

Силова взаємодія цукрових буряків з ножами у відцентрових бурякорізках

О.М. Люлька, аспірант кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування, Національний університет харчових технологій

В.Г. Мирончук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування, Національний університет харчових технологій

М.Л. Нікольський, інженер-конструктор

Д.М. Люлька, кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування, Національний університет харчових технологій

Отримано аналітичні залежності, які дозволяють визначити величину і напрям дії всіх елементів силової взаємодії цукрового буряка з ножами найпоширеніших типів під час роботи відцентрових бурякорізок різних моделей. Дані аналітичні залежності дозволяють оцінити вплив окремих факторів, режимів роботи та налаштувань робочих органів відцентрових бурякорізок на стабільність їх роботи, характер руху цукрових буряків та витрати енергії.

Ключові слова: бурякорізка, різання, ножі, тертя, енергія.

Получены аналитические зависимости, позволяющие определить величину и направление действия всех элементов силового взаимодействия сахарной свеклы с ножами распространенных типов во время работы центробежных свеклорезок различных моделей. Данные аналитические зависимости позволяют оценить влияние отдельных факторов, режимов работы и настроек рабочих органов центробежных свеклорезок на стабильность их работы, характер движения сахарной свеклы и расход энергии.

Ключевые слова: свеклорезка, резка, ножи, трение, энергия.

Analytical dependence for determining the magnitude and direction of the force interaction of all elements of sugar beet most common types of knives during the centrifugal beet various models. Data analytic dependence to assess the impact of certain factors, modes of operation and configuration of working bodies of centrifugal beet on the stability of their work, the motion of sugar beet and energy consumption.

Keywords: beet slicer, slicing, beet knives, friction, energy.

Постановка проблеми. Для вилучення сахарози з тканини цукрових буряків дифузійним способом їх необхідно подрібнити в стружку. Дана операція здійснюється в бурякорізальних машинах. Бурякорізки є енергоємним обладнанням, про що свідчать дані таблиці 1 [1 – 3], в якій наведено марки, продуктивності та потужності найпоширеніших барабанних та відцентрових бурякорізок. Оскільки на території України та країн СНД найбільшого поширення набули відцентрові бурякорізки, розглянемо саме їх.

Як свідчать роботи науковців, що займалися дослідженням витрат енергії на роботу відцентрових бурякорізок більше 70 % енергії витрачається на подолання сил тертя цукрових буряків по внутрішній поверхні корпусу бурякорізки та по передніх поверхнях ножів, при чому, на тертя по передніх поверхнях ножів витрачається від 10 % до 30 % цієї енергії в залежності від марки бурякорізки. Сили тертя, між новоутвореними зрізами цукрових буряків та передніми поверхнями кенігсфельдських ножів виникають не лише від відцентрової сили, як у випадку тертя по внутрішній поверхні корпусу бурякорізки, але і від дією сили тяжіння. На величину цих сил тертя має вплив геометрія ножів та їх розташування в ножових рамах. Дані сили варто розглядати в рамках силової взаємодії цукрових буряків з передньою поверхнею бурякорізальних ножів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковці Н. Р. Фрепон, Є. В. Островський, А. М. Щербаков та ін., які досліджували складові витрат енергії відцентрових бурякорізок, енергію, що витрачається на тертя по передніх поверхнях ножів розглядали в сукупності із її витратами на тертя по внутрішній поверхні корпусу. Вищезгадані сили тертя визначали або емпіричним методом для кожної моделі бурякорізки, або задаючись припущенням, що вони виникають за рахунок дії лише відцентрової сили.

Характеристики бурякорізок

Тип бурякорізки	Продуктивність, т/добу	Потужність основного приводу, кВт	Загальна потужність, кВт
<i>Відцентрові бурякорізки</i>			
T2M-СЦ2Б-12	1500	75 – 80	75 – 80
T2M-СЦ2Б-16	2000	90 – 110	90 – 110
A2-ПРБ-24	3100	90 – 110	90 – 110
РБА-2-12	4200	75 – 80	75 – 80
РБА-2-16	5600	90 – 110	90 – 110
<i>Барабанні бурякорізки фірми Putsch®</i>			
TSM 1600	до 5000	90	120
TSM 1800	до 8000	110	150
TSM 2200	до 10000	132	170

Невирішені раніше частини загальної проблеми. На нашу думку, розглядати витрати енергії на тертя по передніх поверхнях ножів в сукупності із витратами енергії на тертя по внутрішній поверхні корпусу є не зовсім доцільно, адже сили нормального тиску, що діють на внутрішню поверхню корпусу і на передню поверхню ножа будуть різними.

В існуючих на сьогодні наукових роботах силова взаємодія цукрових буряків з передніми поверхнями ножів розглянута не достатньо. Бракує аналітичних залежностей, які дозволяють визначити величину і напрям дії всіх елементів силової взаємодії цукрових буряків з ножами найпоширеніших типів під час роботи відцентрових бурякорізок різних моделей.

Мета та цілі статті. Метою даної статті є: розгляд силової взаємодії цукрових буряків з передніми поверхнями бурякорізальних ножів під час роботи відцентрових бурякорізок різних моделей; отримання аналітичних залежностей, які дозволять визначити величину і напрям дії всіх елементів силової взаємодії та фактори, що на них впливають, а також аналітично визначити витрати енергії на тертя цукрових буряків по передніх поверхнях ножів.

Виклад основного матеріалу. В процесі різання у відцентровій бурякорізці взаємодіють 3 тіла: цукровий буряк, бурякорізальний ніж та бурякова стружка. Силова взаємодія буряка з ножем відбувається по передніх поверхнях ножа та новоутвореному зрізі цукрового буряка (рис. 1).

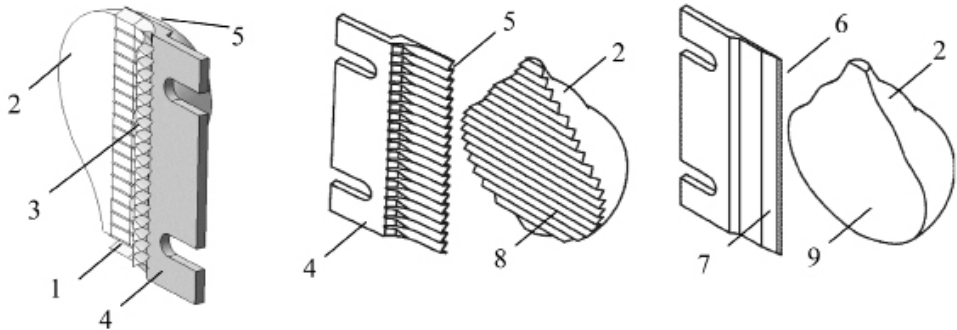


Рис. 1. Елементи силової взаємодії буряка з ножем в процесі отримання бурякової стружки:

1 – задня поверхня кенігсфельдського ножа; 2 – цукровий буряк; 3 – стружка; 4 – кріпильна частина ножа; 5 – передня поверхня кенігсфельдського ножа; 6 – передня поверхня плоского ножа; 7 – задня поверхня плоского ножа; 8 – зріз цукрового буряка кенігсфельдським ножем; 9 – зріз цукрового буряка плоским ножем.

Передня поверхня кенігсфельдського ножа складається з послідовно розташованих пер, кожне з яких - з верхньої на нижньої передніх площин ножа.

Розглянемо два випадки силової взаємодії, при яких лінії вершин пер кенігсфельдського ножа та (або) передня поверхня плоского ножа:

- паралельні вектору швидкості різання v_p і коловій силі P_{KB} (кут $\xi = 0^\circ$);
- не паралельні вектору швидкості різання v_p і коловій силі P_{KB} (кут $\xi > 0^\circ$).

Кут ξ залежить від підйому ножів (рис. 2).

Рух цукрового буряка в середині відцентрової бурякорізки під час її роботи можна розкласти на 3 складові:

- прямолінійний горизонтальний в напрямку від осі ротора до внутрішньої поверхні корпусу відцентрової бурякорізки зумовлений відцентровою силою $P_{ВБ}$;
- обертальний горизонтальний в напрямку обертання ротора бурякорізки зумовлений коловою силою P_{KB} ;

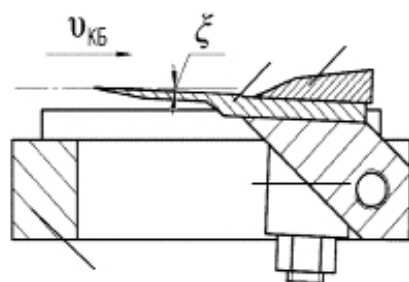


Рис. 2. Ножова рама з плоским ножем:
1 – основа ножової рами;
2 – поворотна стійка; 3 – плоский ніж;
4 – прижимна планка.

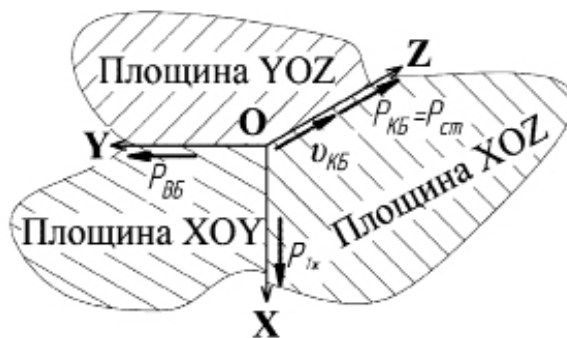


Рис. 3. Система координат, в якій розглядали силову взаємодію: P_{BB} – відцентрова сила;
 $P_{Tж}$ – сила тяжіння; P_{KB} – колова сила, що діє на цукровий буряк; P_{CT} – сила, що стискає бурякову стружку; v_{KB} – колова швидкість.

– прямолінійний вертикальний від дії сили тяжіння на цукровий буряк шару буряків, що знаходяться над ним $P_{Tж}$.

За рахунок цих рухів на верхній та нижній передніх поверхнях кенігсфельдського ножа та (або) передній поверхні плоского ножа виникають сили тертя.

Описані вище три складові руху цукрового буряка відповідають обраним координатним осям XYZ декартової системи координат (рис. 3).

Тобто, напрямок осі OX (вертикальна вісь) співпадає з напрямком сили тяжіння, $P_{Tж}$, OY (горизонтальна вісь) з напрямком дії відцентрової сили P_{BB} , OZ (ортогональна вісь) з напрямком колової швидкості v_{KB} , колової сили P_{KB} та сили стискання бурякової стружки P_{CT} . При усталеному режимі роботи відцентрової бурякорізки приймаємо, що колова швидкість v_{KB} буде рівною швидкості різання v_p ($v_{KB} = v_p$).

У випадку $\xi = 0^\circ$ вертикальна координатна площина XOY буде перпендикулярна до площини, що проходить через лінії вершин пер кенігсфельдського або до передньої поверхні плоского ножа. Якщо $\xi > 0^\circ$, то кут між вищевказаними площинами становитиме $90^\circ \pm \xi$.

Розглянемо зовнішні сили, що діють із сторони цукрового буряка на верхню (рис. 4, т. А) і нижню (рис. 4, т. Б) передні площини пер кенігсфельдського ножа (верхні індекси в позначенні сил обрано по найменуванню вибраних координатних площин та осей):

P_{BB}^{xy} , $P_{Tж}^{xy}$ – проекції в площині XOY, які відповідають відцентровій силі і силі тяжіння спроектованих на нормаль до верхньої і нижньої передніх площин кенігсфельдського ножа;

P_{BB} – відцентрова сила (паралельна осі OY);

$P_{Tж}$ – загальна сила тяжіння (паралельна осі OX);

P_{KB} – колова сила, що діє на цукровий буряк (паралельна осі OZ);

P_H , P'_H – сили нормального тиску відповідно на верхню і нижню передні площини кенігсфельдського ножа, що виникають за рахунок відцентрової сили P_{BB} і сили тяжіння $P_{Tж}$, чисельно дорівнюють сумі їх проекцій на нормаль до верхньої та нижньої передніх площин кенігсфельдського ножа в площині XOY ($P_H = P_{BB}^{xy} + P_{Tж}^{xy}$; $P'_H = P_{BB}^{xy}$);

P_{mp1}^{xy} – сила тертя цукрового буряка по верхній передній площині кенігсфельдського ножа, яка виникає від дії відцентрової сили і сили тяжіння (при умові $P_{BB} > P_{Tж}$ вона направлена в напрямку від впадини до вершини ножа, якщо P_{BB} і $P_{Tж}$, то замість неї виникне сила $P_{mp1}^{xy'}$ рівна за величиною P_{mp1}^{xy} , але направлена від вершини до впадини);

P_{mp2}^{xy} – сила тертя цукрового буряка по нижній передній площині кенігсфельдського ножа, яка виникає від дії відцентрової сили;

P_{mp1}^z – сила тертя цукрового буряка по верхній передній площині кенігсфельдського ножа, яка виникає від дії відцентрової сили і сили тяжіння (одночасно);

P_{mp2}^z – сила тертя цукрового буряка по нижній передній площині кенігсфельдського ножа, яка виникає від дії відцентрової сили;

P_{mp1}^{p6} – рівнодійна від двох сил тертя P_{mp1}^{xy} і P_{mp1}^z , яка знаходиться на верхній передній площині кенігсфельдського ножа;

P_{mp2}^{p6} – рівнодійна від двох сил тертя P_{mp2}^{xy} і P_{mp2}^z , яка знаходиться на нижній передній площині кенігсфельдського ножа;

При взаємодії цукрового буряка з плоским ножем (рис. 4, т. В) у випадку $\xi = 0^\circ$ відцентрова сила буде діяти по нормалі до поверхні ножа створюючи дві сили тертя, одна з яких направлена вертикально вгору P_{mp1}^x , а інша на зустріч вектору швидкості різання P_{mp1}^z .

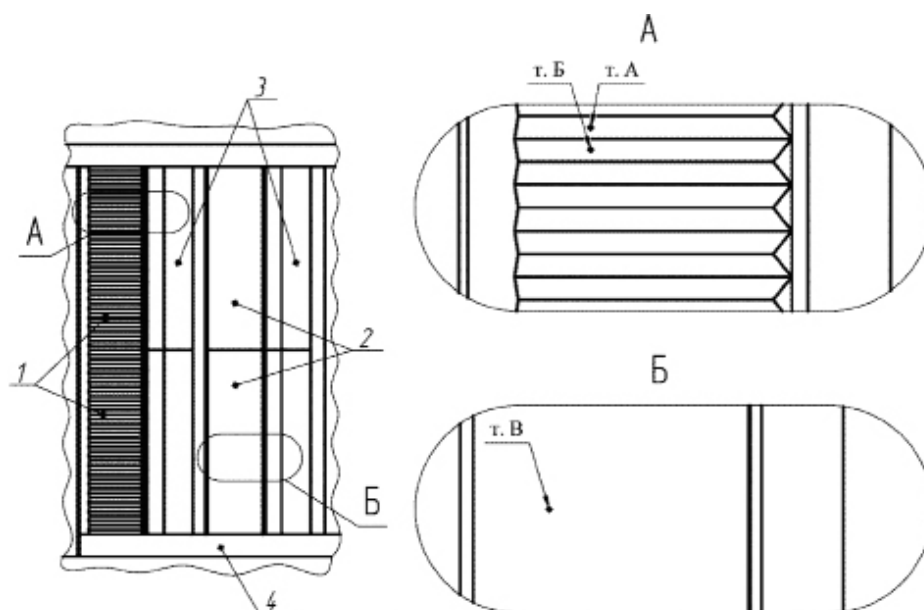


Рис. 4. Розрахункові точки на ножах відцентрової бурякорізки: 1 – кенігсфельдські ножі; 2 – плоскі ножі; 3 – прижимні (контрольні) планки; 4 – внутрішня поверхня корпусу бурякорізки (напівкільця, броньові накладки).

На цукрові буряки, що рухаються по колу вздовж стінок корпусу відцентрової бурякорізки, назустріч лезам ножів, діє доцентрова сила $P_{дсБ}$, яка надає бурякам доцентрове прискорення $a_{дсБ}$. Ця сила завжди направлена до центру осердя завитка. Її величину можна визначити за формулою:

$$P_{дсБ} = m_B \cdot a_{дсБ} = \frac{m_B \cdot v_p^2}{R}, \text{ або } P_{дсБ} = m_B \cdot \omega^2 \cdot R = m_B \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \cdot R, \quad (1)$$

де m_B – маса буряків, що знаходяться між передньою робочою поверхнею ножа і осердям завитка, кг; v_p – швидкість різання буряків, м/с; ω – кутова швидкість обертання буряків, рад/с; n – частота обертання завитка, об/хв; R – внутрішній радіус корпусу барабану, м.

Масу буряків m_B , що знаходяться між передньою робочою поверхнею ножа і осердям завитка можна розрахувати за формулами:

$$m_B = V_{cp} \cdot \rho_{вб} = \frac{V^в + V^н}{2} \cdot \rho_{вб}, \quad V^в = H_{cp}^в \cdot L_n \cdot \delta, \quad V^н = H_{cp}^н \cdot L_n \cdot \delta$$

де V_{cp} – середній об'єм буряків, що знаходяться між передньою робочою поверхнею ножа і осердям завитка, м³;

$\rho_{вб}$ – насипна густина цукрових буряків під час їх стиснення в відцентровій бурякорізці, кг/м³ ($\rho_{вб} = 700 \dots 780$ кг/м³);

$V^в, V^н$ – частини внутрішнього об'єму відцентрової бурякорізки, в яких знаходяться цукрові буряки, що тиснуть відповідно на верхній та нижній ножі, м³ (рис. 5);

$H_{cp}^в, H_{cp}^н$ – середні відстані від передніх поверхонь верхнього та нижнього ножів до осердя завитка, м (рис. 5);

L_n – ширина ножа, м;

δ – довжина ріжучої частини ножа, м (для бурякорізальних ножів моделі 1011В $L_n = 165 \cdot 10^{-3}$ м $\delta = 41,5 \cdot 10^{-3}$ м, рис. 6).

Тоді

$$m_B = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^в + H_{cp}^н)}{2} \cdot \rho_{вб}. \quad (2)$$

Відцентрова сила, що діє на цукрові буряки за величиною рівна доцентровій силі, але протилежна їй за напрямом. Вона визначається за формулою:

$$P_{вб} = |-P_{дсБ}| = |-m_B \cdot a_{дсБ}| = m_B \cdot \omega^2 \cdot R = \frac{m_B \cdot v_p^2}{R}. \quad (3)$$

Підставивши в формулу (3) рівняння (2) отримаємо:

$$P_{вб} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^в + H_{cp}^н)}{2} \cdot \rho_{вб} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \cdot R = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^в + H_{cp}^н) \cdot \rho_{вб} \cdot v_p^2}{2 \cdot R}. \quad (4)$$

Загальна сила тяжіння $P_{Тж}$, що діє на один ніж буде складатися з сили тяжіння буряків, які контактують з двома ножами $P_{ТжН}$ та сили спричиненої тиском стовпа буряків, які знаходяться над ними $P_{ТжСБ}$ відповідно

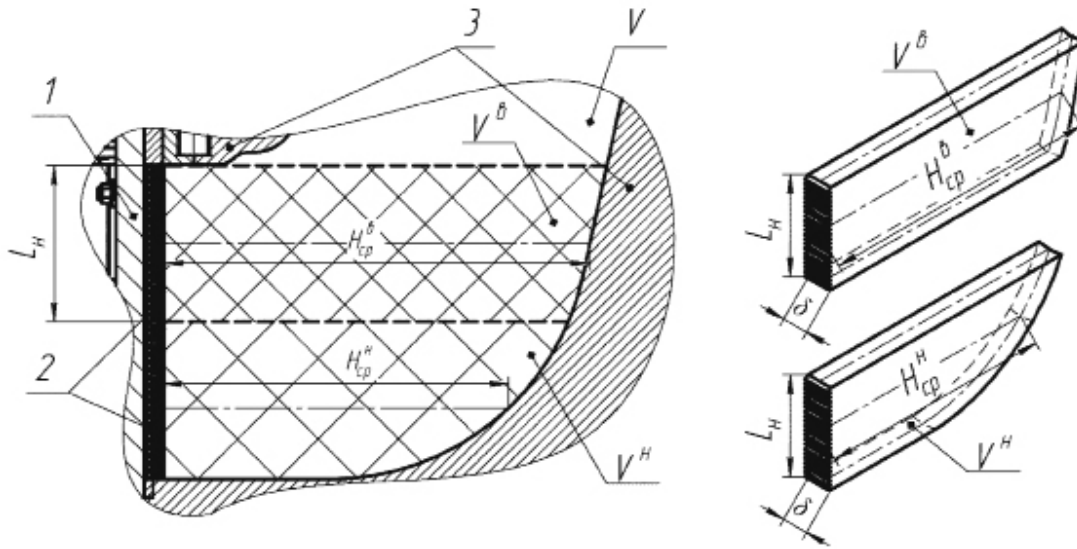


Рис. 5. Розрахункова схема середньої відстані від передньої поверхні ножа до осердя завитка відцентрової бурякорізки: 1 – ножова рама; 2 – ножі; 3 – завиток (ротор); V – внутрішній об'єм бурякорізки, м^3 .

$$P_{\text{Тжс}} = \frac{P_{\text{ТжсН}} + P_{\text{ТжсСБ}}}{2}, \quad P_{\text{ТжсН}} = m_{\text{БН}} \cdot g, \quad m_{\text{БН}} = V_{\text{БН}} \cdot \rho_{\text{вб}}, \quad V_{\text{БН}} = S_{\text{ср1Б}} \cdot 2L_n, \quad P_{\text{ТжсСБ}} = m_{\text{СБ}} \cdot g,$$

$$m_{\text{СБ}} = V_{\text{СБ}} \cdot \rho_{\text{вб}}, \quad V_{\text{СБ}} = S_{\text{ср1Б}} \cdot h_{\text{СБ}},$$

де $m_{\text{БН}}$ – середня маса буряків які контактують з одним рядом ножів, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $V_{\text{БН}}$ – об'єм в якому знаходяться буряки, що контактують з одним рядом ножів, м^3 ; $S_{\text{ср1Б}}$ – середня площа поперечного перерізу одного буряка, м^2 ; $m_{\text{СБ}}$ – маса стовпа буряків, що знаходиться над ножами, кг; $V_{\text{СБ}}$ – об'єм стовпа буряків, м^3 ; $h_{\text{СБ}}$ – висота стовпа буряків, що знаходяться над ножами, м (мінімальне значення $h_{\text{СБ}} = 0,8 + 0,165 = 0,965$ м [4]).

Оскільки цукровий буряк має кулеподібну форму задамося умовою, що об'єм цукрового буряка відповідає об'єму кулі ($V_{\text{кулі}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}$), а площа поперечного перерізу визначатиметься за формулою площі круга ($S_{\text{м}} = \pi \cdot r^2$). Виразивши в рівняння площі круга радіус (r) та підставивши його в формулу

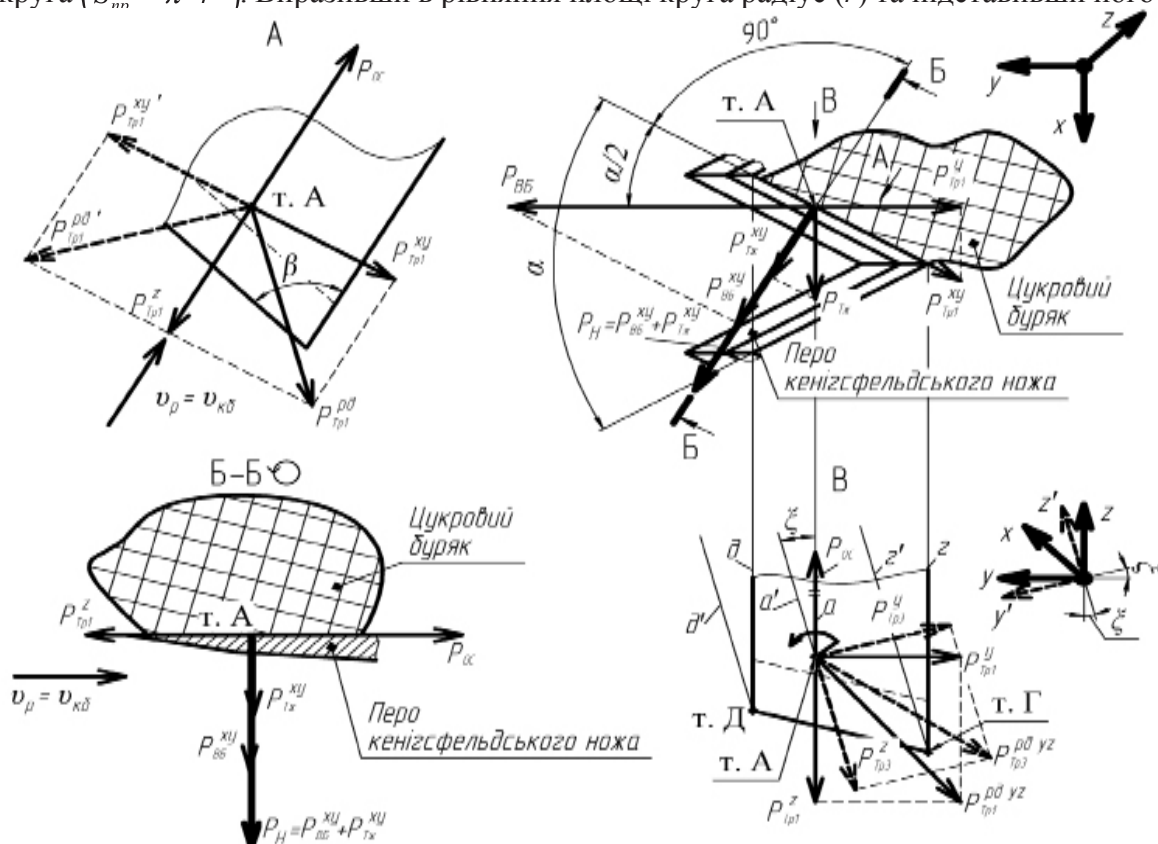


Рис. 6. Схема сил, що діють на верхню передню площину кенігсфельдського ножа зі сторони цукрового буряка в точці А.

об'єму кулі отримаємо:

$$V_{\text{кулі}} = \frac{4 \cdot S_{\text{пр}}^2}{3 \cdot \pi}, \quad (5)$$

де $V_{\text{кулі}}$ – об'єм кулі, м³; r – радіус кулі, м; $S_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу кулі, який проходить через її центр, м².

Середній об'єм одного цукрового буряка можна розрахувати за формулою:

$$V_{\text{ср1Б}} = \frac{m_{\text{ср1Б}}}{\rho_{\text{срБ}}}, \quad (6)$$

де $m_{\text{ср1Б}}$ – середня маса одного буряка, кг; $\rho_{\text{срБ}}$ – середня густина тканини цукрових буряків, кг/м³ ($\rho_{\text{срБ}} = 1060$ кг/м³).

Середню масу одного коренеплоду цукрового буряка можна визначити із врожайності, так наприклад, при врожайності цукрових буряків 200 ц/га середня маса коренеплоду становитиме 200 г при 400 ц/га – 400 г. З 2007 по 2013 р.р. середня врожайність на полях України становила 346 ц/га [5], тобто середня маса одного коренеплоду становить ≈ 350 г.

Прирівнявши рівняння (5) до формули (6) та виразивши площу поперечного перерізу отримаємо:

$$S_{\text{ср1Б}} = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi \cdot m_{\text{ср1Б}}}{4 \cdot \rho_{\text{срБ}}}}. \quad (7)$$

Тоді загальна сила тяжіння $P_{\text{Тжс}}$, що діє на передні верхні площини одного ножа буде визначатися за формулою:

$$P_{\text{Тжс}} = \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{\text{ср1Б}} \cdot \rho_{\text{вб}} \cdot g \cdot (2 \cdot L_{\text{н}} + h_{\text{сб}})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_{\text{срБ}}}}. \quad (8)$$

Проекції відцентрової сили і загальної сили тяжіння на вісь ХОУ (рис. 7, 8) визначають за формулами:

$$P_{\text{ВБ}}^{\text{ху}} = P_{\text{ВБ}} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L_{\text{н}} \cdot \delta \cdot (H_{\text{ср}}^{\text{в}} + H_{\text{ср}}^{\text{н}})}{2} \cdot \rho_{\text{вб}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L_{\text{н}} \cdot \delta \cdot (H_{\text{ср}}^{\text{в}} + H_{\text{ср}}^{\text{н}}) \cdot \rho_{\text{вб}} \cdot v_{\text{р}}^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

$$P_{\text{Тжс}}^{\text{ху}} = P_{\text{Тжс}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{\text{ср1Б}} \cdot \rho_{\text{вб}} \cdot g \cdot (2 \cdot L_{\text{н}} + h_{\text{сб}})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_{\text{срБ}}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (9)$$

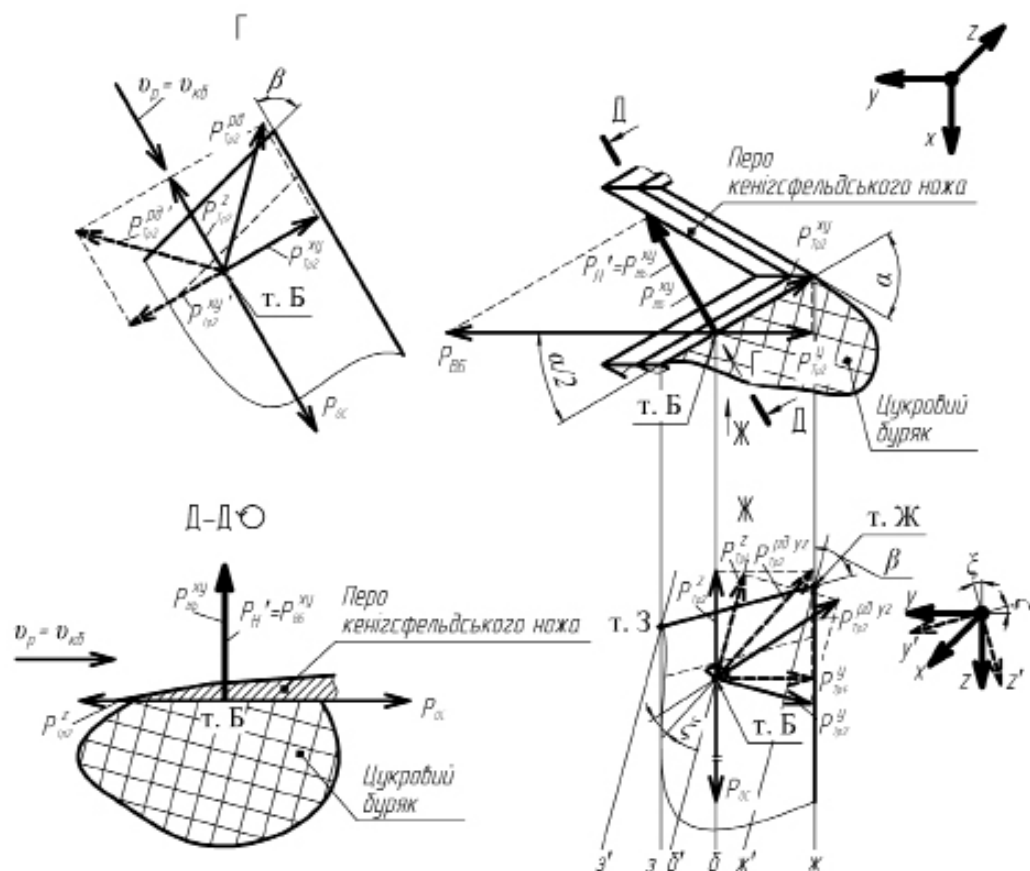


Рис. 7. Схема сил, що діють на нижню передню площину кенігсфельдського ножа зі сторони цукрового буряка в точці Б

де α – кут при вершині пера ножа, град.

З цих формул видно, що зі зменшенням кута α дія відцентрової сили на ніж зменшується а сили тяжіння збільшується.

Загальні сили нормального тиску P_H (рис. 6) і P'_H (рис. 7), що діють на верхню і нижню передні площини кенігсфельдського ножа визначатимуться за формулами:

$$P_H = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_{CB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2},$$

$$P'_H = P_{BB}^{xy} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (10)$$

Вищезгадані сили нормального тиску створюють на верхній на нижній передніх площинах дві ортогонально направлені сили тертя.

На верхній площині це: P_{mp1}^{xy} або $P_{mp1}^{xy'}$ та P_{mp1}^z (рис. 6). На нижній площині: P_{mp2}^{xy} або $P_{mp2}^{xy'}$ та P_{mp2}^z (рис. 7).

Сили тертя P_{mp1}^{xy} і $P_{mp1}^{xy'}$ виражаються формулою (по закону Амонтона):

$$P_{mp1}^{xy} = P_{mp1}^{xy'} = f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_{CB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (11)$$

де f_{III} – коефіцієнт тертя цукрового буряка по передній поверхні пера ножа.

На верхній передній площині ножа виникає сила P_{mp1}^{xy} чи $P_{mp1}^{xy'}$. У випадку коли $P_{BB} > P_{Tж}$ частина цукрового буряка, що знаходиться на верхній площині буде по ній підніматися, гальмуючись силою $P_{Tж}$. Сила тертя P_{mp1}^{xy} буде направлена в напрямку спуску, тобто від впадини до вершини. В даному випадку цукровий буряк всією площиною новоутвореного зрізу буде притискатися до ножа. Якщо $P_{BB} < P_{Tж}$, то частинка цукрового буряка здійснює спуск по передній верхній площині, який гальмується силою P_{BB} , а сила тертя $P_{mp1}^{xy'}$, яка гальмує даний рух – направлена протилежно до спуску (від вершини до впадини).

На нижній передній площині кенігсфельдського ножа сила тертя виникає лише за рахунок проекції відцентрової сили на нормаль до поверхні тертя, тобто за рахунок P_{BB}^{xy} . Силу тертя P_{mp2}^{xy} можна визначити за формулою:

$$P_{mp2}^{xy} = f_{III} \cdot \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (12)$$

Сили тертя P_{mp1}^z і P_{mp2}^z виникають в наслідок переміщення цукрового буряка вздовж осі z коловою силою P_{KB} . Оскільки сили тертя P_{mp1}^z , P_{mp2}^z , створюються тими ж нормальними силами що і P_{mp1}^{xy} , P_{mp2}^{xy} , то справедливі такі залежності: $P_{mp1}^z = P_{mp1}^{xy}$, $P_{mp2}^z = P_{mp2}^{xy}$.

Рівнодійні P_{mp1}^{pd} , P_{mp2}^{pd} , ортогональних сил тертя визначаються за формулами:

$$P_{mp1}^{pd} = \sqrt{(P_{mp1}^z)^2 + (P_{mp1}^{xy})^2} = \sqrt{2 \cdot (P_{mp1}^{xy})^2} = \sqrt{2} \cdot P_{mp1}^{xy},$$

$$\text{або} \quad P_{mp1}^{pd} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_B}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (13)$$

Рівнодійна сил P_{mp2}^z і P_{mp2}^{xy} визначається по аналогії за формулою:

$$P_{mp2}^{pd} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (14)$$

Зовнішні сили (P_{BB} , $P_{Tж}$, P_{mp1}^{pd} , P_{mp2}^{pd}), що діють зі сторони цукрових буряків на ніж змінюються в часі, оскільки змінюється маса буряків, що обертається в бурякорізці, висота їх стовпа, швидкість різання, частота обертання завитка та інші фактори. Необхідно забезпечувати максимально можливу стабільність цих факторів, що призведе, до покращення роботи відцентрової бурякорізки, а відповідно покращення якості стружки.

Під час роботи відцентрової бурякорізки необхідно регулювати ножові рами для отримання заданого типу та необхідної площі поперечного перерізу бурякової стружки (числа Сіліна). Дане регулювання проводять шляхом зміщення ножових рам в вертикальному напрямі та зміною підйому бурякорізальних ножів. При підйомі ножів кут ξ збільшується. У випадку $\xi > 0^\circ$ сила нормального тиску, що діє на верхню передню поверхню кенігсфельдського ножа P_H трансформується в $P_{H\xi}$, яка буде визначатися за формулою $P_{H\xi} = P_{BB}^{xy} \cdot \cos \xi + P_{Tж}^{xy}$. Сила, що діє на нижню передню поверхню

P_H' перетвориться в $P_{H\xi}' = P_{BB}^{xy} \cdot \cos \xi$. Сили P_{mp1}^{xy} , $P_{mp1}'^{xy}$, P_{mp2}^{xy} , P_{mp1}^z , P_{mp2}^z , P_{mp1}^y , P_{mp2}^y , P_{mp1}^{pd} , P_{mp2}^{pd} , $P_{mp1}^{pd\ yz}$, $P_{mp2}^{pd\ yz}$ трансформуються в P_{mp3}^{xy} , $P_{mp3}'^{xy}$, P_{mp4}^{xy} , P_{mp3}^z , P_{mp4}^z , P_{mp3}^y , P_{mp4}^y , P_{mp3}^{pd} , P_{mp4}^{pd} , $P_{mp3}^{pd\ yz}$, $P_{mp4}^{pd\ yz}$ і визначатимуться за формулами:

$$P_{mp3}^{xy} = P_{mp3}'^{xy} = P_{mp3}^z = f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \xi + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (15)$$

$$P_{mp4}^{xy} = P_{mp4}^z = f_{III} \cdot \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \xi, \quad (16)$$

$$P_{mp3}^{pd} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \xi + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (17)$$

$$P_{mp4}^{pd} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \xi. \quad (18)$$

Крутний момент на валу ротора відцентрової бурякорізки буде визначатися за формулою $M_{kp} = \frac{N_p}{\omega}$, де M_{kp} – крутний момент на валу ротора бурякорізки, Н·м; N_p – потужність на валу ротора, Вт.

Колове зусилля на кінцях лопатей ротора P_{KP} можна визначити за формулою:

$$P_{KP} = \frac{2 \cdot M_{kp}}{D_{\bar{b}}}, \text{ або } P_{KP} = \frac{N_p}{v}. \quad (19)$$

Оскільки цукрові буряки в процесі різання рухаються по внутрішній поверхні корпусу бурякорізки, то справджується рівність $P_{KP} = P_{KB}$.

При відомій колійній швидкості обертання завитка (ротора) v_{kp} колове зусилля можна визначити за формулою:

$$P_{KB} = \frac{N_d \cdot \eta_{np}}{v_{kp}}. \quad (20)$$

де η_{np} – ККД приводу.

Загальний опір сил тертя від взаємодії цукрових буряків з одним ножом кенігсфельдського типу при $\xi = 0$ град можна визначити за формулою:

$$P_{on} = P_{mp1}^z + P_{mp2}^z = f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (21)$$

При $\xi > 0$ град:

$$P_{on\xi} = P_{mp3}^z + P_{mp4}^z = f_{III} \cdot \left(\frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^6 + H_{cp}^u) \cdot \rho_{66} \cdot v_p^2}{R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \xi + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{66} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (22)$$

Висновок

Вирішено аналітичним шляхом величину і напрям дії всіх елементів силової взаємодії цукрових буряків з передніми поверхнями ножів найпоширеніших типів під час роботи відцентрових бурякорізок. Дані залежності дозволяють визначити: вплив конструкції робочих органів бурякорізальних машин на стабільність їх роботи; характер і напрям руху цукрових буряків; витрати енергії на тертя по передніх поверхнях ножів.

Список використаних джерел

1. Штангеев В. О. Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства: в 2-х ч. Ч. 1. / В. О. Штангеев, В. Т. Кобер, Л. Г. Белостоцкий и др. – К. : «Цукор України», 2003. – С. 71-73.
2. Азрилевич М. Я. Каталог специального оборудования для сахарных заводов. / М. Я. Азрилевич. – М. : Издательский комплекс МГУПП, 2007. – С. 29.
3. Asadi M. Beet-Sugar Handbook. / M. Asadi. – New Jersey : Published by John Wiley & Sons, Inc., 2007. – С. 147-148.
4. Правила ведения технологического процесса производства сахара из сахарной свеклы / Российский научно-исследовательский институт сахарной промышленности. – Курск, 2009. – С. 117.
5. Ярчук М. М. Буряки і цукор України: попередні підсумки роботи галузі за 2013 рік / М. М. Ярчук // Цукрові буряки. - 2014. № 1(97). - С. 4-7.
6. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру з цукрових буряків : правила установленої практики 15,83-37-106 : 2007. — К. : Видавництво ТОВ «Інформаційно-Аналітичний Центр Цукор України», 2007. — 419 с.
7. Denkena B. Cutting edge geometries / B. Denkena, D. Biermann // CIRP Annals-Manufacturing Technology — 2014. № 63(2), pp. 631-653.