

Тип статьи: научная
УДК 681.3:631.333.5
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-109-117

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА В ФОРМЕ ТРЕХГРАННОГО КЛИНА ПРИ ДВИЖЕНИИ В МАССЕ ПОДСТИЛОЧНОГО ОВЕЧЬЕГО НАВОЗА

Бибигуль Джэксенбаевна Сарбалина

*Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Российская Федерация
Rumasa79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3762-8873>*

Реферат. Рассматривается содержание овец в зимний период времени в овчарнях на утрамбованной подстилке, представляющей собой накопленный монолит, содержащий твердые и жидкие фракции, периодически рассыпанную солому и остатки корма, уплотненные со временем животными в овчарне. Накопленная толщина слоя навоза за стойловый период составляет до 25-30 см. Анализ существующих технологий уборки накопленного навоза показал, что они энергоемки, требуют большого количества разнообразной техники и не отвечают современным технологическим требованиям. Так агрегат уборки навоза АУН-10, который не получил распространение из-за недостатков процесса предварительного разрушения пласта виброножами. Рассматривается разработанное устройство для уборки овечьего подстилочного навоза, главным рабочим органом которого является навесное устройство, включающее три трехгранных клина, которые разрыхляют навозную массу в вертикальной плоскости, в винтовая спираль шнека срезает разрыхленный навоз и транспортирует его на выгрузной транспортер. Рассмотрены элементы процесса разрушения навозной массы при взаимодействии на нее рабочего органа в форме трехгранного клина. Определяли тяговое сопротивление рабочего органа в форме трехгранного клина при движении в массе подстилочного овечьего навоза. Определены траектории движения навоза и силы, действующие на трехгранный клин при его движении, углы резания навоза, направление реакции клина.

Ключевые слова: рабочий орган трехгранного клина, траектория движения навоза, тяговое сопротивление, критерии прочности.

DETERMINATION OF THE TRACTION RESISTANCE OF A WORKING BODY IN THE FORM OF A TRIANGULAR WEDGE WHEN MOVING IN A MASS OF BEDDING SHEEP MANURE

Bibigul Sarbalina

*Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation
Rumasa79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3762-8873>*

Abstract. Keeping sheep in sheepfolds in winter on compacted bedding, which is an accumulated monolith containing solid and liquid fractions, periodically scattered straw and feed residues compacted over time by animals in the sheepfold, is considered. The accumulated thickness of the manure layer during the stall period is up to 25-30 cm. An analysis of existing technologies for removing accumulated manure has shown that they are energy-intensive, require a large amount of various equipment and do not meet modern technological requirements. For example, the AUN-10 manure removal unit, which has not become widespread due to the shortcomings of the process of preliminary destruction of the formation with vibrating knives. We consider a developed device for harvesting sheep bedding manure, the main working body of which is a mounted device, including three triangular wedges that loosen the manure mass in a vertical plane, cut off the loosened manure into the helical spiral of the auger and transport it to the unloading conveyor. The elements of the process of destruction of the manure mass when a working body in the form of a triangular wedge interacts with it are considered. The traction resistance of a working body in the shape of a triangular wedge was determined when moving through a

mass of sheep bedding. The trajectories of movement of manure and the forces acting on the triangular wedge during its movement, the cutting angles of manure, and the direction of reaction of the wedge are determined.

Keywords: *working body of a triangular wedge, trajectory of movement of manure, traction resistance, strength criteria.*

Для цитирования: Сарбалина Б.Д. Определение тягового сопротивления рабочего органа в форме трехгранного клина при движении в массе подстилочного овечьего навоза// Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 69, № 3. С. 109-117. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-109-117>.

For citation: Sarbalina B. Determination of the traction resistance of a working body in the form of a triangular wedge when moving in a mass of bedding sheep manure. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 69(3): 109-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-109-117>.

Введение. В зимнее время овец содержат в овчарнях на несменяемой подстилке. Подстилка представляет слежавшийся монолит, включающий твердые и жидкие фракции, периодически подсыпаемую измельченную солому и остатки корма и уплотненного животными на протяжении стойлового периода. Толщина слоя может достигать 25-30 см. Уборка такого навоза традиционно осуществляется специальными агрегатами типа АУН-10 на базе тракторов класса 0,9 в сцепке с одноосным прицепом 1 ПТС-2 или комплексом, включающим несколько машин: бульдозер с навеской БН-Ф-2,5-1 и БН-Ф-2,3-2, погрузчик ПК-10Е (сельскохозяйственный вариант), агрегат уборки навоза АПТ-1, погрузчик-экскаватор, транспортное средство и др.[1].

Анализ литературных источников показал, что существующие технологии весьма энергоемки, требуют большого количества разнообразной техники и не отвечают современным технологическим требованиям. К сожалению мало исследований свойств подстилочного овечьего навоза из-за отсутствия приборной базы для измерения физических величин, его характеризующих. Для определения возможности качественного разрыхления навоза с наименьшими затратами надо знать сопротивляемость навоза при различных условиях взаимодействия рабочих органов с навозной массой.

Для качественной работы агрегата типа АУН-10 необходимо предварительное разрушение пласта навоза, плотность которого достигает 800 кг/м³. Предлагаемое в агрегате АУН-10 измельчение пласта с помощью виброножей технологически не выгодно, так как ножи быстро выходят из строя и плохо разрушают пласт.

Наилучшим с точки зрения выполнения технологического процесса является использование рабочих органов в виде клиньев. За счет работы клиньев масса навоза перемещается по поверхности клина, растягивается за счет увеличения общей длины соприкосновения с рабочей гранью и разрыхляется. Далее навоз поступает к наклонному, а затем и подающему транспортерам и подается в транспортное средство, установленное за трактором.

В работе использовано разработанное устройство для уборки овечьего подстилочного навоза (патент РФ №215500) [2,3], состоящее из рамы, выгрузного транспортера, трактора с навеской, шнеков, и ворошителя конической треугольной формы. Главным рабочим органом предложенной машины является навесное устройство, включающее три трехгранных клина, которые разрыхляют навозную массу с целью возможности дальнейшего транспортирования в прицепную тележку. Суть работы этого устройства в следующем. При внедрении рабочего органа в пласт подстилочного навоза, ворошители конической треугольной формы разрыхляют пласт с растительными остатками в вертикальной плоскости, в винтовая спираль шнека срезает разрыхленный навоз и транспортирует его на выгрузной транспортер. Загруженная в транспортное средство измельченная масса перевозится и укладывается в борт.

Для анализа работы предлагаемого рабочего органа – трехгранного клина рассмотрим процессы, происходящие при его движении в массе навоза.

Результаты и их обсуждение. С целью определения процессов, происходящих при воздействии клина на подстилочный слой и усилий, возникающих при этом, были определены

показатели прочности навоза (таблица 1). Как показывают опыты, наименьший предел прочности навоза наблюдается – при сдвиге (τ), наибольший – при растяжении (σ_p), среднее значение при сжатии ($\sigma_{сж}$).

Таблица 1 Временное сопротивление растяжению, сжатию и сдвигу подстилочного овечьего навоза

Влажность навоза, %	Растяжение	Сжатие	Сдвиг
	σ_p , кПа	$\sigma_{сж}$, кПа	τ , кПа
25-34	73,8	64,4	22,1
35-44	80,3	48,8	32,7
45-54	85,6	37,2	48

Показатели предела прочности навоза разрушению могут служить ориентиром при оценке фактических деформаций навоза при взаимодействии с рабочими органами орудий.

Рассмотрим некоторые элементы процесса разрушения навозной массы при взаимодействии на нее рабочего органа в форме трехгранного клина (рисунок 1).

Знание угла вхождения навоза на клин η позволяет определить угол резания навоза трехгранным клином χ . Этот угол лежит в плоскости OmB (рисунок 1) и измеряется углом между направлением движения (осью X) и траекторией движения навоза S.

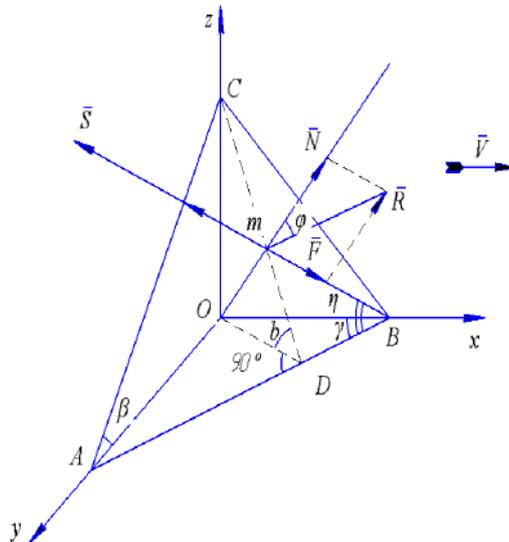


Рисунок 1 – Траектория движения навоза и силы, действующие на трехгранный клин при его движении

Навоз движется по клину по траектории S, определяемой углом η . Угол η - это угол между траекторией движения навоза и лезвием клина AB.

По траектории S действует сила трения $F = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$ в направлении, обратном движению. Угол OmD прямой ($\angle OmD = 90^\circ$). Также прямыми являются углы: $\angle mDB = 90^\circ$, $\angle ODB = 90^\circ$. Такое представление механики процесса движения позволяет определить угол η :

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{mD}{BD}; \operatorname{tg} \gamma = \frac{OD}{BD}; \operatorname{cose} = \frac{mD}{OD};$$

$$\operatorname{tg} \eta \operatorname{cose} = \frac{OD}{BD} \frac{mD}{OD} = \frac{mD}{BD} = \operatorname{tg} \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \eta = \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{cose}$$

Угол η определяет траекторию движения навоза.

На рисунке 2 показано влияние углов γ и ϵ на траекторию движения навоза по клину. В литературе по почвообработке угол η называют углом вхождения почвы на клин.

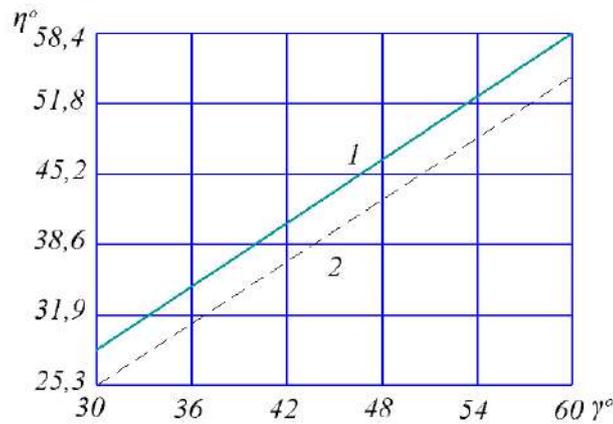


Рисунок 2 – Траектория движения навоза по трехгранному клину – угол η
 1 – $\varepsilon = 20^\circ$; 2 – $\varepsilon = 35^\circ$

Знание угла η позволяет определить угол резания навоза трехгранным клином χ . Этот угол лежит в плоскости $OмВ$ (рисунок 1) и измеряется углом между направлением движения клина (осью x) и траекторией движения навоза S . Угол резания представляется как один из обобщающих конструктивных показателей трехгранного клина. Угол χ определяется следующим образом (рисунок 1)

$$\sin \chi = \frac{Om}{OB}; \quad \sin \gamma = \frac{OD}{OB}; \quad \sin \varepsilon = \frac{Om}{OD}$$

то есть

$$\sin \gamma \cdot \sin \varepsilon = \frac{OD}{OB} \cdot \frac{Om}{OD} = \frac{Om}{OB} = \sin \chi,$$

$$\sin \chi = \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon$$

Значение угла резания χ в зависимости от установочных углов трехгранного клина γ и ε представлено на рисунке 3. Отсюда следует, что угол резания трехгранного клина всегда меньше любого из установочных углов.

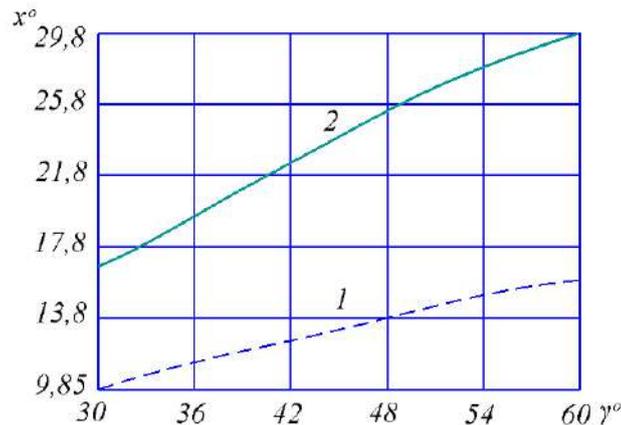
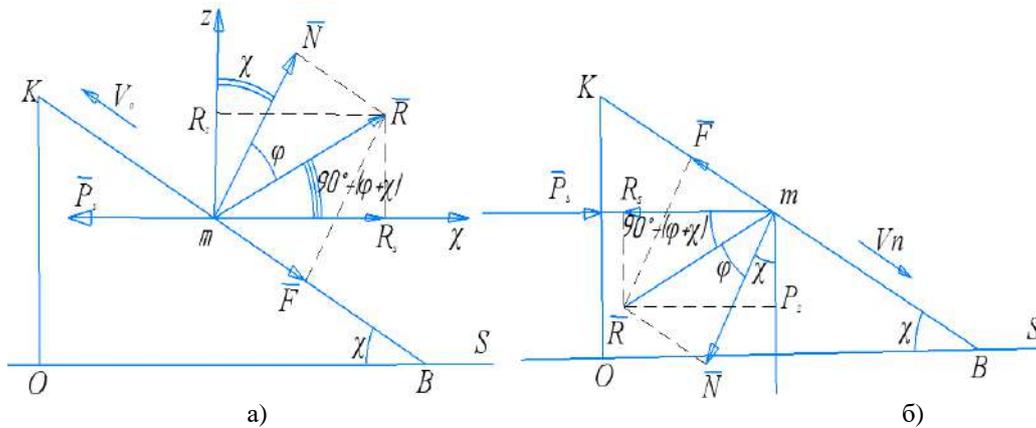


Рисунок 3 – Угол резания навоза χ трехгранным клином 1 – $\varepsilon = 20^\circ$; 2 – $\varepsilon = 35^\circ$

Определим тяговое сопротивление трехгранного клина в зависимости от угла χ (рисунок 4). На рисунке 4 представлены направления реакции клина (рисунок 4а) и направление реакции навоза при движении рабочего органа (рисунок 4б).



а - направление реакции клина; б - направление реакции навоза при движении клина
 Рисунок 4 – Схема для определения силы P

Рассмотрим составляющие усилий при движении клина:

$$R = \frac{N}{\cos \varphi};$$

$$R_s = R_{\cos} [90^\circ - (\chi + \varphi)] = \frac{N}{\cos \varphi} \sin(\chi + \varphi);$$

$$R_z = R_{\cos}(\chi + \varphi);$$

$$P_s = R_s + R_z * \operatorname{tg} \varphi_1.$$

Величина тягового сопротивления трехгранного клина определяется в следующем виде:

$$P_s = R[\sin(\chi + \varphi) + \cos(\chi + \varphi) * \operatorname{tg} \varphi_1].$$

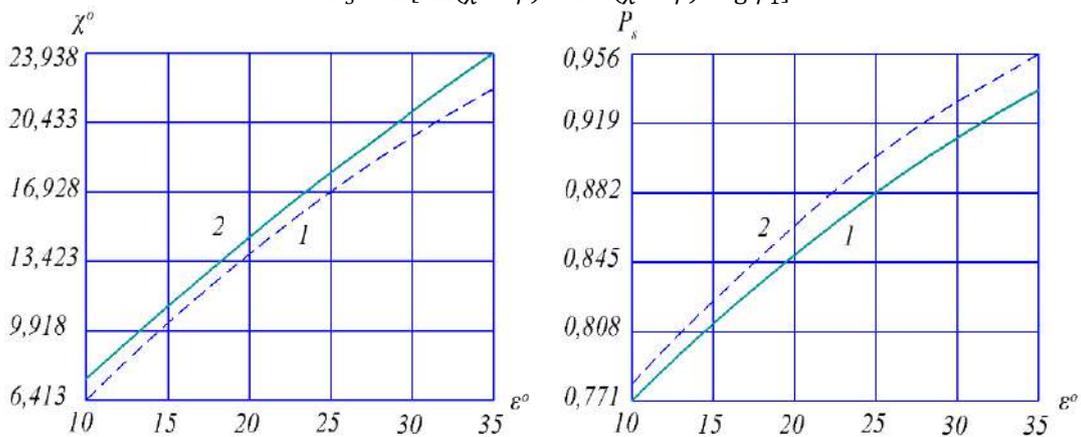


Рисунок 5 – Углы резания и тяговое сопротивление трехгранного клина при следующих значениях переменных:
 $\varphi = \varphi_1 = 20^\circ$; $N = 1$; $1 - \gamma = 40^\circ$; $2 - \gamma = 45^\circ$

Трехгранный клин испытывает наличие составляющих тягового сопротивления по всем осям координат. Используя теоретические и экспериментальные данные Г.Н.Синеокова и И.М.Панова [6, 7], определим составляющие силы \bar{R} трехгранного клина по осям декартовых координат. В этом случае основные зависимости можно выразить в следующем виде [8,9,10]:

$$\bar{R} = \bar{N} + \bar{F}; \quad \bar{R} = (R_x + F_x; R_y + F_y; R_z + F_z)$$

Координаты углов клина (рисунок 6)

$$A(0; y_a; 0); B(x_b; 0; 0); C(0; 0; z_c); AB = (x_b; -y_a; 0); AC = (0; -y_a; z_c).$$

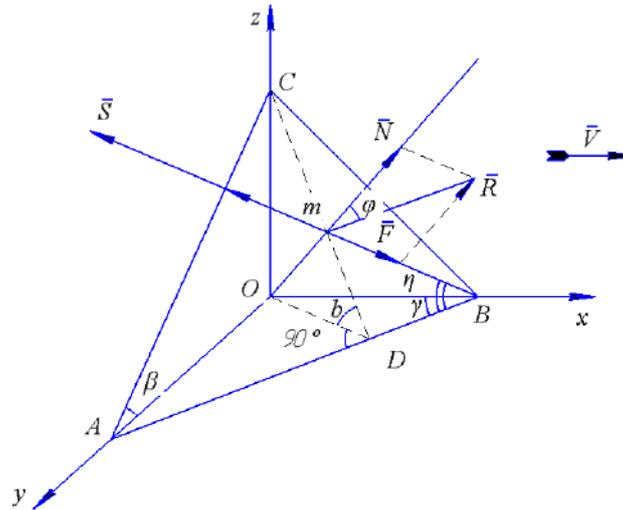


Рисунок 6 – Силы, действующие на трехгранный клин при его движении в навозе

Обозначим вектор единичной длины \bar{N}_0 , нормальный к плоскости ABC.

Тогда $\bar{N} = B \cdot \bar{N}_0$, где B – любое положительное число:

$$\bar{N}_0 = \frac{AB \cdot AC}{|AB \cdot AC|}$$

$$AB \cdot AC = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_b & -y_a & 0 \\ 0 & -y_a & z_c \end{vmatrix} = -y_a z_c \vec{i} - x_b z_c \vec{j} - x_b y_a \vec{k} = (-y_a z_c; -x_b z_c; -x_b y_a)$$

$$|AB \cdot AC| = \sqrt{y_a^2 z_c^2 + x_b^2 z_c^2 - x_b^2 y_a^2} = d;$$

$$N_x = \frac{|\bar{N}| \cdot y_a z_c}{d}; N_y = \frac{|\bar{N}| \cdot x_b z_c}{d}; N_z = \frac{|\bar{N}| \cdot x_b y_a}{d};$$

Используя аналогичный математический аппарат, определим составляющие силы \vec{F} по осям координат:

$$F = q F_0,$$

где \bar{F}_0 - вектор единичной длины:

$$q = |\bar{N}| \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ - угол трения навоза о поверхность клина при движении:

$$\bar{F}_0 = \frac{m \bar{B}}{|m \bar{B}|}; \quad m \bar{B} = (x_b - x_m; y_b - y_m; z_b - z_m)$$

$$\text{Так как } y_A = 0; z_A = 0, \text{ то } m \bar{B} = (x_b - x_m; -y_m; -z_m).$$

$$|m \bar{B}| = \sqrt{(x_b - x_m)^2 + (y_b - y_m)^2 + (z_b - z_m)^2} = e;$$

$$F_x = |\bar{N}| \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{x_b - x_m}{e}; F_y = |\bar{N}| \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{(-y_m)}{e};$$

$$F_z = |\bar{N}| \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{(-z_m)}{e}.$$

Для завершения процесса нахождения $\vec{F}(F_x; F_y; F_z)$ найдем координаты точки m ($x_m; y_m; z_m$). Координаты точки m можно определить на основе следующей теоремы: точка m лежит на плоскости ABC в том и только в том случае, когда векторы $\vec{Am}, \vec{AB}, \vec{AC}$ компланарные. Условием компланарности трех векторов является равенство нулю определителя третьего порядка, составленного из их координат:

$$\begin{vmatrix} x_m - x_a & y_m - y_a & z_m - z_a \\ x_b - x_a & y_b - y_a & z_b - z_a \\ x_c - x_a & y_c - y_a & z_c - z_a \end{vmatrix} = 0;$$

$$\begin{vmatrix} x_m - 0 & y_m - y_a & z_m - 0 \\ x_b - 0 & 0 - y_a & 0 - 0 \\ 0 - 0 & 0 - y_a & z_c - 0 \end{vmatrix} = -x_m y_a z_c - x_b y_a z_m - x_b y_m z_c + x_b y_a z_c = 0;$$

$$\frac{x_m}{N_x} = \frac{y_m}{N_y} = \frac{z_m}{N_z}; \rightarrow x_m = \frac{N_x}{N_y} y_m = \frac{y_a}{x_b} y_m,$$

$$y_m = \frac{N_y}{N_z} z_m = \frac{z_c}{y_a} z_m;$$

$$x_m y_a z_c + x_b y_a z_m + x_b y_m z_c = x_b y_a z_c;$$

$$\begin{cases} x_m - \frac{y_a}{y_b} y_m = 0, \\ y_m - \frac{z_c}{y_a} z_m = 0, \\ \left(x_b y_a + \frac{z_c^2}{y_a} x_b + \frac{z_c^2}{x_b} y_a \right) * z_m = x_b y_a z_c; \end{cases}$$

$$\frac{d^2 * z_m}{x_b y_a} = x_b y_a z_c;$$

$$z_m = \frac{x_b^2 y_a^2 z_c}{d^2}; \quad y_m = \frac{x_b^2 z_c^2 y_a}{d^2}; \quad x_m = \frac{y_a^2 z_c^2 x_b}{d^2}.$$

Результаты и их обсуждение. Выполненные расчеты позволяют определить все составляющие сил по осям координат $\vec{N}(N_x; N_y; N_z)$ и $\vec{F}(F_x; F_y; F_z)$ и вычислить составляющие силы \vec{R} по осям:

$$\begin{cases} R_x = N_x + F_x \\ R_y = N_y + F_y \\ R_z = N_z + F_z \end{cases}$$

В первом приближении сила тягового сопротивления трехгранного клина ABC при его равномерном движении в направлении \vec{V} равна: $P_X = R_X + R_Z \operatorname{tg} \varphi_1 + R_Y \operatorname{tg} \varphi_2$, где:

φ_1 - угол трения нижней грани клина о поверхность пола;

φ_2 - угол трения боковой грани клина о пласт навоза.

Если $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$, то $P_X = R_X + \operatorname{tg} \varphi \cdot (R_Z + R_Y)$

Значение P_x , а также отношения R_Y/P_X и R_Z/P_X для $N=1$ и различных углов ϵ и γ представлены на рисунках 7-9.

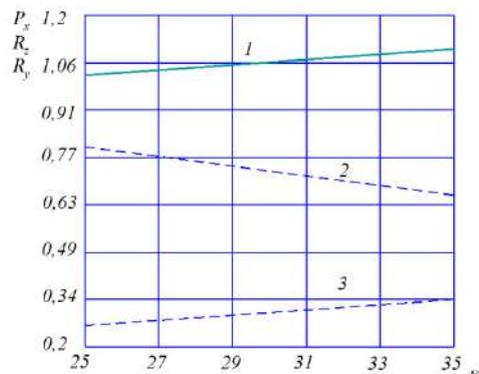


Рисунок 7 – Горизонтальная составляющая тягового сопротивления трехгранного клина P_x и отношения R_Y/P_X и R_Z/P_X ($N=1$, $\gamma=40^\circ$, $\varphi=\varphi_1=\varphi_2=20^\circ$):

1 – P_x ; 2 – R_Z/P_X ; 3 – R_Y/P_X

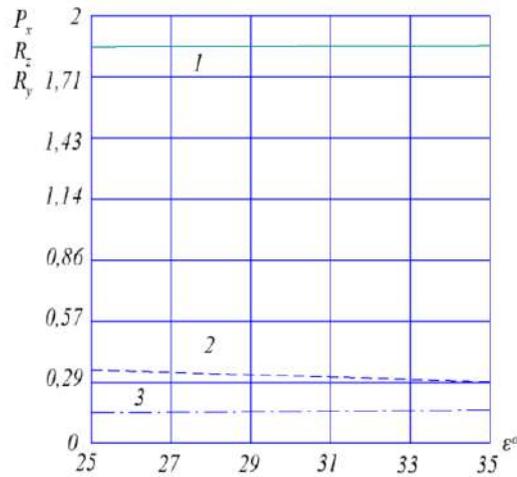


Рисунок 8 – Составляющие тягового сопротивления трехгранного клина ($N=1, \gamma=40^\circ, \varphi=\varphi_1=\varphi_2=40^\circ$) ($N=1, \gamma=40^\circ, \varphi=\varphi_1=\varphi_2=40^\circ$):
 1 – P_x ; 2 – R_z/P_x ; 3 – R_y/P_x

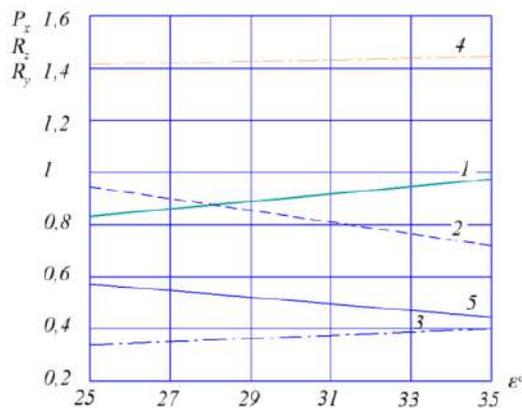


Рисунок 9 – Составляющие тягового сопротивления трехгранного клина ($N=1, \gamma=40^\circ, \varphi=\varphi_1=\varphi_2=20^\circ$):
 1 – P_x при $\varphi_2=10^\circ$; 2 – R_z/P_x при $\varphi_2=10^\circ$; 3 – R_y/P_x ; 4 – P_x при $\varphi_2=40^\circ$; 5 – R_z/P_x при $\varphi_2=40^\circ$

Заключение. Сила P_x является силой, которую необходимо преодолеть, чтобы сообщить клину движение. Эту силу называют силой тягового сопротивления.

Конкретные расчеты, проведенные для навозной массы влажностью в пределах 20-60 %, с показателями прочности на растяжение в пределах 70-90 кПа, пределом прочности на сдвиг в пределах 20...50 кПа показывают, что разрушающее устройство, включающее три клина длиной 1500 мм и максимальной высотой клина 600 мм снижают сопротивление перемещению навозоуборочного агрегата до 70 %, разрыхленная масса легко перемещается выгрузным транспортером в транспортную тележку.

Список источников

1. Завражнов А.И., Ведищев С.М., Бралиев М.К. и др. Техническое обеспечение животноводства; под редакцией А.И. Завражнова, -2-е изд., - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 516 с.
2. Хмыров, В.Д. Совершенствование средств механизации уборки навоза глубокой подстилки [Текст]: монография / В.Д. Хмыров, В.Б. Куденко. – Мичуринск – наукоград РФ, 2011. – 125 с.

3. Хмыров В.Д., Сарбалина Б.Д., Труфанов Б.С. Ворошитель – измельчитель погрузчик подстилочного овечьего навоза. Патент №215500, 15.12.22г.
4. Горячкин В.П. Собрание сочинений; в 3 томах. М.: -Колос, - 1968.
5. Тарханов О. В., Тарханова Л. С. Современные технологии переработки навоза и помета как тормоз экономики / О.В. Тарханов, Л.С. Тарханова. - Уфа: Системы и технологии, 2009. – 159с.
6. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. М, 1965.-311с.
7. Панов И.М. Физические основы механики почвы. / И.М.Панов., В.И.Ветохин.- Киев.: Феникс, 2008. –266с.
8. Бледных В.В. Теория почвообрабатывающего клина и ее приложения: монография / В.В. Бледных, П.Г. Свечников. - Челябинск: ЧГАА, 2013.-92с.
9. Хмыров, В.Д. Устройство для выгрузки навоза глубокой подстилки [Текст] В.Д. Хмыров, В.Б. Куденко, Б.С. Труфанов // Сельский механизатор. – 2008г. – №11. – С. 34.
10. Хмыров, В.Д. Технология производства и уборки подстилочного навоза [Текст] / В.Д. Хмыров, В.Б. Куденко, Б.С. Труфанов // Мировой опыт и перспективы развития сельского хозяйства: материалы междунар. науч. – практ. конф., посвящ. 95-летию Воронеж. гос. аграр. ун-та (23–24 окт. 2007г.).– Воронеж, 2007. – Ч. 1. – С. 160–161.

References

1. Zavrazhnov A.I., Vedishchev S.M., Braliev M.K. et al. Technical support for livestock breeding; edited by A.I. Zavrazhnova, -2nd ed., - St. Petersburg: Lan, 2021.-516 p.
2. Khmyrov, V.D. Improving the means of mechanization of deep litter manure collection [Text]: monograph / V.D. Khmyrov, V.B. Kudenko. – Michurinsk – science city of the Russian Federation, 2011. – 125 p.
3. Khmyrov V.D., Sarbalina B.D., Trufanov B.S. Tedder – chopper and loader of sheep manure. Patent No. 215500, 12/15/22
4. Goryachkin V.P. Collected Works; in 3 volumes. M.: Kolos, - 1968.
5. Tarkhanov O. V., Tarkhanova L. S. Modern technologies for processing manure and litter as a brake on the economy / O.V. Tarkhanov, L.S. Tarkhanova. - Ufa: Systems and Technologies, 2009. – 159 p.
6. Sineokov G.N. Design of tillage machines. M, 1965.-311 p.
7. Panov I.M. Physical foundations of soil mechanics. / I.M.Panov., V.I.Vetokhin. - Kyiv.: Phoenix, 2008. –266s.
8. Blednykh V.V. The theory of tillage wedge and its applications: monograph / V.V. Blednykh., P.G. Svechnikov. - Chelyabinsk: ChGAA, 2013.-92p.
9. Khmyrov, V.D. Device for unloading deep litter manure [Text] V.D. Khmyrov, V.B. Kudenko, B.S. Trufanov // Rural machine operator. – 2008 – No. 11. – P. 34.
10. Khmyrov, V.D. Technology of production and collection of litter manure [Text] / V.D. Khmyrov, V.B. Kudenko, B.S. Trufanov // World experience and prospects for the development of agriculture: materials of international. scientific – practical conf., dedicated 95th anniversary of Voronezh. state agrarian University (October 23–24, 2007).– Voronezh, 2007. – Part 1. – P. 160–161.

Информация об авторах

Б.Д.Сарбалина - аспирант.

Information about the authors

B.D. Sarbalina - graduate student.

Поступила в редакцию (Received): 10.05.2024 Принята к публикации (Accepted): 24.06.2024