

Фабричнікова І.А.

Харківський національний технічний
університет с/г ім. П. Василенка,
м. Харків, Україна

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ СИЛ ТЕРТЯ НА МИТТЄВІ СИЛИ РІЗАННЯ, ЯКІ ВИКЛИКАЮТЬ ЗНОШЕННЯ БУРЯКОРІЗАЛЬНИХ НОЖІВ

Вступ і постановка проблеми

Як відомо, для вироблення цукру коренеплід цукрового буряка зрізується бурякорізальними ножами в стружку. Важливу роль при цьому має динаміка процесу різання. А якість бурякової стружки є одним з визначальних чинників ефективності бурякоцукрового виробництва. Тому теоретичне визначення сил тертя при зрізанні стружки є актуальним і представляє науковий інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В попередніх публікаціях теоретично описані і визначені геометричні параметри випереджаючої тріщини при утворенні бурякової стружки з урахуванням дійсних процесів, що відбуваються в зоні різання, та досліджені види ушкоджень бурякорізальних ножів [1 та ін.].

Метою представленої роботи є розвиток теоретичних основ процесу утворення бурякової стружки, а саме визначення впливу сил тертя на миттєві сили різання, які викликають зношення бурякорізальних ножів і, розрахунок інтенсивності руйнування леза ножа внаслідок кавітації.

Вказана мета досягається тим, що теоретично визначено величину сили тертя і її вплив на зношення бурякорізальних ножів.

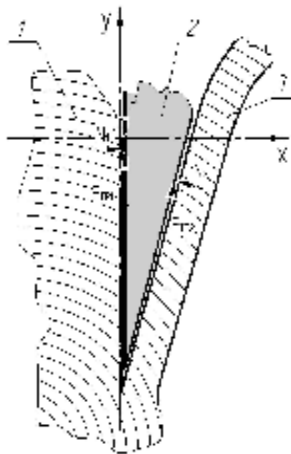


Рис. 1 – Схема різання:
1 – буряк; 2 – ніж; 3 – стружка

Викладення основного матеріалу

Зношування леза ножа обумовлюється не тільки особливостями його навантаження, що характеризується високою відносною концентрацією зусиль на кромці ножа, але і значним коливанням складових цих зусиль, які і викликають руйнування кромки. Ці руйнування, що не підлягають розгляданню в загальному випадку як різновиди зношування для леза ножа, не можуть бути відділені від процесу його зношування як постійно супутні його взаємодії з анізотропним матеріалом коренеплоду буряка.

Розглянемо задачу втискання клина в пружне тіло. При цьому маємо на увазі, що клин – лезо ножа, а пружне тіло – матеріал коренеплоду цукрового буряка. Розрахункова схема представлена на рис. 1.

Реакція N_1 – це відцентрова нормальна сила притискання буряка до корпуса бурякорізки та ножових рам і саме ножів, яка при різанні прикладається до леза ножа [2]. Реакція N_2 – це нормальна сила, що вигинає стружку. Сила P – сила різання одного леза ножа [3].

Максимальні значення дотичних сил зовнішнього тертя дорівнюють

$$T_1 = fN_1, \quad T_2 = fN_2,$$

де f – коефіцієнт зовнішнього тертя ножа по буряку,

N_1 та N_2 – нормальні сили опору при різанні.

В проекціях на вісі координат рівняння рівноваги будуть такі:

$$N_1 - N_2 \cos \alpha + f \cdot N_2 \sin \alpha = 0; \quad (1)$$

$$N_2 \sin \alpha + f \cdot N_1 - P + f \cdot N_2 \cos \alpha = 0. \quad (2)$$

Перепишемо:

$$N_1 = N_2 (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha); \quad (3)$$

$$P = f \cdot N_1 + N_2 (\sin \alpha + f \cos \alpha). \quad (4)$$

З рівняння (3) матимемо:

$$N_2 = \frac{N_1}{\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha}. \quad (5)$$

Підставимо рівняння (5) в (4):

$$P = f \cdot N_1 + \frac{N_1 (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha)}{\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha},$$

$$P = N_1 \cdot \left(f + \frac{\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha} \right). \quad (6)$$

Перетворимо рівняння (6):

$$\frac{P}{N_1} = f + \frac{\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha} = \frac{f \cos \alpha - f^2 \sin \alpha + \sin \alpha + f \cos \alpha}{\cos \alpha - f \sin \alpha}. \quad (6,a)$$

Позначимо $\lambda = \frac{P}{N_1}$, тоді після перетворення матимемо:

$$f^2 \sin \alpha - f(\lambda \sin \alpha - 2 \cos \alpha) + \lambda \cos \alpha - \sin \alpha = 0. \quad (7)$$

Це квадратне рівняння, рішенням якого буде:

$$f_{1,2} = \frac{\lambda \sin \alpha - 2 \cos \alpha \pm \sqrt{(\lambda \sin \alpha - 2 \cos \alpha)^2 - 4 \sin \alpha (\lambda \cos \alpha - \sin \alpha)}}{2 \sin \alpha}. \quad (8)$$

Підставимо в рівняння (8) значення кута загострення ножа $\alpha = 20^\circ$. Отримаємо $f = 0,114$. Згідно [2, 3] $P = 14$ Н та $N_1 = 36$ Н.

Наведені вище міркування зроблені для того, щоб розрахувати на підставі експериментальних даних реальний зовнішній коефіцієнт тертя. Невелике значення його пояснюється напіврідинним характером тертя в зоні різання. З урахуванням цього положимо $\alpha = 9^\circ$ для експериментального ножа і матимемо $P = 7,04$ Н.

Таким чином, зменшення кута загострення ножа від 20° до 9° приводить до зменшення зусилля різання від 14Н до 7Н та збільшення такого трибологічного параметра як зносостійкість, та, відповідно, і до зменшення енергозатрат.

Як уже раніше згадувалось, в зоні різання тертя має напіврідинний характер. Це означає, що поряд з абразивним видом зносу маємо і окислювальне зношення через рідинне тертя. Розглянемо це питання з точки зору гідродинаміки. Для цього скористаємося схемою, зображеною на рис. 2.

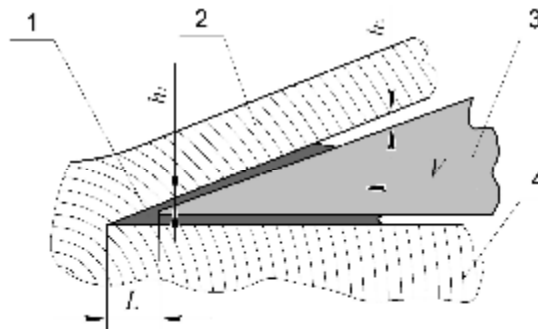


Рис. 2 – Рідинне тертя:
1 – випереджаюча тріщина; 2 – стружка;
3 – ніж; 4 – буряк

Згідно положень гідродинаміки, градієнт тиску в клиновому зазорі – між тілом коренеплоду цукрового буряку та лезом ножа – розраховується згідно закону Рейнольдса:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu \cdot v \frac{h_2 - h_1}{h^3}, \quad (9)$$

де μ – динамічна в'язкість клітинного соку коренеплоду цукрового буряку при прогнозованій температурі в зоні різання + 25°C, $\mu = 1,32 \cdot 10^{-3}$ МПа·с;

v – швидкість різання, 7 м/с;

h – зазор між лезом ножа та тілом коренеплоду цукрового буряку, м.

Тоді, з урахуванням (9), питома сила в'язкого тертя на одиницю поверхні або дотична напруга в зоні різання буде:

$$\sigma_\tau = \mu \frac{v}{h} + \frac{h}{2} \frac{dp}{dx}. \quad (10)$$

Підставимо рівняння (9) в (10) і матимемо

$$\sigma_\tau = \mu \frac{v}{h} + \frac{h}{2} 6\mu \cdot v \frac{h_2 - h_1}{h^3}. \quad (11)$$

Враховуючи, що $h_1 = 0,005 \cdot 10^{-3}$ м, $h_2 = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м та $h = 0,0075 \cdot 10^{-3}$ м, розрахуємо дотичну напругу σ_τ :

$$\sigma_\tau = 11,32 \text{ МПа}$$

Ці міркування стосуються статичного докладання втиснення ножа в тіло буряка. Але на практиці ніж зазнає змінні зусилля, що зумовлені обертанням коренеплодів, динамічними факторами (швидкістю різання, анізотропією будови структури коренеплодів [4] та ін.). Тому розглянемо процес різання з динамічної точки зору, тобто в процесі проходження коренеплоду в зоні кромки бурякорізального ножа з урахуванням динамічних факторів. При цьому ніж зазнає як нормальний тиск, що руйнує структуру, так і силу тертя, зумовлену обтіканням його кромки і фасок клітинним соком.

Однак внаслідок того, що при різанні виникають пропуски в проходженні коренеплодів в зоні різальних кромки ножів через нещільну укладку, зусилля різання мають різні знаки. Тож будемо мати знакозмінне навантаження на лезо ножа. Відповідно до рис. 3 від'ємні значення зусилля різання відповідають стану леза ножа при переході від одного коренеплоду до іншого.

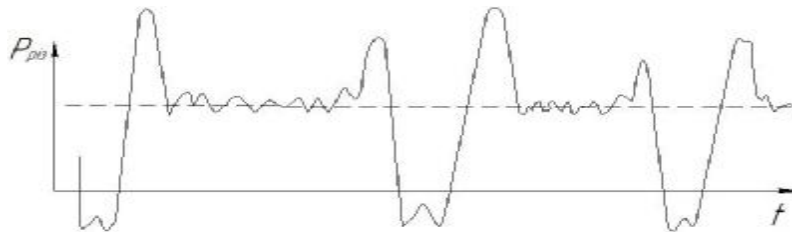


Рис. 3 – Зміни зусилля різання в часі

Як видно, тривалість кожного імпульсу залежить від розмірів перерізу коренеплоду і проміжку між ними. Крім того, значення амплітуд залежать від фізико-механічних властивостей буряка і проміжків між коренеплодами. Таким чином, процес різання носить випадковий характер. Будемо вважати, що середнє значення процесу буде дорівнювати значенню, визначеному по статичному розрахунку, тобто $P_0 = 17$ Н.

Враховуючи, що зусилля різання розподілено по нормальному закону, знайдемо максимально можливе зусилля різання за формулою:

$$P_{\max} = P_0 + 3\sigma_{\Delta P}, \quad (12)$$

де $\sigma_{\Delta P}$ – середнє квадратичне значення випадкового зусилля різання.

Можна вважати, що сила тертя між ножом та коренеплодом буряка з урахуванням випадкового розкиду.

$$F_T = (F_{T0} - \Delta F_T) \cdot \text{sign} V, \quad (13)$$

де ΔF_T – випадкова складова сили тертя,

V – швидкість руху коренеплоду.

Скориставшись принципом Даламбера, отримаємо:

$$-m\ddot{V} - P_0 + P - F_T = 0. \quad (14)$$

Оскільки $P = P_0 + \Delta P$, отримаємо:

$$-mV \frac{\Delta x}{x} \cdot EF_T = -\Delta F_T \cdot \text{sign}V. \quad (15)$$

Рівняння малих коливань приймає вигляд:

$$\Delta F_T = \frac{\Delta F_T}{m} \cdot \text{sign}V. \quad (16)$$

Оскільки швидкість руху V більше Δx , то функцію $\text{sign}V$ можна замінити одиницею. Тоді рівняння (16) можна представити у вигляді:

$$m\ddot{x} = \Delta F_T. \quad (17)$$

Дослідження показали, що випадковий розкид сили тертя можна представити у вигляді процесу, що показано на рис. 4. Випадкову складову сили тертя ΔF_T можна приблизно розглядати як стаціонарну випадкову функцію, обмежену в часі, з випадковими моментами зміни знаку.

Реалізація такого процесу показана на рис. 4.

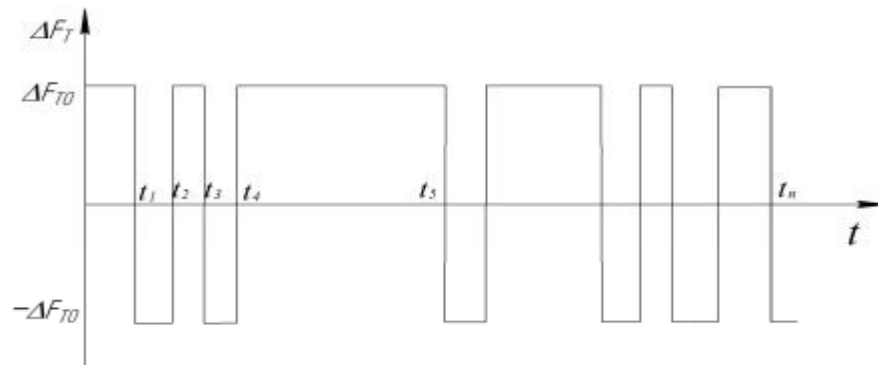


Рис. 4 – Ідеалізація змін зусилля різання в часі

Для повної характеристики процесу потрібно знати ще розподілення точок переходу через нуль (розподілення нулів), тобто вірогідність $P(n, \tau)$, де n – число нулів на інтервалі τ (n – випадкова величина).

Представлений на рис.4 графік змінення $\Delta F_T(t)$ у часі є ідеалізованим, бо миттєві зміни сили тертя (випадкової складової) на кінцеву величину визначити неможливо, але така ідеалізація дозволяє скористатися розподіленням Пуассона:

$$P_n = \frac{a^n}{n!} \cdot e^{-a}, \quad (18)$$

де a – математичне очікування, $a > 0$;

n – кількість точок.

Математичне очікування (параметр a) можна виразити через середню частоту нулів, що приходяться на одиницю часового інтервалу τ , приймаючи $a = \mu\tau$. Тоді (18) запишеться так:

$$P_{(n,\tau)} = \frac{(\mu\tau)^n}{n!} \cdot e^{-\mu\tau}. \quad (19)$$

Перетин випадкової функції $\Delta F_T(t)$ має закон розподілу, представлений рядом:

$$\begin{aligned} \Delta F_{i(t)} &\dots -\Delta F_{T0} \quad +\Delta F_{T0}; \\ P_{i(t)} &\dots 1/2 \quad 1/2. \end{aligned}$$

Оскільки моменти змін знаку функції ΔF_T ніяк не пов'язані зі значенням випадкової функції, то немає підстав вважати будь-яке із значень $+\Delta F_{T0}$, $-\Delta F_{T0}$ найбільш вірогідним, тому:

$$m_{\Delta F} = +\frac{1}{2}\Delta F_{T0} - \frac{1}{2}\Delta F_{T0} = 0 \text{ (математичне очікування),}$$

$$D_{\Delta F} = \frac{1}{2}(-\Delta F_{T0})^2 + \frac{1}{2}\Delta F_{T0}^2 = \Delta F_{T0}^2 \text{ (дисперсія).}$$

Найдемо кореляційну функцію, скориставшись її визначенням:

$$K_{\Delta F_T}(t_1 t_2) = M[\Delta F_T(t) \cdot \Delta F_T(t_1)].$$

Добуток $\Delta F_T(t) \cdot \Delta F_T(t_1)$ дорівнює -1 , якщо між моментами часу виникла непарна кількість перемін знаку, та $+1$, якщо парна.

Вірогідність того, що за час $\tau = t_1 - t$ виникне парна кількість перемін знаку:

$$P_{II} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\mu\tau)^{2m}}{(2m)!} \cdot e^{-\mu\tau} = e^{-\mu\tau} \frac{e^{\mu\tau} + e^{-\mu\tau}}{2}. \quad (20)$$

Вірогідність того, що за час τ виникне непарна кількість перемін знаку:

$$P_H = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\mu\tau)^{2m+1}}{(2m+1)!} \cdot e^{-\mu\tau} = e^{-\mu\tau} \frac{e^{\mu\tau} - e^{-\mu\tau}}{2}. \quad (21)$$

Знаючи P_{II} та P_H , знайдемо:

$$K_{\Delta F_T}(t, t_1) = \Delta F_{T0}^2 \cdot P_{II} - \Delta F_{T0}^2 \cdot P_H = e^{-2\mu t} \Delta F_{T0}^2. \quad (22)$$

Отриманий вираз справедливий для $t_1 > t$.

Аналогічно при $t_1 < t$ отримаємо:

$$K_{\Delta F_T}(t, t_1) = \Delta F_{T0}^2 \cdot e^{2\mu t} = \Delta F_{T0}^2 \cdot e^{-2\mu(-\tau)}. \quad (23)$$

Після об'єднання (22) та (23) отримаємо кореляційну функцію зусилля різання:

$$K_{\Delta x} = \int_0^t \int_0^{t_1} k(t, \tau) \cdot k(t_1, \tau_1) \Delta F_{T0}^2 \cdot e^{-2\mu|\varepsilon|} d\tau d\tau_1,$$

де $\varepsilon = \tau - \tau_1$,

$$k(t, \tau) = \frac{f_{21}(t)f_{22}(\tau) - f_{22}(t)f_{21}(\tau)}{mD}.$$

Тоді дисперсія випадкового зусилля ΔF :

$$D_{\Delta F} = \left(\frac{EF}{d}\right)^2 \int_0^t \int_0^{t_1} k(t, \tau) k(t_1, \tau_1) \Delta F_{T0}^2 \cdot e^{-2\mu(t-t_1)} d\tau d\tau_1. \quad (24)$$

Знайдемо максимальне значення $D_{\Delta F}$ (або $\sigma_{\Delta F} = \sqrt{D_{\Delta F}}$). Із структури виразу для $D_{\Delta F}$ (24) видно, що максимальне значення $D_{\Delta F}$ буде при $e^{-2\mu(t-t_1)} = 1$, що відповідає випадку $\mu = 0$.

Для цього граничного випадку (статика):

$$D_{\Delta F} \leq D_{\Delta F_T} = \left(\frac{EF}{d} \Delta F_{T0}\right)^2 \cdot \left(\int_0^t k(t, \tau) d\tau\right)^2.$$

Внаслідок отримуємо верхню границю можливих значень зусилля різання:

$$F_{\max} = P_0 + 3\sigma_{\Delta P_{TEP}}. \quad (25)$$

Таким чином, максимальне значення сили різання дорівнює сумі статичної сили різання P_0 та потроєного середньоквадратичного значення сили тертя.

Для оцінки середньоквадратичного відхилення $\sigma_{\Delta F_{мер}}$ скористаємося формулою Рейнольдса:

$$\tau = \mu \frac{v}{h} + \frac{h}{2} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (26)$$

$$\text{де } \frac{dP}{dx} = 6\mu v \frac{\Delta h}{h^3}.$$

Приймаємо наступні вихідні дані: $\mu = 0,55 \cdot 10^{-2}$ кг/м·с; $h = 0,01$ мм = 10^{-5} м; $\Delta h = 0,009 \cdot 10^{-5}$ м; площа перетину в зазорі між ножом та стружкою $S = 14 \cdot 10^{-6}$ м²; $v = 7$ м/с.

$$\text{Тоді } \frac{dP}{dx} = 6 \cdot 0,55 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \frac{0,009 \cdot 10^{-5}}{10^{-15}} = 0,21 \cdot 10^{+8} \cdot \text{Н/м}.$$

Після підстановки в (26) отримаємо суму рідинного тертя на одиницю ширини ріжучої фаски:

$$\tau_1 = 0,55 \cdot 10^{-2} \frac{7}{10^{-5}} + \frac{10^{-5}}{2} 0,21 \cdot 10^8 = 3,85 \cdot 10^3 + 0,101 \cdot 10^3 = 3,951 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Відповідно, на ширину фаски ($2 \cdot 10^{-3}$ м):

$$\tau_2 = 0,972 \text{ Н} \approx 1 \text{ Н.}$$

Аналогічно, для іншої фаски при $h = 10^{-6}$ м та $\Delta h = 10^{-7}$ м отримаємо:

$$\tau_2 \approx 5 \text{ Н.}$$

Таким чином, сумарна сила тертя в зоні різання одного V-подібного пера ножа:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \approx 6 \text{ Н.}$$

Оскільки сила тертя розподілена по випадковому закону, то можна вважати, що складаючись із силою різання, вона представляє собою середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\Delta F_{\text{ТЕР}}} = \frac{\tau}{2} = 3 \text{ Н.}$

Таким чином, відповідно до (12) $F_{\text{різ}} = 17 + 3 \cdot 3 = 26 \text{ Н.}$

Як видно, сила тертя вносить суттєвий внесок в опір різанню, як і саме різання. Звідси можна зробити висновок про те, що в зоні різання маємо гідроабразивне зношення, яке характеризується рухом абразивних часток в потоці рідини (клітинного соку) та активізацією окислювальних процесів поверхневих слоїв ножа за рахунок пластичної деформації, що посилюється явищем кавітації.

Рух абразивних часток викликає мікрорізнання поверхонь тертя. В процесі різання на поверхні ножа також виникають окисні плівки, що при руйнуванні перетворюються на абразив і також суттєво сприяють зношенню. Зауважимо, сила опору різанню від внутрішнього тертя не залежить від кута загострення ножа, бо направлена вздовж поверхні тертя. Суттєву роль в гідроабразивному зношенні відіграє кавітація [5]. Зупинимося на цьому питанні докладніше.

Відомо, тиск пароутворення відіграє ключову роль в утворенні явища кавітації. Зокрема, при кімнатній температурі $t = 20$ °С тиск пароутворення складає $P_K = 2261$ Па (17 мм рт. ст.). При цьому радіус каверни r складає 10^{-4} мм при тривалості схлопування $\tau \cong 3\mu\text{с} = 3 \cdot 10^{-6}$ с. Схлопуючись, каверна створює ударний імпульс тривалістю τ .

Обчислимо силу, що приходиться на поверхню каверни. Площа цієї поверхні каверни $S_K = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 10^{-8}$ м². Тоді сила F_K , що діє на цю поверхню, дорівнює:

$$F_K = P_K \cdot S_K = 2261 \cdot 3,14 \cdot 10^{-8} = 7103,13 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

Протягом часу t виникає ударний імпульс $\sigma_\tau = \int_0^\tau F_K(t) dt$. Представимо $F_K(t) = \frac{F_K}{t^4}$, тоді:

$$\sigma_\tau = \int_0^\tau \frac{F_K}{t^4} dt = -F_K \frac{1}{3t^3} \Big|_0^\tau = -\frac{F_K}{3\tau^3} = -\frac{7103,13 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 3^3 \cdot 10^{-18}} = -87,69 \cdot 10^{10} \text{ Н.}$$

Знак мінус означає, що імпульс направлений на відрив частки металу в зоні його дії.

Відповідно до положень трибології, число циклів до руйнування є ступеневою функцією діючих на пружному контакті напруг [6].

$$n_{\text{ц}} = \left(\frac{\sigma_\tau}{\sigma_M} \right)^{t_{\text{ем}}}, \quad (27)$$

де σ_τ – руйнівна напруга;

$t_{\text{ем}}$ – коефіцієнт втомлюваності, що змінюється від 1,3 до 12. Приймаємо $t_{\text{ем}} = 2$;

σ_M – границя міцності на розрив. $\sigma_M = 73,5 \cdot 10^7$ Па (для сталі У8).

Після підстановки в (27) отримаємо:

$$n_{\text{ц}} = \left(\frac{87,69 \cdot 10^{10}}{73,5 \cdot 10^7} \right)^2 = (1,193 \cdot 10^3)^2 = 1,42 \cdot 10^6.$$

Для швидкості $v = 7$ м/с, відповідно до відомого співвідношення $v = \frac{\pi v n}{30}$, отримаємо

$n = 74,2$ 1/хв. Враховуючи, що за одне обертання завитка кожен ніж випробує співудари з коренеплодами буряку в середньому тридцять разів, знайдемо кількість повних обертів завитка:

$$n_{\text{повн}} = \frac{n_{\text{ц}}}{30} = \frac{1,42}{30} \cdot 10^6 = 0,473 \cdot 10^5 = 47300.$$

Розділивши $n_{\text{повн}}$ на частоту обертання завитка (57 ... 114 об/хв.), отримаємо час роботи T :

$$T = \frac{n_{\text{повн}}}{79,2} = \frac{47300}{79,2} = 597,2 \text{ хв} \cong 10 \text{ год.}$$

Висновки

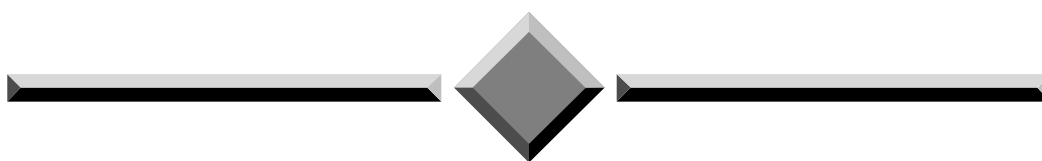
Отриманий результат стосується однієї каверни внаслідок того, що процес не адитивний, тобто кожний ударний імпульс діє локально, а оскільки каверни розташовані по всій передній поверхні (крім ці) ножа, то і зношування виникає по всій поверхні, де утворюється кавітація.

Приведені оцінки зносу відносяться до повного руйнування передньої поверхні різальної частини ножа, тобто максимальне значення часу роботи ножа до переточування. Але руйнівний вплив кавітації можна суттєво зменшити за рахунок вдосконалення геометрії заточування бурякорізальних ножів [5], що дає змогу значно збільшити ресурс ножа.

Література

1. Фабричнікова І.А. Уточнені умови утворення стружки при зрізанні коренеплоду цукрового буряка бурякорізальними ножами / І.А. Фабричнікова, В.М. Євдокимов // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. – Харків: 2011. – Випуск 107. – С. 194-201.
2. Гребенюк С.М. Исследование силовых взаимодействий сахарной свеклы с барабаном свекло-резок / С.М. Гребенюк, А.М. Щербаков // Сахарная промышленность. – 1981. – № 2 – С.22-25.
3. Сичевой П.С. К вопросу теории резания высококачественной свекловичной стружки // Сахарная промышленность. 1956. – № 6. – С. 37-41.
4. Фабричнікова І.А. Зависимость усилий и напряжений процесса срезания стружки от неоднородного строения коренеплода сахарной свеклы / І.А. Фабричнікова, В.В. Коломиец // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка вип. 42 «Технічний сервіс в АПК, техніка та технології у с/г машинобудуванні». – Харків: 2006. – С. 16-19.
5. Фабричнікова І.А. Зношення бурякорізальних ножів при зрізанні коренеплоду цукрового буряка // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 21.- Том II. – Луцьк: ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 150-157.
6. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/ И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2000. – 268 с.

Надійшла 27.07.2012



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>