$$\frac{T - T_{min}}{T} \cdot 100 = \frac{52,8 - 45,1}{52,8} \cdot 100 = 14,6\,\%, \qquad (10)$$

d. h. ungefähr 15% gesenkt werden kann.

Den erhaltenen Wert T_{min} wollen wir mit dem Zugwiderstand einer Maschine mit eisenbereiften Rädern vergleichen. Wir verwenden die Formel von *Gorjatschkin-Grandvoine*:

$$T_{Fe} = 0,86 \sqrt[3]{\frac{Q^4}{q\,b\,D^2}}, \qquad (11)$$

und erhalten bei gleichen Werten für Belastung, Raddurchmesser und Bodendichte sowie einer Reifenbreite von $b = \frac{D}{10}$

$$T_{Fe} = 0,86 \sqrt{\frac{500^4}{10 \cdot \frac{50^3}{10}}} = 68,4 \text{ kg}. \qquad (12)$$

Die Verwendung von Gummibereifung verringert den Zugwiderstand also um

$$\frac{68,4 - 45,1}{68,4} \cdot 100 = 34\,\%. \qquad (13)$$

Dieser errechnete Wert kommt den Versuchswerten nahe. Die Verwendung von Gummibereifung ist hinsichtlich der Zugkraft jedoch nicht immer vorteilhaft. Die mathematische Bedingung dafür ergibt sich aus folgender Überlegung:

Wenn eisenbereifte Räder günstiger sind, ist

$$T_{Fe} < T_{min}$$

oder unter Verwendung der Gleichungen (7) und (11)

$$0,86\,Q \sqrt[3]{\frac{Q}{q\,b\,D^2}} < 2 \sqrt{C_1 C_2 Q} \sqrt[6]{\frac{Q}{D^3 q}}. \qquad (14)$$

Wir drücken die Breite des eisernen Reifens in Teilen des Raddurchmessers aus:

$$b = \xi D$$

und erhalten dann

$$0,43 \sqrt[3]{\frac{Q}{q\,\xi\,D^3}} < \sqrt{C_1 C_2} \cdot \sqrt[6]{\frac{Q}{L^3 q}}. \qquad (15)$$

Lösen wir diese Ungleichheit nach ξ auf, so erhalten wir beim Einsetzen von Mittelwerten für C_1 und C_2:

$$\xi > 17,4 \sqrt{\frac{Q}{q\,D^3}}. \qquad (16)$$

Ob ein eisenbereiftes Rad vorzuziehen ist, hängt also von seiner Reifenbreite ab.

Aus der Gleichung (16) folgt, daß eisenbereifte Räder bei großer Reifenbreite, geringer Belastung, großer Bodenfestigkeit und großem Raddurchmesser vorteilhaft sind. So ergibt sich z. B. bei $Q = 100$ kg, $q = 10$ kg/cm³ und $D = 50$ cm

$$\xi > 17,4 \sqrt{\frac{100}{10 \cdot 50^3}} = 0,156, \qquad (17)$$

d. h. von einer Radreifenbreite von

$$b = \xi D = 0,156 \cdot 500 = 78 \text{ mm}$$

ab sind in diesem Fall gummibereifte Räder hinsichtlich des Zugwiderstandes eisenbereiften Rädern nicht mehr vorzuziehen.

Literatur

[1] *Omelianow, A. E.*: Über die Verwendung von gummibereiften Rädern bei Landmaschinen. „Selchosmaschina" (1948) Nr. 5.

[2] Handbuch der sozialistischen Landwirtschaft für Ingenieure und Mechaniker, Teil I. Selchosgis (1937).

AÜ 1671

Messungen der Zugwiderstandskomponenten bei Landmaschinen und Geräten

Von I. K. KIRTBAJA, Moskau[1])

DK 62.001.5:631.3

Die Widerstände, die bei der Bewegung von Landmaschinen und Geräten auftreten, setzen sich im allgemeinen Fall aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Dem Rollwiderstand R_f, bestehend aus der Reibung in den Radlagern, der Reibung der Radreifen am Boden und der Formänderung des Bodens unter der Einwirkung der Belastung der Laufräder;
2. der Reibung R_F zwischen den Arbeitsflächen der Maschinen und dem zu bearbeitenden Stoff;
3. dem eigentlichen Formänderungswiderstand R_d des zu bearbeitenden Stoffes;
4. dem Widerstand R_ε, der von den Trägheitskräften der Teilchen des bearbeiteten Stoffes ausgeübt wird;
5. dem Widerstand R_m, der durch die Reibung in den Getrieben der Maschinen entsteht.

Der Gesamtwiderstand, den die Landmaschinen und Geräte auf waagerechter Strecke ausüben, ist demnach

$$R_M = R_f + R_F + R_d + R_\varepsilon + R_m. \qquad (1)$$

Der Rollwiderstand R_f kann der Radbelastung gleichgesetzt werden. Wenn sich die Maschine mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt, kommen aber außer den unter (1) genannten Einwirkungen noch Stöße von Bodenunebenheiten gegen die Räder, Schwankungen der Maschinenmassen und ungleichmäßige Bewegungen, die das Auftreten von Trägheitskräften zur Folge haben, hinzu. Dadurch entstehen neue, von der Geschwindigkeit abhängende Widerstände. Der Rollwiderstand von Landmaschinen wird daher in allgemeiner Form durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$R_f = C_M \cos\alpha\,(f_b + f_v \cdot v^n). \qquad (2)$$

Hierbei ist:

$G_M \cos\alpha$	die von den Rädern senkrecht zur Bodenoberfläche ausgeübte Kraft;
f_b und f_v	vom Boden und von der Geschwindigkeit abhängende Koeffizienten;
v	die Fahrgeschwindigkeit der Maschine.

Für den Exponenten von v kann mit genügender Genauigkeit $n = 2$ gesetzt werden.

Wenn unter dieser Voraussetzung für verschiedene Geschwindigkeiten von v_1 und v_2 bei Leerlauf experimentell die Zugwiderstände R_x ermittelt worden sind, kann der Wert des Koeffizienten f_v und nach ihm auch der Wert des Koeffizienten f_b bestimmt werden.

Die entsprechenden Abhängigkeiten haben folgende Form:

$$f_v = \frac{R_{xv_2} - R_{xv_1}}{G_M\,(v_2^2 - v_1^2)} \qquad (3)$$

und

$$f_b = \frac{R_{xv_1} - G_M \cdot f_v \cdot v_1^2}{G_M} = \frac{R_{xv_1}}{G_M} - f_v v_1^2. \qquad (4)$$

Hierbei sind

R_{xv_1} und R_{xv_2} die Zugwiderstände bei Leerlauf mit den entsprechenden Geschwindigkeiten.

Die Komponente R_f wurde nun in der Weise bestimmt, daß die Maschinen im Leerlauf über typische Feldoberflächen ge-

[1]) Сельхозмашина (Landmaschinen), Moskau (1953) Nr. 11, S. 10 bis 14; Übersetzer: Dipl.-Ing. *Balkin*.

fahren, die dabei auftretenden Zugkräfte mit einem Dynamometer gemessen, die Koeffizienten f_v und f_b danach errechnet und theoretische Kurven für $R_f = f_v$ gezeichnet wurden, die man nachher in drei Punkten mit dreimaligem Wiederholen experimentell überprüfte.

Am schwierigsten war es, den Widerstand R_F zwischen Arbeitsflächen und zu bearbeitendem Stoff von den anderen Widerständen zu trennen und zu ermitteln. Wenn die Reibungskoeffizienten zweier verschiedener Oberflächen und die Differenz ΔR_M des Zugwiderstandes, die beim Auswechseln der Arbeitsflächen auftritt, bekannt sind, erhalten wir alle Werte zur Bestimmung der Komponente R_F.

Wenn P die auf die Oberfläche drückende Kraft und ϱ der Reibungskoeffizient sind, können wir schreiben:

$$R'_F = P\varrho', \tag{a}$$
$$R''_F = P\varrho'' \tag{b}$$

Hierbei ist nach den Versuchsbedingungen $P = \text{const}$. Die Indizes ' und '' geben die Zugehörigkeit zu den entsprechenden Arbeitsflächen an.

Dann ist

$$\Delta R_M = P\varrho'' - P\varrho' = P(\varrho'' - \varrho').$$

Daraus folgt

$$P = \frac{\Delta R_M}{\varrho'' - \varrho'}.$$

Setzen wir diesen Wert für P in die Gleichungen (a) und (b) ein, so erhalten wir

$$R'_F = \frac{\Delta R_M}{\varrho'' - \varrho'}\varrho' \quad \text{und} \quad R''_F = \frac{\Delta R_M}{\varrho'' - \varrho'}\varrho''. \tag{5}$$

Die Komponente R_F wurde nun in der Weise bestimmt, daß bei sonst gleichen Arbeitsbedingungen die Maschinen mit zwei verschiedenen Arbeitsflächen, deren Reibungskoeffizienten bekannt waren, gefahren und die auftretenden Zugkräfte mit einem Dynamometer gemessen wurden. Es wurden verrostete und gestrichene Arbeitsflächen verwendet. Nach der Differenz ΔR_M der Zugkräfte und den Koeffizienten ϱ' und ϱ'' wurde dann die Komponente R_F bestimmt.

Nach *Gorjatschkin* ist die für das Wenden des Bodenbalkens erforderliche Zugkraft

$$P'''_{\text{mit}} = R_\varepsilon = m\frac{dv}{dt} = \varepsilon' \mu' v = \varepsilon h b v^2. \tag{c}$$

Hierbei ist:

$\frac{dv}{dt}$ die Beschleunigung der den Widerstand ausübenden Teilchen;

$\mu' = \frac{\gamma h b v}{g}$ die Masse des vom Pflug in der Zeiteinheit aufgenommenen Bodens;

h die Furchentiefe;

b die Furchenbreite;

γ die Bodendichte;

$g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$;

$\varepsilon = \varepsilon' \frac{\gamma}{g}\ \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ (ε' ist ein dimensionsloser Koeffizient).

ε kann für die vorliegenden Verhältnisse als konstant angesehen werden.

Aus der Gleichung (c) folgt, daß die Komponente R_ε bei gleichbleibender Furchentiefe und Furchenbreite eine Funktion der Geschwindigkeit ist. Wenn also die Zugkraftmessungen beim Pflügen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und sonst gleichen Bedingungen vorgenommen werden, ist zu berücksichtigen, daß der Zugwiderstand teilweise auch deswegen anwächst, weil die Rollgeschwindigkeit zunimmt.

Wir können daher schreiben:

$$R'_M = R_{\varepsilon 1} + R_{f1} + R_{\text{const}},$$
$$R''_M = R_{\varepsilon 2} + R_{f2} + R_{\text{const}}.$$

Die Indizes 1 und 2 entsprechen hierbei den Geschwindigkeiten v_1 und v_2, wobei $v_2 > v_1$.

Ziehen wir von der zweiten Gleichung die erste ab, so erhalten wir

$$\Delta R_M = R_{\varepsilon 2} - R_{\varepsilon 1} + R_{f2} - R_{f1}.$$

Da $\Delta R_x = R_{f1} - R_{f2}$ und $\varepsilon = \text{const}$, erhalten wir

$$\Delta R_M = \varepsilon(b h v_2^2 - b h v_1^2) + \Delta R_x.$$

Hieraus folgt

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_M - \Delta R_x}{b h (v_2^2 - v_1^2)}. \tag{6}$$

Setzen wir den Ausdruck für ε in die Gleichung (c) ein, so erhalten wir in allgemeiner Form die Gleichung zur Bestimmung der Komponente R_ε nach Versuchswerten:

$$R_\varepsilon = \frac{(\Delta R_M - \Delta R_x)\, v^2}{v_2^2 - v_1^2}. \tag{7}$$

Die Komponente R_m, die durch die Reibung in den Getrieben hervorgerufen wird, läßt sich durch Messung der Differenz der Zugkräfte beim Fahren mit ein- und ausgeschalteten Getrieben bestimmen. Für Maschinen mit Zapfwellen ist

$$R_m = \frac{270\, N_x \eta_m}{v}.$$

Hierbei ist:

N_x die für den Antrieb der Getriebe bei Leerlauf erforderliche Leistung;

η_m der Wirkungsgrad des Schleppergetriebes;

v die Fahrgeschwindigkeit.

Die Komponente R_d, die für die eigentliche Formänderung des bearbeiteten Stoffes aufgewendet wird, läßt sich für Bodenbearbeitungs- und Drillmaschinen aus dem Zugkraftgleichgewicht ermitteln:

$$R_d = R_M - (R_f + R_F + R_\varepsilon + R_m). \tag{9}$$

Die Ergebnisse der Messungen

Die Werte der Koeffizienten f_b und f_v in Tafel 1 wurden nach Dynamometermessungen bei Leerlauf ermittelt.

Tafel 1

Bodenzustand	Maschinentyp	Koeffizienten f_b	Koeffizienten f_v	$\frac{f_v}{f_b}$
Geschälte Stoppeln	P 5-35	0,155	0,0142	0,092
Brache	PP-50	0,156	0,0213	0,137
Acker (gesetzt)	KUTS-4,2	0,166	0,0204	0,123
Mit Grubber und Egge bearbeitetes Feld	SD-24	0,217	0,0120	0,056
dasselbe	SK-16-2	0,186	0,0102	0,055
Trockene Stoppeln	LU-5	0,151	0,0142	0,094
dasselbe	S-6	0,123	0,009	0,073

Die Reibungskoeffizienten zwischen Erde und verschiedenen Arbeitsoberflächen wurden dadurch ermittelt, daß Platten aus Pflugscharstahl (40×60×10 mm) auf einen Erdblock mit verschieden geneigter Oberfläche gelegt wurden.

Tafel 2

	Reibungskoeffizienten				
	auf lehmiger Schwarzerde			auf sandigem Podsolboden	
Bodenfeuchtigkeit in %	11 bis 12	15 bis 17	21 bis 23	10 bis 12	20 bis 24
Pflugscharstahl, verrostet	0,626	0,787	0,968	0,556	0,811
Pflugscharstahl, gestrichen (2 Schichten Eisen-Mennige, dick verrieben)	0,578	0,741	0,932	0,534	0,676
Pflugscharstahl, blank	0,423	0,552	0,708	0,332	0,456
Pflugscharstahl, verchromt und poliert	0,318	0,441	0,581	0,240	0,365

Bei den Untersuchungen der Grubber wurden verchromte und nicht verchromte Zinken benutzt. Bei den Pflügen und Drillmaschinen wurden zwei Schichten Eisen-Mennige aufgetragen. Bei Schälpflügen wurden Dynamometermessungen mit verrosteten und mit polierten Arbeitsflächen vorgenommen.

(Schluß im nächsten Heft)