$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності для абразивного зношування; $A_{абр.}$ – абразивність сировини, кг/м³.

Швидкість зношування в залежності від шорсткості Ra , навантаження N та швидкості ковзання ϑ розраховується за формулою:

$$I_{шор.} = K_{шор.} \cdot \vartheta \cdot N, \quad (9)$$

де $K_{шор.}$ – коефіцієнт шорсткості, який враховує шорсткість поверхонь матеріалу розраховується за формулою:

$$K_{шор.} = K_3 \cdot \frac{Ra_n}{Ra_b}, \quad (10)$$

де K_3 – коефіцієнт пропорційності для шорсткості трибоелементів; Ra_b – шорсткість базового трибоелемента; Ra_n – шорсткість підібраного трибоелемента.

Загальна швидкість зношування прийме вид:

$$I_{заг.} = Q \cdot (2pH - 14)^2 + K_2 \cdot K_a \cdot K_T \cdot A_{абр.} + K_{шор.} \cdot \vartheta \cdot N, \text{ м/с} \quad (11)$$

На підставі отриманого виразу (11) проведено моделювання зміни швидкості зношування трібосистем від різних вхідних факторів, рис. 1 - 2.

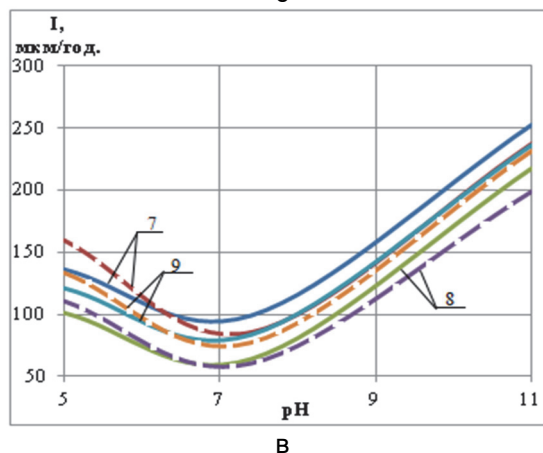
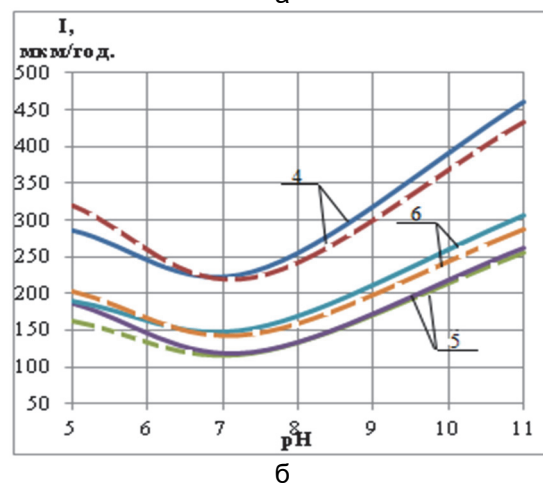
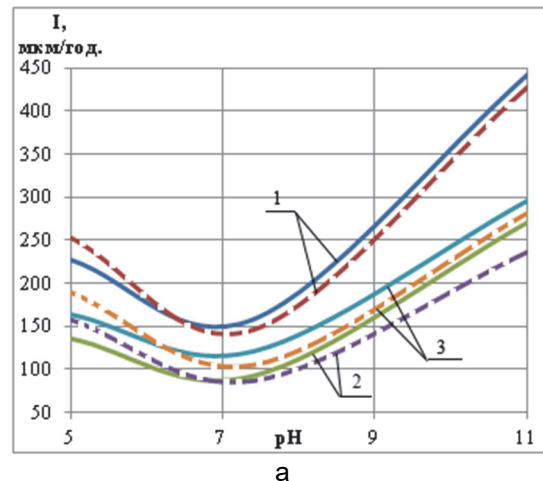


Рис. 1. Теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування трібосистем від рівня активної кислотності при постійній абразивності та навантаженню:

----- розрахунок; _____ експеримент;
 а) 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2; б) 4 – сталь 40Х та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40Х10С2 та чавун ЧХ28; в) 7 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40Х10С2 та чавун ЧХ32

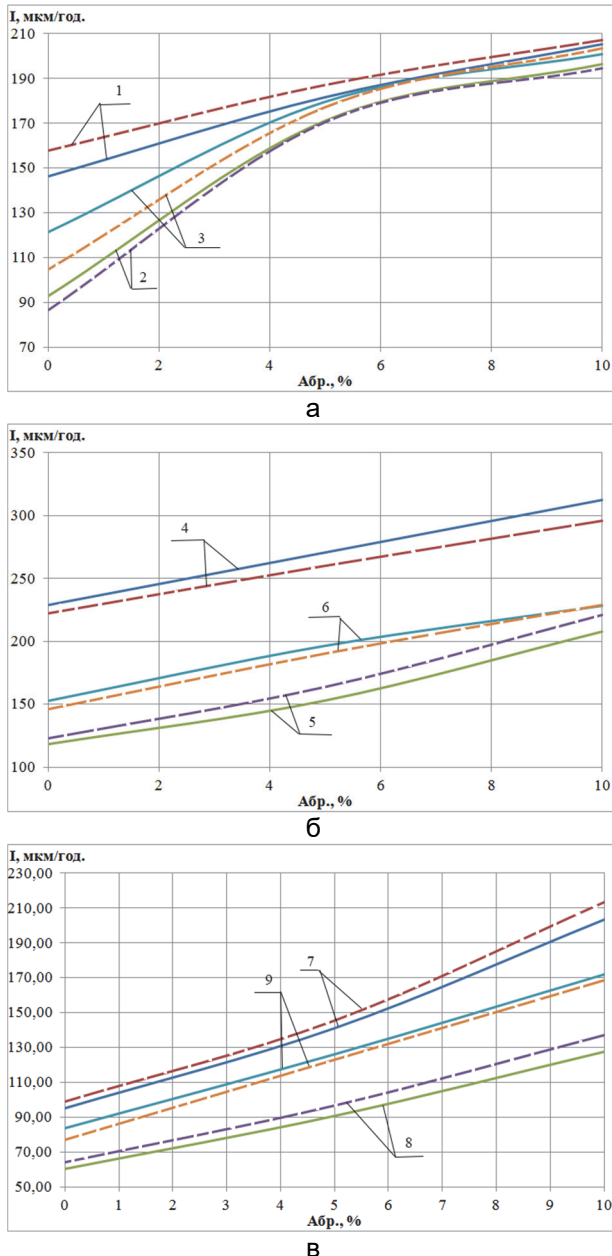


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування трібосистем від абразивності при постійній активній кислотності та навантаженню:

----- розрахунок; _____ експеримент;
 а) 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2; б) 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10С2 та чавун ЧХ28; в) 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10С2 та чавун ЧХ32

Обговорення результатів. Проведене математичне моделювання впливу активної кислотності на швидкість зношування дозволяє стверджувати, що лужне середовище викликає

більшу швидкість зношування, ніж кислотне. Мінімальне значення швидкості зношування притаманне нейтральному середовищу, яке дорівнює рН 7. Це дозволяє зробити висновок, що при просуванні рослинної сировини необхідно робити аналіз на рН та, додаючи луг, прагнути отримати рН 7.

Абразивність середовища пропорційно збільшує швидкість зношування в k разів. Що зменшує ресурс преса для збільшення ресурсу необхідно виключати абразивні часточки із середовища, наприклад промиванням. Адекватність теоретичних кривих отриманих за допомогою математичного моделювання було підтверджено експериментальними дослідженнями, які суцільною лінією нанесені поряд з теоретичними (пунктирна) лінія. Експериментальне випробування проводили на різних сполученнях матеріалів: сталі, чавуни, які є перспективними для виготовлення шнекових пресів. Адекватність теоретичних кривих експериментальним даним перевіряли за допомогою критерію Фішера з оцінкою похибки моделювання.

Висновки.

Отримані теоретичні залежності, адекватні експериментальним даним, математична модель зміни швидкості зношування від рівня активної кислотності середовища, в якому працює трібосистема, абразивності, шорсткості поверхонь трібоелементів, навантаженні та швидкості ковзання.

Встановлено оптимальне значення активної кислотності, яке дорівнює p 7.

Проведені експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність теоретичних залежностей експериментальним.

Література

1. Хлуденев А.Г. Моделирование кинетики износа технологического оборудования нефтехимических производств / А.Г. Хлуденев, Н.М. Рябчиков // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – № 9. – С. 50-54.
2. Стечишин М.С. Методи оцінки і підвищення довговічності деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня док. техн. наук: спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / М.С. Стечишин. – Хмельницький, 1998. – 30 с.
3. Раткин В.В. Построение модели деформирования сжимаемых железобетонных конструктивных элементов транспортных сооружений, эксплуатируемых в агрессивных средах / В.В. Ра-

ткин, А.В. Кокодеев // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 1(9) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trts.esrae.ru/15-64>. – Название с экрана.

4. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений". – 2012. – № 2. – Режим доступа: http://unistroy.spbstu.ru/index_2012_03/3_ovchinnikov_3.pdf. – Название с экрана.

5. Овчинникова А.И. Механика поврежденных армированных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой: автореферат диссертации на соискание научной степени канд. тех. наук: спец. 05.23.17 – «Строительная механика» / Волгоград. – 2004. – 20 с.

6. Овчинников И.И. Моделирование поведения мостовых металлоконструкций, подвергающихся коррозионному износу [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников, Е. Фпузи, М.Ю. Шпранкель // Дороги и мосты. – 2010. – № 24. – С. 150 - 168. – Режим доступа: <http://rosdornii.ru/UserFiles/File/dim/24-2/09.pdf>. – Название с экрана.

7. Зеленцов Д.Г. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций / Д.Г. Зеленцов, Н.Ю. Науменко // Систем. технології. – 2005. – № 2. – С. 48-56.

8. Сухенко В.Ю. Корозійно-механічне спрацювання технологічного обладнання харчової промисловості [Электронный ресурс] / В.Ю. Сухенко, В.В. Мануїлов, Ю.Г. Сухенко // SWorldJournal. – 2013. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-113/machine-s-and-mechanical-engineering-113/17109-113-0624>. – Название с экрана.

9. Кузьменко А.Г. Моделирование и прогнозирование изнашивания материалов незакрепленным абразивом / А.Г. Кузьменко, И.П. Билокур, О.А. Вишневикий // Восточно-Европейский

журнал передовых технологий. – 2013. – №6/7 (66). – С. 20-25.

10. Полярус О.В. Математична модель абразивного зносу риштака скребкового конвеєра / О.В. Полярус, О.В. Сімкович // Автомобильний транспорт. – 2010. – № 27. – С. 110 -112.

11. Крицкий В.Г. Моделирование миграции продуктов коррозии ВО 2-М контуре АЭС с реактором ВВЭР-1200 [Электронный ресурс] / В.Г. Крицкий, И.Г. Березина, А.В. Гаврилов, Е.А. Моткова, Е.В. Зеленина, Н.А. Прохоров // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 9-ая международная научно-техническая конференция, 19-22 мая 2015 г.: сборник трудов. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2015. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article70-ru.htm>. – Название с экрана.

12. Lee G.Y. A physically-based abrasive wear model for composite materials / G.Y. Lee, C.K.H. Dharan, R.O. Ritchie // Wear. – 2002. – № 252. – Pp. 322 - 331.

13. Ponthiaux P. Corrosion Resistance / P. Ponthiaux, F. Wenger, J.-P. Celis. – Rijeka: InTech, 2012. – 472 p.

14. Geringer J. Modeling fretting-corrosion wear of 316L SS against poly (methyl methacrylate) with the point defect model: fundamental theory, assessment, and outlook / J. Geringer, D.D. Macdonald // Electrochimica Acta, Elsevier. – 2012. – № 79. – Pp. 17- 30.

15. Бейтс Р. Определение pH. Теория и практика / Р. Бейтс; Ред. пер. с англ.: Б.П. Никольский, М.М. Шульц. – 2-е изд., испр. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1972. – 398 с.

16. Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби Сааб. – К.: «ВПОЛ», 1999. – 192 с.

17. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: «Машиностроение», 1976, 271 с.

Аннотация

Математическое моделирование трибологических характеристик совместимых материалов рабочих органов экструдеров для производства топливных брикетов в кислотных и щелочных средах

В.А. Войтов, Б.М. Цымбал

В статье представлен анализ методов и моделей процессов трения и изнашивания при абразивном и коррозионно-механическом износе. Приведено математическое моделирование трибологических характеристик совместимых материалов рабочих органов экструдеров для производства топливных брикетов в кислотных и щелочных средах.

Получена математическая модель зависимости общей скорости изнашивания от скорости изнашивания под нагрузкой, скорости изнашивания под нагрузкой от негативного воздействия абразива и уровня активной кислотности среды. Установлено, что наибольшее влияние на скорость изнашивания имеет уровень активной кислотности pH и содержание абразивных частиц в растительном сырье для производства топливных брикетов.

Ключевые слова: *математическое моделирование, скорость износа, совместимые материалы, экструдер, абразивность, кислотность, щелочность*

Abstract

Mathematical modeling of tribological behavior of materials compatibility of working bodies of extruders for manufacture of fuel briquettes in acidic and alkaline environments

V.A. Voitov, B.M. Tsymbal

In article the analysis of methods and models of friction processes and wear in case of abrasive depreciation and in case of corrosion mechanical was provided. Mathematical modeling of tribological characteristics of compatible extruders materials of working bodies for production of fuel briquettes was given in acid and alkaline environments.

Dependence of overall speed wear from wear speed under load was received. Dependence of speed of wear under load from negative impact of an abrasive and level of active acidity of the environment was received too. Active acidity level (pH) and content of abrasive particles in vegetable raw materials for production of fuel briquettes has the greatest influence on wear speed that was established.

Keywords: *mathematical modeling, wear rate, compatible materials, an extruder, abrasiveness, acidity, alkalinity.*

Представлено від редакції: В.І. Пастухов / Presented on editorial: V.I. Pastuhov
Рецензент: В.М. Власовець / Reviewer: V.M. Vlasovets.
Подано до редакції / Received: 14.09.2016