

## РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТ ПРИ ЗАГЛУБЛЕНИИ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА

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

Рабочий процесс бульдозера сопровождается частыми изменениями положения отвала по высоте, при котором происходит 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 изучение позволяет перейти к способам снижения возникающих при заглублении отвала сопротивлений, вследствие чего повышается производительность бульдозера.

На заглубление отвала в грунт будут оказывать влияние геометрические размеры и характер износа режущей кромки ножей, вертикальная скорость заглубления отвала и согласование ее с поступательной скоростью бульдозера, и другие факторы. Наиболее интенсивно изнашивается нижняя сторона ножей, поэтому будем рассматривать нож бульдозера с типовой площадкой износа, величина которой (отрезок  $OA_3$  на рис. 1) будет зависеть от времени и интенсивности эксплуатации бульдозера.

Предельное разрушающее давление  $q$  можно найти, используя положения теории предельного равновесия грунтовых массивов [1]. Оно будет зависеть от физико-механических свойств грунта (углов внутреннего и внешнего трения, сцепления, плотности) а также от характера приложения давления  $p$  к поверхности грунта перед ножом. Поэтому возможно существование нескольких расчетных положений для его определения.

Во-первых, величина давления  $p$  будет зависеть от наличия перед ножом призмы волочения, а во-вторых от того, будет ли эта призма неподвижной или будет двигаться. Таким образом, условия заглубления неподвижного и подвижного отвала бульдозера будут совершенно разными.

Необходимо сказать, что фазе заглубления ножа при разрушении грунта предельными давлениями предшествует фаза заглубления за счет деформирования грунта непредельными давлениями. Каждая из этих фаз представляет собой несомненный интерес. Однако определение предельных давлений является ключевой задачей, поскольку предельные давления определяют границу, качественно разделяющую процесс заглубления – при предельных давлениях, обеспечивающих быстрое заглубление отвала при разрушении грунта, и непредельных – заглубление отвала за счет деформаций грунта.

Рассмотрим следующие расчетные положения заглубления отвала при предельных давлениях:

- заглубление отвала при неподвижной машине и при ее движении;
- заглубление отвала при отсутствии и наличии призмы волочения;
- заглубление отвала на начальной стадии, когда поверхность грунта перед отвалом горизонтальна, и при копании грунта при существовании в грунте перед отвалом наклонных площадок сдвига.

Для решения этих задач обратимся к теории предельного равновесия сыпучей среды, обладающей сцеплением [1]. Согласно этой теории, при предельных нагрузках в грунте возникают зоны предельного напряженного состояния, а задача нахождения неизвестных напряжений сводится к определению функциональной зависимости между граничными условиями на поверхностях зон и свойствами грунта в состоянии предельного равновесия.

Учитывая, что площадка износа ножей бульдозера достаточно узкая и, соответственно, объем разрушаемого ей грунта будет невелик, будем использовать частные решения для невесомой среды, имеющие более простой вид.

Зависимости, связывающие приведенное давление  $p$ , действующее на границе рассматриваемой зоны, и угол его отклонения  $\delta$  со средним приведенным нормальным напряжением  $\sigma$  и углом  $\varphi$  между направлением наибольшего главного напряжения в зоне и ее поверхностью имеют вид [1]

$$\varphi = (1 - \chi) \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\chi\Delta - \delta); \quad \sigma = p \frac{\sin \Delta}{\sin(\Delta - \chi\delta)}, \quad (1)$$

при этом углы  $\delta$  и  $\Delta$  связаны между собой следующим образом

$$\sin \Delta = \frac{\sin \delta}{\sin \rho},$$

где  $\chi = \pm 1$  (знак «плюс» применяется при пассивном напряженном состоянии грунта, «минус» – при активном);  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта.

При переходе к нормальным давлениям выражения типа  $\frac{\sin \Delta}{\sin(\Delta \pm \delta)}$  заменяются их пределами, которые при  $\delta \rightarrow 0$  будут иметь вид  $\frac{1}{1 \pm \sin \rho}$ .

Рассмотрим наиболее простой случай заглубления неподвижного отвала в грунт и определим величину предельных давлений, приводящих к разрушению грунта (рис. 1,а).

В области  $A_0OA_1$  грунт находится в пассивном предельном напряженном состоянии, и для этой области величины  $\sigma$  и  $\varphi$  постоянны. Их значения, в соответствии с уравнениями (1), при  $\chi = +1$  с введением индексов «1» для этой зоны будут иметь вид

$$\varphi_1 = 0; \quad \sigma_1 = p \frac{1}{1 - \sin \rho}, \quad (2)$$

где  $p$  – приведенное давление на поверхность грунта  $A_0O$ .

Это давление в рассматриваемом случае является нормальным, и равно геометрической сумме действительного давления  $p'$  от призмы волочения (при ее наличии), действующего на поверхность грунта, и давления связности  $H$

$$p = p' + H, \quad (3)$$

Под давлением связности понимается временное сопротивление все-стороннему равномерному напряжению

$$H = c \operatorname{ctg} \rho ,$$

где  $c$  – удельное сцепление грунта.

В области  $A_2OA_3$  грунт находится в активном предельном состоянии, для которого из уравнений (1) при  $\chi = -1$  и введении индекса «2» для этой зоны, получим

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2}; \quad \sigma_2 = q \frac{1}{1 + \sin \rho} , \quad (4)$$

где  $q$  – приведенное разрушающее давление, действующее со стороны площадки износа на поверхность  $OA_3$ .

Сетки линий скольжения в областях  $A_0OA_1$  и  $A_2OA_3$  будут образованы двумя семействами параллельных прямых.

В области  $A_1OA_2$  справедливы интегралы уравнений предельного равновесия для вырожденного случая, разработанные В.В.Соколовским

$$\sigma = D \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi = \theta - \varepsilon ,$$

где  $D$  – произвольная постоянная, определяемая через значения  $\sigma_1$  и  $\varphi_1$  в области  $A_0OA_1$ ;  $\theta$  – угловая полярная координата луча в области  $A_1OA_2$  с полюсом в точке  $O$ ;  $\varepsilon$  – угол наклона линий скольжения к направлению  $\sigma_{\max}$ , определяемое углом  $\varphi$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} .$$

Окончательно для этой области получим, что

$$\sigma = p \frac{1}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi = \theta - \varepsilon , \quad (5)$$

а сетка линий скольжения в ней будет состоять из пучка прямых, проходящих через точку  $O$ , и из семейства логарифмических спиралей  $r \exp(\theta \operatorname{tg} \rho) = \operatorname{const}$ .

Угол  $\theta$  изменяется от значения  $\theta_1 = \varepsilon$  на границе  $OA_1$  до значения  $\theta_2 = \pi/2 + \varepsilon$  на границе  $OA_2$ , а значение  $\varphi$  – от  $\varphi_1 = \theta_1 - \varepsilon = 0$  до значения  $\varphi_2 = \theta_2 - \varepsilon = \pi/2 + \varepsilon - \varepsilon = \pi/2$ . Следовательно, формулы (5) можно записать применительно к правой границе – стороне  $OA_2$  таким образом

$$\sigma_2 = \frac{p}{1 - \sin \rho} \exp(2(\varphi_2 - \varphi_1) \operatorname{tg} \rho) = \frac{p}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho) \quad \text{и} \quad \varphi = \varphi_2 = \frac{\pi}{2} .$$

Поскольку эти значения действительны как на границе  $OA_2$ , так и во всей области  $A_2OA_3$ , с учетом уравнений (4) можно написать, что

$$q = p \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho) . \quad (6)$$

Поскольку полученное давление  $q$  является приведенным, то действительное разрушающее давление найдем так

$$q' = q - H . \quad (7)$$

При отсутствии призмы волочения поверхность  $A_0O$  грунта, находящаяся перед ножом, находится под действием одного давления связности  $H$ . Для этого случая в формулу (6) следует подставлять

$$p=H.$$

При наличии призмы волочения на поверхность  $A_0O$  дополнительно будет действовать давление от призмы волочения  $p'$ . За его величину можно принять давление слоя грунта высотой  $H_{np}$ , находящегося над режущей кромкой отвала вследствие незначительных размеров площадки износа.

Тогда, в соответствии с формулой (3)

$$p = p' + H = \rho_g g H_{np} + cctg\rho, \quad (8)$$

где  $\rho_g$  – плотность грунта в призме волочения;  $g$  – гравитационное ускорение.

Из рисунка однозначно видно, что схемы разрушения грунта как в одну, так и в другую стороны идентичны. Различными будут нагрузки на удерживающую поверхность при наличии призмы волочения:  $p=H$  – при разрушении грунта в сторону задней части, и гораздо большим значением  $p$ , определяемом по формуле (8), при разрушении грунта в сторону передней части.

Таким образом, предельные давления, приводящие к разрушению грунта при заглаблении неподвижного отвала при горизонтальной поверхности грунта, как при отсутствии, так и при наличии призмы волочения будут равны

$$q = H \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi g \rho), \quad (9)$$

поскольку при наличии призмы волочения грунт будет разрушаться в области, расположенной за отвалом. Переход к действительному давлению осуществляется по формуле (7).

При заглаблении движущего отвала и подвижной призмы волочения на начальной стадии (рис. 1,б), на горизонтальную поверхность грунта  $A_0O$  действует приведенное давление  $p$ , являющееся геометрической суммой действительного давления  $p'$  от призмы волочения и давления связности  $H$ .

Поскольку призма волочения движется, между ней и поверхностью грунта возникает сила трения. В этом случае действительное давление  $p'$  отклонено от нормали к поверхности грунта на угол внутреннего трения  $\rho$ . Приведенное давление, что видно из схемы на рис. 1,г, равно

$$p = \sqrt{(H + p'_\sigma)^2 + p'^2_\tau} = \sqrt{(cctg\rho + p'_\sigma)^2 + (p'_\sigma tg\rho)^2},$$

где  $p'_\sigma = \rho g H_{np}$  – давление призмы волочения на грунт вблизи режущей кромки.

Угол отклонения  $\delta_1$  приведенного давления  $p$  будет равен

$$\delta_1 = \arctg \frac{p'_\sigma tg\rho}{cctg\rho + p'_\sigma}.$$

В пассивной области  $A_0OA_1$  при  $\chi=+1$  из уравнений (1) будем иметь

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1), \quad (10)$$

где

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{\sin \delta_1}{\sin \rho}. \quad (11)$$

В активной области  $A_2OA_3$  при  $\chi=-1$  аналогично можно получить

$$q = \sigma \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2}; \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2), \quad (12)$$

где 
$$\Delta_2 = \arcsin \frac{\sin \delta_2}{\sin \rho}.$$

Положение граничных прямых  $OA_1$  и  $OA_2$  будет определяться углами

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) + \varepsilon; \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2) + \varepsilon. \quad (13)$$

Эти уравнения позволяют получить, что при наклонных давлениях

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1)tg\rho]. \quad (14)$$

Для того, чтобы можно было использовать эту формулу, необходимо учесть, что угол отклонения  $\delta_2$  приведенного давления  $q$ , действующего со стороны площадки износа ножа на грунт, не определен, поскольку его величина будет зависеть от величины действительного давления  $q'$  (рис. 2,в), а следовательно, и от приведенного давления  $q$ . В соответствии со схемой на этом рисунке, приведенное давление  $q$  и угол его отклонения  $\delta_2$  будут равны

$$q = \sqrt{(q' \cos \omega + H)^2 + (q' \sin \omega)^2}; \delta_2 = \arctg \frac{q' \sin \omega}{q' \cos \omega + H}. \quad (15)$$

Поэтому расчеты необходимо осуществлять итерационными методами в следующей последовательности. Задаться некоторой начальной величиной действительного давления  $q'$ . Угол отклонения этого давления при движении ножа по грунту будет равен углу внутреннего трения  $\omega$ .

Начальное приведенное давление  $q_n$  и угол его отклонения  $\delta_2^H$  определяются по формулам (15), а по формуле (14) вычисляется значение предельного давления  $q$ , приводящее к разрушению грунта при том же угле отклонения  $\delta_2^H$ .

Если полученное по формуле (14) значение давления  $q$  отличается от начального, необходимо изменять начальное значение  $q'_n$  и повторять вычисления до выполнения условия

$$q_n - q \leq \Delta,$$

где  $\Delta$  – принятая погрешность вычислений.

Таким образом, изложенная методика позволяет оценить силовые параметры, характеризующие заглубление движущегося по горизонтальной поверхности ножа при движущейся призме волочения.

Переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется в соответствии с рис. 2,в

$$q' = \sqrt{(q \cos \delta_2 - H)^2 + (q \sin \delta_2)^2}. \quad (16)$$

Прежде чем рассмотреть заглубление движущего отвала при неподвижной призме волочения (рис. 1,в), выясним условия появления такого расчетного случая. Для этого рассмотрим схему, изображенную на рис. 2, где изображена нижняя часть отвала.

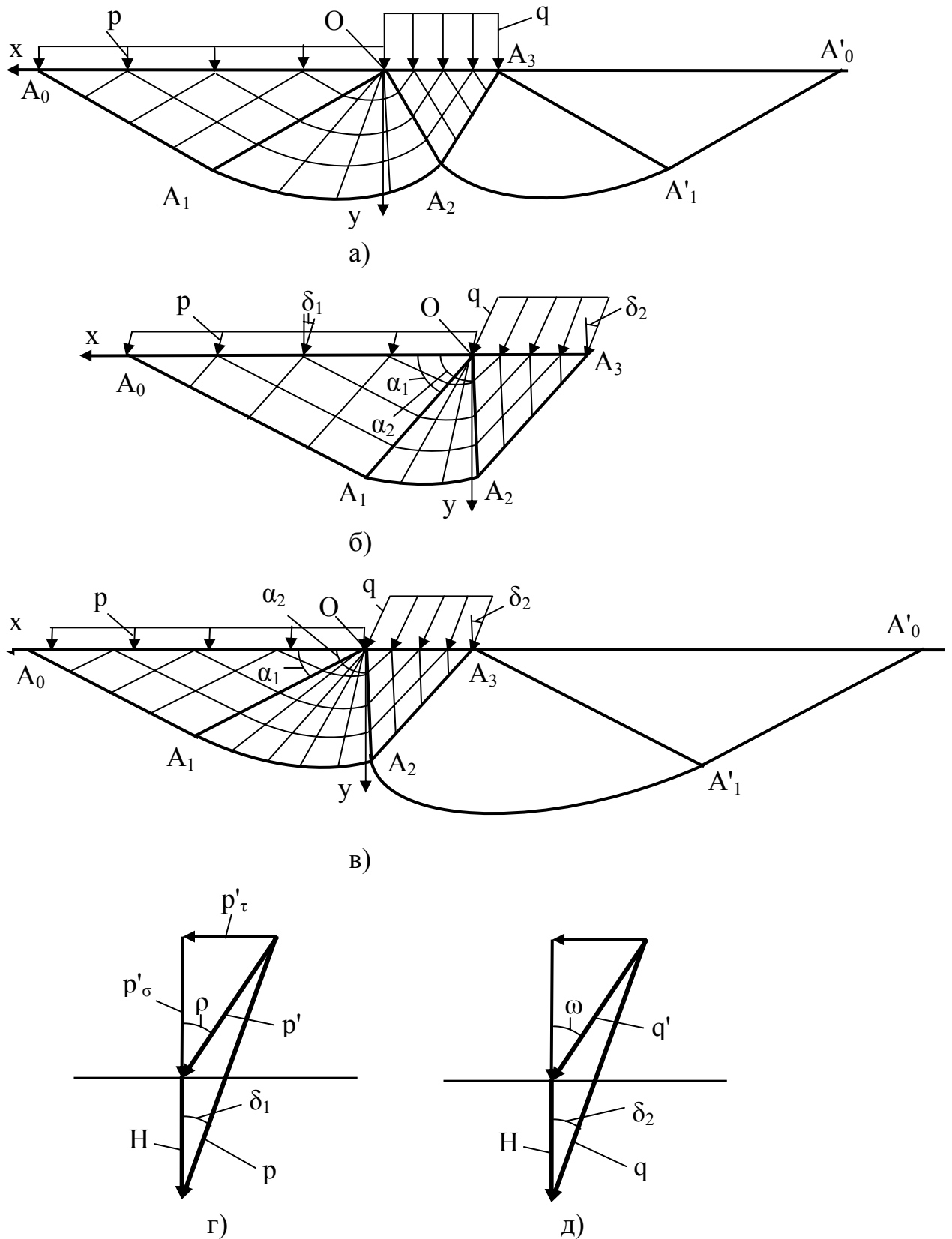


Рис. 1. Расчетные схемы разрушения грунта неподвижным отвалом (а), подвижным отвалом при движущейся (б) и неподвижной (в) призме волочения и схемы для расчета давлений на поверхность грунта при движущейся призме волочения (г) и движущемся ноже (д).

Из рисунка видно, что если траектория 1 режущей кромки отвала при заглаблении будет расположена в зоне I (левее предельной траектории 3), то движущийся при заглаблении отвал будет перемещать призму волочения.

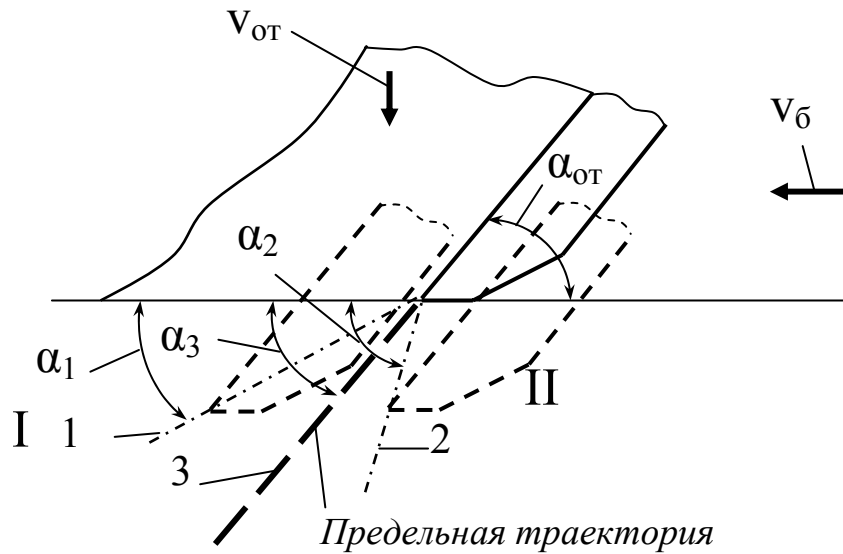


Рис. 2. Схема к расчету предельной траектории заглабления отвала.

И наоборот, если траектория 2 режущей кромки при заглаблении будет расположена в зоне II (правее предельной траектории 3), то при заглаблении движущегося отвала его поверхность будет отходить от грунта, и призма волочения не будет смещаться.

Траектория 3, совпадающая с нижним прямолинейным участком отвала бульдозера, на котором крепятся ножи, разделяет эти две области.

Ее угловое положение в пространстве (угол  $\alpha_3$ ) определяется так

$$\alpha_3 = \text{arctg} \frac{v_{от}}{v_б} = \alpha_{ом}, \quad (17)$$

где  $\alpha_{от}$  – угол резания;  $v_{от}$  – вертикальная скорость заглабления отвала;  $v_б$  – скорость перемещения бульдозера.

Таким образом, при относительно медленном заглаблении отвала (угол заглабления меньше угла резания) призма волочения будет перемещаться отвалом при его заглаблении, а при относительно быстром заглаблении (угол заглабления больше угла резания) не будет.

Для зоны  $A_0OA_1$  остаются в силе уравнения (2), а для зоны  $A_2OA_3$  – уравнения (12). Угол наклона граничной прямой  $OA_1$  равен  $\alpha_1 = \varepsilon$ , а положение граничной прямой  $OA_2$  определяет угол  $\alpha_2$  из уравнений (13).

Аналогично проделанному выше, можно записать, что

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[2(\varphi_2 - \varphi_1) \text{tg} \rho] = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2) \text{tg} \rho]. \quad (18)$$

При этом давление  $p$  определяется по уравнению (8).

Однако при этом необходимо рассмотреть и альтернативную возможность разрушения грунта – в сторону задней части ножа. Выпор грунта будет происходить в такую сторону, куда потребуется меньшее разрушающее дав-

ление. Рассмотрим случай, когда грунт будет разрушаться в области  $OA_2A'_1A'_0$  (рис. 1,в).

В зоне  $A_3A'_1A'_0$  напряженное состояние грунта описывается уравнениями (2) при  $p=N$ . Для зоны  $A_2OA_3$  остается в силе первое из уравнений (12), а значение  $\varphi_2$  изменится на величину  $\pi$  в связи с изменением системы координат и принятого отсчета углов на противоположные и станет равным  $\varphi'_2$ , при этом

$$\varphi'_2 = \pi - \varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2).$$

Тогда

$$q = H \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi + \Delta_2 + \delta_2)tg\rho]. \quad (19)$$

Таким образом, при относительно быстром заглублении отвала, необходимо рассматривать альтернативные варианты разрушения грунта и выбирать такой вариант, при котором приведенное давление  $q$ , подсчитанное по формулам (18) или (19) будет минимальным.

Расчеты необходимо осуществлять итерационными методами, как и в предыдущем случае, а переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется при помощи формулы (16).

Отметим, что вариант разрушения грунта в сторону задней части отвала возможен и при заглублении движущегося отвала с подвижной призмой волочения. Поэтому при расчете такого случая при большой высоте призмы волочения и низкой несущей способности грунта необходимо сравнивать между собой два варианта.

Рассмотрим заглубление отвала при копании с толщиной стружки  $h$ , когда перед ножом будет находиться площадка сдвига, наклоненная к оси  $x$  под углом  $\psi$ . При неподвижной машине устойчивость грунта против выпора в сторону задней части ножа будет ниже, чем в направлении площадки сдвига, поэтому можно использовать уравнения (9).

Если движущийся отвал заглубляется под углом, большим чем критический угол, определяемый по уравнению (17), то перемещение грунта отвалом отсутствует. Обратимся к схеме, изображенной на рис. 3,а и рассмотрим треугольник  $OBD$ . Силу  $Q_{гр}$ , действующую на сторону  $BD$  со стороны вышележащего грунта можно найти по формуле

$$Q_{гр} = q_{гр} Bl_{BD},$$

где  $q_{гр}$  – давление на площадку  $BD$ ;  $B$  – длина отвала;  $l_{BD}$  – длина этой площадки

$$l_{BD} = h \left( \frac{1}{tg\psi} + \frac{1}{tg\alpha_{om}} \right).$$

За давление на площадку  $BD$  можно принимать давление грунта высотой  $H_{пр}$  над режущей кромкой грунта (1-ый член формулы 8).

Весом призмы  $OBD$  можно пренебречь ввиду его незначительности. Тогда уравнения проекций всех сил, действующих на условно неподвижную выделенную призму  $OBD$ , на координатные оси  $x$  и  $y$  будут выглядеть так



$$\Sigma x = N \sin \psi - R \sin \alpha_{om} = 0;$$

$$\Sigma y = Q_{zp} - N \cos \psi - R \cos \alpha_{om} = 0.$$

Из этих уравнений можно получить, что

$$R = N \frac{\sin \psi}{\sin \alpha_{om}};$$

$$N = Q_{zp} \frac{\sin \alpha_{om}}{\sin(\alpha_{om} + \psi)}.$$

Действительное давление  $p'$  от этой силы равно

$$p' = \frac{N \sin \psi}{h}.$$

Для определения приведенного давления  $p$  используем формулу (8).

Схема разрушения грунта движущимся ножом при неподвижном грунте перед отвалом будет иметь вид, изображенный на рис. 3,б.

Для зоны  $A_0OA_1$  уравнения (2) примут вид

$$\sigma_1 = p \frac{1}{1 - \sin \rho}; \varphi_1 = -\psi.$$

Для области  $A_2OA_3$  остаются в силе уравнения (12).

Тогда

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 + 2\psi)tg\rho].$$

Действительное разрушающее давление  $q'$  находится по формуле (16).

В качестве альтернативного варианта разрушения по-прежнему необходимо рассматривать возможность выпора грунта за заднюю часть отвала по площадке  $OA_2A'_1A'_0$  (уравнение 9).

При заглаблении отвала по траектории, приводящей к движению срезанного грунта по поверхности отвала и площадке сдвига (рис. 3,в), для определения приведенных давлений, действующих на площадку сдвига, и угла сдвига используем метод расчета, основы которого изложены в работе [2].

Различные условия нагружения площадки скольжения делают обязательным рассмотрение двух случаев [3] – в момент ее формирования, когда приведенное давление, действующее на ее поверхность, отклонено от нормали на угол внутреннего трения грунта  $\rho$ , и сразу после ее образования, когда произошло изменение действующих сил, и условие  $\delta_1 = \rho$  уже не соблюдается.

Рассмотрим сначала второй случай. В зоне  $A_0OA_1$  относительно поверхности  $A_0O$  справедливы соотношения (10). Относительно оси  $x$  первое соотношение не изменится, а второе примет новый вид, так что

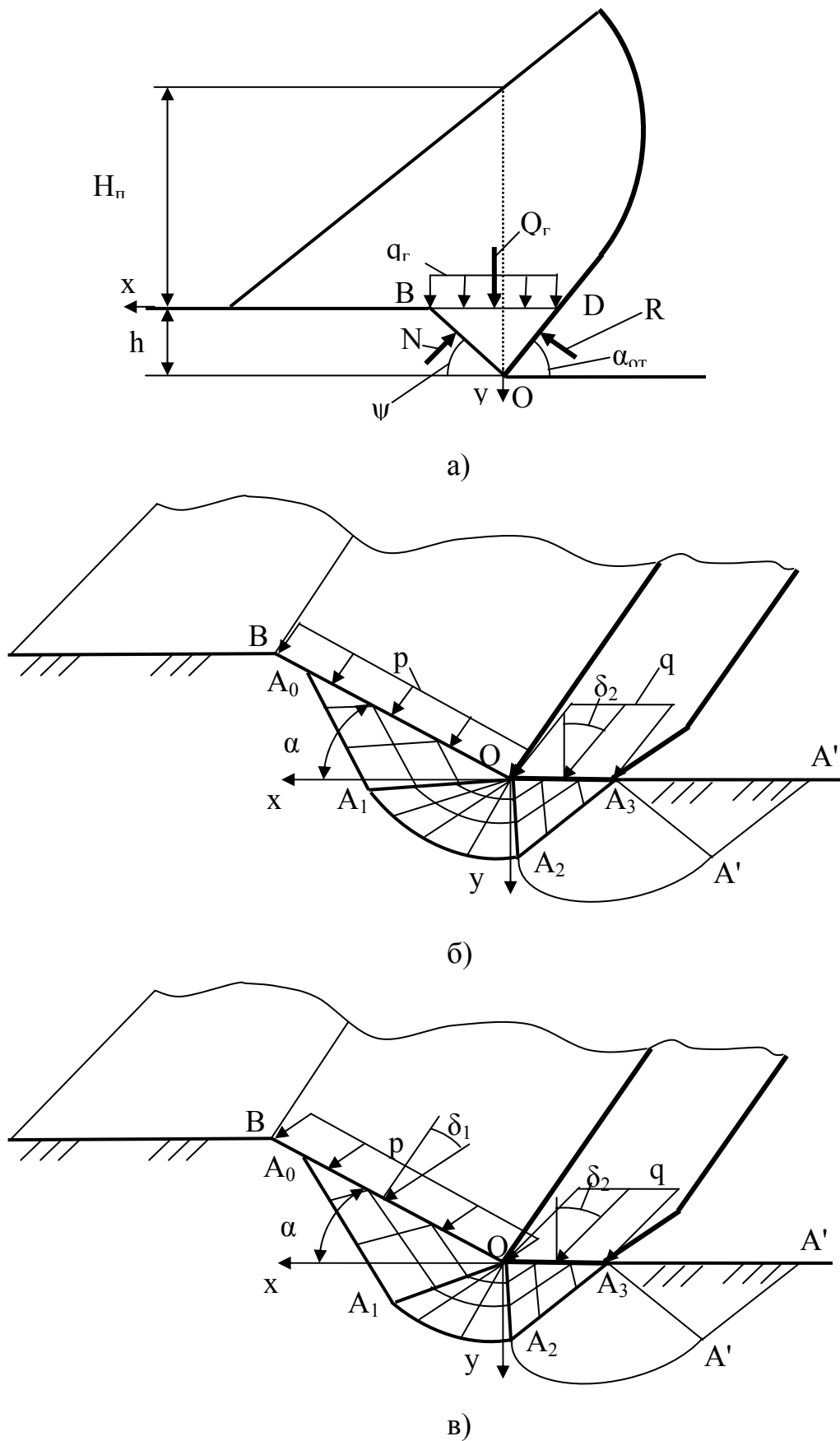


Рис. 3. Расчетная схема заглубления отвала при высокой скорости заглубления (а) и схемы разрушения грунта для этого случая (б) и при перемещении срезанного грунта отвалом (в).

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \psi. \quad (20)$$

Для области  $A_2OA_3$  справедливы уравнения (12). Тогда, аналогично предыдущему, получим

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1 + 2\psi)tg\rho]. \quad (21)$$

Действительное давление  $p'$ , приведенное давление  $p$  и угол его отклонения в соответствии с методикой [2] определяются по формулам

$$p' = \frac{E_{\min} \sin \psi}{Bh};$$

$$p = \sqrt{(p' \cos \rho + H)^2 + (p' \sin \rho)^2}; \delta_1 = \arctg \frac{p' \sin \rho}{p' \cos \rho + H},$$

где  $E_{\min}$  – сила, действующая на площадку ОВ после сдвига.

Таким образом, при сформированной площадке скольжения ОВ, предельное заглубляющее давление определяется по формуле (39) с учетом альтернативного варианта разрушения по площадке скольжения  $OA_2A'_1A'_0$  (формула 19). Выбирается вариант, для осуществления которого требуется меньшее предельное давление.

Теперь рассмотрим ту же задачу непосредственно в момент формирования площадки сдвига ОВ, когда выполняется условие  $\delta_1 = \rho$ , а приведенное давление  $p$  определяется по формуле [3]

$$p = \frac{E_{\max} \sin \psi}{Bh} + \frac{c}{\sin \rho},$$

где  $E_{\max}$  – сила, действующая на площадку ОВ в момент сдвига.

В соответствии с уравнением (11) для этого случая

$$\Delta_1 = \arcsin 1 = \frac{\pi}{2}.$$

Тогда уравнения (20) примут вид

$$\sigma_1 = p \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right)} = \frac{p}{\cos \rho}; \varphi_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \psi = \varepsilon - \psi,$$

а уравнение (21) станет равным

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2 \cos \rho} \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} - \Delta_2 - \delta_2 + \rho + 2\psi\right)tg\rho\right]. \quad (22)$$

В момент большого сдвига так же необходимо рассматривать два варианта разрушения грунта отвалом при его заглублении – в переднюю сторону (уравнение 22), и в заднюю сторону – уравнение (19). Выбирается вариант с меньшим разрушающим приведенным давлением. Действительное давление, действующее со стороны площадки износа, рассчитывается по формуле (16).

Таким образом, изложенная методика расчета позволяет определить величину давления, необходимого для заглубления как неподвижного, так и движущегося отвала, как при наличии, так и при отсутствии призмы волочения.

Вычислим величину предельных действительных давлений, необходимых для заглубления отвала бульдозера Т10М при максимальной высоте призмы волочения 1,3 м. Рассмотрим грунт III категории (по числу ударов ударника ДорНИИ), наиболее типичный для работы бульдозеров, для которого можно принять следующие физико-механические свойства: угол внутреннего трения  $\rho=30^\circ$ , удельное сцепление  $c=100$  кПа. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Численные значения давления  $q'$ , необходимого для заглубления отвала.

Состояние отвала	Состояние призмы волочения	Разрушающее давление $q'$ , кПа	
Неподвижен	Отсутствует	3175	
	Имеется	3291 (в сторону призмы волочения)	
Двигается по поверхности грунта	Отсутствует	1010	
	Неподвижна	1080	
	Двигается	1060	
Двигается при копании	Неподвижна	1660	1830
		(при $h=0,05$ м)	(при $h=0,2$ м)
	Двигается при формировании площадки сдвига	1030	1010
		(при $h=0,05$ м)	(при $h=0,2$ м)
Двигается после формирования площадки сдвига	Двигается после формирования площадки сдвига	2030	1950
		(при $h=0,05$ м)	(при $h=0,2$ м)

Из приведенных результатов видно, что при заглублении движущегося отвала происходит резкое уменьшение разрушающего давления по сравнению с неподвижным отвалом. Призма волочения увеличивает величину разрушающего давления  $q'$  на относительно небольшую величину.

Сравнение расчетных значений, полученных для грунтов I-III категорий при неподвижном отвале, с рекомендуемыми [4] свидетельствует о их хорошем соответствии друг другу при угле внутреннего трения  $\rho=30^\circ$ , наиболее характерного для супесей. Это свидетельствует о том, что рекомендуемые [4] значения давлений на режущей кромке отвала при его заглублении выбраны с запасом, поскольку при эксплуатации бульдозера с постоянной массой по мере износа ножа давления на режущей кромке снижаются.

Рассмотрим заглубление отвала при копании грунта. Рассматривалось копание при толщине стружки  $h=0,05$  м и  $h=0,2$  м, поскольку эти значения практически охватывают диапазон реальных значений толщины стружки при работе бульдозера.

Результаты расчетов показывают, что наиболее легко отвал заглубляется непосредственно в момент большого сдвига, а наиболее трудно – сразу после появления устойчивой площадки сдвига. Так, если в первом случае для разрушения грунта при  $h=0,05$  м требуется давление 1030 кПа, то во втором

почти в два раза больше - 2030 кПа. При  $h=0,2$  м эти цифры соответственно равны 1010 кПа и 1950 кПа. Отсюда можно сделать вывод, что при заглублении отвала действуют значительные по величине колебания силы сопротивления грунта заглублению, так же, как это происходит и с силой сопротивления копания [2].

Причина этих колебаний следующая – при достаточно быстром формировании площадки сдвига резко изменяются нагрузки на ее поверхности из-за разрушения сцепления грунта. Это вызывает скачкообразное изменение как силы сопротивления копания, так и разрушающих давлений при заглублении ножа. Но если сила сопротивления копания при этом уменьшается, то разрушающее давление, а значит и сила, требуемая для заглубления отвала, увеличивается.

При движущемся отвале, как в начальной стадии заглубления, так и при копании, альтернативное разрушение грунта в сторону задней части отвала невозможно, так как для этого требуется давление в 3,2-5,7 раз выше.

Таким образом, наиболее легкое заглубление отвала бульдозера обеспечивается при движении отвала и призмы волочения при копании в момент формирования площадки большого сдвига.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды.- М.: Физматгиз, 1960. – 243 с.
2. Берестов Е.И., Ивлев С.В., Бондарь-Ляшук С.И. Расчет параметров процесса копания грунта отвалом. – В журн.: Строительные и дорожные машины, 2005, №7, с.36-39.
3. Берестов Е.И. Сопротивление грунтов резанию. – В журн.: Известия Вузов. Строительство, 1997, N 10, с.102-107.
4. 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.