



УДК 624.132.3

М.К. Сукач, д-р техн. наук, профессор КНУБА;

Ю.П. Филонов, канд. физ.-мат. наук, доцент КНУБА;

Д.В. Пузаков, КНУБА

СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗАНИЮ ГРУНТА ЯДРОМ УПЛОТНЕНИЯ НА НОЖЕ

Введение. Настоящая статья является продолжением теоретических исследований авторов, опубликованных в [1, 2], где решалась задача резания грунта широким плоским ножом в глубине массива (в замкнутом пространстве грунта). Далее необходимо определить условия, обеспечивающие процесс резания без образования пластической зоны деформации, и минимальный угол резания, при котором начинает формироваться ядро уплотнения грунта на лобовой поверхности ножа. Рассматривается образование щели при закрытом резании суглинка, имеющего влажность, пористость и другие физико-механические свойства, характерные для грунтов 3...4 категории прочности [3].

Цель исследования – определение условий закрытого резания и размеров ядра уплотнения, а также сил сопротивления, возникающих на ноже при резании грунта без выпора пластической зоны.

Условия резания ядром уплотнения без пластического выпора грунта

При резании жестким наростом на ноже происходит трение грунта по грунту с минимальной активной пористостью ω_0 . Соответствующий этому процессу новый параметр μ_n – угол трения грунта по наросту, который фактически является углом внутреннего трения при уплотнении грунта до минимальной пористости и определяется опытным путем. Часто его приравнивают углу внутреннего трения грунта Θ , то есть ($\mu_i \approx \Theta$). Естественно, он больше, чем угол внешнего трения μ :

$$\mu \leq \mu_n. \quad (1)$$

Рассмотрим условие, полученное в работе [2], при котором пластический выпор грунта отсутствует:

$$0,45\omega_0 \frac{\cos^2\gamma}{\cos^2\mu} + \left(\frac{2a\tilde{n}}{\omega_0} + \operatorname{tg}\Theta \right) \times \times \operatorname{tg}\mu \cos\gamma (1 - 0,45\omega_0) \leq \left(\frac{2a\tilde{n}}{\omega_0} + \operatorname{tg}\Theta \right)^2, \quad (2)$$

где γ – угол поворота режущего ножа в плане; a – коэффициент уплотнения; c – сцепление грунта.

При подстановке значения угла μ_n вместо величины μ возможны 2 варианта.

Вариант 1. Неравенство (2) меняет знак " $\leq$ " на " $>$ ".

Это означает, что при углах резания $\delta \leq \bar{\delta}$ взаимодействие ножа с грунтом происходит по типу рис.1, а. Здесь $\bar{\delta}$ – граничное значение угла резания, соответствующее началу образования ядра уплотнения (см. формулу (33) работы [2]):

$$\operatorname{ctg}\bar{\delta} = \frac{2ac + \omega_0 \operatorname{tg}\Theta}{0,45\omega_0^2 \cos\gamma} + \operatorname{tg}\mu \quad (3)$$

При углах $\delta > \bar{\delta}$ резание грунта будет происходить по типу рис.1, в, когда появляются ядро уплотнения и выпор пластической зоны грунта.

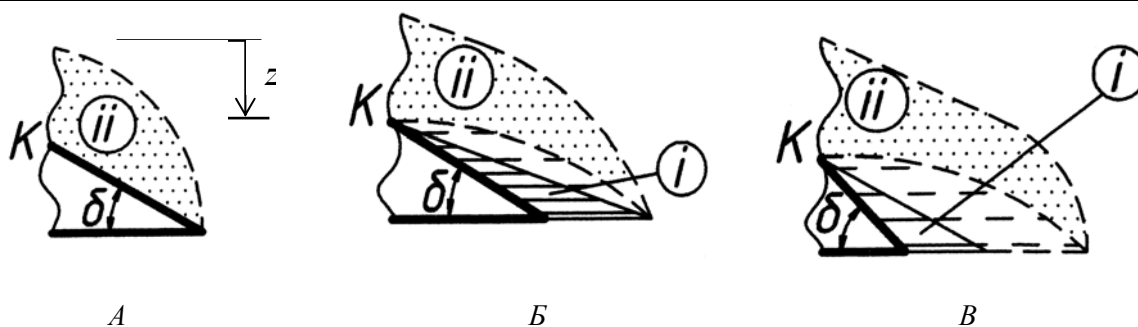


Рис.1. Типы деформации грунта перед лобовой гранью ножа:
I – ядро уплотнения; II – область пластического разрушения

Вариант 2. Неравенство (2) сохраняется.

В этом случае при углах $\delta > \bar{\delta}$ будет происходить резание грунта по типу рис.1, б [1] при всех значениях $\delta > \bar{\delta}$. Учитывая монотонность по μ в левой части неравенства (2), можно констатировать: если нет выпора с наростом (при $\delta > \bar{\delta}$), то его не будет и при резании без нароста (при $\delta \leq \bar{\delta}$).

При резании грунта ядром уплотнения без пластического выпора можно применять подход работ [1, 2], заменяя лобовую поверхность CB' ножа лобовой поверхностью ядра уплотнения CB (рис. 2) и вводя соответствующие изменения в формулы.

Итак, давление в точке C , согласно принятому в работе [1] условию $\sigma_a \leq \bar{\sigma}_a = \frac{\omega_0}{a}$ и при отсутствии выпора грунта будет

$$\sigma_a = \frac{\omega_0}{a}; \quad \sigma_{cp} = \frac{\omega_0}{2a}. \quad (4)$$

(здесь $\bar{\sigma}_a$ – давление грунта соответствующее началу образования ядра уплотнения).

Угол ядра уплотнения δ_n приблизительно можно считать "новым" углом резания (параметры грунта те же, но вместо угла внутреннего трения μ используется угол трения грунта по ножу μ_n):

$$\operatorname{ctg} \delta_n = \frac{2ac + \omega_0 \operatorname{tg} \Theta}{0,45 \omega_0^2 \cos \gamma} + \operatorname{tg} \mu_n. \quad (5)$$

Тогда условие отсутствия пластического выпора грунта примет вид

$$\operatorname{tg} \delta_n + \operatorname{tg} \mu_n \leq \frac{2ac + \omega_0 \operatorname{tg} \Theta}{\omega_0 \cos \gamma}. \quad (6)$$

Из всего сказанного следует основное утверждение.

Утверждение. Пусть выполняется неравенство (6), где угол ядра уплотнения δ_n найден по формуле (5), а все величины выражены через основные параметры грунтовой среды и характеристики рабочего процесса. Тогда при углах $\delta < \bar{\delta}$, где $\bar{\delta}$ определяется по формуле (3), резание происходит без нароста и без пластического выпора грунта. Для этого случая силы резания определены в работах [4, 5]. При углах $\delta > \bar{\delta}$ резание происходит с наростом, но без выпора. В этом случае угол ядра уплотнения находится по формуле (5), а сила, действующая на нож, имеет составляющие, приведенные в формулах (8 – 10).

Размеры ядра уплотнения грунта (в соответствии с рис. 2):

$$l_n = l \frac{\sin \delta}{\sin \delta_n}; \quad AB = l \sin \delta \operatorname{ctg} \delta_n. \quad (7)$$



Сила сопротивления резанию грунта ядром уплотнения

Рассматривается резание грунта широким плоским ножом, ориентированным под некоторым углом γ по отношению к траектории резания. В отличие от работы [4] резание происходит ядром уплотнения без образования пластического выпора грунта. Сначала оценим угол ядра уплотнения δ_n .

Из формул (5) и (6) следует, что $0,45\omega_0 \operatorname{ctg} \delta_n \geq \operatorname{tg} \delta_n$, то есть $\operatorname{tg} \delta_n \leq \sqrt{0,45\omega_0} \approx \sqrt{u} \approx 0,54$ (см. также формулы (30) и (12) из работы [1]).

Для упрощения дальнейших вычислений обозначим $f_i = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \delta_i} \approx \cos \gamma$. Величина f_n при углах $\gamma \leq 45^\circ$ с точностью до $\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \gamma \sin^2 \gamma \sin^2 \delta_n \leq 0,1$. При уменьшении угла γ ошибка приближения быстро уменьшается.

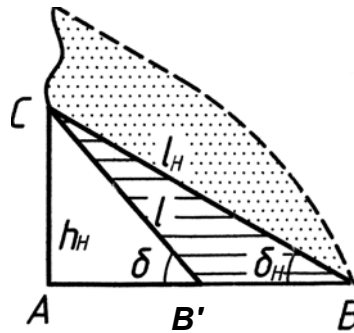


Рис. 2. Угол резания грунта ядром уплотнения

Для вычисления вертикальной составляющей силы, действующей на нож (рис. 3), используем формулу (20) из работы [4]:

$$F_z = S_n (\sigma_{z \text{ ср}} - \sigma_{tz \text{ ср}}) = lbf \frac{\sigma_b}{2} \times \left[\frac{1}{f} \cos \delta \cos \gamma - \operatorname{tg} \mu \sin \delta \right] =$$

$$= lb \cos \delta \cos \gamma \frac{\sigma_b}{2} \left[1 - \frac{f \operatorname{tg} \mu \operatorname{tg} \delta}{\cos \gamma} \right],$$

где S_n - площадь передней грани ядра уплотнения, $S_n = S_{np} / \cos \varphi_z$; S_{np} - площадь проекции этой грани на горизонтальную плоскость, $S_{np} = l \cos \delta \cdot b \cos \gamma$; φ_z - угол нормали лобовой грани к оси AZ ; $\cos \varphi_z = \frac{1}{f} \cos \delta \cdot \cos \gamma$; $\sigma_{z \text{ ср}}$ и $\sigma_{tz \text{ ср}}$ - средние значения напряжений от действия соответственно сил давления и сил трения грунта по наросту на лобовой грани ножа; b - ширина ножа; $f = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \delta}$; σ_z - составляющая давления σ на единичную площадку плоскости ножа, $\sigma_z = \frac{-1}{f} \cos \delta \cos \gamma \cdot \sigma$.

В нашем случае формулах (7) и (4); следует провести замены: l на l_n ; δ на δ_n ; $\frac{\sigma_{\hat{a}}}{2} = \sigma_{\text{ср}}$ на $\frac{\omega_0}{2a}$; f на $f_n \approx \cos \gamma$; μ на μ_n . Тогда

$$F_z = bl \frac{\sin \delta}{\sin \delta_n} \cos \delta_n \cos \gamma \frac{\omega_0}{2a} (1 - \operatorname{tg} \mu_n \operatorname{tg} \delta) = bl \sin \delta \frac{\omega_0}{2a} (\operatorname{ctg} \delta_n - \operatorname{tg} \mu_n).$$

Подставив сюда значение угла δ_n из формулы (5), получим вертикальную составляющую силы резания ядром уплотнения



$$F_z = 1,1bl \sin \delta \left(\frac{2\dot{a}}{\omega_0} + \frac{\operatorname{tg} \Theta}{a} \right). \quad (8)$$

Боковая составляющая силы резания имеет вид

$$F_y = lb \sin \delta \sin \gamma \frac{\sigma_{\dot{a}}}{2}.$$

Сделаем такие же, как указывалось выше замены, получим,

$$F_y = bl \frac{\sin \delta}{\sin \delta_i} \cdot \sin \delta_i \sin \gamma \frac{\omega_0}{2a},$$

или

$$F_y = lb \sin \delta \sin \gamma \frac{\omega_0}{2a}. \quad (9)$$

Касательная составляющая силы резания

$$F_x = lbf \left[\frac{1}{f} \sin \delta \cos \gamma \frac{\sigma_{\dot{a}}}{2} + \operatorname{tg} \mu \cos \delta \frac{\sigma_{\dot{a}}}{2} \right].$$

Выполним и в этой формуле аналогичные замены:

$$F_x = bl \frac{\sin \delta}{\sin \delta_n} \cos \gamma \frac{\omega_0}{2a} [\sin \delta_n + \operatorname{tg} \mu \cos \delta_n] = bl \frac{\omega_0}{2a} \sin \delta \cos \gamma [1 + \operatorname{tg} \mu_n \operatorname{ctg} \delta_n].$$

Подставляя угол δ_n из формулы (5), окончательно получим касательную составляющую силы резания

$$F_x = bl \frac{\omega_0}{2a} \sin \delta \cos \gamma \times \left[1 + \operatorname{tg} \mu_n \left(\frac{2ac + \omega_0 \operatorname{tg} \Theta}{0,45 \omega_0^2 \cos \gamma} + \operatorname{tg} \mu_n \right) \right]. \quad (10)$$

Исходным для вычисления действующих на нож сил при углах резания δ , указанных в основном утверждении, является неравенство (6). Его можно заменить неравенством (11) так же, как это делалось в формулах (27) и (24) работы [2]:

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_i (\operatorname{tg} \delta_i + \operatorname{tg} \mu_i)}{1 - \operatorname{tg} \delta_i \operatorname{tg} \mu_i} \leq \bar{u} \quad (\approx 0,45 \omega_0). \quad (11)$$

Это же можно сделать, заменив условие (6) неравенством (12), для которого не требуется предварительного вычисления угла δ_n по формуле (5):

$$0,45 \omega_0 \frac{\cos^2 \gamma}{\cos^2 \mu_n} + \left(\frac{2ac}{\omega_0} + \operatorname{tg} \Theta \right) \operatorname{tg} \mu_n \times \cos \gamma (1 - 0,45 \omega_0) \leq \left(\frac{2ac}{\omega_0} + \operatorname{tg} \Theta \right)^2. \quad (12)$$

Последнее выражение аналогично выражению (36'), приведенному в работе [2].

Рассмотрим выполнение условия (6) на примере суглинистого грунта.

Пусть он имеет следующие характеристики: угол трения грунта по ножу $\mu = 14^\circ$; $\operatorname{tg} \mu = 0,25$; коэффициент уплотнения $a = 0,03 \text{ см}^2/\text{кг}$; сцепление $c = 2,7 \text{ кг/см}^2$; минимальная активная пористость грунта (в не разрушенном состоянии) $\omega_0 = 0,5$; угол резания в плане $\gamma = 90^\circ$; угол внутреннего трения грунта $\Theta = 20^\circ$; угол трения грунта по ядру уплотнения $\mu_i = 20^\circ$; $\operatorname{tg} \mu_n = \operatorname{tg} \Theta = 0,34$.


$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \delta_i &= \frac{2 \cdot 0,03 \cdot 2,7 + 0,5 \cdot 0,34}{0,45 \cdot 0,5^2} + 0,34 = \\ &= 3,2911; \quad \operatorname{tg} \delta_i \approx 0,30 \quad (\delta_i \approx 17^\circ). \end{aligned}$$
$$0,30 + 0,34 \leq \frac{2 \cdot 0,03 \cdot 2,7 + 0,5 \cdot 0,34}{0,5 \cdot 1},$$
$$\operatorname{ctg} \bar{\delta} = \frac{2a\tilde{n} + \omega_0 \operatorname{tg} \Theta}{0,45\omega_0^2 \cos \gamma} + \operatorname{tg} \mu,$$

В нашем примере при углах $\delta \leq 17,5^\circ$ происходит резание грунта без образования ядра уплотнения и выпора пластической зоны, а при углах $\delta > 17,5^\circ$ – резание ядром (тоже без пластической деформации), что и подтверждается теоретическим прогнозом характера резания грунта пространственно ориентированным плоским ножом в замкнутом пространстве.

3. Показана адекватность аналитической модели в условиях закрытого резания грунта косоугольным широким плоским ножом.

Література

1. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Пузаков Д.В. Характеристики процесса резания грунта в замкнутом пространстве // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини: Всеукр. зб. наук. праць.– К.: КНУБА, 2006.– Вип.67.– С.8-11.
2. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Пузаков Д.В. Условие образования ядра уплотнения при щелевом резании грунта // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини: Всеукр. зб. наук. праць.– К.: КНУБА, 2006.– Вип.68.– С.8-11.
3. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами.– М.: Машиностроение, 1971.– 356 с.
4. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Литвиненко И.Н. Модель косоугольного щелевого резания грунта широким острым ножом // Техніка будівництва.– К.: КНУБА, 2005.– Вип.18.– С.4-11.
5. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Литвиненко И.Н. Модель перемещения грунта по ножу при вырезании щели в глубине массива // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини: Всеукр. зб. наук. праць.– К.: КНУБА, 2005.– Вип.66.– С.4-11.

УДК 666.94

В.Й.Сівко, д-р техн. наук, професор КНУБА,
Г.М.Голенков, канд. техн. наук, професор КНУБА,
С.А. Макогон,
Є.В.Сівко,
Є.В.Грищенко

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО ОРГАНУ З ҐРУНТОМ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ЗАНУРЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Актуальність проблеми. Процес вібраційного занурення палі, шпунтів та інших будівельних елементів у ґрунт – своєрідний коливальний процес, що виникає при взаємодії стрижню з ґрунтом. Вібробуджувач, що закріплений до наголовника палі, генерує в ній повздовжні коливання, які на границі паля-ґрунт викликають поперечні коливання ґрунту. Врахування цих сил взаємодії, особливо при умові, що ґрунт володіє суттєво нелінійними характеристиками, - надто складна задача, для вирішення якої дослідники використовують різні спрощення, які базуються на експериментальних даних. В роботах [1, 2] описані моделі процесу віброзанурення при допущенні про незмінність фізико-механічних характеристик ґрунту при дії вібрації і відсутності поперечних коливань ґрунту (лінійна задача).

Моделювання та методика досліджень. В цій роботі задача взаємодії робочого органу (палі) і ґрунту вирішується в строгій постановці. На межі гострого кінця палі і ґрунту формується зона напружено-деформованого стану (НДС), характер якої визначається формою наконечника, режимом коливань палі, фізико-механічними властивостями ґрунту. Задача надто ускладнюється тим, що ґрунт у процесі роботи змінює свою щільність. Внаслідок цього змінюється не тільки зона НДС, але й реактивний опір рухові палі. Тому задача про взаємодію палі з ґрунтом повинна вирішуватись спільно: коливання палі-деформування ґрунту. Паля моделюється абсолютно твердим тілом масою m з центром в середині палі і площею опирання F . Вона здійснює коливання по закону $Q(t)$, де Q - амплітудне значення сили, що збуджується.