

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 α . При этом угол между режущим органом и вертикальной плоскости равняется углу β .

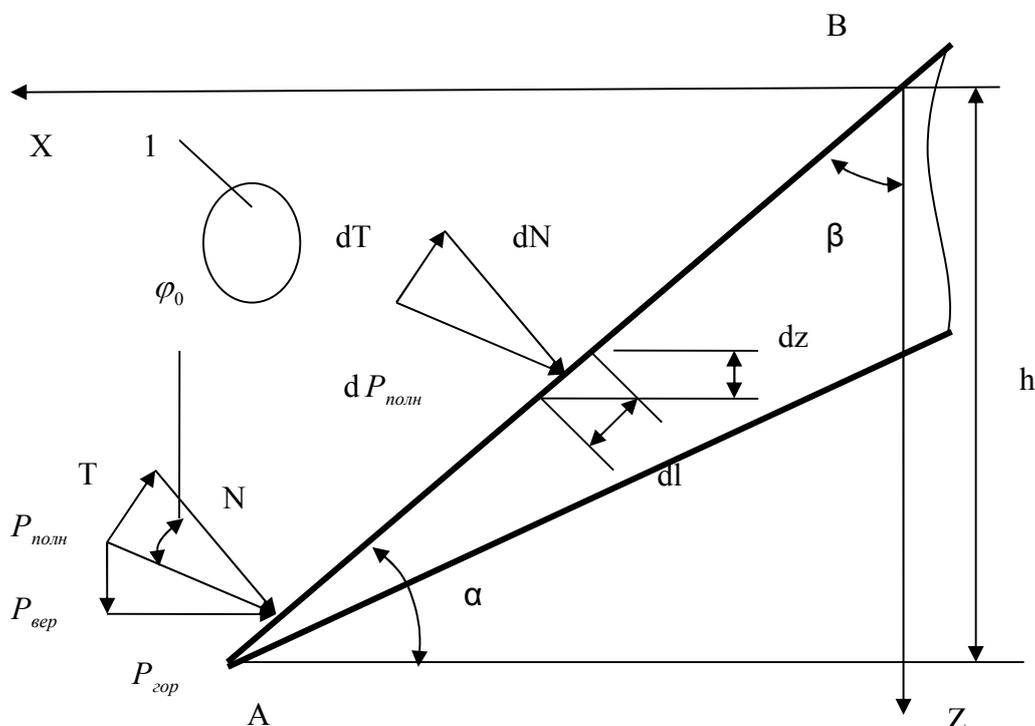


Рис.1. Расчетная схема для определения сопротивления резанию грунта с каменными включениями

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 β_0 и β_1 .

Углы β_0 и β_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 φ_0 - угол трения грунта о режущий орган,

φ - 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 - φ_0 [3].

Сначала определяется сила сопротивления резанию однородного грунта, а в дальнейшем принимается во внимание влияние каменных 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 σ и τ – 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 γ – 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° , 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 – φ и угла резания - α :

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

Таблица 1.

Физико-механические свойства и значения опытной и теоретической сил резания

Наименование грунта	Объемный вес, γ К $кН / м^3$	Сцепление, $кН / м^2$	Угол внутреннего трения, φ , $^\circ$	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.