

## Аналитическое определение общего сопротивления сил трения сахарной свеклы при резке ножом кенигсфельдского типа

Александр Люлька, Цветан Димитров, Дмитрий Люлька, Виталий Пономаренко

**The analytical determination of the total resistance of the friction forces of sugar beet with a beet knife.** *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.*

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для извлечения сахарозы диффузионным способом ткани сахарной свеклы ее необходимо измельчить в стружку. Данный процесс осуществляется в свеклорезательных машинах. Наибольшее распространение получили центробежные свеклорезки, поэтому рассмотрим именно их.

Как свидетельствуют работы ученых [1-3], занимавшихся исследованием затрат энергии на работу центробежных свеклорезок более 70% энергии расходуется на преодоление сил трения сахарной свеклы по внутренней поверхности корпуса свеклорезки и по передним поверхностям ножей, причем, на трение по передним поверхностям ножей тратится от 10% до 30% этой энергии в зависимости от марки свеклорезки. Силы трения между новообразованными срезами сахарной свеклы и передними поверхностями ножей возникают не только от центробежной силы, но и от действия силы тяжести. На величину этих сил трения влияет геометрия ножей и их расположение в ножевых рамах [4]. Данные силы следует рассматривать в рамках силового взаимодействия сахарной свеклы с передней поверхностью свеклорезальных ножей.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

В процессе резки в центробежной свеклорезке взаимодействуют 3 тела: сахарная свекла, нож и свекловичная стружка. Наиболее часто для резки свеклы на стружку используют кенигсфельдские ножи передняя поверхность которых состоит из последовательно расположенных пер. Силовое взаимодействие свеклы с ножом происходит по передним поверхностям ножа и вновь образованному срезу сахарной свеклы.

Движение сахарной свеклы внутри центробежной свеклорезки во время ее работы можно разложить на 3 составляющие:

- прямолинейное горизонтальное в направлении от оси ротора к внутренней поверхности корпуса центробежной свеклорезки обусловлено центробежной силой  $P_{ВБ}$  (рис. 1);
- вращательное горизонтальное в направлении вращения ротора свеклорезки обусловлено круговой силой  $P_{КБ}$ ;
- прямолинейное вертикальное от действия силы тяжести на сахарную свеклу слоя свеклы, находящихся над ним  $P_{Тж}$ .

В результате на верхней и нижней передних поверхностях кенигсфельдского ножа и (или) передней поверхности плоского ножа возникают силы трения [5].

Распределенные нагрузки, что действуют на передние поверхности ножа заменим равнодействующей силой, действующей с стороны сахарной свеклы на верхнюю и нижнюю передние плоскости, перьев кенигсфельдского ножа:

$P_{BB}^{xy}$ ,  $P_{Тж}^{xy}$  – проекции в плоскости XOY, которые соответствуют центробежной силе и силе тяжести на нормали к верхней и нижней передним плоскостям кенигсфельдского ножа;

$P_{BB}$  – центробежная сила (параллельна оси OY);

$P_{Тж}$  – общая сила тяжести (параллельна оси OX);

$P_{KB}$  – круговая сила, действующая на сахарную свеклу (параллельна оси OZ);

$P_H$ ,  $P_H^1$  – силы нормального давления соответственно на верхнюю и нижнюю передние плоскости кенигсфельдского ножа, возникающие за счет центробежной силы  $P_{BB}$  и силы тяжести  $P_{Тж}$ , численно равны сумме их проекций на нормаль к верхней и нижней передним плоскостям кенигсфельдского ножа в плоскости XOY;

$P_{mp1}^{xy}$  – сила трения сахарной свеклы по верхней передней плоскости кенигсфельдского ножа, которая возникает от действия центробежной силы и силы тяжести (при условии  $P_{BB} > P_{Тж}$ , она направлена в направлении от впадины к вершине ножа, если  $P_{BB} < P_{Тж}$ , то вместо нее возникнет сила, равна по величине, но направленная от вершины к впадине);

$P_{mp2}^{xy}$  – сила трения сахарной свеклы по нижней передней плоскости кенигсфельдского ножа, которая возникает от действия центробежной силы;

$P_{mp1}^z$  – сила трения сахарной свеклы по верхней передней плоскости кенигсфельдского ножа, которая возникает от действия центробежной силы и силы тяжести (одновременно);

$P_{mp2}^z$  – сила трения сахарной свеклы по нижней передней плоскости кенигсфельдского ножа, которая возникает от действия центробежной силы;

$P_{mp1}^{p6}$  – равнодействующая от двух сил трения  $P_{mp1}^{xy}$  и  $P_{mp1}^z$ , которая находится на верхней передней плоскости кенигсфельдского ножа;

$P_{mp2}^{p6}$  – равнодействующая от двух сил трения  $P_{mp2}^{xy}$  и  $P_{mp2}^z$ , которая находится на нижней передней плоскости кенигсфельдского ножа.

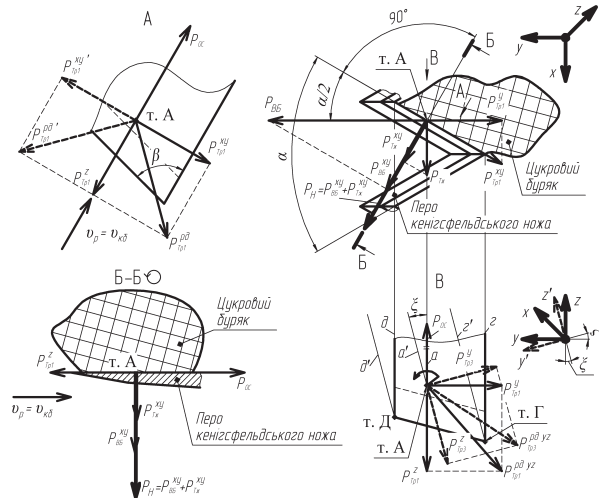


Рис. 1. Силы, действующие на верхнюю переднюю плоскость кенигсфельдского ножа со стороны сахарной свеклы в точке А

Центробежная сила, действующая на сахарную свеклу по величине равна центростремительной силе, но противоположная ей по направлению:

$$P_{BB} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n)}{2} \cdot \rho_{\omega^6} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot R = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n) \cdot \rho_{\omega^6} \cdot v_p^2}{2 \cdot R}. \quad (1)$$

Общая сила тяжести  $P_{Тж}$  действующая на один нож будет состоять из силы тяжести свеклы, которая контактирует с ним  $P_{ТжН}$  и силы вызванной давлением столба свеклы, которая находится над ними  $P_{ТжСБ}$ .

Общая сила тяжести  $P_{Тж}$ , действующая на передние верхние плоскости одного ножа будет определяться по формуле:

$$P_{Тж} = \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1Б}} \cdot \rho_{\omega^6} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{СБ})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpБ}}}. \quad (2)$$

Проекции центробежной силы и общей силы тяжести на плоскость ХОУ находятся из соотношений:

$$P_{BB}^{xy} = P_{BB} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n)}{2} \cdot \rho_{\omega^6} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n) \cdot \rho_{\omega^6} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

$$P_{Тж}^{xy} = P_{Тж} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1Б}} \cdot \rho_{\omega^6} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{СБ})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpБ}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - угол при вершине перьев ножа, град.

Из этих формул следует, что с уменьшением угла  $\alpha$  действие центробежной силы на нож уменьшается, а силы притяжения увеличиваются.

Общие силы нормального давления  $P_H$  (рис. 1) и  $P'_H$  (рис. 2), действующие на верхнюю и нижнюю передние плоскости кенигсфельдского ножа нами определены по формулам:

$$P_H = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n) \cdot \rho_{\omega^6} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1Б}} \cdot \rho_{\omega^6} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{СБ})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpБ}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2},$$

$$P'_H = P_{BB}^{xy} = \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^n) \cdot \rho_{\omega^6} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

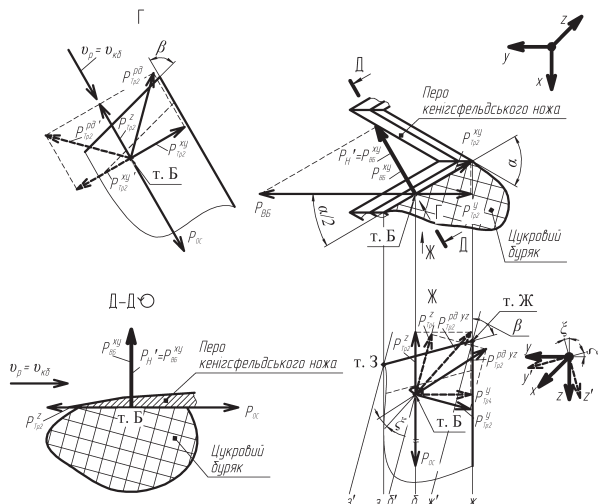


Рис. 2. Силы, действующие на нижнюю переднюю плоскость

кенигсфельдского ножа со стороны сахарной свеклы в точке Б

Вышеупомянутые силы нормального давления создают на верхней и нижней передних плоскостях две ортогонально направленные силы трения.

На верхней плоскости это:  $P_{mp1}^{xy}$  или  $P_{mp1}^{xy'}$  и  $P_{mp1}^z$  (рис. 1). На нижней плоскости:  $P_{mp2}^{xy}$  либо  $P_{mp2}^{xy'}$  и  $P_{mp2}^z$  (рис. 2).

Силы трения  $P_{mp1}^{xy}$  и  $P_{mp1}^{xy'}$  выражаются формулой (по закону Амонтона):

$$P_{mp1}^{xy} = P_{mp1}^{xy'} = f_{III} \cdot \left( \frac{L_u \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^u) \cdot \rho_{\omega\delta} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{\omega\delta} \cdot g \cdot (2 \cdot L_u + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (5)$$

где  $f_{III}$  - коэффициент трения сахарной свеклы по передней поверхности перьев ножа.

На верхней передней плоскости ножа возникает сила  $P_{mp1}^{xy}$  или  $P_{mp1}^{xy'}$ . В случае когда  $R_{вБ} > R_{тж}$  часть сахарной свеклы, что находится на верхней плоскости будет по ней подниматься, замедляясь силой  $R_{тж}$ . Сила трения  $P_{mp1}^{xy}$  будет стремиться в направлении спуска, то есть от впадины к вершине. В данном случае сахарная свекла всей плоскостью вновь созданного среза будет прижиматься к ножу. Если  $R_{вБ} < R_{тж}$ , то частица сахарной свеклы осуществляет спуск по передней верхней плоскости, который тормозится силой  $R_{вБ}$ , а сила трения  $P_{mp1}^{xy'}$ , которая замедляет данное движение - направлена противоположно спуску (от вершины к впадине).

Сила трения определяется по формуле:

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

Силы трения  $P_{mp1}^z$  и  $P_{mp2}^{xy}$  возникают вследствие перемещения сахарной свеклы вдоль оси z круговой силой  $R_{кБ}$ . Поскольку они, создаются теми же нормальными силами что и  $P_{mp1}^{xy}$ ,  $P_{mp2}^{xy}$ , то справедливы следующие зависимости:

$$P_{mp1}^z = P_{mp1}^{xy}, \quad P_{mp2}^z = P_{mp2}^{xy}.$$

Равнодействующая, ортогональных сил трения на верхней передней грани определяется по формулам:

$$P_{mp1}^{p0} = \sqrt{(P_{mp1}^z)^2 + (P_{mp1}^{xy})^2} = \sqrt{2 \cdot (P_{mp1}^{xy})^2} = \sqrt{2} \cdot P_{mp1}^{xy},$$

или:

$$P_{mp1}^{p0} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \left( \frac{L_u \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^u) \cdot \rho_{\omega\delta} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{cp1B}} \cdot \rho_{\omega\delta} \cdot g \cdot (2 \cdot L_u + h_{CB})}{4 \cdot \sqrt{\rho_{cpB}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (7)$$

Равнодействующая сил на нижней передней грани рассчитывается по соотношению:

$$P_{mp2}^{p0} = \sqrt{2} \cdot f_{III} \cdot \frac{L_u \cdot \delta \cdot (H_{cp}^e + H_{cp}^u) \cdot \rho_{\omega\delta} \cdot v_p^2}{2 \cdot R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (8)$$

Внешние силы ( $R_{вБ}$ ,  $R_{тж}$ ), действующие со стороны сахарной свеклы на нож изменяются во времени, поскольку меняется масса свеклы, в корпусе свеклорезки,

высота столба, скорость резания, частота вращения и другие определяющие параметры. Необходимо обеспечивать максимально возможную стабильность этих факторов, что приведет, к улучшению работы центробежной свеклорезки, а соответственно улучшению качества стружки.

Общее сопротивление сил трения от взаимодействия сахарной свеклы с одним ножом кенигсфельдского типа можно определяется по формуле:

$$P_{\text{от}} = P_{\text{мп1}}^z + P_{\text{мп2}}^z = f_{\text{III}} \cdot \left( \frac{L_n \cdot \delta \cdot (H_{\text{cp}}^e + H_{\text{cp}}^u) \cdot \rho_{\text{св}} \cdot v_p^2}{R} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3 \cdot \pi \cdot m_{\text{ср1Б}} \cdot \rho_{\text{св}} \cdot g \cdot (2 \cdot L_n + h_{\text{СБ}})}}{4 \cdot \sqrt{\rho_{\text{срБ}}}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (9)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическим путем найдены зависимости для определения численного значения величин и направлений действия всех сил при взаимодействии сахарной свеклы с передними поверхностями ножей кенигсфельдского типа во время работы центробежных свеклорезок. Данные зависимости позволяют определить характер и направление движения сахарной свеклы по передней поверхности ножа в зависимости от соотношения сил тяжести и центробежной силы; затраты энергии на трение по передним поверхностям ножа.

## ЛИТЕРАТУРА

- [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 ведення технологічного процесу виробництва цукру з цукрових буряків : правила усталеної практики 15,83-37-106 : 2007. — К. : Видавництво ТОВ "Інформаційно-Аналітичний Центр Цукор України ", 2007. — 419 с.
- [5] Denkena B. Cutting edge geometries / B. Denkena, D. Biermann // CIRP Annals-Manufacturing Technology — 2014. № 63(2), pp. 631-653.

## Для контактов:

Ассистент Александр Люлька, кафедра технологического оборудования и компьютерных технологий проектирования, Государственное высшее учебное заведение "Национальный университет пищевых технологий", г. Киев, Украина, тел: (067) 239-31-12, e-mail: lulkaom@ukr.net.

## Доклад был рецензирован