

УДК 624.132.3

М.К. Сукач, канд. техн. наук, доцент КНУБА

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НОЖА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ С ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫМ ГРУНТОМ

Для аналитического описания сил резания грунта рабочим органом землеройной машины необходимо знать его напряженное состояние перед лобовой гранью ножа. Ранее была решена плоская задача взаимодействия ножа с подводным илистым грунтом [1]. В настоящей работе предлагается пространственная модель резания водонасыщенного грунта ножом клиновидной формы.

1. Постановка и решение краевой задачи

Грунт представляет собой вязкопластичную несжимаемую однородную среду (типа модели Бингама-Шведова). Основные параметры грунта – коэффициент структурной вязкости μ и предельное напряжение сдвига τ_0 . Считаем, что τ_0 равно сцеплению, как это принято для большинства водонасыщенных грунтов, у которых угол внутреннего трения φ ничтожно мал. Ширина ножа b превышает его длину l (здесь $b = |MM'|$, $l = |OM|$); угол резания равен α , задний угол – β , глубина погружения ножа в грунт – h (рис.1). Резание грунта сопровождается образованием сливной стружки. Движение элементов системы «рабочий орган – грунт» медленное, как это понимается в динамике сплошных сред, ламинарное, установившееся. Нелинейными членами и массовыми силами в уравнении движения будем пренебрегать. Система отсчета связана с ножом, движущимся с постоянной скоростью v_0 . Экспериментально установлено, что стружка грунта имеет два характерных участка – зону текучести I , прилегающую к лобовой поверхности ножа, и зону II , движущуюся как сплошное твердое тело (точнее зона II имеет пренебрежимо малый перепад скоростей $v(y)$ элементов грунта). Сечение BB_1 разделяет эти зоны, то есть на их границе напряжение $\tau = \tau_0$. Скорость твердой фазы вдоль лобовой поверхности ножа \bar{v} , ($\bar{v} \perp \overrightarrow{OY}$, $\bar{v} \parallel \overrightarrow{OX}$).

Запишем для зоны I уравнение Навье-Стокса [2]

$$\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \text{grad}P = 0. \quad (1)$$

Обозначим $\tilde{y} = |OB|$, $\tilde{y} = |BC|$; величина изменения давления $\hat{P} = -\text{grad}P$ постоянна.

Граничные условия

$$v(0) = 0, \quad v'(y)|_{y=\tilde{y}} = 0. \quad (2)$$

Задача (1 – 2) имеет единственное решение

$$v(y) = \frac{\hat{P}}{2\mu} y(2\tilde{y} - y). \quad (3)$$

При $y = \tilde{y}$ получаем из (3)

$$\bar{v} = \frac{\hat{P}}{2\mu} \tilde{y}^2. \quad (4)$$

Интегрируя (3) и добавляя твердую фазу, найдем поток грунта

$$I_{zp} = b \left(\int_0^{\tilde{y}} v(y) dy + \bar{v}\tilde{y} \right) = b \left(\frac{2}{3} \bar{v}\tilde{y} + \bar{v}\tilde{y} \right) = b\bar{v}y_1, \quad (5)$$

где по определению $y_1 = \frac{2}{3} \tilde{y} + \tilde{y}$.

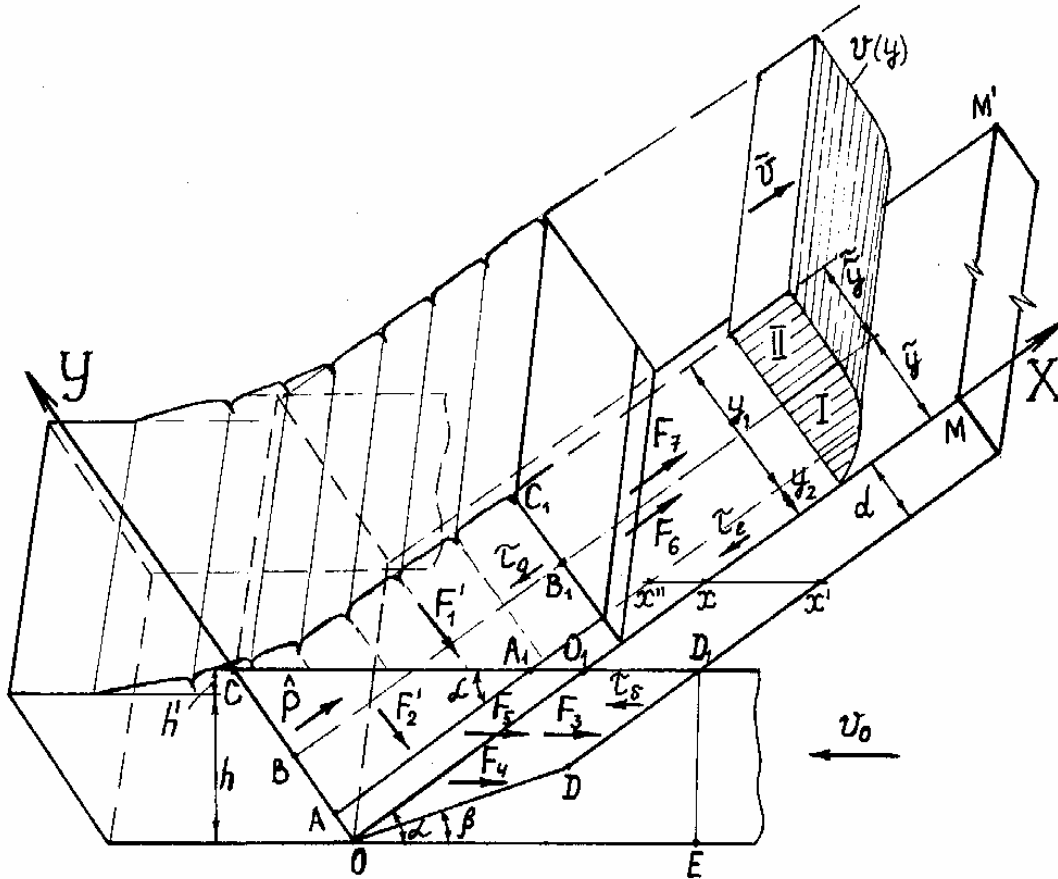


Рис.1. Расчетная схема резания вязкопластичного грунта широким ножом

Зону толщиной y_1 от поверхности грунта назовем квазитвердой. Она несет более 85% потока, даже при полностью жидком грунте, когда $\tau_0 = 0$. Это можно показать, вычислив поток в зоне $y_2 = \frac{\tilde{y}}{3}$, используя зависимости (3) и (4):

$$I_2 = b \int_0^{\tilde{y}} v(y) dy = b \int_0^{\tilde{y}} \frac{\hat{p}}{2\mu} y(2\tilde{y} - y) dy = b \frac{\hat{p}}{2\mu} \left(y^2 \tilde{y} - \frac{y^3}{3} \right) \Big|_0^{\tilde{y}} = b \frac{\hat{p}}{2\mu} y^3 \frac{8}{81} = b \frac{8}{81} \bar{v}\tilde{y}.$$

Отношение этого потока к общему I_{zp} , взятому из формулы (5): $\frac{8}{81} \frac{\tilde{y}}{y_1} < \frac{8}{81} \cdot \frac{3}{2} = \frac{4}{27} < 0,15$.

При реальном сцеплении грунта, когда $\tau_0 > 0$, доля квазитвердого потока тем больше, чем больше τ_0 (точнее – см. далее выражение для критерия $\varepsilon = \frac{y_2}{y_1}$).

В прилегающем к ножу слое толщиной y_2 при малой доле общего потока происходит основной перепад скоростей (более 55 % от максимальной) и, следовательно, прирост касательного напряжения за счет вязкости. Это очевидно из соотношения

$$\frac{v\left(\frac{\tilde{y}}{3}\right)}{\bar{v}} = \frac{\hat{P}}{2\mu} \frac{\tilde{y}\left(2\tilde{y} - \frac{\tilde{y}}{3}\right)}{3} = \frac{5}{9} \geq 0,55,$$

где использованы формулы (3) и (4).

Поток грунта, набегающий на лобовую поверхность ножа (вдалеке от него), $I = v_0 h b$.

Принимая сохранение потока $I_{zp} = I$, из (5) получим

$$\bar{v} y_1 = v_0 h. \quad (6)$$

Реологическое уравнение вязкопластичного грунта

$$\tilde{\tau} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (7)$$

где $\tilde{\tau} = \tau - \tau_0$ – добавочное касательное напряжение между слоями грунта в зоне I .

Из формулы (7) получаем, дифференцируя зависимость (3),

$$\tilde{\tau} = \hat{P}(\tilde{y} - y). \quad (8)$$

Значит, добавочное касательное напряжение τ_l на лобовой поверхности ножа (при $y = 0$) будет

$$\tilde{\tau}_l = \hat{P}\tilde{y}, \quad (9)$$

а, учитывая выражение (4):

$$\hat{P} = \frac{2\mu\bar{v}}{\tilde{y}^2}; \quad \tilde{\tau}_l = \frac{2\mu\bar{v}}{\tilde{y}}. \quad (10)$$

Опыт показывает, что стружка вязкопластичного грунта отделяется от массива сплошной лентой, практически без неровностей на внешней стороне. Тем не менее, в некоторых (крайних) случаях со стороны свободной поверхности наблюдаются деформации сжатия фрагментов стружки, углубления которых направлены перпендикулярно передней плоскости ножа. Поэтому, поскольку такой эффект существует, будем в первом приближении считать, что в процессе резания грунта фрагменты стружки испытывают сдвиговые напряжения в плоскости перпендикулярной лобовой грани ножа, обуславливающие уменьшение скорости перемещения стружки по ножу и увеличение ее толщины. Тогда

$$\bar{v} = v_0 \cos \alpha \quad (11)$$

и из соотношения (6)

$$y_1 = \frac{h}{\cos \alpha}. \quad (12)$$

Введем критерий $K = \frac{\mu v}{\tau_0 y}$, полученный в работе [1], и критерий

$$k = K \cos^2 \alpha = \frac{\mu\bar{v}}{\tau_0 y_1}, \quad (13)$$

Значение K обратно пропорционально критерию пластичности Π , известному из теории движения жидкостей в трубах [2]. Введем также безразмерные величины

$$\eta = \frac{\tilde{\tau}_l}{\tau_0}; \quad \varepsilon = \frac{y_2}{y_1}, \quad (14)$$

динамически и геометрически характеризующие роль вязкости в процессе резания грунта.

Тогда из (10) для $\tilde{\tau}_l$, равенства $\tilde{y} = 3y_2$, формул (13) и (14) получим связь между этими критериями

$$\varepsilon\eta = \frac{2}{3}k. \quad (15)$$

Рассматривая указанные выше фрагменты стружки на лобовой грани ножа можно предположить, что перепад давлений от величины \hat{P} у основания зоны II (в сечении BB_1) до нулевого перепада на поверхности грунта (в сечении CC_1) меняется линейно (учитывая наличие малой зоны текучести между ними). Тогда равновесие отдельного фрагмента грунта приводит к равенству

$$\frac{\hat{P}}{2}|BC| = \frac{\hat{P}}{2}(y_1 - 2y_2) = \tau_0. \quad (16)$$

Подставим в (16) значение \hat{P} из (10) с учетом соотношения (15):

$$y_1 - 2y_2 = 9 \frac{\tau_0 y_2^2}{\mu \bar{v}} = \frac{9}{k} \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 y_1 = \frac{9\varepsilon^2}{k} y_1. \text{ Поделив на } y_1, \text{ получим } 1 - 2\varepsilon = \frac{9}{k} \varepsilon^2.$$

Решая это квадратное уравнение, находим

$$\varepsilon = \frac{1}{9} \left(\sqrt{9k + k^2} - k \right) \quad (17)$$

$$\text{и из (15): } \eta = \frac{2}{3} \left(\sqrt{9k + k^2} + k \right). \quad (18)$$

2. Расчет сил, действующих на нож

Определим горизонтальные составляющие сил F_1 и F_2 , расходуемых на образование стружки грунта. Нормальная к лобовой поверхности сила, обусловленная сдвигом фрагментов стружки относительно друг друга при взаимодействии с режущей кромкой ножа,

$$F'_1 = \tau_0 b y_1 = \frac{\tau_0 b h}{\cos \alpha}. \quad (19)$$

Ее горизонтальная составляющая

$$F_1 = F'_1 \sin \alpha = \tau_0 b h \operatorname{ctg} \alpha. \quad (19')$$

Сила трения вырезаемой стружки о грунт в боковых прорезях, направленная перпендикулярно к лобовой поверхности ножа,

$$F'_2 = \tau_0 y_1^2 \operatorname{ctg} \alpha = \frac{2\tau_0 h^2}{\sin 2\alpha}. \quad (20)$$

(Здесь берем удвоенную площадь треугольника ACA_1 , учитывая две боковые грани ножа и пренебрегая слоем толщиной y_2 , не связанным со стружкообразованием). Горизонтальная составляющая этой силы

$$F_2 = F'_2 \sin \alpha = \frac{\tau_0 h^2}{\cos \alpha}. \quad (20')$$

Найдем теперь силу F_3 , действующую по касательной к боковым граням в горизонтальной плоскости. Обозначим P_1 – давление у нижней кромки ножа, в точке O . Тогда давление в произвольной точке x на расстоянии \overline{OX} ножа

$$P_x = P_1 - x\hat{P}. \quad (21)$$

Рассмотрим горизонтальный отрезок xx' по боковой поверхности ножа. Перепад $\hat{P}_x = -gradP$ вдоль линии xx' равен (из формулы (21))

$$\hat{P}_x = \frac{P_1 - x\hat{P}}{d_1}, \quad (22)$$

где $d_1 = |xx'| = \frac{d}{\sin \alpha}$ (здесь пренебрегаем участком заострения ножа), или приближенно

$$\hat{P}_x \approx \frac{P_1 \sin \alpha}{d}. \quad (22')$$

Из формул (10) следует, что $\tilde{\tau}_l^2 = 2\hat{P}\mu\bar{v}$. Вдоль боковых граней ножа тоже есть зона текучести, поэтому можно написать аналогичную формулу

$$\tilde{\tau}_0^2 = 2\hat{P}_x\mu v_0. \quad (23)$$

где $\tilde{\tau}_0$ – добавочное касательное напряжение вдоль боковой грани ножа (в горизонтальной плоскости); v_0 – скорость твердой фазы грунта вдоль боковой грани, совпадающая со скоростью ножа.

Здесь и далее считаем, что на боковые грани ножа и прилегающую зону толщиной y_2 действует горизонтальная касательная сила со стороны целика грунта вплоть до высоты $h + h'$ (где $h' = y_2 + \cos \alpha$ – высота бокового валика прорези). Напомним, что $y_2 = |OA|$; $|D_1E| = (y_1 + y_2)\cos \alpha = y_1(1 + \varepsilon)\cos \alpha$.

Силу, затрачиваемую на преодоление сцепления в области OAA_1D_1DO , оценим как

$$F_3 = 2\tau_0 S, \quad (24)$$

где $2S$ – удвоенная площадь этой области (учитывая две боковые грани ножа); $S = S_1 + S_2$:

$$\left\{ \begin{aligned} S_1 &= S_{OAA_1O_1O} = \frac{1}{2}[y_1(1 + \varepsilon)]^2 \operatorname{ctg} \alpha - \frac{1}{2}y_1^2 \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{2}y_1^2 \operatorname{ctg} \alpha \cdot \varepsilon(2 + \varepsilon) = \\ &= \frac{h^2}{\sin 2\alpha} \varepsilon(2 + \varepsilon); \\ S_2 &= S_{OO_1D_1DO} = y_1(1 + \varepsilon)\operatorname{ctg} \alpha \cdot d - \frac{d^2}{2}[\operatorname{ctg}(\alpha - \beta) - \operatorname{ctg} \alpha] = \\ &= \frac{hd}{2\sin \alpha}(1 + \varepsilon) - \frac{d^2}{2}[\operatorname{ctg}(\alpha - \beta) - \operatorname{ctg} \alpha]. \end{aligned} \right. \quad (25)$$

Тогда сила F_3 , которая идет на преодоление сцепления грунта на боковых гранях ножа,

$$F_3 = \tau_0 \left\{ \frac{2\varepsilon(2 + \varepsilon)h^2}{\sin 2\alpha} + \frac{hd(1 + \varepsilon)}{\sin \alpha} - d^2[\operatorname{ctg}(\alpha - \beta) - \operatorname{ctg} \alpha] \right\}. \quad (26)$$

Найдем давление P_1 как результат действия нормальных к ножу сил F'_1 , F'_2 и давления $\hat{P}l$, расходуемого на преодоление вязкого трения стружки по лобовой грани ножа,

$$P_1 = \frac{F'_1 + F'_2}{bl} + \hat{P}l. \quad (27)$$

Из формулы (9) и определения \tilde{y} , ε , η в (15), (17), (18) вычислим \hat{P} :

$$\hat{P} = \frac{\tilde{\tau}l}{\tilde{y}} = \frac{\tau_0\eta}{3\epsilon y_1} = \frac{\tau_0}{3y_1} \frac{\eta^2}{\epsilon\eta} = \frac{\tau_0}{3y_1} \frac{4}{9} \frac{\left(\sqrt{9k+k^2}+k\right)^2}{\frac{2}{3}k} = \frac{2}{3} \frac{\tau_0}{h} \cos \alpha (3+\eta). \quad (28)$$

Подставляя в формулу (27) значения \hat{P} из (28) и F'_1, F'_2 из (19), (20), получим

$$P_1 = \tau_0 \left[\frac{h}{l \cos \alpha} + \frac{2h^2}{bl \sin 2\alpha} + \frac{2}{3} \frac{l}{h} \cos \alpha (3+\eta) \right]. \quad (29)$$

Далее из (23), (22') и (29) добавочное касательное напряжение $\tilde{\tau}_\delta$ будет

$$\tilde{\tau}_\delta = \sqrt{2\hat{P}_x \mu\nu_0} = \sqrt{\frac{2\mu\nu_0 \sin \alpha \tau_0}{d} \left[\frac{h}{l \cos \alpha} + \frac{2h^2}{bl \sin 2\alpha} + \frac{2}{3} \frac{l}{h} \cos \alpha (3+\eta) \right]}. \quad (30)$$

Находим силу, которая идет на преодоление вязкого сопротивления стружки в слое, примыкающем к боковым граням ножа (в области OO_1D_1DO), используя (30) и (25),

$$F_4 = 2\tilde{\tau}_\delta S_2 = \left[\frac{2h(1+\epsilon)}{\sin \alpha} - d \operatorname{ctg}(\alpha - \beta) + d \operatorname{ctg} \alpha \right] \sqrt{2\mu\nu_0 \tau_0 d \left[\frac{h}{l} \operatorname{tg} \alpha + \frac{h^2}{bl \cos \alpha} + \frac{l}{h} \sin 2\alpha \left(1 + \frac{\eta}{3} \right) \right]} \quad (31)$$

На отрезке xx' (см. рис.1) величина $-\operatorname{grad}P = \hat{P} \cos \alpha$ и добавочное касательное напряжение $\tilde{\tau}$ может быть вычислено аналогично $\tilde{\tau}_\delta$, взяв \hat{P} из формулы (28),

$$\tilde{\tau} = \sqrt{2\hat{P} \cos \alpha \cdot \mu\nu_0} = 2 \cos \alpha \sqrt{\frac{\tau_0}{h} \left(1 + \frac{\eta}{3} \right) \mu\nu_0}. \quad (32)$$

Тогда сила, расходуемая на преодоление вязкости в слое грунта перед боковыми гранями ножа (в области OAA_1O_1O), используя (32) и (25), будет

$$F_5 = 2\tilde{\tau}S_1 = \frac{2\epsilon(2+\epsilon)h^{1,5}}{\sin \alpha} \sqrt{\mu\nu_0 \tau_0 \left(1 + \frac{\eta}{3} \right)}. \quad (33)$$

Сила, компенсирующая горизонтальную составляющую того давления у нижней кромки ножа, которое тратится на преодоление вязкого трения на его лобовой поверхности

$$F_6 = \frac{\hat{P}bl^2}{2} \sin \alpha = \frac{\tau_0 bl^2}{6h} (3+\eta) \sin 2\alpha. \quad (34)$$

Горизонтальная составляющая силы F_7 , которая идет на преодоление трения (сцепления и вязкости) вдоль лобовой поверхности ножа,

$$F_7 = \tau_l bl \cos \alpha = \tau_0 (1+\eta) bl \cos \alpha. \quad (35)$$

Полная сила резания грунта в горизонтальном направлении включает в себя сумму семи составляющих $F = \sum_{i=1}^7 F_i$, где значения ϵ и η находятся по формулам (17) и (18), а критерий

$$k = \frac{\mu\nu_0}{\tau_0 h} \cos^2 \alpha.$$

Выводы

1. Представлена пространственная модель блокированного резания вязкопластичного грунта широким плоским ножом прямоугольной формы в стационарном режиме. Напряжения на

лобовой поверхности и боковых сторонах рабочего органа машины в пределах разрушаемой части грунтового массива описаны через механические параметры грунта – сцепление τ_0 и динамическую структурную вязкость μ .

2. В расчетной модели учтены сопротивления, обусловленные сцеплением между фрагментами сливной стружки, ее пригрузкой в боковых прорезях при отделении от массива, силами сцепления и вязкости от трения грунта по боковым граням ножа, силами вязкого сопротивления между слоями грунта в зоне текучести грунта перед ножом, трением стружки (включая силы сцепления и вязкости) по лобовой поверхности ножа, а также силами, компенсирующими давление у нижней кромки ножа, которое расходуется на преодоление вязкого трения грунта вдоль ножа.
3. Силовые характеристики модели выражены через критериальные зависимости, связывающие динамические и кинематические параметры процесса с деформационно-прочностными свойствами среды, и достаточно полно отражают физическую картину резания водонасыщенного вязкопластичного грунта рабочим органом землеройной машины.

Список литературы:

1. Сукач М.К. Разработка глубоководных грунтов. - К.: Наук. думка, 1998.- 348 с.
2. Лойцянский Д.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987.- 840 с.

УДК 69.00.25

*І.І. Назаренко, д-р техн. наук, професор КНУБА,
М.О. Клименко, асистент КНУБА*

ДО ВИБОРУ ТИПУ БЕТНОЗМІШУВАЧІВ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ЇХ ОБ'ЄМІВ

Становлення України як суверенної правової держави із ринковою економікою вимагає розробки нового покоління будівельних машин із значно вищими від існуючих конструкцій показниками енерго- та ресурсозбереження, ефективності робочого процесу, технологічності виготовлення і ремонту, строку служби тощо. Для досягнення такого результату необхідне не тільки впровадження прогресивних методів виробництва, але й розробка новітніх методів розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів, а також сучасних критеріїв вибору машин і обладнання в залежності від умов роботи, технологічних режимів, т.ін. Останні повинні бути законодавчо закріплені у відповідних стандартах. При цьому досить доречним було б використання наробок державних та громадських організацій із стандартизації і сертифікації провідних держав світу. Як приклад розглянемо один з таких стандартів і порівняємо його із діючими на сьогодні вітчизняними нормативними документами.

Для аналізу візьмемо ГОСТ 16349-85Е "Смесители цикличные для строительных материалов. Технические условия" та чинний в Америці з 17 квітня 1996 року стандарт PMMD 100-96 "Змішувачі бетонних заводів" американського Бюро виробників бетонних заводів (Concrete Plant Manufacturers Bureau – СРМВ). Стандарт є обов'язковим для виконання підприємствами-членами Бюро і покладений в основу перевірки відповідності бетонозмішувачів при їх сертифікації в США.

Розглянемо основні положення цього стандарту.

Як зазначається в документі, в якості параметра, який покладений в основу стандартизації циклічних бетонозмішувачів, є об'єм бетонозмішувача по завантаженню сухими компонентами. На основі цього параметра побудований типорозмірний ряд та запроваджена система градацій. Таким чином, відповідно до стандарту, за типорозмір узятий "найбільший об'єм бетону, який може бути завантажений і якісно перемішаний за умови, що змішувач