

УДК (UDC) 625.08

РАСЧЁТ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЛЕЗВИЕМ ПУТЁМ АНАЛИЗА ПРОЦЕССАCALCULATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR SOIL CUTTING  
HORIZONTAL BLADE BY THE ANALYSIS PROCESSНиколаев В.А.  
Nikolayev V.A.Ярославский государственный технический университет (Ярославль, Россия)  
Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, Russian Federation)

**Аннотация.** В структуре затрат энергии применяемых технических средств строительства автомобильных дорог существенную долю занимает энергия, затраченная на резание грунта. Уменьшение этих затрат энергии в значительной степени обусловлено конструктивным совершенством рабочих органов, для совершенствования которых необходимо дальнейшее развёртывание теории резания грунта. В статье проведен анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом, в частности острого горизонтального лезвия. Для этого рабочий орган разделён на элементы, а сложный процесс взаимодействия рабочего органа с грунтом разделён на простые процессы и проведен теоретический анализ взаимодействия каждого элемента с грунтом. В ходе анализа выведены зависимости, позволяющие вычислить минимальную скорость агрегата, оснащённого горизонтальным ножом, от параметров ножа. Рассмотрены взаимодействия верхней кромки и верхней фаски острого лезвия горизонтального ножа с грунтом. В результате анализа из пространственных моделей сил выявлены соотношения сил и их проекций на плоскости и оси. Выявлены затраты энергии на механическое перемещение горизонтального острого ножа для разработки одного кубического метра грунта.

**Ключевые слова:** строительство дорог, анализ резания грунта лезвием, элементы рабочего органа, взаимодействие с грунтом, затраты энергии.

**Дата принятия к публикации:** 22.03.2000  
**Дата публикации:** 25.06.2019

**Сведения об авторах:**

**Николаев Владимир Анатольевич** - доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»; nikolaev53@inbox.ru.

**Abstract.** In the structure of the energy consumption used technical means the construction of roads takes a significant share of the energy spent on cutting soil. Reducing energy costs is largely due to constructive perfection of working bodies in order to improve that further deployment of the Machinist. For practical calculations of the working bodies of the cars requires a simple and intuitive method based on accepted formulas of strength of materials, theoretical mechanics and other sciences. It is therefore necessary to analyse the interaction with soil working bodies, in particular a sharp horizontal blades. For this body is divided into elements, and the complex process of interaction of the working body with the ground is divided into simple processes and conducted theoretical analysis of the interaction of each element with the soil. In analyzing the withdrawn according to compute the minimum speed of the unit, equipped with a horizontal knife, knife settings. The interaction is considered the top edge and the top of the bevel blade horizontal blades with sharp ground. As a result of the analysis of the spatial patterns of force revealed the correlation of forces and their projections on a plane and axis. Energy costs are revealed on the mechanical moving horizontal sharp knife for the elaboration of one cubic meter of soil.

**Keywords:** road construction, analysis of soil cutting blade, working elements, interaction with the soil, the energy cost.

**Date of acceptance for publication:** 22.03.2000  
**Date of publication:** 25.06.2019

**Authors' information:**

**Vladimir A. Nikolayev** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction and road machines at Yaroslavl State Technical University; nikolaev53@inbox.ru.

**1. Введение**

Одним из важных факторов развёртывания строительства дорог, зданий и сооружений является уменьшение затрат энергии на

их возведение. Общие затраты энергии на строительство дорог, выраженные стоимостными показателями, зависят от многих факторов, в частности, от совершенствования используемых технических средств. В структу-

ре затрат энергии применяемых технических средств строительства существенную долю занимает энергия, затраченная на резание грунта. Уменьшение этих затрат энергии в значительной степени обусловлено конструктивным совершенством их рабочих органов. Для совершенствования рабочих органов строительных машин необходимо дальнейшее развёртывание теории резания грунта.

## 2. Постановка задачи

В настоящее время теоретическую оценку затрат энергии на разработку грунта проводят, преимущественно, синтезным методом, когда сложный процесс взаимодействия рабочего органа с грунтом пытаются описать одной формулой [1-9]. При таком описании получаются сложные длинные формулы, трудно применимые в практических расчётах. Чтобы формулы упростить, авторы их часто конкретизируют, приспособив к расчётам конкретных конструкций с конкретными параметрами. При этом, изменение какого-либо параметра конструкции часто делает используемую ранее формулу неприменимой или трудно применимой. Между тем, для практических расчётов рабочих органов машин требуется простой и понятный метод, основанный на общепринятых формулах сопротивления материалов, теоретической механики и других наук. Для этого, не отвергая синтезный метод оценки затрат энергии на разработку грунта, необходимо произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.

## 3. Разработанная методика

Хотя в середине 20 века предпринимали попытки анализа резания грунта, но аналитический метод не получил должного развития. В предлагаемой работе основным методом теоретического исследования является анализ взаимодействия элементов рабочих органов с грунтом. Для этого рабочий орган разделён на элементы, а сложный процесс взаимодействия рабочего органа с грунтом разделён на простые процессы и проведён теоретический анализ взаимодействия каждого элемента с грунтом. Затраты энергии на

взаимодействия каждого элемента с грунтом можно вычислить, используя общепринятые формулы. Общие затраты энергии на резание грунта получаются сложением частных составляющих.

## 4. Результаты и их анализ

Существующие технические средства, содержащие рабочие органы, взаимодействующие с грунтом, имеют передний угол более  $30^\circ$  (рис. 1, а).

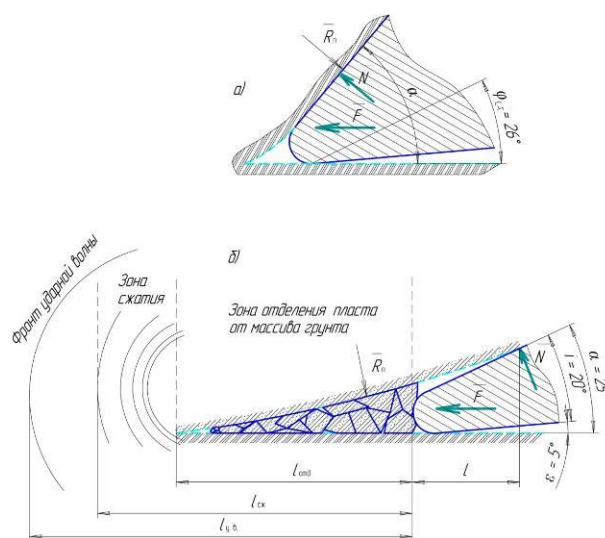


Рис. 1. Профиль кромки лезвия рабочего органа: а) передний угол более  $30^\circ$ ; б) передний угол  $25^\circ$ , меньше угла трения грунта о сталь

Известно, что среднее значение угла трения суглинков о сталь около  $26^\circ$  [10]. Следовательно, с теоретических позиций, они осуществляют, преимущественно, резание пуансоном с наличием, в той или иной степени краевого эффекта. Резание пуансоном обусловлено большими затратами энергии. При создании перспективных технических средств, чтобы уменьшить затраты энергии на резание грунта, следует от резания пуансоном перейти к резанию лезвием. Резание лезвием осуществляется, когда передний угол меньше угла трения грунта о сталь (рис. 1, б).

Рассмотрим свободное резание грунта горизонтальным лезвием. Кромка лезвия при внедрении в грунт создает впереди себя на расстоянии  $l_{у.в.}$  упругую ударную волну,

первично разрушающую структуру грунта. В промежутке между  $l_{омд}$  и  $l_{сжс}$  образуется зона сжатия грунта. На расстоянии  $l_{омд}$  от воздействия кромки лезвия пласт отделяется от массива почвы. Расстояния зависят от физико-механических свойств грунта, остроты лезвия и скорости его продвижения.

Задний угол при резании грунта должен быть не менее  $5^\circ$  [10]. Тогда минимальный угол заострения  $20^\circ$ . Он равен углу заточки лезвия, если оно установлено перпендикулярно направлению резания. Чтобы уменьшить затраты энергии на резание грунта, целесообразно установить лезвие так, чтобы оно было отклонено от перпендикуляра к направлению резания не менее чем на угол трения. Из пространственной модели получена трансформация угла заострения лезвия (табл. 1).

Таблица 1

Трансформация угла заострения лезвия при его отклонении от перпендикуляра к направлению резания, угол заточки  $20^\circ$

Угол отклонения лезвия от перпендикуляра к направлению резания, $\gamma$	Угол заострения лезвия
30	17,37
35	16,43
40	15,38
45	14,21
50	12,93
55	11,55
60	10,08

Зависимость угла заострения лезвия от отклонения от перпендикуляра к направлению резания (рис. 2). Результат аппроксимации показан на рис. 2.

Исходя из трансформации угла заострения и технологических требований, следует установить угол отклонения лезвия от перпендикуляра к направлению резания. Чтобы осуществлять резание со скольжением, угол отклонения лезвия от перпендикуляра к направлению резания должен быть больше угла трения грунта о сталь. Если этот угол большой, появляется возможность увеличить угол заточки лезвия с целью уменьшения его

изнашиваемости и увеличения ресурса. Принципиальное значение для определения ресурса лезвия также имеют свойства грунта, износостойкость лезвия, степень его допускаемого затупления. По мере затупления лезвия увеличиваются затраты энергии на его перемещение в грунте. Следует заметить, что методика расчёта затрат энергии на резание грунта затуплённым лезвием существенно отличается от анализа и методики расчёта затрат энергии на резание грунта острым лезвием.

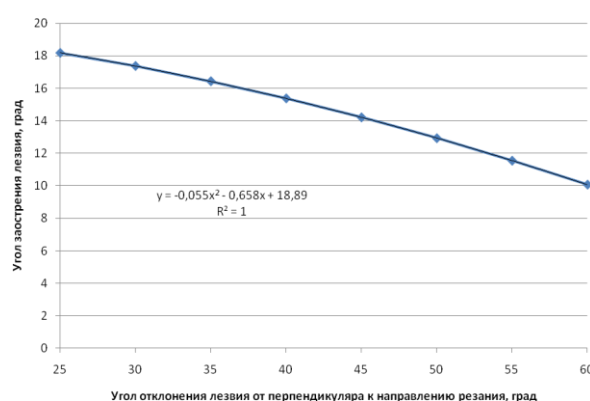


Рис. 2. Зависимость угла заострения лезвия от отклонения от перпендикуляра к направлению резания, угол заточки  $20^\circ$

Исходя из ориентировочного расчёта действующих сил, необходимо определить рациональные конструктивные и режимные параметры ножа. Так, при увеличении скорости перемещения лезвия, плотность грунта в зоне сжатия увеличивается (рис. 1). Это приводит к увеличению затрат энергии на перемещение ножа. Тем более скорость перемещения ножа не должна превышать скорость звука в грунте. Если скорость перемещения ножа превысит скорость звука в грунте, затраты энергии на резание грунта резко возрастут.

Однако невысокая скорость перемещения ножа в грунте также бывает нерациональна. Допустим, что угол отклонения лезвия от перпендикуляра к направлению резания острого горизонтального ножа  $45^\circ$ . Для определения минимальной скорости расчётом горизонтальный нож продольно-вертикальной плоскостью (рис. 3) по ходу агрегата.

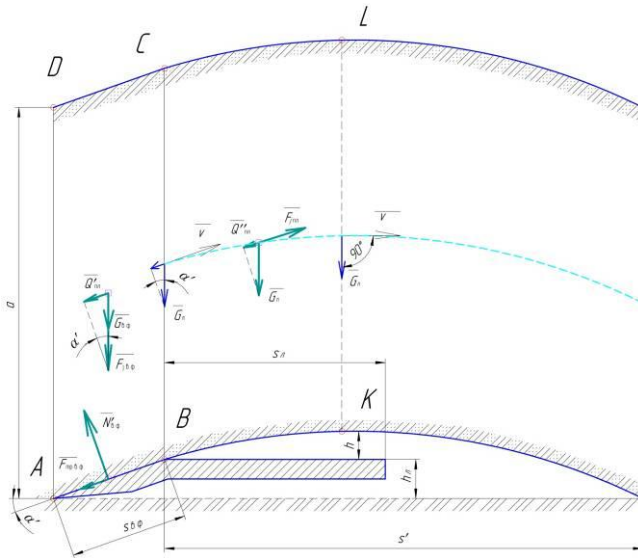


Рис. 3. Взаимодействие верхней фаски горизонтального ножа с грунтом

Пользуясь принципом относительности движения, представим, что не нож продвигается в грунте, а грунт скользит по ножу. Исходя из принятых геометрических параметров горизонтального ножа время движения пласта по верхней фаске ножа без учёта деформации пласта:

$$\tau_{\text{вф}} = \frac{s_{\text{вф}}}{v}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость перемещения ножа в грунте.

Средняя вертикальная скорость пласта на верхней фаске горизонтального ножа

$$v_{\text{вф}} = \frac{h_{\text{л}}}{\tau_{\text{вф}}}, \quad (2)$$

а его вертикальное ускорение

$$j_{\text{вф}} = \frac{v_{\text{вф}}}{\tau_{\text{вф}}}. \quad (3)$$

На сходе с фаски ножа пласт можно представить как материальную точку, перемещающуюся под углом к горизонту. Горизонтальная составляющая скорости

$$v_{\text{2ф}} = v \cos \alpha'.$$

За время  $\tau'_\delta$  движения в полете материальная точка переместится в горизонтальном направлении от точки схода с фаски на расстояние  $s' = v_{\text{2ф}} \tau'_\delta$ . За это же время она переместится по вертикали на высоту

$$h_{\text{л}} = v_{\text{вф}} \tau'_\delta - \frac{g \tau'^2_\delta}{2}. \quad (4)$$

Из уравнения определим время движения в полёте и дальность полёта пласта от точки схода с фаски горизонтального ножа до точки касания дна борозды

$$s' = v_{\text{2ф}} \tau'_\delta. \quad (5)$$

Если пласт грунта за время  $\tau_\delta$ , описав дугу, опустится на уровень поверхности горизонтального ножа, то

$$v_{\text{вф}} \tau_\delta - \frac{g \tau^2_\delta}{2} = 0$$

или

$$g \tau^2_\delta - 2 v_{\text{вф}} \tau_\delta = 0. \quad (6)$$

Определив отсюда время  $\tau_\delta$  и подставив в уравнение (4) выражение  $\tau'_\delta = \tau_\delta / 2$ , вычислим расстояние  $h$  от поверхности горизонтального ножа до высшей точки траектории полёта нижней частицы пласта без учёта его деформации.

Если рассматривать движение пласта грунта по горизонтальному ножу более строго, частицы грунта, контактирующие с фаской ножа, будут перемещаться по ней с меньшей скоростью в связи с торможением силой трения. В период перемещения по верхней фаске ножа в них накопятся упругие деформации. В момент схода с фаски ножа под действием сил упругости частицы, расположенные внизу пласта, «спружинят» и отделятся от него. Обладая меньшей скоростью, они упадут на поверхность горизонтального ножа, затормозятся на ней, будут там накапливаться и постепенно соскальзывать на дно разреза. По поверхности горизонтального ножа будет перемещаться рыхлый слой частиц грунта. Этот слой оказывает незначительное сопротивление перемещению горизонтального ножа в грунте, поэтому этим сопротивлением можно пренебречь.

Критическая скорость агрегата та, при движении с которой низ пласта в полёте начинает задевать поверхность горизонтального ножа. Из рис. 3 дальность полёта пласта при таком условии не должна быть более ширины сечения ножа продольно-вертикальной плоскостью  $s_{\text{л}}$ . Заменяв скорость



$v_{z\phi} = v_{z\phi} \operatorname{tg} \alpha'$  и обозначив время полёта  $\tau_{кр}$ , имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} s_{л} = v_{z\phi} \tau_{кр} \\ g \tau_{кр}^2 - 2v_{z\phi} \operatorname{tg} \alpha' \tau_{кр} = 0. \end{cases}$$

Выразив из первого уравнения  $v_{z\phi}$  и подставив во второе уравнение, получим критическое значение времени

$$\tau_{кр} = \sqrt{\frac{2s_{л} \operatorname{tg} \alpha'}{g}}. \quad (7)$$

Критическая горизонтальная составляющая скорости  $v_{z\phi} = s_{л} / \tau_{кр}$ , а критическая скорость агрегата

$$v_{кр} = v_{z\phi} / \cos \alpha'. \quad (8)$$

При резании суглинков горизонтальным ножом шириной 120 мм и высотой 20 мм критическая минимальная скорость агрегата получилась 1,35 м/с. Если скорость агрегата меньше критической, пласт начинает тормозиться о поверхность горизонтального ножа. На ней появится нормальная распределённая нагрузка, равная алгебраической сумме силы тяжести грунта и соответствующей вертикальной составляющей силы инерции. При этом сопротивление почвы перемещению ножа увеличится в связи с появлением силы трения пласта о его поверхность.

При резании грунта горизонтальным ножом энергию затрачивают на механическое перемещение, создание упругих ударных волн, накопление в почве упругого потенциала. Поскольку определение затрат энергии на создание упругих ударных волн, накопление в грунте упругого потенциала на данном этапе знаний вызывает затруднения, ограничимся вычислением объёмных затрат энергии на механическое перемещение.

Разделим острый горизонтальный нож на элементы: кромку лезвия, верхнюю фаску лезвия и проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Для этого рассечём лезвие ножа продольно-вертикальной плоскостью (рис. 4) и установим силы взаимодействия лезвия с грунтом.

При взаимодействии острого лезвия ножа с грунтом, кроме распределённой нагрузки  $q$  напора грунта, на рассматриваемый участок  $ACD$  действуют:

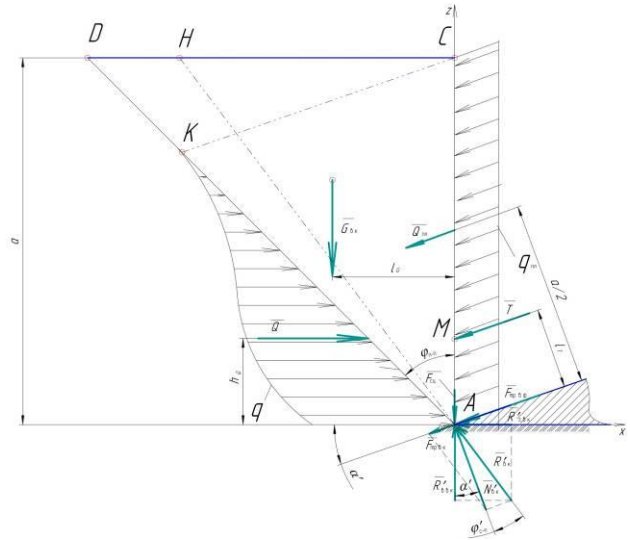


Рис. 4. Схема взаимодействия острого лезвия горизонтального ножа с грунтом

- $G_{вк}$  – сила тяжести грунта, действующая на верхнюю кромку лезвия;
- $F_{сц}$  – сила сцепления частиц в момент отрыва пласта от массива грунта;
- $q_{пл}$  – распределённая нагрузка, действующая на рассматриваемый участок пласта грунта со стороны части пласта, скользящей по верхней фаске горизонтального ножа и находящейся на взлёте фазы полёта;
- $F_{трвф}$  – сила трения грунта о верхнюю фаску ножа;
- $N'_{вк}$  – проекция нормальной реакции верхней кромки лезвия горизонтального ножа на продольно-вертикальную плоскость;
- $F_{трвк}$  – сила трения пласта о верхнюю кромку лезвия ножа.

Сначала рассмотрим взаимодействие верхней кромки лезвия горизонтального ножа с грунтом. С одной стороны участок взаимодействия на грунт верхней кромки лезвия горизонтального ножа ограничен продольно-вертикальной плоскостью, с другой стороны – плоскостью, перпендикулярной лезвию ножа. Поэтому объём грунта, на который воздействует верхняя кромка лезвия горизонтального ножа, состоит из объёма призмы и объёма пирамиды  $V_{вк} = V_{пр} + V_{пир}$ .

Определив эти объёмы, вычислим массу  $m_{вк}$  и силу  $G_{вк}$  тяжести грунта, располо-

женной в пределах участка воздействия верхней кромки лезвия. Отделение пласта от массива грунта происходит микроотрывами [10]. Если один микроотрыв происходит на пути  $l_{отр}$ , а длина лезвия  $l_{лез}$ , условная площадь отделения пласта от массива грунта за один микроотрыв  $S_{отр} = l_{лез} l_{отр}$ , а сила сцепления грунта

$$F_{сц} = \sigma_p^e S_{отр} . \quad (9)$$

Суммарная сила  $T$  (рис. 4) воздействия пласта грунта на рассматриваемый участок складывается из силы  $Q_{нл}$  и силы трения пласта о верхнюю фаску горизонтального ножа

$$T = Q_{нл} + F_{тр\phi} . \quad (10)$$

Сила  $Q_{нл}$  частично обусловлена воздействием части пласта, находящейся на верхней фаске ножа  $Q'_{нл}$ , и частично воздействием грунта, находящегося в полёте до верхней точки траектории  $Q''_{нл}$  (рис. 3):

$$Q_{нл} = Q'_{нл} + Q''_{нл} . \quad (11)$$

Силу  $Q'_{нл}$  определим проецированием суммы сил  $G_{вк} + F_{ж\phi} = F_{\Sigma\phi}$  на направление перемещения пласта по верхней фаске горизонтального ножа:

$$Q'_{нл} = F_{\Sigma\phi} \sin \alpha' . \quad (12)$$

В процессе полёта проекция элементарной составляющей силы тяжести грунта над поверхностью ножа на направление движения уменьшается, становясь в верхней точке траектории равной нулю.

Можно записать

$$Q''_{нл} = - \int_{\alpha'_{нач}}^0 G_l \sin \alpha' d\alpha' . \quad (13)$$

Интегрируя, получим  $Q''_{нл}$ , а затем из (11) -  $Q'_{нл}$  и из (10) - суммарную силу  $T$ . Точку приложения  $M$  силы  $T$ , её плечо относительно точки  $A$  определим из пропорции (рис. 4):

$$\frac{Q_{нл}}{F_{тр\phi}} = \frac{AM}{100 - AM} .$$

Сила  $F_{тр\phi}$  расположена в продольно-вертикальной плоскости, а нормальная реакция не в ней. Величину проекции нормаль-

ной реакции верхней кромки лезвия на продольно-вертикальную плоскость получим из уравнения равновесия сил относительно оси  $z$  (рис. 4):

$$N'_{вк} = \frac{G_{вк} + F_{сц} + T \sin \alpha'}{\cos \alpha'} . \quad (14)$$

Силы воздействия на грунт верхней кромки лезвия и их проекции на оси и плоскости определим из соотношений (18), полученных из пространственной модели сил (рис. 7). Разложив проекцию  $R'_{вк}$  реакции верхней кромки лезвия на рис. 4 на горизонтальную и вертикальную составляющую, определим силы  $R'_{zвк}$  и  $R'_{yвк}$ .

Заменив распределённую силу  $q$  на сосредоточенную  $Q$ , из уравнения равновесия сил относительно оси  $x$ :

$$Q = T \cos \alpha' + R'_{zвк} . \quad (15)$$

Из уравнения моментов относительно точки  $A$  плечо силы  $Q$ :

$$h_Q = \frac{G_{вк} l_G + T l_T}{Q} . \quad (16)$$

Можно определить среднее сопротивление почвы на единицу длины кромки лезвия горизонтального ножа  $p = R'_{zвк} / l_{лез}$  и распределённую нагрузку напора грунта

$$p_Q = Q / l_{лез} . \quad (17)$$

На рис. 5 рассмотрим действие сил, параллельных и перпендикулярных плоскости сдвига, следом которой является линия  $АН$ . Для этого изобразим векторы сил в масштабе и разложим их на составляющие. Анализ показывает наличие встречных сил, параллельных линии  $АН$ . Поскольку величины встречных сил недостаточны, при работе острого горизонтального ножа не будет явного сдвига грунта в направлении  $АН$ . Сила  $R'_{вк}$  создаёт лишь концентрацию касательных напряжений в плоскости, следом которой является линия  $АН$ . В грунте при этом накапливается упругий потенциал. Поскольку затраты энергии при этом увеличатся в полтора раза [10], соответственно силу  $R'_{вк}$  и её составляющие также следует увеличить в полтора раза. Силы, перпендикулярные следу плоскости сдвига, создают объёмное сжатие грунта перед лезвием горизонтального ножа. Сила тя-

ги трактора преодолевает горизонтальную составляющую реакции верхней кромки лезвия  $R'_{звк}$ .

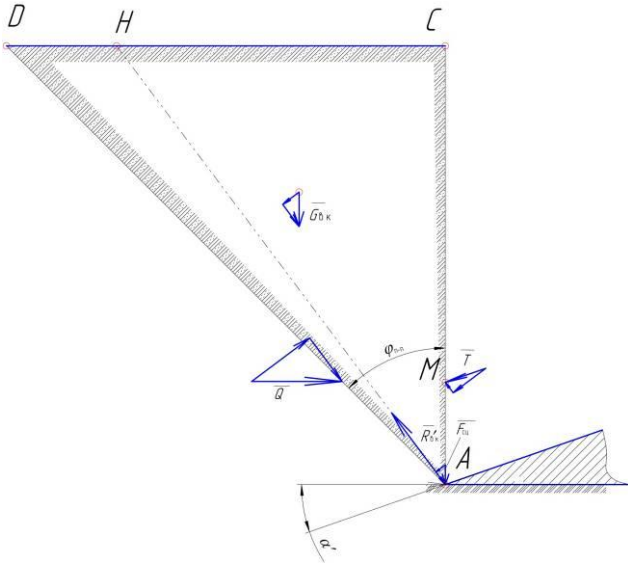


Рис. 5. Действие сил, параллельных и перпендикулярных следу плоскости сдвига

Рассмотрим взаимодействие верхней фаски лезвия горизонтального ножа с грунтом. Задавшись условной нормальной реакцией верхней фаски ножа и заменив распределённые силы сосредоточенными, с помощью пространственной модели определим проекции углов на продольно-вертикальную плоскость, проходящую по оси  $x$  направления движения агрегата, и соотношения динамических параметров. Соотношения сил и их проекций на плоскости и оси, полученное из пространственной модели:

$$\begin{aligned} R_{эф} &= 1,1N_{эф}; \quad N'_{эф} = 0,95N_{эф}; \\ R'_{эф} &= 0,96R_{эф}; \quad F_{трэф} = 0,5N'_{эф}; \\ F_{зтрэф} &= 0,9F_{трэф}; \quad N_{эф}^{xy} = 0,41N_{эф}; \\ N_{эф}^x &= 0,29N_{эф}; \quad N_{эф}^y = 0,9N_{эф}; \\ N_{эф}^z &= 0,9N_{эф}. \end{aligned} \quad (18)$$

На верхнюю фаску острого горизонтального ножа действует распределённая нагрузка от сил тяжести и инерции грунта, которую можно привести к сосредоточенным силам  $G_{эф}$  и  $F_{j_{эф}}$  (рис. 3), приложенным к центру масс пласта. Если допустить отсутствие сжатия грунта над ножом и отсутствие воздей-

ствия на фаску грунта, находящегося в полёте, сечение грунта на верхней фаске ножа с острым лезвием представляет параллелограмм  $ABCD$ . Определим площадь  $S_{эф}$  параллелограмма, объём  $V_{эф}$  параллелепипеда, опирающегося на него, массу  $m_{эф}$  почвы на верхней фаске горизонтального ножа, силу  $G_{эф}$  тяжести почвы на верхней фаске ножа.

Вертикальная сила инерции грунта на верхней фаске ножа

$$F_{j_{эф}} = j_{эф}m_{эф}, \quad (19)$$

где  $j_{эф}$  – вертикальное ускорение грунта на верхней фаске горизонтального ножа.

Суммарная вертикальная сила воздействия грунта на верхнюю фаску горизонтального ножа

$$F_{\Sigma_{эф}} = G_{эф} + F_{j_{эф}}. \quad (20)$$

Эта сила вызывает ответную равную ей вертикальную реакцию верхней фаски горизонтального ножа. Спроецировав эту силу на нормаль, из пространственной модели, выявим нормальную реакцию  $N_{эф}$  верхней фаски на воздействие грунта. Нормальную реакцию можно также определить из соотношений сил (18). Из соотношений сил и их проекций на плоскости и оси определим проекции нормальной реакции верхней фаски: на продольно-вертикальную плоскость  $N'_{эф}$ , на горизонтальную плоскость  $N_{эф}$  и на оси. Определим также силу трения грунта о верхнюю фаску горизонтального ножа, горизонтальную и вертикальную проекции силы трения грунта о верхнюю фаску ножа. Сила тяги трактора преодолевает сумму горизонтальной составляющей нормальной реакции и горизонтальной составляющей силы трения.

$$F_{\Sigma_{эф}} = N_{эф}^x + F_{зтрэф}. \quad (21)$$

Если присутствует нижняя фаска ножа, то следует учитывать силу  $F_{зтрнф}$  трения нижней фаски ножа. Исходя из параметров отделяемого пласта, следует определить перемещение агрегата и время перемещения, необходимое для разработки одного кубического метра грунта. Тогда затраты энергии

на механическое перемещение ножа для разработки одного кубического метра грунта:

$$u_{\text{гн}} = s(F_{\Sigma_{\text{эф}}} + F_{\Sigma_{\text{вк}}} + F_{\text{зтрнф}}). \quad (22)$$

Исходя из затрат энергии на механическое перемещение ножа и времени перемещения, определяют мощность на перемещение ножа для разработки одного кубического метра грунта. Например, при резании суглинков горизонтальным ножом шириной 120 мм, высотой 20 мм, ширине отрезаемого слоя 0,35 м и толщине 0,2 м потребляемая мощность 6,8 кВт.

### Заключение

Расчёт затрат энергии на резание грунта можно осуществлять двумя способами. Первый способ, методика которого приведена,

заключается в вычислении конкретных значений сил в определённый момент времени, то есть мгновенных сил, с последующим умножением на путь агрегата, необходимый для разработки одного кубического метра грунта. При вычислении затрат энергии вторым способом сразу определяют условные силы, при разработке одного кубического метра грунта, с последующим умножением на перемещение грунта по рабочему органу. Применение первого или второго способа зависит от конкретных условий работы рабочего органа. Анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом позволяет более точно определить параметры этого взаимодействия, понять физическую сущность процесса резания.

### Список литературы

1. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. - М.: Высшая школа, 1976. - 328 с.
2. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. - М.: Изд-во ЛКИ, 2013. - 224 с.
3. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. - М.: Машиностроение, 1975. - 424 с.
4. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. - 366 с.
5. Зыков, Б.И. Теория рабочих процессов строительных машин / Б.И. Зыков. - Ярославль: ЯГТУ, 2003. - 114 с.
6. Ветров, Ю.А. Разрушение прочных грунтов / Ю.А. Ветров. - Киев: Будивельник, 1973. - 350 с.
7. Бьюи, Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения / Х.Д. Бьюи. - М.: Физматлит, 2011. - 412 с.
8. Партон, В.З. Механика разрушения. От теории к практике / В.З. Партон. - М.: ЛКИ, 2016. - 240 с.
9. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. - М.: Машиностроение, 1971. - 357 с.
10. Николаев, В.А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В.А. Николаев. - Ярославль: ЯГСХА, 2014. - 358 с.

### References

1. Babkov V.F. *Fundamentals of soil science and soil mechanics*. Moscow, Vysshaya shkola, 1976. 328 p. (In Russian).
2. Kolesnikov Yu.V. *Contact mechanics of destruction*. Moscow, LKI, 2013. 224 p. (In Russian).
3. Zelenin A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. *Machines for excavation works*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1975. 424 p. (In Russian).
4. Goldshteyn M.N. *Mechanical properties of soils*. Moscow, Izd-vo literatury po stroitelstvu, 1971. 336 p. (In Russian).
5. Zykov B.I. *Workflow theory of construction machinery*. Yaroslavl, YAGTU, 2003. 114 p. (In Russian).
6. Vetrov Yu.A. *Destruction of strong soils*. Kiev, Budivelnik, 1973. 350 p. (In Russian).
7. Byui Kh.D. *Fracture mechanics: inverse problems and solutions*. Moscow, Fizmatlit, 2011. 412 p. (In Russian).
8. Parton V.S. *Fracture mechanics. From theory to practice*. Moscow, LKI, 2016. 240 p. (In Russian).
9. Vetrov Yu.A. *Cutting soil moving machines*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1971. 357 p. (In Russian).
10. Nikolayev V.A. *Soil processing machines. Theory and calculation*. Yaroslavl, YaGSKHA, 2014. 358 p. (In Russian).