

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Евдокимов А.Н.

Научные руководители: к. т. н. Жубрин В.Г., к. т. н., доцент Васильев С.И.

*Сибирский федеральный университет*

Процесс разрушения мёрзлых грунтов поступательно движущимся инструментом землеройно-транспортных машин в соответствии с исследованиями может быть разбит на два этапа деформирования. Первый этап – образование и развитие зоны пластических деформаций перед инструментом. Второй этап характеризуется отделением крупных элементов, вызванное повышением напряжений в упругой зоне до критической величины.

Для решения задачи о резании мёрзлого грунта поступательно движущимся инструментом можно использовать модель плоской деформации жёстко – пластического тела при неустановившемся пластическом течении с геометрическим подобием.

Мёрзлый грунт в зависимости от его типа и состояния может вести себя как материал, обладающий различной степенью сжимаемости, т.е. может быть практически несжимаемым или обладать способностью сжиматься до перехода в пластическое состояние.

В обоих случаях процесс разрушения грунта рассматривается как частный случай внедрения соответствующего штампа в жёстко – пластическую среду, ограниченную плоскостью. Используем некоторые обозначения, принятые в работе при рассмотрении задачи о давлении клинообразного штампа на вырез в жёстко – пластической полуплоскости:

$k$  – константа пластичности, равная пределу текучести грунта при сдвиге  $\tau_{\max}$ .

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные нормальные напряжения.

$$\varphi = \Theta + \frac{\pi}{4}$$

где  $\varphi$  – угол наклона наибольшей главной компоненты напряжения к оси X;

$\Theta$  – угол раствора центрированного поля.

На рис.1 и рис.2 показаны схемы резания грунта инструментом, подобным режущим элементам рабочих органов землеройных машин по оси. В качестве допущений принимаем: инструмент острый и абсолютно жесткий, объёмные силы равны нулю.

На рисунках обозначены:  $\alpha_p$  – угол резания инструмента,  $PA_0$  – длина контакта режущей кромки (далее обозначим через  $a$ ),  $\alpha, \beta$  – параметры двух ортогональных семейств линий скольжения. Пунктирными линиями показаны возможные варианты поверхностей, по которым происходит отделение элементов грунта с углом  $\alpha'$ . Начало прямоугольных координат принято в т.О, соответствующей моменту отделения последнего крупного элемента. При этом образуется поверхность ОС, наклонная к оси  $x$  – к текущей координате режущей кромки, под углом  $\alpha'$ . Область  $A_0A_1A_2A_3P$  перед резцом находится в пластическом состоянии и развивается геометрически подобно самой себе.

Максимальное трение  $T$  на поверхности  $PA_0$  контакта инструмента с грунтом находим по формуле [2]

$$T = k \cdot \sin 2\delta, \quad 0 \leq \delta \leq \pi/4 \quad (1)$$

Угол  $\delta$  связан с углом  $\Theta$  соотношением  $\Theta = (1 - \chi) \cdot \pi/4 + \chi \cdot \delta + n \cdot \pi$ ,

где  $\chi = \pm 1$ ,  $n$  – целое число.

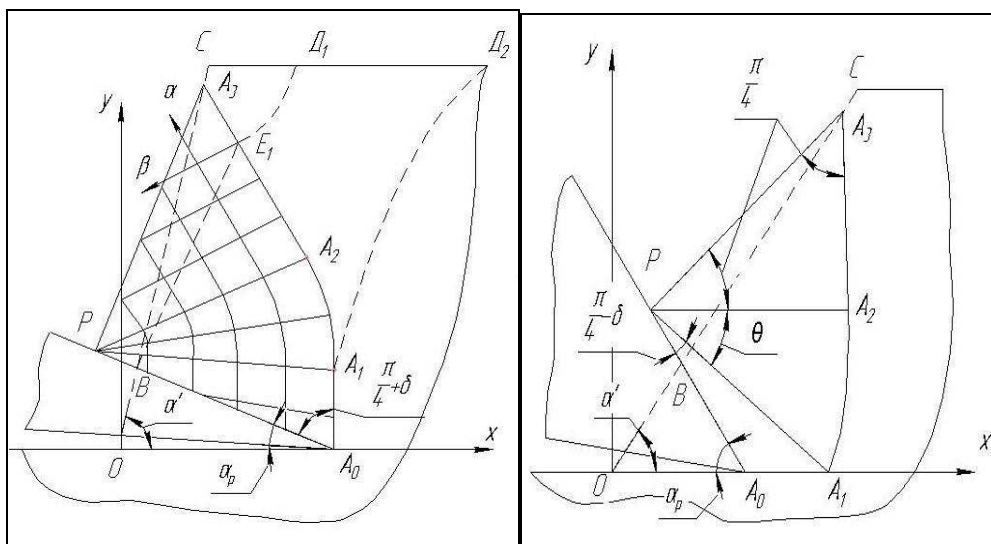


Рис.1 Расчетная схема резания

Рис.2 Расчетная схема резания

при угле резания  $\delta \geq \pi/2 - \alpha_p$

при угле резания  $\delta < \pi/2 - \alpha_p$ .

В случае несжимаемого грунта материал выдавливается в сторону свободной поверхности. Граница  $PA_3$  может быть аппроксимирована прямой линией. Исходя из принятых допущений, строим поля линий скольжения. Поле на рис.1 соответствует условию  $\delta < \pi/2 - \alpha_p$ , удовлетворяющее основным значениям углов резания, поле на рис.2 – условию  $\delta \geq \pi/2 - \alpha_p$ . Используя зависимости определяем распределение нормальных  $\sigma_n$  и касательных напряжений  $\tau_{nt}$  на контактной прямой  $A_0P$ .

Удельное сопротивление движению инструмента (резанию)  $P_{y\delta}$ , приходящееся на единицу ширины инструмента равно:

$$P_{y\delta} = a \cdot (\sigma_n \cdot \sin\alpha_p + \tau_{nt} \cdot \cos\alpha_p) = -p_o \cdot a \cdot \sin\alpha_p, \quad (2)$$

где  $p_o$  – сила давления острого штампа (резания острого резца), которая уравнивается нормальными и касательными напряжениями на контактной прямой.

В свою очередь:

$$P_o = 2k [\Theta + \cos\delta \cdot \sin(\alpha_p + \delta) / \sin\alpha_p] \quad \text{при } \delta < \pi/2 - \alpha_p$$

$$P_o = 2k[1 + \Theta + \cos(\pi/4) \cdot \cos(\pi/4 - 2\alpha_p)] \quad \text{при } \delta \geq \pi/2 - \alpha_p$$

Угол  $\Theta$  раствора центрированного поля  $A_1A_2P$  определяется согласно условию не сжимаемости исходя из равенства треугольников  $A_0OB$  и  $A_3PB$ . В соответствии с замерах углов при вершине уплотнённых ядер, приведенных в работе, величина угла резания  $\delta$  может быть принята равной для глины  $0^\circ$ , суглинка –  $2,5^\circ$ , супеси –  $13,5^\circ$  и  $22,5^\circ$  для песка. Для учёта различных схем резания (от свободного до заблокированного) в формулу (2) вводится коэффициент влияния боковых стенок реза на величину сопротивления резанию  $k_\delta$ . На основании исследований значение  $k_\delta$  для свободного, полублокированного и заблокированного резания можно принять равным соответственно 0,7, 1,0 и 1,3. Тогда полное сопротивление движению инструмента  $P_x$  в направлении оси  $x$  равно

$$P_x = k_\delta \cdot b \cdot P_{y\delta} = -k_\delta \cdot b \cdot a \cdot p_o \cdot \sin\alpha_p, \quad (3)$$

$b$  – ширина резания (ширина инструмента).

При расчёте сил сопротивления резанию рабочим инструментом роторных экскаваторов необходимо учитывать, что в контакте с грунтом находится несколько резцов. В этом случае коэффициент  $k_b$  должен быть заменён коэффициентом энергоёмкости  $K_3$ , приведенным ниже.

Траектория резания грунта траншейными экскаваторами с роторным рабочим органом складывается из поступательного движения базовой машины и вращательного движения ротора. Толщина стружки при этом увеличивается от нуля в нижней части траншеи до максимальной величины на уровне горизонтальной оси ротора. Поэтому при определенном расстоянии между резцами в соседних линиях резания на роторе (шаге резания) форма элементов стружки, срезаемой каждым резцом, постоянно меняется на протяжении всего пути резания. При малых значениях коэффициента режима резания коэффициент энергоёмкости меньше по величине, чем у заблокированного резания и у однородных мерзлых грунтов. Это объясняется тем, что при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов, вследствие влияния предыдущих резов на последующие, часто происходят сколы крупных элементов мерзлого грунта, при этом резец испытывает незначительные нагрузки. Проведенная математическая обработка экспериментальных данных при условии, что зависимость коэффициента энергоёмкости от угла резания можно считать прямолинейной, позволила получить следующие расчетные формулы:

для резцов в крайних линиях резания:

$$K_3 = [0,446(1-0,00038C)(1+0,00493 \cdot \alpha_p) \cdot 0,0404 \frac{t-b}{h}] (1 - 0,049V_p); \quad (4)$$

для резцов в средних линиях резания:

$$K_3 = [0,406(1-0,00038C)(1+0,00482 \cdot \alpha_p) \cdot 0,02 \frac{t-b}{h}] (1 - 0,049V_p); \quad (5)$$

Где  $C$  – прочность грунта (число ударов плотномера ДорНИИ);  $\alpha_p$  – угол резания;  $t$  – шаг расстановки резцов;  $h$  – глубина резания;  $V_p$  – скорость резания.

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод, что увеличение коэффициента энергоёмкости резания мерзлых грунтов резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, способствует выравниванию коэффициента вариации сил резания  $K_b$  на крайних и средних резцах. Этот коэффициент может служить мерой влияния на сопротивление внедрению (резанию) инструмента степени его износа. Среднеквадратичные отклонения значений  $\sigma_p$ , характеризующих рассеивание силы резания, показывают, что  $\sigma_p$  незначительно отличается как для острых, так и для затупленных резцов. Коэффициент вариации для изношенных резцов можно определить по формуле

$$K_p = \frac{K_{p0}}{1 + \frac{\Delta P}{P_0}}$$

где  $K_p$ ,  $K_{p0}$  – коэффициенты вариации силы резания соответственно затупленными и острыми резцами;  $P_0$  – средняя сила резания острыми резцами;  $\Delta P$  – дополнительная сила для преодоления силы сопротивления затупленным резцом, определяемая по формуле Ю. А. Ветрова. При ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов в нижней части траншеи имеет место глубокое блокированное резание, которое по мере движения резца вверх переходит в сотовое. Это объясняется разным соотношением толщины стружки и шага резания в различных точках траектории движения резца.