



Scientific quarterly journal ISSN 1429-7264

**Agricultural Engineering**

2014: 4(152):23-44

Homepage: <http://ir.ptir.org>



DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.152.078>

## THEORY OF THE PLOUGHING MECHANISM OF THE SUGAR BEET COMBINE HARVESTER

Volodymyr Bulgakov<sup>a\*</sup>, Valerii Adamchuk<sup>b</sup>, Taras Gutcol<sup>c</sup>

<sup>a</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

<sup>b</sup>National Technical University of Agriculture of Ukraine

<sup>c</sup>Podilsky State Agrarian Technical University of Ukraine

\*Contact details: Str. Geroev Oborony 15, 03041, Kyiv, Ukraine, e-mail: [vbulgakov@meta.ua](mailto:vbulgakov@meta.ua)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: June 2014

Received in the revised form:

September 2014

Accepted: December 2014

#### Keywords:

*beet plough*

*theory of mechanisms*

*mathematical model*

### ABSTRACT

Forces acting on the sugar beet combine plough are caused not only by physical properties of soil (e.g. its compactness) but also by physical properties of the harvested crop (i.e. sugar beets). A current theory on rooting out sugar beets has included only physical properties of soil along with physical and geometrical parameters of the ploughing mechanism. The article presents a mathematical model of mechanical influence of the soil layer together with the mass of sugar beets roots on the beets ploughing element. Mathematical formulas of the developed theory were verified with exemplary calculations for the accepted working parameters of the sugar beets harvesting combine (inter alia working speed, working depth).

## Einführung

Die Theorie der Extraktion der Hackfrüchte aus dem Boden mit dem Roderschar, die der Arbeit anderer Wirkorgane der Landmaschinen auf Grund der fundamentalen Forschungen des Dreikantkeilbewegungs im Boden zugrunde liegt, galt als erforscht und wurde bereits viele Jahre lang in der Lehliteratur (Bosoj, 1977; Chawostov, 1995) behandelt. Beim Studium dieser Literatur wurde festgestellt, daß da nur die Frage des Zusammenwirkens der Scharoberflächen des Roders mit der Bodenschicht im Roder behandelt wird, und die Frage der Bedingungen für dessen Kompression und Zerstörung. Es wurde angenommen, daß gleiche Bedingungen auch für die Hackfrüchte in der Bodenschicht für ihre endgültige und qualitative Extraktion aus dem Boden geschaffen werden. Aber die Hackfrucht als Objekt der Analyse der Kinematik und Kraft wurde hierbei nicht betrachtet, da sein Kontakt mit den Keilkanten, die Bewegung im Raum beim Zusammenwirken mit Scharen sowie Bedingungen ihrer Nichtbeschädigungen bei der Extraktion aus dem Boden und usw. nicht untersucht wurde.

## Zweck und Umfang der Analyse

Wir haben es sich zum Ziel gesetzt, die Theorie des Rodens der Rübenwurzeln mit dem Scharroder zu schaffen, die die Hackfrucht als Gegenstand der mechanik-mathematischen Forschung betrachtet, und ausgerechnet für das Zusammenwirken des Roders und des Rübekörpers wird das mathematische Modell geschaffen werden. Das neue Theorie wird die Anfangsergebnisse der Forschungen bezüglich der Deformation der Bodenschicht zwischen zwei Keilen des Scharroders (Bosoj, 1977) zugrunde gelegt.

Bei der Bewegung des Scharroders wird die Bodenschicht der Reihe der Hackfrüchte entlang durch die Keile zerstört, die sich samt den Wurzelkörpern zwischen den inneren Keiloberflächen des Roders verjüngt. Da die Keile unter den entsprechenden Winkeln  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  positioniert sind, so werden die Bodenschicht und die Wurzelkörper bei der Vorwärtsbewegung der Keile zusammen gepresst und deformiert. Bei der weiteren Bewegung der Schicht zwischen den sich verengenden Oberflächen werden die für die Wurzelkörper die Kräfte deren Rodens aus der Erde geschaffen.

Das Zusammenwirken der Kräfte des Scharroders und des Bodens untersucht werden. Dafür stellen wir das Kraftschema wie auch in (Bosoj, 1977) zusammen, wo wir den Scharroder mit der zwischen seinen Keilen gepressten Bodenschicht  $KL$  zeigen/abbilden. In der Bodenschicht befindet sich der Rübekörper, dessen Form wir als echten Kegel (Abb. 1) darstellen. Unter der Wirkung der Bodenstützkraft, die als gleichmäßig verteilte Belastung mit einer Intensität  $\bar{q}$  dargestellt wird, wird das Element  $KL$  zwischen den Wirkoberflächen des Scharroders bei der Vorwärtsbewegung allmählich zusammen gepresst. Unter die Stützkraft, die unmittelbar auf den Rübekörper übertragen wird, bezeichnen wir  $\bar{Q}$ . Infolge der Wirkung der normalen Kräfte  $\bar{N}$  und der Reibungskräfte  $\bar{F}$  entsteht in den Kontaktpunkten  $K$  und  $L$  der Bodenschicht mit den Keiloberflächen die Spannung. Auf den Teil des Rübekörpers, der sich innerhalb der Schicht  $KL$  befindet (der untere Teil des Rübekörpers befindet sich in der nicht deformierten Bodenschicht), wirkt die bereits festgesetzte Kraft  $\bar{Q}$ , bedingt durch die Stützkraft  $\bar{q}$ . Auf diesen Teil des Rübekörpers wirken andererseits auch die Kräfte  $\bar{P}'_{xi}, \bar{P}'_{yi}, \bar{P}'_{zi}$ , ( $i=1,2$ ), die von den Keiloberflächen getragen werden, wo die Kräfte  $\bar{P}_{xi}, \bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$ , ( $i=1,2$ ) entstehen.

Jede der erwähnten Kräfte, die von den Scharoberflächen wirken, ist auf der Abb. 1 mit dem entsprechenden Koeffizient abgebildet. Die Kräfte, die von der Wirkoberfläche  $A_1B_1C_1$  übertragen werden und auf die Bodenschicht im Punkt  $K$  wirken, sind mit Index 1 –  $\bar{P}_{x1}, \bar{P}_{y1}, \bar{P}_{z1}$ , und die Kräfte, die auf den Wurzelkörper unmittelbar von dieser Oberfläche wirken, werden –  $\bar{P}'_{x1}, \bar{P}'_{y1}, \bar{P}'_{z1}$  bezeichnet. Die Kräfte, die auf die Bodenschicht im Punkt  $L$  von der Wirkoberfläche  $A_2B_2C_2$  wirken, sind mit Index 2 –  $\bar{P}_{x2}, \bar{P}_{y2}, \bar{P}_{z2}$  bezeichnet, und die Kräfte, die auf den Wurzelkörper unmittelbar von dieser Oberfläche auf den Rübekörper wirken, mit  $\bar{P}'_{x2}, \bar{P}'_{y2}, \bar{P}'_{z2}$  bezeichnet. Die Wirkung der besagten Kräfte auf den Wurzelkörper hängt von ihrer Entstehung an den Keiloberflächen und vom Charakter der Übertragung in der deformierten Bodenschicht ab. Die Kraft der Bindung des Wurzelkörpers mit dem Boden bezeichnen wir als –  $\bar{R}$ . Sie ist wie vereinbart an der Achse

des Wurzelkörpers angeordnet und ist üblicherweise senkrecht nach unten gerichtet. Aber bei der unmittelbaren Extraktion des Wurzelkörpers aus dem Boden kann sie entlang den entsprechenden Koordinatenachsen verlaufen. Auf Abb. 1 ist sie als Projektionen  $R_x$ ,  $R_z$  dargestellt.

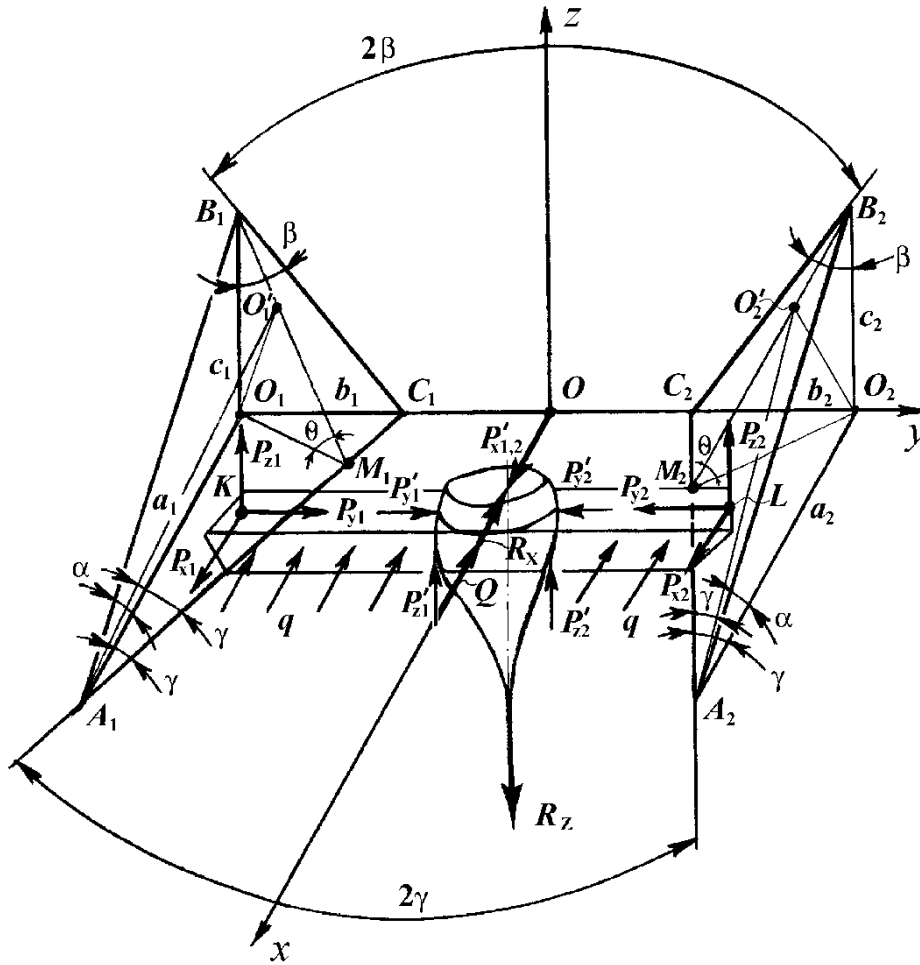


Abbildung 1. Zusammenwirken des Scharrodgers mit dem Boden

Bestimmen wir die erwähnten Kräfte. Die Kräfte  $\bar{P}_{xi}, \bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$  ( $i=1,2$ ), die auf Abb. 2 (Abb. 2 a, b, c) dargestellt sind, sind allgemein in der Vektorform für die Fläche  $A_1B_1C_1$ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{x1} &= \bar{N}_{x1} + \bar{F}_{x1}, \\ \bar{P}_{y1} &= \bar{N}_{y1} + \bar{F}_{y1}, \\ \bar{P}_{z1} &= \bar{N}_{z1} + \bar{F}_{z1}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

gleich und

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{x2} &= \bar{N}_{x2} + \bar{F}_{x2}, \\ \bar{P}_{y2} &= \bar{N}_{y2} + \bar{F}_{y2}, \\ \bar{P}_{z2} &= \bar{N}_{z2} + \bar{F}_{z2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

gleich, wo  $\bar{N}_{xi}, \bar{N}_{yi}, \bar{N}_{zi}$ , ( $i=1,2$ ) – normale Reaktionen der Keiloberflächen als Projektionen an den entsprechende Achsen der Koordinaten;  $\bar{F}_{xi}, \bar{F}_{yi}, \bar{F}_{zi}$ , ( $i=1,2$ ) – Reibungskräfte der Bodenschicht an den Keiloberflächen auch in den Projektionen an entsprechenden Achsen der Koordinaten.

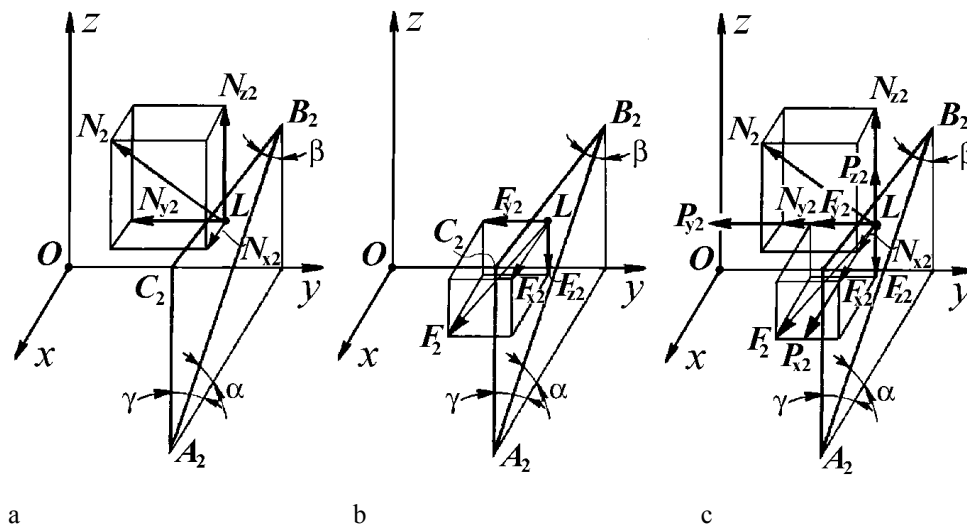


Abbildung 2. Schema der Kräfte, die auf einen der Roderkeile wirken: a) normale Komponente/Kraft  $\bar{N}_2$  und ihre Projektion auf die Koordinatenachse; b) reibungskraft  $\bar{F}_2$  und ihre Projektion auf die Koordinatenachse; c) summarische Kräfte, die von der Keiloberfläche  $P_{x2}, P_{y2}, P_{z2}$  übertragen werden.

Analysieren wir die Wirkung jeder der Kräfte, die Bestandteile der Formel (1) und (2) sind und die die Kräfte bilden, die von den Rodekeilen auf die Hackfrucht (Wurzelkörper) übertragen werden. Senkrechte Kräfte der Keiloberflächen  $\bar{P}'_{z1}, \bar{P}'_{z2}$  reißen die Hackfrucht aus der Erde (insbesondere den Teil der Hackfrucht, der im Boden eingeklemmt ist), die

waagerechten Querkräfte  $\bar{P}'_{y1}, \bar{P}'_{y2}$  pressen die Hackfrucht wie einen Keilkörper aus der Erde heraus.

Die horizontalen Kräfte  $\bar{P}'_{x1}, \bar{P}'_{x2}$  (auf Abb. 1 sind sie wie nur eine Kraft  $\bar{P}'_{x1,2}$  abgebildet) wirken in Richtung der Bewegung des Roders und mittels der Kraft  $\bar{Q}$  pressen die Wurzel aus dem Boden raus. Da die Kraft  $\bar{Q}$  gegen die Bewegung des Roders gerichtet ist, ist es nicht zu vermeiden, dass die Wurzelkörper manchmal beschädigt werden. Die Stützkraft  $\bar{Q}$  kann je nach Erdbeschaffenheit und aus anderen Gründen gering sein, dann ist  $P'_{x1,2} > Q$ , so dass die Wurzel unter der Wirkung bestimmter horizontaler Kraft  $R_i = P'_{x1,2} - Q$  nach vorne verschoben wird und dadurch zu Bruch der Wurzel im Bereich der Festklemmung in der nicht deformierter Bodenschicht führen kann. Aus diesem Grund kann die qualitative Arbeit der Rodeschare nur im Falle der Schaffung maßgeblicher Werte der Kräfte  $\bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$  und umgekehrt der niedrigeren Werte der Kräfte  $\bar{P}_{xi}$  erreicht werden.

Die Werte und die Richtung der Kräfte  $\bar{N}_i, \bar{F}_i$ , die Kräfte  $\bar{P}_{xi}, \bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$  ( $i=1,2$ ) bestimmen, hängen von vielen Faktoren ab: vom Zustand und der Beschaffenheit der Erde, von der Größe der Kraft  $\bar{R}$  der Bindung des Wurzelkörpers und der Erde, von geometrischen Parametern der Roderkeile und der Einstellungswinkel gegenüber der Richtung der Bewegung, der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung u.ä. Weiterhin betrachten wir den Einfluß der Winkel  $\alpha, \beta, \gamma$  auf die Werte der Kräfte  $\bar{P}_{xi}, \bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$ , ( $i=1,2$ ), die den Druck der Keiloberfläche auf die Bodenschicht und entsprechenderweise auf den Rübekörper erzeugen. Wie aus dem Schema Abb. 2 ersichtlich ist, wirkt im Kontaktpunkt  $L$  (Abb. 2a) normale Reaktion  $\bar{N}_2$ , die in Form von Projektionen an die entsprechenden Achsen der Koordinaten  $(N_{x2}, N_{y2}, N_{z2})$  dargestellt werden kann. Nach der Errechnung der besagten Projektionen der normalen Reaktion  $\bar{N}_2$  wird es möglich, auch die Reibungskraft  $\bar{F}_2$  zu finden, die auch in Form von Projektionen an die gleichen Achsen der Koordinaten -  $F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}$  dargestellt werden kann (Abb. 2b).

Finden wir die Größen der Kräfte  $\bar{N}_{xi}, \bar{N}_{yi}, \bar{N}_{zi}$ , die entlang den Achsen der Koordinaten  $x, y, z$  gerichtet sind und von der Richtung des selbigen Vektors der Kraft  $\bar{N}_i$ , ( $i=1,2$ ) abhängen. Für die Ebene  $A_1B_1C_1$  sind sie gleich:

$$\left. \begin{aligned} N_{x1} &= N_1 \cos(x, \hat{N}_1), \\ N_{y1} &= N_1 \cos(y, \hat{N}_1), \\ N_{z1} &= N_1 \cos(z, \hat{N}_1). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

für die Ebene  $A_2B_2C_2$

$$\left. \begin{aligned} N_{x2} &= N_2 \cos(x, \hat{\bar{N}}_2), \\ N_{y2} &= -N_2 \cos(y, \hat{\bar{N}}_2), \\ N_{z2} &= N_2 \cos(z, \hat{\bar{N}}_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

wo  $\cos(x, \hat{\bar{N}}_i)$ ,  $\cos(y, \hat{\bar{N}}_i)$ ,  $\cos(z, \hat{\bar{N}}_i)$  – die richtenden Kosinuswerte des Kraftvektors  $\bar{N}_i$  ( $i=1,2$  sind).

Und nun bestimmen wir die Abhängigkeit der gegebenen richtenden Kosinuswerte von den Winkeln  $\alpha, \beta, \gamma$ , die im Grunde genommen die Konstruktionsparameter des Roders bestimmen. Dazu bezeichnen wir die Abschnitte der Koordinatenachsen durch  $a_i, b_i, c_i$ , ( $i=1,2$ ), die der Arbeitskeiflächen abtrennen. Für die Fläche  $A_1B_1C_1$  sind das die Abschnitte  $a_1, b_1, c_1$ , und für die Fläche  $A_2B_2C_2 - a_2, b_2, c_2$ . Dann sind die Koordinaten dreier Punkte an jeder Fläche ( $A_1B_1C_1; A_2B_2C_2$ ) im übernommenen Koordinatensystem  $Oxyz$  entsprechenderweise gleich:

$$\left. \begin{aligned} x_{A1} &= a_1; \quad y_{A1} = -\frac{A_1A_2}{2}; \quad z_{A1} = 0; \\ x_{B1} &= 0; \quad y_{B1} = -\frac{A_1A_2}{2}; \quad z_{B1} = c_1; \\ x_{C1} &= 0; \quad y_{C1} = -\left[\left(\frac{A_1A_2}{2}\right) - b_1\right]; \quad z_{C1} = 0; \\ x_{A2} &= a_2; \quad y_{A2} = \frac{A_1A_2}{2}; \quad z_{A2} = 0; \\ x_{B2} &= 0; \quad y_{B2} = \frac{A_1A_2}{2}; \quad z_{B2} = c_2; \\ x_{C2} &= 0; \quad y_{C2} = \left(\frac{A_1A_2}{2}\right) - b_2; \quad z_{C2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Auf Grund der Hauptbestimmungen (Priwalov, 1960) und der Angaben (5) bilden wir eine Gleichung der Oberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  in Form von solchen Determinanten:

$$A_1B_1C_1 : \begin{vmatrix} x_{A1} - a_1 & y_{A1} + \frac{A_1A_2}{2} & z_{A1} \\ -a_1 & b_1 & 0 \\ -a_1 & 0 & c_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$A_2B_2C_2 : \begin{vmatrix} x_{A2} - a_2 & -y_{A2} - \frac{A_1A_2}{2} & z_{A2} \\ -a_2 & -b_2 & 0 \\ -a_2 & 0 & c_2 \end{vmatrix} = 0$$

Aus dem Schema auf Abb. 1 sehen wir, daß die Werte der entsprechenden Abschnitte  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ , ( $i=1,2$ ) an den Achsen gleich sind.

$$a_1 = \frac{b_1}{\operatorname{tg}\gamma}; \quad a_2 = -\frac{b_2}{\operatorname{tg}\gamma}; \quad c_1 = \frac{b_1}{\operatorname{tg}\beta}; \quad c_2 = -\frac{b_2}{\operatorname{tg}\beta}; \quad b_1 = b_2 = \frac{(A_1A_2 - C_1C_2)}{2} \quad (7)$$

Nach der Transformation der erhaltenen Determinanten bekommen wir folgende Gleichungen der Oberflächen:

$$A_1B_1C_1 : (x_{A1} - a_1)[b_1c_1 - 0 \cdot 0] + \left(y_{A1} + \frac{A_1A_2}{2}\right)[0 \cdot (-a_1) - (-a_1) \cdot c_1] + z_{A1}[(-a_1) \cdot 0 - b_1(-a_1)] = 0 \quad (8)$$

$$A_2B_2C_2 : (x_{A2} - a_2)[(-b_2) \cdot c_2 - 0 \cdot 0] + \left(-y_{A2} - \frac{A_1A_2}{2}\right) \times [0 \cdot (-a_2) - (-a_2) \cdot c_2] + z_{A2}[(-a_2) \cdot 0 - (-b_2)(-a_2)] = 0$$

Nach der Substitution (7) in (8) und nach entsprechenden Transformationen bestimmen wir die Gleichungen der Roderscharoberflächen. Sie sehen folgenderweise aus:

$$A_1B_1C_1 : x_{A1} \operatorname{tg}\gamma + y_{A1} + z_{A1} \operatorname{tg}\beta + \frac{C_1C_2}{2} = 0 \quad (9)$$

$$A_2B_2C_2 : x_{A2} \operatorname{tg}\gamma - y_{A2} + z_{A2} \operatorname{tg}\beta - \frac{C_1C_2}{2} = 0 \quad (10)$$

Aus dem Abb. 3 wissen wir, dass für die Vektorwerte, die an der Normale zur Fläche angeordnet sind und den Ausdruck der Oberflächen (9) und (10) haben, die richtenden Kosinuswerte folgende Größen haben:

$$\begin{aligned}\cos(x, \hat{N}_i) &= \frac{tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \\ \cos(y, \hat{N}_i) &= \frac{1}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \\ \cos(z, \hat{N}_i) &= \frac{tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}\end{aligned}\quad (11)$$

Nach der Substitutionformel (11) in (3) und (4) bekommen wir die Werte der Projektionen der Normal- bestandteile der Kräfte  $\bar{N}_i$ , ( $i=1,2$ ) der Oberflächen der Keile an entsprechenden Achsen der Koordinaten. Für die Fläche  $A_1B_1C_1$  sind sie gleich:

$$\left. \begin{aligned}N_{x1} &= \frac{N_1 tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}, \\ N_{y1} &= \frac{N_1}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}, \\ N_{z1} &= \frac{N_1 tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}.\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

für die Fläche  $A_2B_2C_2$  :

$$\left. \begin{aligned}N_{x2} &= \frac{N_2 tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}, \\ N_{y2} &= -\frac{N_2}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}, \\ N_{z2} &= \frac{N_2 tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}.\end{aligned}\right\} \quad (13)$$

Nach der Errechnung der Werte der Projektionen der normalen Bestandteile der Keiloberflächen kann man andere Kräfte bestimmen, die von den Keilen auf die Bodenschicht und von da direkt auf den Wurzelkörper übertragen werden.

Weiterhin betrachten wir unter welchen Hauptfaktoren und Kräften beim Roden mit den Scharrodern normale Reaktionen  $\bar{N}_1$  und  $\bar{N}_2$  der Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  entstehen sowie die Reibungskräfte  $\bar{F}_1$  und  $\bar{F}_2$  der Bodenschicht samt Hackfrüchten an den bereits erwähnten Keiloberflächen, d.h. bestimmen wir das physikalische Wesen dieser Kräfte. Auf die Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  wirkt die Kraft des Gewichtes  $\bar{G}$  der Bodenschicht samt der Hackfrucht. Nehmen wir an, daß die Gewichtskraft der Boden-



schicht und der Wurzelkörper an beide Roderkeile  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  gleich verteilt wird, d.h.  $G_1 = G_2 = \frac{1}{2}G$ . Die Kräfte  $\bar{G}_1$  und  $\bar{G}_2$  rufen statische Komponenten normaler Reaktionen seitens der Wirkoberflächen der Keile ( $\bar{N}_{G1}$ ,  $\bar{N}_{G2}$ ) hervor. Infolge der Bewegung der Schicht an den besagten Oberflächen entstehen infolge der Gewichtskräfte  $\bar{G}_1$  und  $\bar{G}_2$  die Komponenten der Reibungskräfte  $\bar{F}_{G1}$  und  $\bar{F}_{G2}$ . Zum Zweiten, wirken auf die Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  entsprechenderweise die Trägheitskräfte  $\bar{I}_1$  und  $\bar{I}_2$  der sich bewegenden Bodenschicht. Betrachten wir die Wirkung der gegebenen Kräfte als kontinuierlichen Ablauf des Schlages der Bodenpartikeln an die Keilflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$ . Infolge des ununterbrochenen Stromes der Erdschicht entsteht der Stossimpuls, der gleich ist:

$$\bar{I}_1 dt = \bar{I}_2 dt = (\bar{V}_a - \bar{V}_o) dm \quad (14)$$

wo:

$\bar{V}_a$  – absolute Geschwindigkeit der Bewegung der Bodenpartikeln mit der Masse  $dm$

$\bar{V}_o$  – die Anfangsgeschwindigkeit der Partikeln vor dem Zusammenstoß mit dem Keil.

Da die Anfangsgeschwindigkeit  $\bar{V}_o = 0$  ist, so bekommen wir aus der Gleichung (14)

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{dm}{dt} \cdot \bar{V}_a \quad (15)$$

Die Erdmenge, die an die Keiloberfläche in einer bestimmten Zeiteinheit gelangt, kann folgenderweise bestimmt werden:

$$\frac{dm}{dt} = ab \frac{\gamma_{o\delta}}{g} V \quad (16)$$

wo:

$a$  und  $b$  – dicke und Breite der Bodenschicht ist, die mit jedem Keil getrennt geschnitten wird;

$\gamma_{o\delta}$  – das räumliche Erdgewicht;

$g$  – Beschleunigung des freien Fallens und

$V$  – Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Roders ist.

Setzen wir (16) in (15) ein, bekommen wir

$$I_1 = I_2 = ab \frac{\gamma_{o\delta}}{g} V \cdot V_a \quad (17)$$

Die Trägheitskräfte  $\bar{I}_1$  und  $\bar{I}_2$  wirken gegen die Vektorrichtung  $\bar{V}_a$  der absoluten Geschwindigkeit der Bewegung der Bodenschicht.

Für die Bestimmung der Bahnkurve und der Geschwindigkeit der Bewegung der Bodenschicht an der Keiloberfläche nehmen wir laut (Saika, 2001) an, daß sich die Länge der

Bodenschicht beim Schneiden und der Bewegung an dem Keil nicht ändert, deshalb ist die Geschwindigkeit der relativen Bewegung  $V_r$  der Bodenschicht an der Keiloberfläche der Geschwindigkeit deren transportablen Bewegung  $V$  gleich, d.h. der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Scharrodgers ). Es kann ähnlich wie in (Saika, 2001) angenommen werden, dass bei der Bewegung der Bodenschicht im Arbeitsbereich des Roders die Bahnkurve der Bewegung des Schichtbodenpunktes an der Keiloberfläche  $A_1B_1C_1$ , die sich vor dem Schneiden am Anfang im Punkt  $O_1$  befand, ist eine gerade Linie  $A_1O'_1$ . Eine absolute Bahnkurve ist die gerade Linie  $O_1O'_1$ , wobei  $O'_1M_1 = O_1M_1$  und  $\angle O'_1A_1M_1 = \angle O_1A_1M_1 = \gamma$  ist.

Genauso bei der Bewegung der Bodenschicht an der Oberfläche  $A_2B_2C_2$  -  $O'_2M_2 = O_2M_2$  und  $\angle O'_2A_2M_2 = \angle O_2A_2M_2 = \gamma$ . Dabei sind die relative und absolute Bahnkurven der Bewegung des Bodenschichtpunktes entsprechend gerade Linien  $A_2O'_2$  und  $O_2O'_2$  ( $O'_2M_2 = O_2M_2$ ,  $\angle O'_2A_2M_2 = \angle O_2A_2M_2 = \gamma$ ).

Daraus kann man schließen, daß die Bahnkurven der relativen Bewegung unterschiedlicher Punkte der Bodenschicht, die die Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$ , berühren, gerade Linien sind, die den geraden Linien  $A_1O'_1$  und  $A_2O'_2$  parallel sind, und die Bahnkurven der absoluten Bewegung sind gerade Linien, die den Linien  $O_1O'_1$  und  $O_2O'_2$  parallel sind.

Somit sind die Reibungskräfte  $\bar{F}_1$  und  $\bar{F}_2$  der Bodenschicht an den Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  den geraden Linien  $A_1O'_1$  und  $A_2O'_2$  parallel, und der Richtung der relativen Bewegung der Bodenschicht an den Keilen entgegengesetzt gerichtet. Gleiche Schlüsse kann man über die Bewegung des Rübenkörpers und die Richtung der Reibungskräfte beim unmittelbaren Kontakt des Rübenkörpers mit den Keiloberflächen ziehen, da die Bewegungsbahnkurve durch die geometrischen Parameter der Rodekeile bestimmt ist.

Die Kräfte der Trägheit  $\bar{I}_1$  und  $\bar{I}_2$  der sich mit dem Rübenkörper bewegenden Bodenschicht rufen dynamische Bestandteile/Komponenten der normalen Reaktionen  $\bar{N}_{I1}$  und  $\bar{N}_{I2}$  hervor.

Normale Bestandteile/Komponenten der Reaktionen der Keiloberflächen, die infolge der Wirkung der Gewichtskraft (G) der Bodenschicht samt Rübenkörper entstehen, sind gleich

$$N_{G1} = N_{G2} = \frac{G}{2(\cos\theta - f \sin\theta \sin\gamma)} \quad (18)$$

wo:

- $\theta$  – zweiflächiger Winkel ( $\angle B_1M_1O_1$ ) zwischen der unteren Grundfläche/Grundlinie  $A_1O_1C_1$  und der Keillauffläche  $A_1B_1C_1$ ;
- $f$  – der Gleitreibungskoeffizient des Bodens an der Keillauffläche.

Beim unmittelbaren Kontakt des Rübenkörpers mit der Keillauffläche  $f$  ist der Gleitreibungskoeffizient des Rübenkörpers an der Keillauffläche.

Ein Teil der Reibungskraft, die unter der Wirkung der Gewichtskraft  $G$

bei der Bewegung der Bodenschicht samt Rübenkörper entstehen, ist gleich:

$$F_{G1} = F_{G2} = \frac{Gf}{2(\cos\theta - f \sin\theta \sin\gamma)} \quad (19)$$

Da die absolute Geschwindigkeit der Bewegung der Schicht samt Rübenkörper  $V_a$  von der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Roder  $V$

$$V_a = 2V \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \gamma \quad (20)$$

abhängig ist, so ergibt sich aus (17), daß die Kräfte der Bodenschicht

$$I_1 = I_2 = \frac{2ab \cdot \gamma_{o\phi}}{g} \cdot V^2 \sin \frac{\theta}{2} \sin \gamma \quad (21)$$

gleich sind.

Die Bestandteile der normalen dynamischen Reaktionen der Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  sind (bei der Wirkung der Trägheitskräfte  $\bar{I}_1$  und  $\bar{I}_2$ )

$$N_{I1} = N_{I2} = I_1 \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\cos\theta - f \sin\gamma \cdot \sin\theta}$$

gleich.

Bei Berücksichtigung (21) ergibt sich

$$N_{I1} = N_{I2} = \frac{ab \cdot \gamma_{o\phi}}{g} \cdot V^2 \cdot \frac{\sin\theta \cdot \sin\gamma}{(\cos\theta - f \sin\gamma \cdot \sin\theta)} \quad (22)$$

Die Bestandteile der Reibungskräfte, die infolge der Wirkung der Trägheitskräfte der Bewegung der Bodenschicht samt Rübenkörper der an den Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  (Saika, 2001) entstehen, sind gleich

$$F_{I1} = F_{I2} = f \cdot \frac{ab \cdot \gamma_{o\phi}}{g} \cdot \frac{V^2 \sin\theta \cdot \sin\gamma}{(\cos\theta - f \sin\gamma \cdot \sin\theta)} \quad (23)$$

Für gutes Funktionieren der Scharroder ist die Bodenstützkraft  $\bar{Q}$  notwendig, die wie oben gezeigt horizontal der Achse entlang  $Ox$  und der Bewegungsrichtung des Roder entgegengesetzt gerichtet ist. Maximale Bedeutung der Bodenstützkraft ist gleich (Saika, 2001).

$$Q_{\max.} = 2ab \cdot \sigma_{zp}. \quad (24)$$

wo:

$\sigma_{zp}$  – zulässige Spannung der Bodenkompression; Umrechnungsfaktor 2 zeigt, daß die Kraft  $\bar{Q}$  gleichzeitig an zwei Keilen entsteht/sich bildet.

Bei der weiteren Bewegung des Rübenkörpers in der Bodenschicht verringert sich im Scharroder die Bodenstützkraft  $\bar{Q}$  maßgeblich wegen der Lockerung des Bodens und im hinteren Teil des Durchgangs ist die Wirkung dieser Kraft gering. In diesem Fall kann man die Stützkraft  $\bar{Q}$  mit der Formel  $Q = 2ab \cdot k_{y\partial}$  bestimmen, ( $k_{y\partial}$  – der spezifische Koeffizient des Widerstandes des aufgelockerten Bodens ist).

Nehmen an, dass die Kraft des Widerstandes  $\bar{R}$  (das heißt, die Haftkraft des Rübenkörpers mit dem Boden) entgegengesetzt der Richtung der Rodekraft des Rübenkörpers aus dem Boden gerichtet ist.

Wie schon erwähnt wurde, kann die Widerstandskraft  $\bar{R}$  in zwei Bestandteile zerlegt werden: die Kraft des Widerstandes der senkrechten Bewegung des Rübenkörpers  $\bar{R}_z$  und die Kraft des Widerstandes der horizontalen Bewegung des Rübenkörpers  $\bar{R}_x$ . Bei der horizontalen Bewegung des Rübenkörpers im Roder entstehen ausgerechnet unter der Kraftwirkung  $\bar{R}_x$  die biegenden Deformationen bei dessen Ziehen aus der Erde. Die biegenden Deformationen bringen zur Beschädigung des Rübenkörpers meistens bei der maßgeblichen Haftkraft mit dem Boden. Das geschieht in der Regel infolge des unmittelbaren Kontaktes des Rübenkörpers mit den Keilflächen der Schare im hinteren Teil des Durchganges/Arbeitsbettes des Roders. Deshalb ist das Zusammenwirken des Rübenkörpers mit den Scharoberflächen im verjüngten Durchgang des Roders abgesondert zu untersuchen und die Differentialgleichungen der Bewegung des Rübenkörpers bei dessen unmittelbaren Roden aus dem Boden zusammenzustellen. Die Kräfte des Zusammenwirkens des Rübenkörpers mit den Keiloberflächen sollen in diesem Fall den Kräften des Zusammenwirkens der Bodenschicht mit den Keiloberflächen fast identisch sein. Deshalb können wir annehmen, daß diese Kräfte gleich sind und dass das Roden des Rübenkörpers aus dem Boden unter der Wirkung der Kräfte erfolgt, die auf Abb. 3 dargestellt sind.

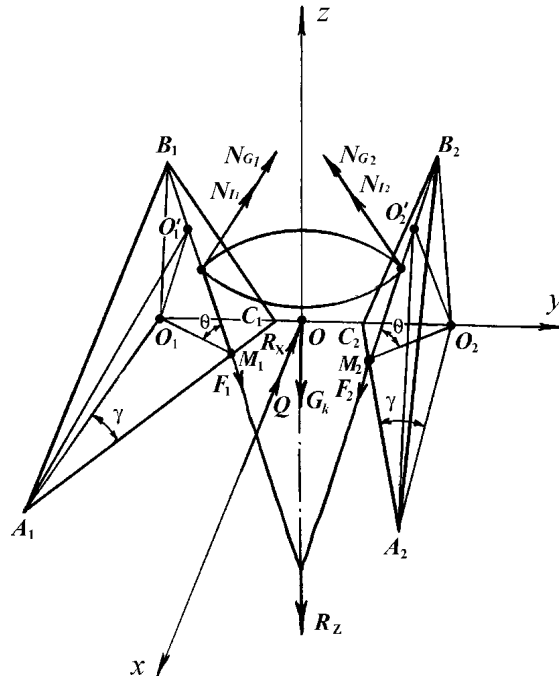


Abbildung 3. Kraftzusammenwirken des Rübenkörpers mit den Keilen des Scharroders

Leiten wir die Differentialgleichung der Bewegung des Rübenkörpers ab. In der Vektorform sieht diese Gleichung so aus

$$m\bar{a} = \bar{N}_{G1} + \bar{N}_{G2} + \bar{N}_{I1} + \bar{N}_{I2} + \bar{Q} + \bar{R}_x + \bar{R}_z + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{G}_k, \quad (25)$$

wo:

- $m$  – Masse des Rübenkörpers,
- $\bar{a}$  – Beschleunigung des Rodenprozesses des Rübenkörpers aus dem Boden,
- $\bar{R}_x, \bar{R}_z$  – horizontale und senkrechte Bestandteile der Widerstandskraft  $\bar{R}$  der Haftung des Rübenkörpers mit dem Boden,
- $\bar{F}_1, \bar{F}_2$  – summarische Reibungskräfte, die bei der Bewegung des Rübenkörpers an den Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  entstehen,
- $G_k$  – ist Gewicht des Rübenkörpers.

Es ist offensichtlich, dass die Reibungskräfte  $F_1$  und  $F_2$  in (25) sind gleich

$$F_1 = f_1(N_{G1} + N_{I1}), \quad F_2 = f_1(N_{G2} + N_{I2}), \quad (26)$$

wo:

- $f_1$  – der Reibungskoeffizient der Seitenfläche des Rübenkörpers an den Keiloberflächen.

Die Differentialgleichung (25) zeichnen wir in den Projektionen an die Achse des kartesischen Koordinatensystems  $xOyz$  auf. Infolgedessen, dass die Bestandteile der normalen Reaktionen an den Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  an der Achse  $Oy$  der Größe nach gleich und entgegengerichtet sind (d.h., der Rübenkörper berührt zu gleicher Zeit zwei Keiloberflächen und wird im weiteren Verlauf zwischen beiden geklemmt), so findet das Roden des Rübenkörpers eigentlich im Bereich der Fläche  $xOz$  statt. Deswegen wird die Differentialgleichung der Bewegung der Rübenkörper (25) im Vektorform in das System folgender zweier Differentialgleichungen abgeleitet:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= N_{G1x} + N_{G2x} + N_{I1x} + N_{I2x} - Q - R_x + F_{1x} + F_{2x} \\ m\ddot{z} &= N_{G1z} + N_{G2z} + N_{I1z} + N_{I2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Bestimmen wir die Projektionen der Kräfte, die zum erwähnten System der Differentialgleichungen (27) gehören. Die Projektionen der normalen Reaktionen der Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  an der Achse  $X$  und  $Z$  bestimmen wir nach den Formeln (12) und (13). Sie sind gleich

$$N_{G1x} = N_{G2x} = \frac{N_{G1} \cdot tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \quad (28)$$

oder unter Berücksichtigung von (18)

$$N_{G1x} = N_{G2x} = \frac{G \cdot tg\gamma}{2(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma) \sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \quad (29)$$

Genauso bestimmen wir aus den Formeln (12), (13) und (22)

$$N_{I1x} = N_{I2x} = \frac{ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2}{g} \cdot \frac{\sin\theta \cdot \sin\gamma \cdot tg\gamma}{(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma) \sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \quad (30)$$

$$N_{I1z} = N_{I2z} = \frac{ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2}{g} \cdot \frac{\sin\theta \cdot \sin\gamma \cdot tg\beta}{(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma) \sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \quad (31)$$

Da die Reibungskräfte entgegengesetzt der Richtung der Bahnkurve der relativen Bewegung der Bodenschicht und des Rübenkörpers an den Keiloberflächen  $A_1B_1C_1$  und  $A_2B_2C_2$  (das heißt parallel  $A_1O'_1$  und  $A_2O'_2$ ) sind, so sind ihre Projektionen an der Koordinatenachse gleich:

$$\left. \begin{aligned} F_{1x} &= F_1(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta) \\ F_{1y} &= -F_1 \cos \gamma \cdot \sin \gamma (1 - \cos \theta) \\ F_{1z} &= -F_1 \sin \gamma \cdot \sin \theta, \\ F_{2x} &= F_2(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta) \\ F_{2y} &= F_2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma (1 - \cos \theta) \\ F_{2z} &= -F_2 \sin \gamma \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Fernerhin führen wir folgende Bezeichnungen ein:

$$\begin{aligned} \bar{N}_1 &= \bar{N}_{G1} + \bar{N}_{I1}, & N_2 &= \bar{N}_{G2} + \bar{N}_{I2} \\ \bar{F}_1 &= \bar{F}_{G1} + \bar{F}_{I1}, & \bar{F}_2 &= \bar{F}_{G2} + \bar{F}_{I2} \end{aligned}$$

Dann erhalten wir:

$$\begin{aligned} N_{1x} &= N_{G1x} + N_{I1x} & N_{2x} &= N_{G2x} + N_{I2x} \\ F_{1x} &= F_{G1x} + F_{I1x} & F_{2x} &= F_{G2x} + F_{I2x} \\ N_{1z} &= N_{G1z} + N_{I1z} & N_{2z} &= N_{G2z} + N_{I2z} \\ F_{1z} &= F_{G1z} + F_{I1z} & F_{2z} &= F_{G2z} + F_{I2z} \end{aligned}$$

Danach sieht das System der Differentialgleichungen (27) nach der Substitution aller bekannten Größen folgenderweise aus:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q \\ m\ddot{z} &= N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Es ist offensichtlich, dass der Vorgang des Rodens der Rübenkörper aus dem Boden möglich wäre, wenn

$$N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - G_k > R_z \quad (34)$$

oder unter Berücksichtigung von formel (29), (31) und (26) wir folgendes erhalten:

$$\begin{aligned} &\frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma} + \frac{2ab \cdot \gamma_{\text{öf.}} \cdot V^2 \sin \theta \cdot \sin \gamma}{g(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma)} \right] - \\ &\frac{Gf_1 \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma}{\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma} - \frac{2ab \cdot \gamma_{\text{öf.}} \cdot V^2 \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \gamma \cdot f_1}{g(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma)} - G_k > R_z \end{aligned} \quad (35)$$

Bei der Erfüllung der Bedingung (35) erfolgt das Roden der Rübenkörper aus der Erde. Der linke Teil der Formel (35) stellt dar die Aufzeichnung der Kraft beim Roden der Rübenkörper in Richtung der Achse  $Oz$  unter der Bedingung des vorhandenen Kontaktes der Rübenkörper und den Keiloberflächen.

Wenn wir das System der Differenzialgleichungen (33) zweimal integrieren, erhalten wir den Wert der Geschwindigkeit und der Bewegung der Rübenkörper als Funktion der Zeit  $t$ .

Die ersten Integrale sind gleich:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q)t + C_1 \\ \dot{z} &= \frac{1}{m}(N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k)t + L_1\end{aligned}\quad (36)$$

und die zweiten Integrale sind gleich:

$$\begin{aligned}x &= \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q)\frac{t^2}{2} + C_1t + C_2 \\ z &= \frac{1}{m}(N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k)\frac{t^2}{2} + L_1t + L_2\end{aligned}\quad (37)$$

wo:

$C_1, C_2, L_1, L_2$  – willkürliche Konstantwerte sind.

Für das Auffinden der willkürlichen Konstantwerte geben wir Anfangs- und Grenzbedingungen vor. Bei  $t_o = 0$ :

$$x = x_o, \quad z = -h, \quad \dot{x} = 0, \quad \dot{z} = 0,$$

und bei  $t = t_1$ :

$$x = x_1, \quad z = 0, \quad \dot{x}_1 = V_1,$$

wo:

- $t_o$  – Anfangszeitpunkts des Rodens;
- $t_1$  – Endzeitpunkt des Rodens der Rüben aus der Erde;
- $x_o$  – Abstand vom Anfang der Koordinaten bis zu der senkrechten Achse des Rübenkörpers zum Zeitpunkt  $t_o$ ;
- $x_1$  – Abstand vom Anfang der Koordinaten bis zu der senkrechten Achse des Rübenkörpers zum Endzeitpunkt des Rodens  $t_1$ ;
- $h$  – Tiefe des Sitzes des Rübenkörpers im Boden;
- $V_1$  – Geschwindigkeit der Bewegung des Rübenkörpers im Endzeitpunkt des Rodens  $t_1$ .

Ausgehend von Ausgangsbedingungen bekommen wir die Werte der willkürlichen konstanten Größen:

$$C_1 = 0, \quad L_1 = 0, \quad C_2 = x_o, \quad L_2 = -h. \quad (38)$$

Nach der Substitutionformel (38) in (36) in (37) bekommen wir



$$\dot{x} = \frac{1}{m} (N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q) t, \quad (39)$$

$$\dot{z} = \frac{1}{m} (N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k) t, \quad (40)$$

$$x = \frac{1}{m} (N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q) \frac{t^2}{2} + x_o, \quad (41)$$

$$z = \frac{1}{m} (N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k) \frac{t^2}{2} - h. \quad (42)$$

Die oben erhaltenen Werte für die Kräfte (28) – (32) setzen wir in die Formeln (39) – (42) ein. Nach all den nötigen Transformationen bekommen wir:

$$\begin{aligned} \dot{x} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \left[ \frac{G}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \frac{2ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{G \cdot f_1 (\cos^2\gamma + \sin^2\gamma \cdot \cos\theta)}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \right. \\ \left. + \frac{2f_1 \cdot ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \sin\theta \cdot \sin\gamma (\cos^2\gamma + \sin^2\gamma \cdot \cos\theta)}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} - 2ab \cdot k_{y\delta} - R_x \right\} t, \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \left[ \frac{G}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \frac{2ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} \right] - \right. \\ \left. - \frac{G \cdot f_1 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} - \frac{2f_1 \cdot ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \sin^2\theta \cdot \sin^2\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} - G_k - R_z \right\} t, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} x = \frac{1}{m} \left\{ \frac{tg\gamma}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \left[ \frac{G}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \frac{2ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{Gf_1 (\cos^2\gamma + \sin^2\gamma \cdot \cos\theta)}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \right. \\ \left. + \frac{2f_1 \cdot ab \cdot \gamma_{o\delta} \cdot V^2 \sin\theta \cdot \sin\gamma (\cos^2\gamma + \sin^2\gamma \cdot \cos\theta)}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} - 2ab \cdot k_{y\delta} - R_x \right\} \frac{t^2}{2} + x_o, \end{aligned} \quad (45)$$

$$z = \frac{1}{m} \left\{ \frac{tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}} \left[ \frac{G}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} + \frac{2ab \cdot \gamma_{o\ddot{o}} \cdot V^2 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} \right] - \frac{G \cdot f_1 \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma}{\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma} - \frac{2f_1 \cdot ab \cdot \gamma_{o\ddot{o}} \cdot V^2 \sin^2\theta \cdot \sin^2\gamma}{g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)} - G_k - R_z \right\} \frac{t^2}{2} - h, . \quad (46)$$

Aus der Formel (42) kann man die Zeit des Rodens der Rübenkörper aus dem Boden  $t_1$  bestimmen. Sie ist gleich:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2mh}{N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - R_z - G_k}} \quad (47)$$

Wenn wir in die Formel (47) die oben erhaltenen Werte der Kräfte einsetzen und sie entsprechenderweise transformieren, bekommen wir die Endformel der Zeit  $t_1$ :

$$t_1 = \sqrt{\frac{2mgh(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}{(Gg + 2ab \cdot \gamma_{o\ddot{o}} \cdot V^2 \sin\theta \sin\gamma)(tg\beta - \sin\gamma \cdot \sin\theta \cdot f_1 \times \sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}) - (R_z + G_k)g(\cos\theta - f \sin\theta \cdot \sin\gamma)\sqrt{tg^2\gamma + 1 + tg^2\beta}}} \quad (48)$$

Da  $t_1$  die Rodenzeit der Rübenkörper mit Roderscharen ist, so kann die Formel (48) für die Bestimmung der Leistung des Zuckerrübenerntegerätes, ausgerüstet mit diesen Werksorganen, verwendet werden.

Wird die Bedingung (35) nicht erfüllt, d.h. es besteht gegensätzliche Ungleichheit, der Rübenkörper haftet mit dem Boden, so dass seine Bewegung der Achse  $Oz$  entlang ausbleibt. Und trotzdem erfolgt unter der Wirkung der Kräfte, die in der ersten Gleichung des Systems (33) enthalten sind, nämlich die Kraft

$$P_x = N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - Q \quad (49)$$

die die Widerstandskraft  $R_x$  (die Haftung des Rübenkörpers mit der Erde) überwindet, verhält sich die Hackfrucht wie ein Kraftträger und biegt sich, weil der obere Teil des Rübens sich in Richtung der Kraftwirkung  $P_x$  um Einiges verschiebt, infolgedessen die Wurzel brechen kann.

Deswegen gibt es eine bestimmte zulässige Kraft  $[P_x]$ , bei der keine Beschädigung des Rübenkörpers stattfindet. Wenn man in die Formel (49) anstatt der Kraft  $[P_x]$  deren zulässigen Wert einsetzt, bekommen man:

$$[P_x] = N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - Q \quad (50)$$

oder unter Berücksichtigung der Bedeutungen der Kräfte aus dem rechten Teil dieser Formel

$$[P_x] = N_{G1x} + N_{G2x} + N_{I1x} + N_{I2x} + F_{G1x} + F_{G2x} + F_{I1x} + F_{I2x} - Q \quad (51)$$

Wenn wir also die symmetrische Anordnung der Roderkeile berücksichtigen, bekommen wir:

$$[P_x] = 2N_{G1x} + 2N_{I1x} + 2F_{G1x} + 2F_{I1x} - Q \quad (52)$$

Die Formel (52) wird dann so aussehen:

$$2N_{I1x} + 2F_{I1x} = [P_x] - 2N_{G1x} - 2F_{G1x} - Q \quad (53)$$

Ersetzen wir die Kräfte in der Formel (53) durch ihre oben erhaltenen Werte. Dann bekommen wir:

$$\begin{aligned} & \frac{2ab \cdot \gamma_{\text{öf.}}}{g} \cdot \frac{V^2 \sin \theta \cdot \sin \gamma \cdot \text{tg} \gamma}{(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma) \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1 + \text{tg}^2 \beta}} + \\ & + 2f_1 \frac{ab \cdot \gamma_{\text{öf.}} \cdot V^2 \sin \theta \cdot \sin \gamma (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta)}{g(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma)} = \\ & = [P_x] - \frac{G \cdot \text{tg} \gamma}{(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma) \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1 + \text{tg}^2 \beta}} - \\ & - \frac{f_1 G (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta)}{(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma)} + 2ab \cdot k_{y\text{öf.}} \end{aligned} \quad (54)$$

Auf Grund der Formel (54) errechnen wir die Geschwindigkeit  $V$  der Vorwärtsbewegung des Scharrodgers, bei der die Wurzelkörper nicht beschädigt werden:

$$\begin{aligned} V = & \sqrt{\frac{g([P_x] + 2ab \cdot k_{y\text{öf.}})(\cos \theta - f \sin \theta \cdot \sin \gamma) \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1 + \text{tg}^2 \beta} - gG \cdot \text{tg} \gamma -}{2ab \cdot \gamma_{\text{öf.}} \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma \left[ \text{tg} \gamma + f_1 (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta) \times \right.}} \\ & \left. \frac{- f_1 g G (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos \theta) \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1 + \text{tg}^2 \beta}}{\times \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1 + \text{tg}^2 \beta}} \right]} \end{aligned} \quad (55)$$

Somit sind endgültig kinematische Parameter des Rodens der Rüber aus dem Boden mit Scharrodern, die durch geometrische Parameter ausgedrückt sind, gefunden und die die Bedingungen für die qualitative Ausführung des gegebenen technologischen Prozesses berücksichtigen.

Für die praktische Nutzung der Formel (55) muss man das Verhältnis bestimmen zwischen dem Zweikeilwinkel  $\theta$  und den Winkeln  $\beta$  und  $\gamma$ , die eigentlich alle Winkelpara-

meter der Keile bestimmen, weil der dritte Winkel  $\alpha$  durch die Winkel  $\beta$  und  $\gamma$  ausgedrückt werden kann. Wie aus dem Schema (Abb. 1) zu ersehen ist:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_1}{a_1} \quad (56),$$

können wir unter Berücksichtigung (7) bekommen:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta} \quad (57)$$

Somit kann der Winkel  $\theta$  durch die Winkel  $\beta$  und  $\gamma$  bestimmt werden. Mittels des Schemas (Abb. 1) kann man folgende Relationen feststellen:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{O_1 B_1}{O_1 M_1} \quad (58)$$

und

$$O_1 M_1 = O_1 A_1 \cdot \sin \gamma \quad (59)$$

Wenn man berücksichtigt, dass  $O_1 B_1 = c_1$  und  $O_1 A_1 = a_1$  gleich ist, bekommen wir

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{c_1}{a_1 \sin \gamma} \quad (60)$$

Nach der Substitution (7) in (60) bekommen wir

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta} \quad (61)$$

oder

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\cos \beta}{\sin \beta \cdot \cos \gamma} \quad (62)$$

infolgedessen wir endgültig die Größe des Winkels  $\theta$  erhalten:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\cos \beta}{\sin \beta \cdot \cos \gamma} \quad (63)$$

Indem wir geometrische Parameter der Scharroderkeile (Winkel  $\beta$  und  $\gamma$ ) ändern, können wir auf Grund der oben erhaltenen analytischen Abhängigkeiten benötigte kinematische Parameter des Roderwerkzeuges unter der Bedingung der Unbeschädigkeit der Hackfrüchte bestimmen. Mit Hilfe der Formel (55) kann die Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit  $V$  der Vorwärtsbewegung des Roders von seinen Winkeln  $\beta$  und  $\gamma$  feststellen ohne seine anderen Kostruktionsparameter zu ändern.

Entsprechend dem zusammengesetzten EDV-Programm wurde die zulässige Geschwindigkeit  $V$  der Bewegung des Scharrodgers bei unterschiedlichen Winkelgrößen  $\gamma$  und eini-

gen fixierten Winkelgrößen  $\beta$  (unter der Bedingung der Unbeschädigung des Rübekörpers) errechnen.

Die Ausgangswerte für die Kalkulationen (Pogorelij, 1983 und andere Quellen), wo die Ergebnisse der Versuchsforschungen herausgegeben wurden, sind in der folgenden Tabelle angeführt:

Tabelle 1

Parameter	$a$ (m)	$[P_x]$ (N)	$\gamma_{o\ddot{o}}$ (N/m <sup>3</sup> )	$f$	$f_1$	$g$ (m·s <sup>-2</sup> )
Werte/Größen/ Mengen	0,12	200	11000	0,6	0,5	9,81

Einige Kostruktionsparameter des Scharrodgers und des ausgeführten technologischen Prozesses des Roders sind untereinander durch folgende Abhängigkeiten verbunden: die Breite der deformierten Bodenschicht

$$b = a \cdot \operatorname{tg} \beta = 0,12 \operatorname{tg} \beta \quad (64)$$

das Gewicht der Bodenschicht

$$G = \gamma_{o\ddot{o}} \cdot a^2 (2a \cdot \operatorname{tg} \beta + 0,05) \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin \gamma} \quad (65)$$

Auf Grund der Zahlenrechnungen werden die graphischen Darstellungen der Veränderung der Geschwindigkeit bei der Vorwärtsbewegung des Scharrodgers  $V$  je nach der Winkelgröße  $\gamma$  (Abb. 4).

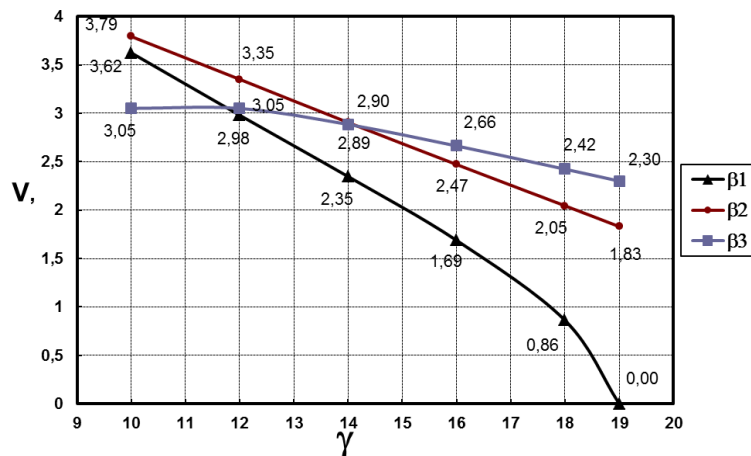


Abbildung 4. Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung  $V$  vom Winkel  $\gamma$  bei  $\beta_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 20^\circ$ ,  $\beta_3 = 30^\circ$ .

## Zusammenfassung

Die Analyse der Kennlinien ergibt, daß die Abhängigkeit dieser Parameter dem linearen Parameter nht. Bei der Vergroberung des Anstellwinkels  $\gamma$  des Scharrodgers sinkt die Groe der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung  $V$ , was beim Roden die Nichtbeschdigung der Wurzelkörper ermöglicht. Die Benutzung der groeren Werte des Schräg­winkels ermöglicht es, die höhere Geschwindigkeiten der Vorwärtsbewegung zu erreichen. Bercksichtigend, daß die Statistikwert der Konizität des Zuckerrbekrper  $\gamma_k = 20...28^\circ$  laut (Pogorelij, 1983) ausmacht, kann die Steigerung der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung beim Schräg­winkel  $\beta$  des Scharrodgers bei ca.  $30^\circ$  erreicht werden. Die gewonnenen Forschungsergebnisse zeigen somit, dass die optimalsten Winkelwerte  $\gamma$  und  $\beta$ , bei denen eine hohe Geschwindigkeit  $V$  der Vorwärtsbewegung des Scharrodgers und des Rodens der Zuckerrüben aus der Erde ohne Beschädigung gesichert wird,  $\gamma = 13...16^\circ$  und  $\beta = 20...30^\circ$  gleich sind.

Die Ergebnisse der Berechnungen bestätigen somit laut den gewonnenen analytischen Abhängigkeiten deren Richtigkeit und schaffen die Basis für die praktische Anwendung beim Entwurf und Kalkulation neuer ausgereifterer Wirkorgane der Rbenerntemaschinen.

## Literaturverzeichnis

- Bosoj, E.S.; Wernjaev, O.V.; Smirnov, I.I.; Sultan-Schach, E.G. (1977). *Theorie, Konstruktion und Berechnung der Landmaschinen*. Lehrbuch für Hochschule der Landmaschenbau, Maschinostroenie, 568.
- Chawostov, W.A.; Rheingart, E.S. (1995). *Maschinen für die Hackfrucht - und Zwiebelernte (Theorie, Konstruktion und Berechnung)*. – M.: WISChOM, 391.
- Privalov, I.I. (1960). *Analytische Geometrie*. M.: Phymathisdat, 299.
- Saika, P.M. (2001). *Theorie der Landmaschinen*. Band 1, Teil 1. – Charkov: Olo, Ukrainisch, 444.
- Pogorelij, L. V.; Tatianko, N.V.; Brej, V.V. und andere. (1983). *Zuckerrbenern-temaschinen (Konstruktion und Berechnung)*, Technika, 168.

## TEORIA MECHANIZMU WYORUJCEGO KOMBAJNU DO ZBIORU BURAKW CUKROWYCH

**Streszczenie.** Siły oddzia­ujce na wyorywacz kombajnu do zbioru burakw cukrowych wymuszane są nie tylko fizycznymi w­lciwociami gleby (np. jej związ­loci), ale także fizycznymi w­lciwociami zbieranego plonu (tj. buraków cukrowych). Dotychczasowa teoria wrywania buraków cukrowych uwzględnia­la tylko w­lciwoci fizyczne gleby, w powiązaniu z fizycznymi i geometrycznymi parametrami mechanizmu wyorujcego. Artyku­l prezentuje matematyczny model mechanicznego oddzia­ywania warstwy gleby, łącznie z mas korzeni buraków cukrowych na element wyorujcy buraki. Formu­ly matematyczne opracowanej teorii zosta­ly weryfikowane przyk­ladowymi obliczeniami, dla przyjętych parametrów roboczych kombajnu do zbioru buraków cukrowych (m.in. prędkością roboczą, g­lbokoci roboczą).

**S­lowa kluczowe:** wyorywacz buraków, teoria mechanizmów, model matematyczny