

Тургумбаев Ж.Ж., Тургунбаев М.С.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА С КАМЕНИСТЫМИ  
ВКЛЮЧЕНИЯМИ РАЗРУШЕНИЮ**

*Zh.Zh. Turgumbaev, M.S. Turgunbaev*

**THEORETICAL FOUNDATION OF POWER  
RESISTANCE OF GROUND WITH STONE  
INCLUSIONS OF DESTRUCTION**

УДК: 621.879.06

*Рассмотрены теоретические основы определения силы сопротивления однородного грунта и грунта, содержащего крупнообломочные включения разрушению на основе теории предельного равновесия сыпучей среды.*

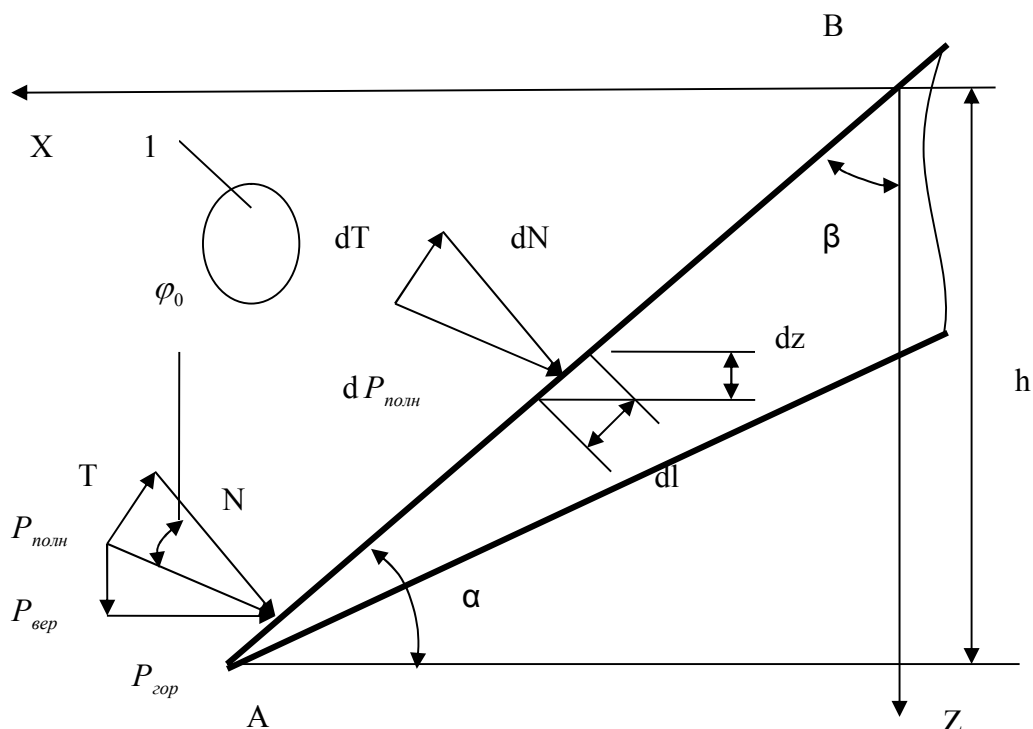
*Влияние каменных включений грунта на силу разрушения, а в дальнейшем и на энергоёмкость процесса разрушения оценено комплексным коэффициентом – коэффициентом камня.*

*Theoretical foundation of definition force of homogenous ground contents ground of large disintegrated rock formations of inclusions, destruction of foundation theory limits equilibrium among flowing.*

*The influence of stone inclusions ground of force destruction and in future of power consuming process destruction appreciates of complex coefficient – coefficient of stone.*

Теоретическое определение отделения определенного объема грунта от массива, а также сопротивление грунта разрушению базируются на теории предельного напряженного состояния сыпучей среды [1].

Расчетными схемами грунтов являются идеальная сыпучая и связная сыпучая среды. Расчетная схема грунта с каменными включениями при воздействии на него режущего органа землеройной машины показана на рис.1. Режущий орган землеройной машины воздействует на грунт под углом резания  $\alpha$ . При этом угол между режущим органом и вертикальной плоскости равняется углу  $\beta$ .



**Рис.1.** Расчетная схема для определения сопротивления резанию грунта с каменными включениями

Воздействие режущего органа землеройных машин на грунт геометрически уподобляется надвиганию подпорной стены к массиву грунта.

В зависимости от наклона задней поверхности подпорные стены разделяются на крутые, промежуточные, у которых задняя грань служит одной из поверхностей скольжения, и на пологие, у которых обе поверхности скольжения проходят внутри сыпучего тела [1].

Диапазон изменения угла наклона режущего элемента землеройных машин, при соответствующих значениях угла внутреннего трения грунта и угла трения грунта по рабочему органу относятся к крутым и промежуточным подпорным стенам [2]. Значит, граничными углами для режущего органа землеройной машины являются углы  $\beta_0$  и  $\beta_1$ .

Углы  $\beta_0$  и  $\beta_1$  определяются соответственно зависимостями:

$$\beta_0 = 0,5 \cdot (\varphi_0 + \arcsin \frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi}) \quad (1)$$

$$\beta_1 = 0,5 \cdot (180^\circ + \varphi_0 - \arcsin \frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi}) \quad (2)$$

где  $\varphi_0$  - угол трения грунта о режущий орган,

$\varphi$  - угол внутреннего трения грунта.

Угол наклона режущего органа к вертикальной плоскости равняется:

$$\beta = 90^\circ - \alpha$$

Для крутых подпорных стен угол отклонения полного давления от нормали равняется углу трения грунта по стенке -  $\varphi_0$  [3].

Сначала определяется сила сопротивления резанию однородного грунта, а в дальнейшем принимается во внимание влияние каменистых включений – 1 (рис.1) на силу сопротивления грунта.

Если принять изменение напряжения по ширине режущего органа одинаковым, то решение задачи можно рассматривать в плоскости.

На наклонной плоскости режущего органа выделяется элементарный участок  $d(AB) = dl$  (рис.1). Тогда с учетом единичной ширины режущего органа получится элементарная площадь:  $dF = dl \cdot b$ , где  $b = 1$ . Так как задача рассматривается в плоскости, то будем учитывать только элементарную длину режущего органа  $dl$ .

На элементарный участок  $dl$  режущего органа со стороны грунта действуют элементарные составляющие  $dN$  нормального и  $dT$  касательного давления.

$$dN = \sigma \cdot dl \quad (3)$$

$$dT = \tau \cdot dl \quad (4)$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  – соответственно нормальное и касательное напряжения.

Нормальное напряжение для промежуточных граней или подпорных стен определяется по формуле [1]:

$$\sigma = aCctg\varphi - Cctg\varphi \quad (5)$$

$$\sigma = a\gamma z + aCctg\varphi - Cctg\varphi, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – объемный вес грунта,

$C$  – сцепление в грунте.

$$\text{где } a = \frac{\cos \varphi_0 (\cos \varphi_0 + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \varphi_0})}{\cos^2 \varphi (1 - \sin \varphi)} \cdot \left( \sin \varphi \cos \chi + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \sin^2 \chi} \right)^2,$$

$$\chi = 90^\circ + \beta - 0,5\varphi_0 - 0,5 \arcsin \frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi}.$$

Как видно из формул (5) и (6), в первом случае пригрузка по поверхности грунта отсутствует, а в формуле (6) вместо пригрузки применяется объемный вес грунта.

Условие предельного напряженного состояния связной сыпучей среды выражается зависимостью [1]:

$$\tau = (\sigma + C \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (7)$$

По этой зависимости предполагается сцепление связного грунта с воздействующим на него элементом.

Элементарный участок на наклонной поверхности режущего органа и элементарная глубина разработки грунта связаны со следующей зависимостью (рис.1):

$$dz = dl \cdot \sin \alpha, \text{ Отсюда:}$$

$$dl = \frac{dz}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Для нахождения составляющей нормального напряжения по глубине резания проинтегрируем выражение (3) по h. Тогда:

$$dN = \sigma \cdot dl = \sigma \cdot \frac{dz}{\sin \alpha}$$

$$\int_0^h dN = \int_0^h (a\gamma z + aC \operatorname{ctg} \varphi - C \operatorname{ctg} \varphi) \frac{dz}{\sin \alpha}$$

$$N = \frac{1}{\sin \alpha} [0,5ah^2\gamma + hC \operatorname{ctg} \varphi(a - 1)] \quad (9)$$

$$N^2 = \frac{1}{\sin^2 \alpha} [0,25a^2h^4\gamma^2 + a^2h^3\gamma C \operatorname{ctg} \varphi - ah^3\gamma C \operatorname{ctg} \varphi + h^2C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi(a - 1)^2] \quad (10)$$

Для нахождения составляющей касательного напряжения по глубине резания проинтегрируем выражение (4) по h. Тогда имеем:

$$\int_0^h dT = \int_0^h (\sigma \operatorname{tg} \varphi_0 + C \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_0) \frac{dz}{\sin \alpha}$$

$$T = \frac{ah \operatorname{tg} \varphi_0}{\sin \alpha} (0,5h\gamma + C \operatorname{ctg} \varphi) \quad (11)$$

$$T^2 = \frac{a^2 h^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0}{\sin^2 \alpha} (0,25h^2\gamma^2 + h\gamma C \operatorname{ctg} \varphi + C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi) \quad (12)$$

В случае отсутствия пригрузки по поверхности грунта:

Составляющая нормального напряжения:

$$N = \frac{C \operatorname{ctg} \varphi h}{\sin \alpha} (a - 1) \quad (13)$$

$$N^2 = \frac{h^2 C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi}{\sin^2 \alpha} (a - 1)^2 \quad (14)$$

Составляющая касательного напряжения:

$$T = \frac{ahC \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_0}{\sin \alpha} \quad (15)$$

$$T^2 = \frac{a^2 h^2 C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi_0}{\sin^2 \alpha} \quad (16)$$

Составляющая полного давления определяется формулой:

$$P_{\text{полн}} = \sqrt{N^2 + T^2} \quad (17)$$

С учетом силы тяжести грунта:

$$P_{\text{полн}} = \sqrt{\frac{I}{\sin^2 \alpha} \left\{ (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_0) (0,25 a^2 h^4 \gamma^2 + a^2 h^3 \gamma C \operatorname{ctg} \varphi) - ah^3 \gamma C \operatorname{ctg} \varphi + C^2 h^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi [(a - 1)^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0] \right\}} \quad (18)$$

Когда пригрузка по поверхности грунта равняется нулю:

$$P_{\text{полн}} = \sqrt{\frac{h^2 C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi [(a - 1)^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0]}{\sin^2 \alpha}} \quad (19)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие полного давления:

1. Горизонтальная составляющая равна:

$$P_{\text{гор}} = (\sin \alpha \cos \varphi_0 + \cos \alpha \sin \varphi_0) \cdot P_{\text{полн}} = d_1 \cdot P_{\text{полн}} \quad (20)$$

2. Вертикальная составляющая равна:

$$P_{\text{вер}} = (\cos \alpha \cos \varphi_0 - \sin \alpha \sin \varphi_0) \cdot P_{\text{полн}} = d_2 \cdot P_{\text{полн}} \quad (21)$$

Отношение вертикальной составляющей к горизонтальной равно:

$$\frac{P_{\text{вер}}}{P_{\text{гор}}} = \left( \frac{I}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi_0} - \frac{I}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \varphi_0} \right) \quad (22)$$

Пространственность процесса резания грунтов учитывается посредством коэффициента пространственности. Коэффициент пространственности процесса резания грунтов определяется:

$$\eta_{np} = \begin{cases} 0, \text{ при свободном резании,} \\ 0,5 \cdot \frac{P_{бок}}{P_{лоб}} + 0,5 \cdot \frac{P_{бок.ср}}{P_{лоб}} \text{ при полублокированном резании,} \\ \frac{P_{бок}}{P_{лоб}} + \frac{P_{бок.ср}}{P_{лоб}} \text{ при блокированном резании} \end{cases}$$

(23)

где  $P_{бок}$  - сила резания в боковых расширениях прорези,

$P_{бок.ср}$  - сила среза в боковых гранях режущего элемента,

$P_{лоб}$  - сила резания в лобовой части режущего элемента.

Влияние каменных включений грунтов на энергоёмкость процесса резания учитывается введением коэффициента -  $\eta_{кам}$ , который учитывает количественную и качественную стороны содержания крупных обломков в грунте.

Сила сопротивления грунтов, содержащие каменные включения разрушению при резании острым режущим органом, установившемся режиме, на глубине резания -  $h$  и узкой шириной резания -  $b$ , определяется по формуле:

$$P_{гор} = (P_{полн} \cdot d_1 \cdot v \cdot \eta_{кам}) + (P_{полн} \cdot d_1 \cdot v \cdot \eta_{кам} \cdot \eta_{np}) \quad (24)$$

где  $P_{полн}$  определяется по формуле (18).

В случае отсутствия пригрузки по поверхности грунта:

$$P_{гор} = \left( \sqrt{\frac{h^2 C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi [(a-1)^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0]}{\sin^2 \alpha}} \right) \cdot d_1 \cdot b \cdot \eta_{кам} +$$

$$+ \left( \sqrt{\frac{h^2 C^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi [(a-1)^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0]}{\sin^2 \alpha}} \right) \cdot d_1 \cdot b \cdot \eta_{кам} \cdot \eta_{np} \quad (25)$$

На основе проведенных экспериментальных исследований на стенде [4] по полублокированному резанию однородного грунта – суглинка (угол резания -  $45^\circ$ , глубина резания 0,15 м, ширина резания 0,2 м [5],  $\eta_{np} = 0,2$ ,  $\eta_{кам} = 1$ ) определены расхождения между значениями экспериментальной и теоретической силами резания (табл. 1).

ой шириной резания анных построена регрессионная модель угла трения грунта по поверхности режущего органа, в зависимости от сцепления –  $C$ , угла внутреннего трения –  $\varphi$  и угла резания -  $\alpha$ :

$$\varphi_0 = -32,9 + 0,019C + 2,211\varphi + 2,1 \cdot 10^{-4} \alpha^{2,35} \quad (26)$$

Таблица 1.

**Физико-механические свойства и значения опытной и теоретической сил резания**

Наименование грунта	Объемный вес, $\gamma$ К $кН / м^3$	Сцепление, $кН / м^2$	Угол внутреннего трения, $\varphi$ , $^\circ$	Число ударов, С	Влажность	Опытная сила резания, $R_{сп}$ , кН	Теорет. полная сила резания, $R_{пол}$ , кН	Теорет. гориз. сила резания, $R_{гор}$ , кН	Расхождение, %
Теоретическая сила резания грунта рассчитана с учетом объемного веса грунта									
Суглинок	17,658	32	20	5	0,14	2,7 2,7	2,71 -	- 2,312	0,3 16,7
Теоретическая сила резания грунта рассчитана без учета пригрузки на поверхности грунта									
Суглинок	17,658	32	20	5	0,14	2,7 2,7	2,617 -	- 2,232	3,07 17,3

Из анализа расхождения между значениями силы сопротивления грунта разрушению, полученными экспериментальным путем и на основе формул (24) и (25) следует, что применение объемного веса грунта в пригрузке по поверхности грунта (формула 24) дает меньшее расхождение между опытной и теоретической силой резания.

**Литература:**

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды., Гостехтеориздат, 1954.
2. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 359 с.
3. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. Высшая школа, 1964. 153 с.
4. Тургунбаев М.С., Шамуратов К.Т. Стенд для исследования процесса резания грунтов. Патент на полезную модель Кыргызской Республики №113 от 30.08.2010.
5. Тургунбаев М.С. Разрушение однородных грунтов. Материалы международной научно-практической конференции «Совершенствование конструкций и системы эксплуатации транспортной техники» (I том). – Алматы, 2010. – с. 163-167.

**Рецензент: д.тех.н., профессор Жылкычиев А.И.**