

ЗАГЛУБЛЕНИЕ НОЖЕЙ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА ПРИ НЕПРЕДЕЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ НА ГРУНТ

Е.И. БЕРЕСТОВ - д-р техн. наук, проф.,
Э.Х. ДЖАЛИЛВАНД, инженер
(Белорусско-Российский университет, г. Могилев)

Рабочий процесс бульдозера сопровождается частыми изменениями положения отвала по высоте. Происходит это по многим причинам, которые можно разделить на две группы:

- причины, вызванные действиями бульдозериста;
- причины, вытекающие из особенностей рабочего процесса бульдозера, не зависящие от действий бульдозериста.

К первой группе относятся действия машиниста, направленные либо на выполнение технологических требований, зависящих от выполняемой работы (особенно при перемещении и укладке грунта), либо вытекающие непосредственно из рабочего процесса копания (заглубление и подъем отвала).

Вторая группа объединяет многочисленные факторы. Одни из этих факторов не зависят ни от конструкции бульдозера, ни от вида выполняемой работы. К ним можно отнести изменения толщины стружки, зависящие от макро- и микрогеометрии поверхности участка, где работает бульдозер. Так, макронеровности способствуют заглублению отвала в выемках и выходу его из грунта на поверхностях возвышенностей. Влияние микронеровностей сказывается на заглублении и выглублении отвала при движении по ним бульдозера или даже части его движителя – одного колеса или гусеницы.

К факторам, в той или иной степени зависящим от вида выполняемых работ, можно отнести, прежде всего, самопроизвольное изменение толщины стружки вследствие перемещения бульдозера на поверхность, сформированную отвалом.

К факторам, зависящим от конструктивных особенностей бульдозера, можно отнести жесткость подвески отвала в вертикальной плоскости. От этой жесткости будет зависеть изменение положения отвала по высоте при действии на него вертикальных сил. К таким силам относится, прежде всего, вертикальная составляющая сопротивления копанию, обычно направленная вниз, а также силы, действующие на площадку износа ножа со стороны грунта, особенно при наезде на нижележащий слой повышенной прочности.

При действии на площадку износа дополнительных усилий возникает сопротивление от трения ножей о грунт. Кроме того, разгружается ходовое оборудование, что приводит к снижению тягового усилия из-за уменьшения сцепного веса и ухудшения условий работы движителей, особенно при вывешивании машины на отвале.

На заглубление отвала в грунт будут оказывать влияние как геометрические размеры режущей кромки ножей (с учетом площадки, появляющейся

из-за износа), так и другие факторы. К ним можно отнести вертикальную скорость заглубления отвала и согласование ее с поступательной скоростью бульдозера, перераспределение вертикальных сил, приводящее к снижению нагрузки на ходовую часть, и, соответственно, к снижению тягового усилия машины.

Поэтому исследование взаимодействия с грунтом изношенных ножей бульдозера при заглублении отвала является актуальной и важной задачей, поскольку ее решение обеспечивает снижение возникающих при заглублении отвала сопротивлений, вследствие чего повышается производительность бульдозера.

Экспериментальные исследования показывают, что наиболее интенсивно изнашивается нижняя сторона ножей. Поэтому будем рассматривать нож бульдозера с типичной площадкой износа (рис. 1), ширина которой «с» будет зависеть от времени и интенсивности эксплуатации бульдозера. Такая расчетная схема используется при расчете вертикальных давлений на режущей кромке отвала бульдозера [1], приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендуемые значения удельных напорных усилий q_H и вертикальных давлений q_B на режущей кромке ножей бульдозера

Показатели	Категория грунта			
	I	II	III	IV
	Значения показателей			
$q_H, \text{кН/м}$	до 15	20...30	40...55	более 60
$q_B, \text{МПа}$	до 1	1,2...2,0	2,5...3,5	более 3,5

Рассматривая процесс заглубления ножа с площадкой износа, можно выделить основные его особенности в зависимости от величины давлений, действующих на грунт. Если давления меньше предельных значений, то в зоне грунта, расположенной под площадкой износа, возникают упругие и пластические деформации, вследствие чего нож заглубляется на некоторую величину, зависящую от геометрических размеров площадки износа, заглубляющего усилия и физико-механических свойств грунта [2].

Если же давление на площадке износа достигнет предельных значений, то это приведет к разрушению грунта под ней. Величина этих давлений будет зависеть от физико-механических свойств грунта а также от характера пригрузки призмой волочения поверхности грунта, расположенной перед ножом.

Поскольку при работе бульдозера изменение положения отвала по высоте происходит достаточно часто по отмеченным выше причинам, во многих случаях это будет происходить при давлениях, не достигающих предельных значений. Вследствие этого исследуем этот процесс. При этом заглубление отвала будем рассматривать применительно к начальной стадии заглубления, поскольку на этот процесс практически не оказывают влияния ни

призма волочения, ни положение площадки сдвига перед ножом, ни толщина срезаемой стружки.

В механике грунтов [2] принято различать уплотнение грунтов при длительном воздействии постоянной статической нагрузки (компрессия) и уплотняемость грунтов при кратковременном действии динамических нагрузок (механическое уплотнение). В соответствии с этим положением будем рассматривать второй случай уплотнения. Для этого случая допускается рассматривать грунт как линейно-деформируемую и идеально упругую среду. При этих условиях сопротивление R вертикальным перемещениям характеризуется коэффициентом жесткости основания K_h

$$R = K_h F h,$$

где F – площадь основания заглубляемого тела; h – вертикальное перемещение площади основания.

Эта формула позволяет увязать напряжения с глубиной погружения штампа

$$\sigma = K_h h. \quad (1)$$

Коэффициент жесткости K_h зависит не только от упругих свойств грунта, но и от размеров подошвы основания, что видно из формулы

$$K_h = C_0 \left[1 + \frac{2(l+b)}{\Delta_1 F} \right] \sqrt{\frac{p}{p_0}}, \quad (2)$$

где C_0 – постоянная упругости основания, не зависящая от размеров подошвы основания; l и b – соответственно длина и ширина подошвы прямоугольного заглубляемого основания; p – давление, передаваемое на грунт основанием; p_0 – давление под опытном штампом, применяемое при определении коэффициента C_0 ; $\Delta_1 = 1 \text{ м}^{-1}$ – постоянный коэффициент размерности.

Рассмотрим расчетную схему заглубления ножа под действием вертикальной силы N , изображенную на рис. 1.

Если заглубляемый нож будет при этом перемещаться, то передняя часть площадки износа будет попадать на новый участок грунта, не подвергавшийся ранее вертикальным давлениям. Вследствие этого будет происходить перераспределение давлений, поскольку новый, недеформированный ранее участок грунта будет оказывать меньшее сопротивление по сравнению с предварительно сжатым старым участком. Поэтому давление на оставшуюся часть старого участка будет увеличиваться, что приведет к дополнительному погружению ножа. При дальнейшем перемещении ножа такой процесс будет повторяться, и нож будет заглубляться по некоторой траектории I-I.

Разделим ширину площадки износа «с» на одинаковые отрезки длиной Δc и рассмотрим заглубление ножа при его последовательном перемещении на длину, равную длине одного отрезка Δc , после того, как к нему будет приложено заглубляющее усилие N постоянной величины, и нож заглубится под действием этого усилия на некоторую начальную величину h_n .

При приложении к ножу заглубляющего усилия N , нормальное давление на грунт q будет увеличиваться до величины

$$q = \frac{N}{Bc}, \quad (3)$$

где B – длина отвала.

Под действием этого давления грунт будет деформироваться до тех пор, пока нормальные напряжения около его поверхности не сравнятся с давлением, рассчитанным по формуле (3), то есть, выполнится условие $\sigma=q$.

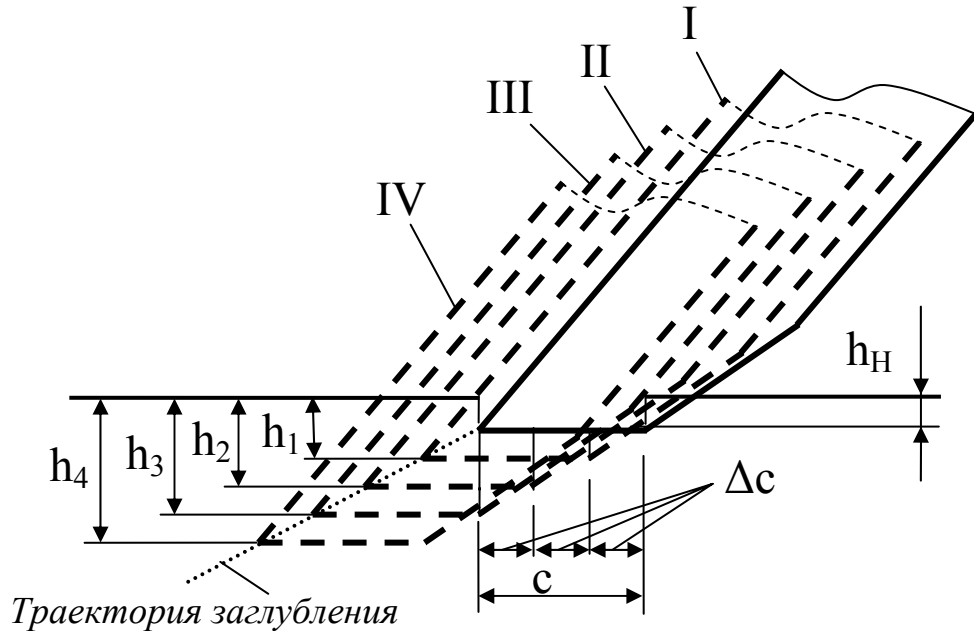


Рис. 1. Схема заглубления ножа при деформации грунта непердельными давлениями.

С учетом формулы (1) можно найти первоначальную величину заглубления ножа h_H

$$h_H = \frac{\sigma}{K_h} = \frac{N}{BcK_h}. \quad (4)$$

После этого начнем перемещать нож в горизонтальной плоскости. При перемещении ножа на длину одного отрезка Δc (положение ножа I на рис. 1) произойдет некоторое изменение давлений по ширине площадки износа. Это вызвано тем, что первый участок Δc будет находиться на поверхности грунта, ранее не нагруженной и, следовательно, подпрессовка грунта для этого участка будет равна $h_1 - h_H$, а для всех остальных участков останется равной h_1 . Поэтому и давление на первый участок будет меньшим, что вызовет соответствующее увеличение давления на остальные участки площадки износа. Поскольку давление на эти участки увеличится, это приведет к некоторому дальнейшему заглублению ножа. Можно считать, что

$$N = N_1 + N_{2-3} = \sigma_1 B \Delta c + \sigma_{2-3} B (c - \Delta c), \quad (5)$$

где N_1 , N_{2-3} – силы, действующие на первый участок и остальную поверхность площадки износа; σ_1 , σ_{2-3} – давления на тех же участках.

Используя формулу (1), получим для первого перемещения ножа

$$N = K_h(h_1 - h_H)B\Delta c + K_h h_1 B(c - \Delta c). \quad (6)$$

Из этой формулы можно получить искомую величину h_1 , поскольку остальные величины известны.

Аналогичным образом рассмотрим положение ножа при втором смещении (положение II на рис. 2). В этом случае, аналогично формуле (5), будем иметь

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = \sigma_1 B\Delta c + \sigma_2 B\Delta c + \sigma_3 B\Delta c. \quad (7)$$

Величину заглубления можно найти из следующей формулы, полученной аналогично формуле (6)

$$N = K_h(h_2 - h_1)B\Delta c + K_h(h_2 - h_H)B\Delta c + K_h h_2 B\Delta c. \quad (8)$$

Эта формула содержит все необходимые величины для расчета заглубления ножа h_2 .

При следующих – третьем и четвертом перемещениях ножа формула (8) будет выглядеть так. При третьем перемещении

$$N = K_h(h_3 - h_2)B\Delta c + K_h(h_3 - h_1)B\Delta c + K_h(h_3 - h_H)B\Delta c. \quad (9)$$

При четвертом перемещении

$$N = K_h B\Delta c[(h_4 - h_3) + (h_4 - h_2) + (h_4 - h_1)]. \quad (10)$$

Таким образом, если нож, заглубленный в грунт на начальную величину h_H усилием постоянной величины N перемещать в грунте, то это приведет к его заглублению вследствие того, что он смещается на новые, не сжимаемые ранее участки грунта. Величину его погружения можно рассчитать по формулам (4), (6), (8...10), рассматривая последовательно стадии перемещения, начиная с первой. Зависимость глубины погружения ножа от его перемещения, подсчитанная по приведенным формулам, имеет вид, представленный на рис. 2 сплошной линией.

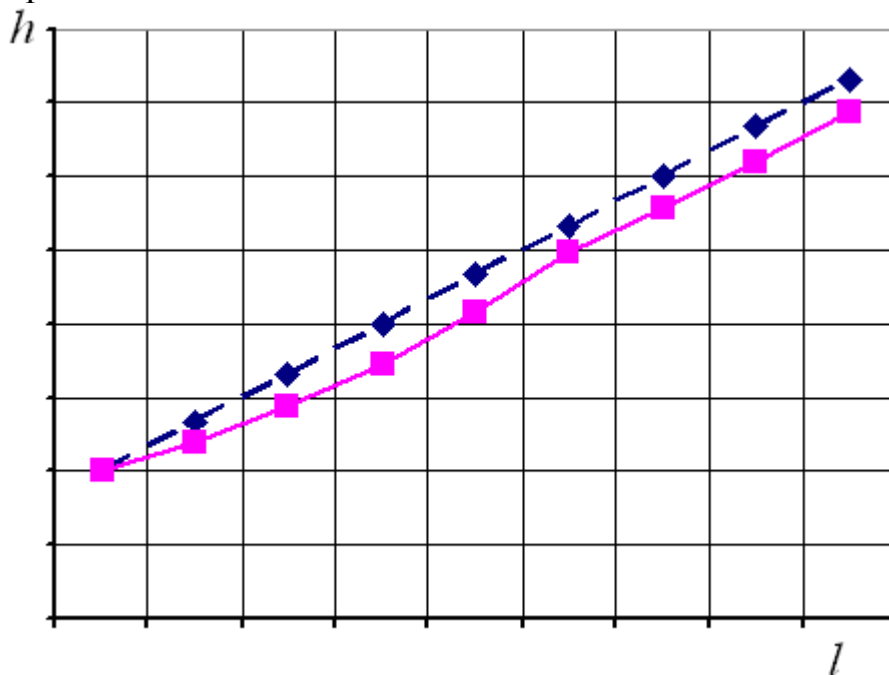


Рис. 2. Зависимость заглубления ножа h от его смещения l , полученная по полной методике расчета (сплошная линия) и по формуле (2.14) (штриховая линия).

Из рисунка видно, что функция $h=f(l)$, подсчитанная по предложенной методике, близка к прямолинейной, за исключением начального отрезка. На этом отрезке сказывается влияние начального заглубления ножа на величину h_H . При последующем смещении ножа стабилизируются условия заглубления и функцию $h=f(l)$ можно считать прямолинейной. Можно считать, что каждое последующее смещение ножа на величину Δc приводит к заглублению ножа на величину Δh .

Тогда формула (10) преобразуется следующим образом

$$N = K_h B \Delta c (\Delta h + 2\Delta h + 3\Delta h) = K_h B \Delta c \sum_{m=1}^{m=k} m \Delta h = K_h B \Delta c \Delta h \sum_{m=1}^{m=k} m, \quad (11)$$

где m – номер участка площадки износа, считая от режущей кромки; k – количество участков на площадке износа.

Отсюда глубина заглубления ножа при одном его смещении будет равна

$$\Delta h = \frac{N}{K_h B \Delta c \sum_{m=1}^{m=k} m}. \quad (12)$$

С повышением количества участков, на которые разбита площадка износа, точность расчетов повышается.

Тогда полное заглубление ножа при n -ном смещении с учетом начального погружения будет равно

$$h = h_H + n \Delta h. \quad (13)$$

Если нож будет погружаться при движении, без начального погружения, то формула примет вид

$$h = n \Delta h.$$

Расчеты по формуле (13) для тех же условий представлены на рис. 2 в виде штриховой линии. Из рисунка видно, что принятое допущение имеет место, поскольку результаты расчетов близки друг к другу, а метод расчета значительно проще.

Рассмотрим формулу (11) в другом виде

$$N = B \Delta c K_h \Delta h + B \Delta c K_h 2\Delta h + B \Delta c K_h 3\Delta h = B \Delta c \sigma_1 + B \Delta c \sigma_2 + B \Delta c \sigma_3 = N_1 + N_2 + N_3$$

где $N_1, N_2, N_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – силы и давления, действующие на соответствующие участки.

При этом

$$\sigma_1 = K_h \Delta h; \quad \sigma_2 = 2K_h \Delta h; \quad \sigma_3 = 3K_h \Delta h \quad \text{или} \quad \sigma_m = mK_h \Delta h.$$

Следовательно, с увеличением номера участка площадки износа (приближения к задней части ножа) будет увеличиваться и давление, действующее на него при заглублении отвала бульдозера.

Принятая расчетная схема и полученные уравнения позволяют достаточно полно проанализировать возможность заглубления отвала бульдозера в том случае, когда давления на площадке износа не являются предельными, а заглубление осуществляется лишь за счет деформации грунта.

Рассмотрим бульдозер весом 200 кН на базе трактора Т10М, имеющий длину отвала 3,2 м. Длина c площадки износа ножа у этого бульдозера для новых ножей равна 14 мм, а для полностью изношенных – около 25 мм.

Максимальное заглубляющее усилие отвала будет при вывешивании бульдозера на отвале, и это усилие не превышает 70 кН. Тогда вертикальное давление, передаваемое на грунт площадкой износа ножа при $c=14$ мм будет равно $q_6=1560$ кПа, а при $c=25$ мм - $q_6=875$ кПа.

Численные значения коэффициента C_0 [2] примем для грунтов II категории $C_0=15000$ кН/м³ и для грунтов III категории $C_0=30000$ кН/м³. По формуле (2) определим значения коэффициента жесткости K_h .

Для расчета заглубления отвала воспользуемся формулой (12), согласно которой определяется глубина заглубления Δh при перемещении отвала на величину Δc , которая равна

$$\Delta c = \frac{c}{k},$$

где k – количество расчетных участков, на которое разбита длина c площадки износа.

Поэтому для расчета величины заглубления ножа h при перемещении на какую-то величину l , необходимо использовать формулу

$$h = \frac{l\Delta h}{\Delta c}.$$

Прежде чем перейти к расчетам заглубления отвала, оценим влияние количества расчетных участков площадки износа на точность расчетов. Для этого подсчитаем величину h после 100 мм пути при разных значениях количества участков k . Результаты расчетов применительно к II категории грунта и новому ножу при давлении на грунт 600 кПа представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что при увеличении количества участков результаты расчета стабилизируются, и при достаточно большом их количестве ($k>30-50$) они практически не оказывают влияния на вычисления.

На рис. 4 представлены результаты расчетов величины заглубления ножа h при прохождении им пути $l=100$ мм в зависимости от заглубляющего усилия N для II и III категорий грунта. Для нового ножа с длиной площадки износа $c=14$ мм заглубляющее усилие ограничивалось величиной $N=26,9$ кН для II категории грунта при $C_0=15000$ кН/м³, что соответствует заглубляющему давлению 600 кПа, и величиной $N=44,8$ кН для III категории грунта при $C_0=30000$ кН/м³, что соответствует заглубляющему давлению 1000 кПа. Давления 600 кПа и 1000 кПа являются максимальными неразрушающими давлениями в рассматриваемых условиях. Для полностью изношенного ножа с $c=25$ мм для грунта II категории максимальное заглубляющее усилие ограничивается величиной $N=48$ кН по тем же причинам, а для грунта III категории – величиной $N=70$ кН. Эта величина является максимально возможным заглубляющим усилием из условий вывешивания бульдозера на отвале.

Из рис. 4 видно, что при одном и том же усилии N увеличение площадки износа с 14 мм до 25 мм (в 1,8 раза) примерно на эту же величину уменьшает глубину погружения отвала при одинаковых остальных условиях. Поч-

ти так же влияют и свойства грунта, снижающие величину заглубления отвала h примерно в 2 раза для грунтов III категории по сравнению с грунтами II категории.

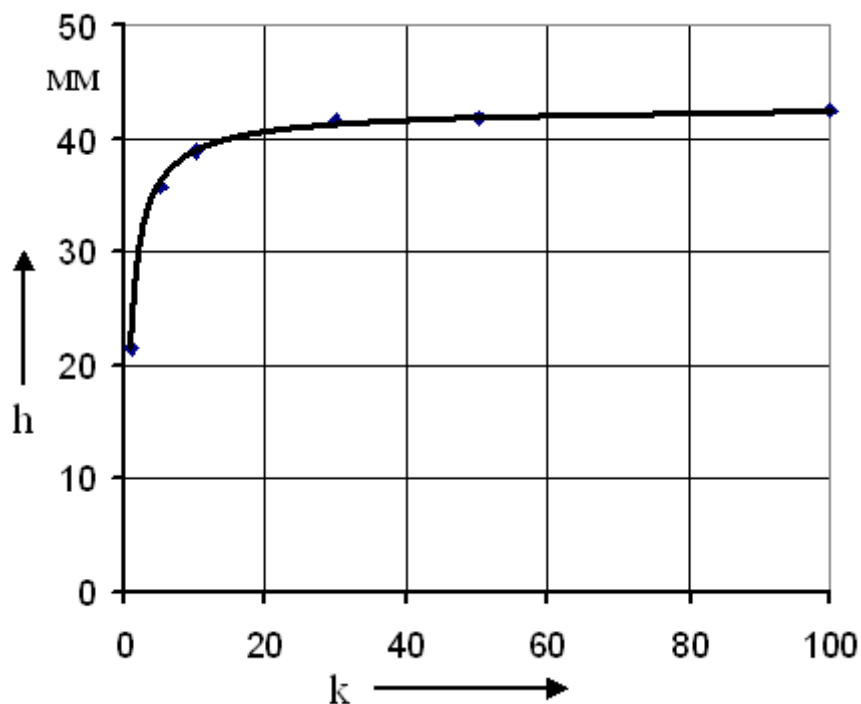


Рис. 3. Влияние количества расчетных участков разбиения площадки износа k на результаты расчета.

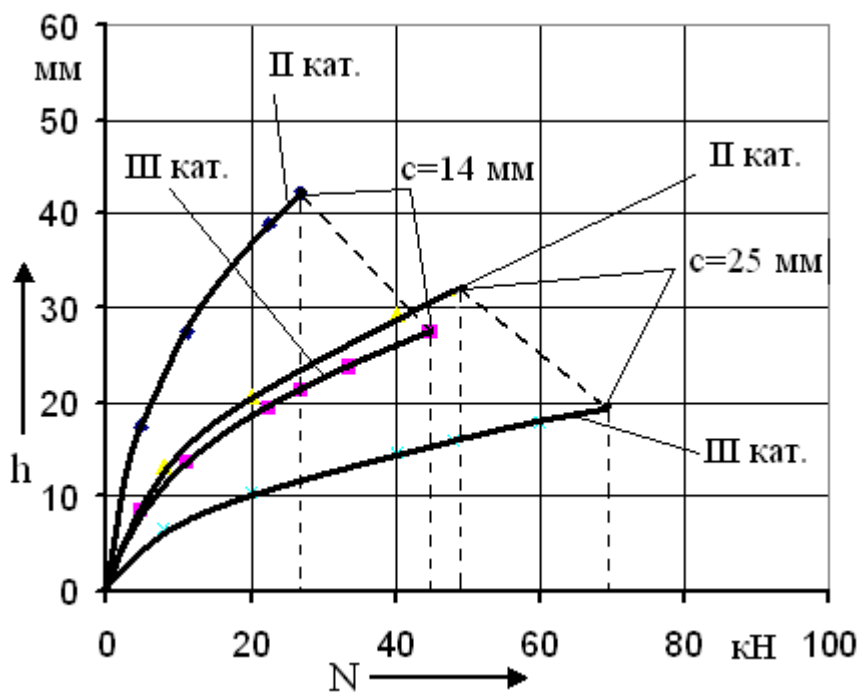


Рис. 4 Влияние заглубляющего усилия N на величину заглубления отвала h при разных размерах площадки износа c на грунтах разных категорий.

На рис. 5 представлены графики зависимости глубины заглабления отвала h от пути его перемещения l в разных условиях при заглабляющем давлении 600 кПа для всех случаев. Графики по своей сути представляют собой угол наклона к горизонтали траектории заглабления отвала. Наибольший угол $\alpha=40^\circ$ будет при заглаблении нового ножа в грунт II категории. При заглаблении этого же ножа в грунт III категории угол наклона траектории заглабления отвала будет равен всего $\alpha=21^\circ$. Для полностью изношенного ножа для грунтов II категории $\alpha=31^\circ$, а для грунтов III категории $\alpha=15,8^\circ$.

Но на эти графики можно посмотреть и с другой стороны. Если гидроприводом бульдозера не обеспечивается нужная траектория ($\alpha > 40^\circ$ при заглаблении нового ножа и $\alpha > 31^\circ$ при заглаблении полностью изношенного ножа), то достижение предельных давлений будет невозможно. При малой скорости вертикального перемещения отвала и большой скорости бульдозера грунт под ножом не получит необходимой для достижения предельных давлений деформаций.

Следовательно, при больших скоростях бульдозера и малых скоростях опускания отвала заглабление отвала будет не рациональным.

Изложенная методика расчета позволяет увязать между собой параметры процесса заглабления отвала бульдозера за счет деформаций грунта с его геометрическими и силовыми характеристиками, от которых зависит давление на площадке износа, а также с деформационными свойствами разрабатываемого грунта. При этом методика позволяет получить количественную картину распределения давлений по длине площадки износа при заглаблении.

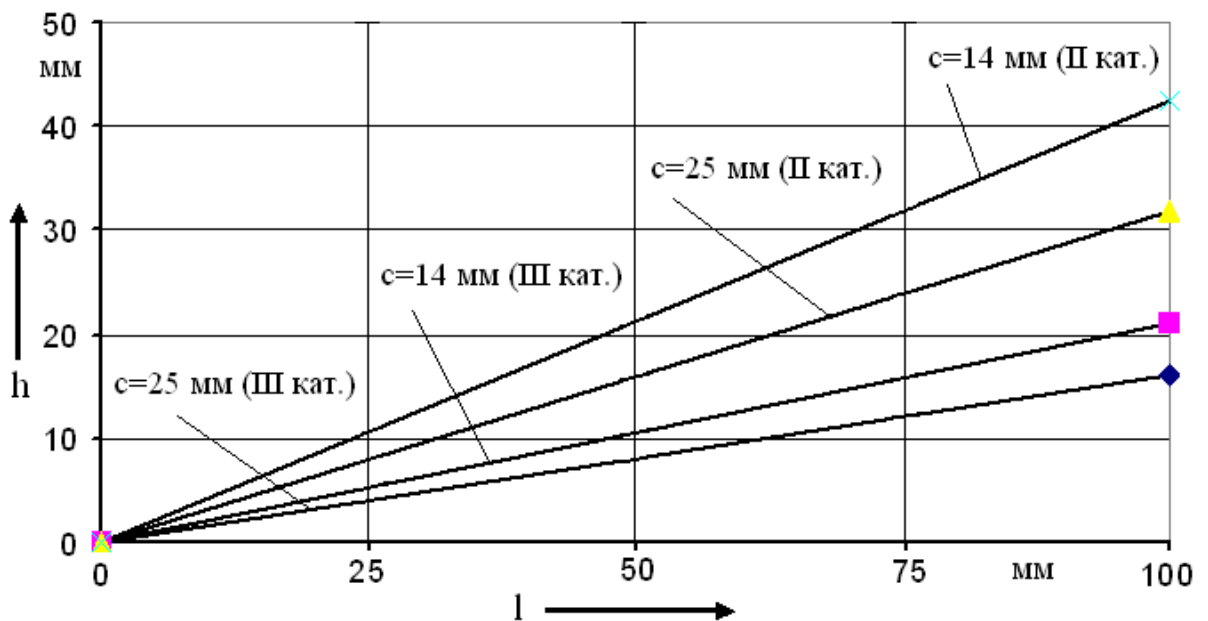


Рис. 5 Влияние длины площадки износа c и категории грунта на угол траектории заглабления отвала.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Справочник конструктора дорожных машин. Под. ред. Бородачева И.П. / И.П. Бородачев, С.А. Варганов, М.В. Гарбер и др. - М.: Машиностроение, 1973. – 502 с.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). – М.: Высшая школа, 1973. – 280 с.