

Моделювання робочих процесів машин

УДК 624.132.3

М.К. Сукач, д.т.н., проф.;
Ю.П. Филонов, к.ф.-м.н., доцент;
Р.Ю. Новиков (КНУСА, Киев)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЩЕЛЕВОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА ШИРОКИМ ПЛОСКИМ НОЖОМ

АННОТАЦИЯ. Проведено чисельний аналіз процесу щілинного різання типового суглинка просторово орієнтованим ножом в умовах природного залягання. Розраховані мінімальний кут різання, що визначає виникнення пластичної деформації ґрунту і максимальний кут, за якого починає формуватися ядро ущільнення на ножі. Встановлені значення тиску на лобовій грані ножа і розміри зони пластичної деформації ґрунту.

Ключові слова: щілинне різання, пластичне руйнування, плоский ніж, деформація ґрунту, граничний кут різання, тиск ґрунту.

АННОТАЦИЯ. Проведен численный анализ процесса щелевого резания типичного суглинка пространственно ориентированным ножом в условиях естественного залегания. Рассчитаны минимальный угол резания, определяющий возникновение пластической деформации грунта, и максимальный угол, при котором начинает формироваться ядро уплотнения на ноже. Установлены значения давления на лобовой грани ножа и размеры зоны пластической деформации грунта.

Ключевые слова: щелевое резание, пластическое разрушение, плоский нож, деформация грунта, граничный угол резания, давление грунта.

SUMMARY. The numerical analysis of process of the crack cutting of typical loam is conducted by the spatially oriented knife in the conditions of the natural bedding. The minimum corner of cutting, which determines the origin of flowage of soil, is expected, and a maximal corner at which begins to be formed kernel of compression on a knife. The values of pressure on the frontal verge of knife and sizes of zone of flowage of soil are set.

Key words: crack cutting, plastic destruction, flat knife, deformation of soil, border corner of cutting, pressure of soil.

Введение

Ранее в работе авторов [1] было описано щелевое резание грунта пространственно ориентированным плоским ножом, при котором грунт перемещается по лобовой поверхности в боковую сторону и в своды щели, не создавая пластической зоны деформации. Резание происходит при малых углах – $\delta \leq \delta_1$.

В модели [2] обоснован вариант резания грунта ядром уплотнения, образующимся на передней грани ножа. Здесь процесс осуществляется в наиболее неблагоприятном режиме с точки зрения прикладываемых к рабочему органу усилий и энергетических затрат на выполнение работы по созданию щели в массиве грунта. Он, как правило, наблюдается при больших углах резания $\delta \geq \delta_2$.

В диапазоне углов $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_2$, в подавляющем большинстве, возникают условия пластического деформирования грунта перед режущим ножом. Так, в работах [3, 4] были установлены минимальный угол резания δ_1 , при котором начинается выпор пластической зоны грунта, и максимальный угол δ_2 – начало роста ядра уплотнения на ноже. Там же дана прогнозная оценка давления грунта на поверхности режущего ножа и размеров пластического разрушения среды.

Целью настоящей работы является оценка основных параметров щелевого резания грунта в условиях его пластического разрушения в зоне контакта с поверхностью ножа и подтверждение адекватности аналитического описания процесса для реальных суглинистых грунтов.

Изложение основного материала

Используем разработанные авторами модели щелевого резания суглинка пространственно ориентированным ножом [3, 4], а также результаты исследования других авторов на типичных грунтах, встречающихся в средней полосе. Определим основные параметры процесса резания и посмотрим, насколько они соответствуют нашим представлениям о режиме резания массива в условиях пластического выпора грунта в зоне контакта с рабочим органом.

1. Пример расчета граничных углов резания суглинка

1) Возьмем **типичный суглинок**, который имеет следующие характеристики.

На глубине залегания 0,6...0,7 м грунт находится под давлением 1,2...1,7 кг/см², его пористость $\omega = 0,540...0,525$ (по данным В.И. Уродова, [5, табл. 7]).

Коэффициент уплотнения суглинка $a = \frac{\Delta\omega}{\Delta\sigma}$, где $\Delta\omega$, $\Delta\sigma$ – соответственно изменение его пористости ω и давления σ ;

$$\Delta\omega = 0,540 - 0,525 = 0,015; \Delta\sigma = 1,7 - 1,2 = 0,5 \text{ кг/см}^2; a = \frac{\Delta\omega}{\Delta\sigma} = \frac{0,015}{0,5} = 0,03 \text{ см}^2/\text{кг}.$$

В соответствии с компрессионными кривыми [5, рис. 13], коэффициент пористости суглинка в естественном состоянии $\omega_0 = 0,6$.

Угол внутреннего трения суглинка, по данным Н.Н. Маслова, $\theta = 19^\circ$. Сцепление $c = 0,75 \text{ кг/см}^2$; угол внешнего трения $\mu = 10^\circ$ (по Ю.А. Ветрову, [6, С.193]).

Примем угол резания ножа в плане $\gamma = 20^\circ$.

2) Найдем по этим данным **величины в обозначениях модели резания** [3, 4]:

$$n = \text{tg}\theta = 0,344;$$

$\gamma' = \cos\gamma = 0,94$ (γ – угол поворота ножа в плане);

$$\mu' = \text{tg}\mu = 0,176 \quad (\cos\mu = 0,985);$$

$$m = \frac{2ac}{1 + \omega_0} = \frac{2 \cdot 0,03 \cdot 0,75}{1 + 0,6} = 0,028;$$

$$m' = \frac{m}{\gamma'} = \frac{0,028}{0,940} = 0,03;$$

$$\bar{t} = \frac{\omega_0}{1 + \omega_0} = \frac{0,6}{1 + 0,6} = 0,375 \quad - \text{макси-}$$

мальное значение параметра $t = \frac{\omega_0 - \omega}{1 + \omega_0}$,

при котором начинает расти ядро уплотнения без выпора пластической зоны;

$$n' = \frac{n}{\gamma'} = \frac{0,344}{0,94} = 0,366;$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{t}}{2} \left(1 + \frac{5}{6} \bar{t} \right) = \frac{0,375}{2} \left(1 + \frac{5}{6} \cdot 0,375 \right) = 0,246.$$

3) Вычислим **параметр t_1** , определяющий начало пластической деформации грунта, по формуле (26) работы [3]:

$$t_1 = \frac{5}{3} \cdot \frac{\text{tg}\theta(\text{tg}\theta - \text{tg}\mu \cos\gamma)}{\cos^2\gamma - \text{tg}\mu \cos\gamma(\text{tg}\theta - \text{tg}\mu \cos\gamma)} + \left(\frac{5}{3} \cdot \frac{4a^2c^2}{(1 + \omega_0)^2 \cos^2\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{2act\text{tg}\mu}{3(1 + \omega_0)\cos\gamma} = \frac{5}{3} \cdot \frac{0,344(0,344 - 0,176 \cdot 0,94)}{0,94^2 - 0,176 \cdot 0,94(0,344 - 0,176 \cdot 0,94)} + \left(\frac{5}{3} \cdot 0,028^2 \cdot \frac{1}{0,94^2} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{0,028 \cdot 0,176}{3 \cdot 0,94} \approx 0,119 + 0,114 + 0,0017 \approx 0,235.$$

(Здесь первые два слагаемых существенны, третье – значительно меньше).

Следовательно, процесс резания обычного суглинка происходит по нашему, прогнозируемому в модели, типу – сначала возникает выпирающий перед ножом «чулок» (зона пластической деформации), потом образуется «нарост» (ядро уплотнения на лобовой поверхности ножа). Это подтверждается выполнением условия $t_1 \leq \bar{t}_0$

с «хорошим запасом»: $0,235 \leq 0,375$, что эквивалентно значениям формул (27') или (28) работы [3].

4) Проверим условие возникновения пластической деформации грунта по формуле [3, (29)]:

$$\bar{u} \frac{\cos^2 \gamma}{\cos^2 \mu} + \left(\frac{2ac}{\omega_0} + \operatorname{tg} \Theta \right) \operatorname{tg} \mu \cos \gamma (1 - \bar{u}) \geq \left(\frac{2ac}{\omega_0} + \operatorname{tg} \Theta \right)^2,$$

что дает

$$0,246 \cdot \frac{0,94^2}{0,985^2} + \left(\frac{2 \cdot 0,03 \cdot 0,75}{0,6} + 0,344 \right) \times \\ \times 0,176 \cdot 0,94 (1 - 0,246) \geq \left(\frac{2 \cdot 0,03 \cdot 0,75}{0,6} + 0,344 \right)^2$$

или

$$0,224 + 0,419 \cdot 0,176 \cdot 0,94 \cdot 0,754 \geq 0,419^2.$$

То есть условие [3, (29)]: $0,275 \geq 0,175$ выполняется с таким же хорошим запасом.

5) Найдем величину угла δ_1 – начала выпора (пластического деформирования) грунта перед ножом по формуле [3, (25)] или, что то же самое, по (27)]:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\cos \gamma} - \operatorname{tg} \mu + \\ + \frac{bac}{5(1 + \omega_0) \frac{\operatorname{tg} \theta (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \mu \cos \gamma)}{\cos \gamma - \operatorname{tg} \mu (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \mu \cos \gamma)} +} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{1}{+ [180(1 + \omega_0) \cos \gamma \cdot a^2 c^2]^{\frac{1}{3}} + 2ac \operatorname{tg} \mu} ; \\ \operatorname{tg} \delta_1 = 0,366 - 0,176 + \frac{0,030}{0,235} = 0,318.$$

Таким образом, $\delta_1 \approx 18^\circ$.

При углах резания $\delta < \delta_1 = 18^\circ$ грунт движется по лобовой поверхности ножа без образования зоны пластической деформации или ядра уплотнения (рис. 1, а). Деформирование (перемещение) среды происходит по лобовой поверхности ножа, практически реализуя чистое трение ее по металлу. Сопротивление резанию грунта определяется, главным образом, углом внешнего трения μ .

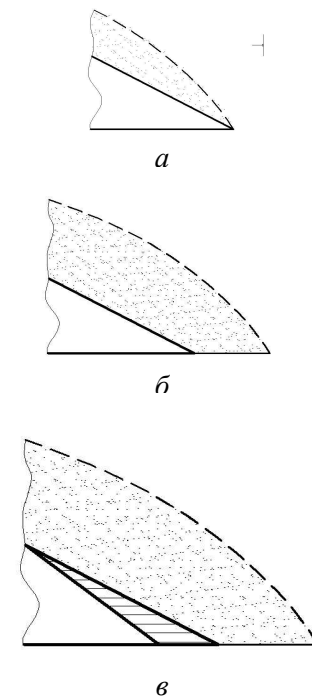


Рис. 1. Варианты деформирования грунта:
а – перемещение стружки по ножу;
б – пластическое деформирование грунта;
в – образование ядра уплотнения на ноже

При углах $\delta > \delta_1 = 18^\circ$ образуется зона пластической деформации грунта, которая развивается впереди перед ножом по ходу его движения (рис. 1, б).

б) Определим значение угла δ_2 , при котором возникает ядро уплотнения на ноже.

Для этого сначала найдем величину \bar{A} по формуле [4, (41)]:

$$\bar{A} = \frac{2,12\gamma'\bar{u}}{\frac{m}{t} + n} = \frac{2,12 \cdot 0,94 \cdot 0,246}{\frac{0,027}{0,375} + 0,344} \approx 1,17$$

и запишем квадратное уравнение [4, (42)], связывающее угол резания ($\delta' = \text{tg}\delta_2$) и давление ($u = u(t)$; $g = g(t)$, $t = \sigma_B \frac{a}{1 + \omega_0}$)

при резании выпирающей вперед пластической массой грунта без ядра уплотнения на ноже:

$$(1 + \mu'\bar{A})\delta'^2 - (\bar{u}\mu' - \mu' + \bar{A} - \mu'^2\bar{A})\delta' + \bar{u} - \mu'A = 0.$$

Подставив сюда значения соответствующих величин, получим

$$(1 + 0,176 \cdot 1,17)\delta'^2 - (0,246 \cdot 0,176 - 0,176 + 1,17 - 0,176^2 \cdot 1,17)\delta' + 0,246 - 0,176 \cdot 1,17 = 0$$

или

$$1,206\delta'^2 - 1,001\delta' + 0,04 = 0.$$

$$\delta' = \text{tg}\delta_2 = \frac{1,001 + \sqrt{1,001^2 - 4 \cdot 0,04 \cdot 1,206}}{2 \cdot 1,201} \approx 0,79.$$

Отсюда предельный (максимальный) угол, при котором начинает формироваться ядро уплотнения на ноже, $\delta_2 \approx 39^\circ$.

Итак, в пределах углов от 18° до 39° происходит резание грунта выпирающей вперед пластической зоной, а при $\delta > 39^\circ$ – наростом (ядром уплотнения) на ноже.

2. Пример расчета давления на лобовой грани ножа

Вычислим давление σ на ноже при трех углах резания: $\delta = 15^\circ$; 25° ; 35° .

1) При $\delta = 15^\circ \leq 18^\circ$ – малом угле резания и отсутствии выпора пластической зоны грунта.

В этом случае применяем формулу [1, (28)]:

$$\sigma_B = \frac{1,8}{a} \text{tg}\delta \text{tg}\Theta(1 + \omega_0) + \sqrt{\frac{3,2}{a} \text{tg}\delta(1 + \omega_0)c}.$$

$$\delta' = \text{tg}\delta = \text{tg}15^\circ = 0,27.$$

Давление на верхней кромке ножа

$$\sigma_B = \frac{1,8}{a} \text{tg}\delta \text{tg}\Theta(1 + \omega_0) + \sqrt{\frac{3,2}{a} \text{tg}\delta(1 + \omega_0)c} =$$

$$= \frac{1,8 \cdot 0,27}{0,03} \cdot 0,344 \cdot (1 + 0,6) + \sqrt{\frac{3,2}{0,03} \cdot 0,27 \cdot 1,6 \cdot 0,75} \approx 14,8 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее давление на ноже (в предположении треугольной формы эпюры давления на передней грани, рис. 2)

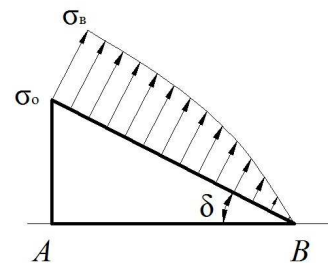


Рис. 2. Эпюра давлений на передней грани ножа

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_B}{2} = 7,4 \text{ кг/см}^2.$$

2) При угле резания $\delta = 25^\circ$ величина $\delta' = \text{tg}\delta = 0,47$.

Квадратное уравнение для параметра t (формула [4, (46)]):

$$\frac{\delta'm}{1-\mu'\delta'} + \left(\frac{\delta'n}{1-\mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta'+\mu'} \right) t =$$

$$= 0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+n'} \right) t^2.$$

$$\frac{0,47 \cdot 0,028}{1-0,176 \cdot 0,47} + \left(\frac{0,47 \cdot 0,344}{1-0,176 \cdot 0,47} + \frac{0,6 \cdot 0,028}{0,47+0,176} \right) t =$$

$$= 0,6 \left(2,12 \cdot 0,94 - \frac{0,344}{0,47+0,176} \right) t^2$$

или

$$0,014 + 0,202t = 0,876t^2.$$

Отсюда величина $t = 0,29$, а давление

$$\sigma_B = \frac{1+\omega_0}{a} t = \frac{1+0,6}{0,03} 0,29 \approx \mathbf{14,1 \text{ кг/см}^2}.$$

Это значит, что давление на верхней кромке ножа σ_B при переходе угла резания δ через величину δ_1 может немного уменьшаться.

Приближенная формула [4, (48)]

$$t = 0,9 \left[\sqrt{\frac{\delta'm}{(1-\mu'\delta')0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'} \right)}} + \frac{\frac{\delta'u}{1-\mu'\delta'} + \frac{0,6m}{\delta'+\mu'}}{0,6 \left(2,12\gamma' - \frac{n}{\delta'+\mu'} \right)} \right].$$

дает значение $t \approx 0,32$ с ошибкой $\approx 10\%$.

3) При угле $\delta = 35^\circ$ параметр $\delta' = \text{tg}\delta = 0,7$.

Квадратное уравнение для t [4, (46)]:
 $0,022 + 0,294t = 0,96t^2$, откуда $t \approx 0,37$.

По приближенной формуле [4, (48)] параметр $t \approx 0,41$ – тоже завышен примерно на 10%. Его следует снизить до величины $\bar{t} = 0,375$ – максимального значения, поскольку угол $\delta = 35^\circ$ близок к граничному

углу резания $\delta_2 = 39^\circ$, а точнее $t - \bar{t} \leq 10\%$ от значения параметра t .

Давление на верхней кромке ножа [4, (47')]

$$\sigma_B = \frac{1+\omega_0}{a} t = \frac{1+0,6}{0,03} \cdot 0,37 \approx \mathbf{18 \text{ кг/см}^2}.$$

Среднее значение давления на ноже вычисляем по формуле [4, (50)]:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1+\omega_0}{a} \cdot \frac{\delta'}{1-\delta'\mu'} \cdot \frac{(m+nt)}{\gamma't \left(1 + \frac{5}{6}t \right)};$$

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1+0,6}{0,03} \cdot \frac{0,7}{1-0,7 \cdot 0,176} \times$$

$$\times \left(\frac{0,028 + 0,344 \cdot 0,37}{0,94 \cdot 0,37 \left(1 + \frac{5}{6} \cdot 0,37 \right)} \right) \approx \mathbf{14 \text{ кг/см}^2}.$$

Таким образом, при возрастании δ от 25° до 35° давления грунта на верхней кромке ножа σ_B изменяется в пределах 2...3 % на 1° увеличения угла резания. В том числе некоторое уменьшение давления σ_B при возрастании углов $15^\circ \leq \delta \leq 25^\circ$ коррелируется с известными закономерностями (см. работы Ю.А. Ветрова [6, С.90-91], А.Н. Зеленина [7] и др.).

3. Пример расчета размеров зоны разрушений

Найдем размеры зоны разрушений при $\delta = 35^\circ$.

1) Высота пластической зоны h над верхней кромкой ножа, по формуле [4, (51)], составляет

$$h = h_n \frac{2}{t \left(1 + \frac{5}{6}t \right)} = h_n \frac{2}{0,37 \left(1 + \frac{5}{6} \cdot 0,37 \right)} \approx 4,2h_n,$$

где h_n – высота ножа; h и h' – размеры зоны пластического разрушения грунта перед ножом (рис. 3).

2) Продольный размер h' зоны разрушения (выпора пластической зоны), по формуле [4, (52)]

$$h' = \frac{2(\delta' + \mu')h_n}{(1 - \delta'\mu')\left(1 + \frac{5}{6}t\right)} = \frac{2(0,7 + 0,176)h_n}{(1 - 0,7 \cdot 0,176) \cdot 0,37 \cdot \left(1 + \frac{5}{6} \cdot 0,37\right)} \approx 4,2h_n;$$

$$h' = h_n \cdot 4,2 \cdot \frac{0,876}{0,877} \approx 4,2h_n.$$

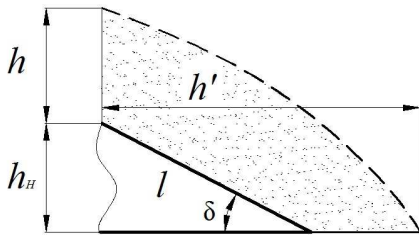


Рис. 3. Размеры зоны разрушения грунта

Таким образом, в условиях щелевого резания широким плоским ножом выпор грунта вперед составляет приблизительно 2,5 длины ножа.

Выводы

1. В статье проведен численный анализ процесса резания типичного суглинка широким плоским ножом в условиях естественного залегания.

2. Рассмотрен процесс резания грунта в условиях его пластического разрушения в контактной зоне с поверхностью ножа.

3. Рассчитаны минимальный угол резания, при котором возникает пластическая деформация грунта, и максимальный угол, при котором начинает формироваться ядро уплотнения на ноже.

4. Определен диапазон углов $18^\circ \leq \delta \leq 39^\circ$, в пределах которых происходит резание суглинка выпирающей вперед пластической зоной, при $\delta > 39^\circ$ резание осуществляется наростом (ядром уплотнения) на ноже.

5. Установлены значения давления на лобовой грани ножа и размеры зоны пластической деформации грунта.

6. Таким образом, расчетным путем подтверждена адекватность аналитической модели процесса резания суглинка, находящегося под гидростатическим давлением в грунтовом массиве.

Литература

1. Сукач М.К. Модель давления грунта на нож при щелевом резании / М.К. Сукач, Ю.П. Филонов, И.Н. Литвиненко // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2005.– Вип. 65.– С.17-22.
2. Сукач М.К. Характеристики процесса резания грунта в замкнутом пространстве / М.К. Сукач, Ю.П. Филонов, Д.В. Пузаков // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2006.– Вип. 67.– С.8-11.
3. Сукач М.К. Модель пластической деформации грунта при щелевом резании / М.К. Сукач, Ю.П. Филонов, Р.Ю. Новиков // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2011.– Вип. 77.– С.3-10.
4. Сукач М.К. Определение параметров коугольного пластического резания суглинка / М.К. Сукач, Ю.П. Филонов, Р.Ю. Новиков // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– К.: КНУБА, 2011.– Вип. 78.– С.3-8.
5. Уродов В.И. Физические основы глубокого резания грунтов.– Минск: Наука и техника, 1972.– 232 с.
6. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами.– М.: Машиностроение, 1971.– 360 с.
7. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами.– М.: Машиностроение, 1968.– 356 с.

Рецензент: С.В. Кравець, д.т.н., проф.
(НУВГП)

Отримано: 16.02.2012 р.