

## РАСЧЕТ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА

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

Рабочий процесс бульдозера сопровождается частым заглублением отвала, при котором происходит перераспределение вертикальных сил, приводящее к снижению нагрузки на ходовую часть и тягового усилия машины.

При заглублении отвала фазе разрушения грунта предельными давлениями предшествует фаза заглубления за счет деформирования грунта не предельными давлениями. Каждая из этих фаз представляет собой несомненный интерес. Однако расчет предельных давлений является ключевой задачей, поскольку эти давления определяют границу, качественно разделяющую процесс заглубления – при предельных давлениях, обеспечивающих разрушение грунта и быстрое заглубление отвала, и не предельных – заглубление отвала за счет деформаций грунта.

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.

Поскольку величина предельных давлений зависит от многих факторов, будем рассматривать следующие основные расчетные положения:

- 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, 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 рассматривать невесомую среду в зоне разрушения. Это позволит 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 в этой зоне  $\sigma$  и углом  $\varphi$  имеют вид [1]

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

где  $\varphi$  - угол между направлением наибольшего главного напряжения  $\sigma_{\max}$  в данной точке и поверхностью рассматриваемой зоны или оси  $X$  при их сов-

падении;  $\chi = \pm 1$  (знак «плюс» при пассивном напряженном состоянии, «минус» – при активном).

Углы  $\delta$  и  $\Delta$  связаны зависимостью

$$\sin \Delta = \frac{\sin \delta}{\sin \rho}, \text{ причем } |\Delta| \leq \pi/2,$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта.

Для обозначения параметров, характеризующих напряженное состояние грунта, будем использовать обозначения на рис. 1 и введем индексы «1» для зоны  $A_0OA_1$  и «2» для зоны  $A_2OA_3$ .

В области  $A_0OA_1$  грунт находится в пассивном предельном напряженном состоянии, а в области  $A_2OA_3$  – в активном. Для этих областей величины  $\sigma_1$ ,  $\varphi_1$  и  $\sigma_2$ ,  $\varphi_2$  постоянны, а сетки линий скольжения образованы двумя семействами параллельных прямых.

В специальной зоне  $A_1OA_2$  справедливы интегралы уравнений предельного равновесия

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

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  $\sigma_{\max}$

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

Пучок прямых характеристик проходит через точку  $O$ , а кривые характеристики являются логарифмическими спиралями

$$r \exp(\theta \operatorname{tg} \rho) = \text{const},$$

приближающимися к точке  $O$  с увеличением угла  $\theta$ .

Угол  $\theta$  изменяется от значения  $\theta_1 = \varphi_1 + \varepsilon$  на границе  $OA_1$  до значения  $\theta_2 = \varphi_2 + \varepsilon$  на границе  $OA_2$ , а значение  $\varphi$  в зоне  $A_1OA_2$  находится в пределах от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ .

Из схем для принятых расчетных положений (рис. 1) видно, что удерживающая поверхность  $A_0O$  на начальной стадии заглубления является горизонтальной, а при копании наклонена к горизонту под углом сдвига  $\psi$ . Разрушающая поверхность  $OA_3$ , примыкающая к площадке износа ножа, во всех случаях расположена горизонтально. Приведенное давление, действующее на этих поверхностях, может быть как нормальным, так и наклонным, по причинам, рассмотренным ниже.

Под приведенным давлением понимается геометрическая сумма внешнего (действительного) давления, действующего на поверхность рассматриваемой зоны, и давления связности  $H = c \operatorname{ctg} \rho$ , где  $c$  – удельное сцепление грунта. При отсутствии внешнего давления приведенное давление равно давлению связности.

С целью получения обобщенного универсального уравнения для определения приведенного разрушающего давления, пригодного для всех рассматриваемых случаев, поступим следующим образом.

Уравнения (1) для пассивной зоны  $A_0OA_1$ , примыкающей к удерживающей поверхности, для наиболее сложной расчетной схемы при  $\chi=+1$  будут такими

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \psi, \quad (3)$$

причем второе уравнение дает величину угла  $\varphi_1$  относительно горизонтально расположенной положительной полуоси X.

Те же уравнения (1) для активной зоны  $A_2OA_3$  при  $\chi=-1$  будут выглядеть так

$$\sigma_2 = q \frac{\sin \Delta_2}{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2) \quad (4)$$

Тогда уравнение (2) применительно к правой границе – стороне  $OA_2$ , а следовательно, и ко всей зоне  $A_2OA_3$ , можно записать таким образом

$$\sigma_2 = \sigma_1 \exp(2(\varphi_2 - \varphi_1)tg\rho). \quad (5)$$

Но тогда предельное приведенное давление  $q$  будет равно

$$q = \sigma_1 \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp(2(\varphi_2 - \varphi_1)tg\rho) \quad (6)$$

В полном виде это уравнение будет выглядеть так

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1 + 2\psi)tg\rho]. \quad (7)$$

Уравнение (7) пригодно для расчета заглубления отвала при копании и перемещении срезанного грунта отвалом (рис. 1,д), поскольку граничные условия на удерживающей поверхности (уравнения 3) относятся именно к этому случаю, а граничные условия на разрушающей поверхности (уравнения 4) справедливы при движущемся отвале.

Рассмотрим рисунок 1 и покажем, как использовать полученное обобщенное уравнение (6). Для этого нужно в это уравнение подставлять граничные условия, присущие каждому рассматриваемому расчетному случаю. При этом для нормальных давлений выражения  $\frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}$  и  $\frac{\sin \Delta_2}{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}$  заменя-

ются их пределами при  $\delta_1 \rightarrow 0$  и  $\delta_2 \rightarrow 0$ , которые будут иметь вид  $\frac{1}{1 - \sin \rho}$  и  $\frac{1}{1 + \sin \rho}$ , а так же необходимо учесть, что при  $\delta_1 = \rho$

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{\sin \delta_1}{\sin \rho} = \arcsin 1 = \frac{\pi}{2}.$$

Рассмотрим наиболее простой случай заглубления неподвижного отвала в грунт (рис. 1,а). Для зоны  $A_0OA_1$  уравнения (3) при горизонтальной удерживающей поверхности и нормальных давлениях, действующих на эту поверхность, станут такими

$$\sigma_1 = p \frac{1}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi_1 = 0. \quad (8)$$

Изменяются и уравнения (4), которые при нормальных давлениях, действующих со стороны неподвижного отвала, будут равны

$$\sigma_2 = q \frac{1}{1 + \sin \rho}; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}. \quad (9)$$

Уравнение (6) при нормальном давлении  $q$  и известных значениях параметров  $\sigma$  и  $\varphi$  для рассматриваемых зон позволяет получить, что предельное приведенное давление  $q$  в полном виде определится по формуле

$$q = p \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho). \quad (10)$$

Из рисунка 1,а однозначно видно, что схема разрушения грунта при нормальных давлениях будет симметрична в обе стороны. Различными могут быть давления  $p$  на удерживающую поверхность. При отсутствии призмы волочения давление  $p$  будет равно давлению связности  $H$  как перед, так и позади отвала. При наличии призмы волочения на поверхность перед отвалом дополнительно будет действовать давление от призмы волочения, а это значит, что грунт будет разрушаться в сторону области, расположенной за отвалом. Следовательно, предельные давления, приводящие к разрушению грунта при заглублении неподвижного отвала при горизонтальной удерживающей поверхности, как при отсутствии, так и при наличии призмы волочения будет определяться по формуле (10) при  $p=H$ .

При заглублении движущего отвала и подвижной призмы волочения на начальной стадии, при горизонтальной удерживающей поверхности грунта (рис. 1,б), первое уравнение (1) для пассивной зоны  $A_0OA_1$  останется таким же, а второе незначительно изменится

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) \quad (11)$$

В активной области  $A_2OA_3$  остаются в силе уравнения (4). Тогда, для этого случая, при подвижном отвале и подвижной призме волочения, из уравнения (6) получим

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1) \operatorname{tg} \rho]. \quad (12)$$

Приведенное давление  $p$  является геометрической суммой действительного давления  $p'$  от призмы волочения и давления связности  $H$ , и, в соответствии со схемой на рис. 1,е, при движущейся призме волочения будет равно

$$p = \sqrt{(H + p'_\sigma)^2 + p'^2_\tau} = \sqrt{(c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma)^2 + (p'_\sigma \operatorname{tg} \rho)^2}, \quad (13)$$

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

Угол отклонения  $\delta_1$  приведенного давления  $p$  определится так

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{p'_\sigma \operatorname{tg} \rho}{c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma}. \quad (14)$$

Прежде чем рассмотреть заглубление движущего отвала при неподвижной призме волочения, рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.

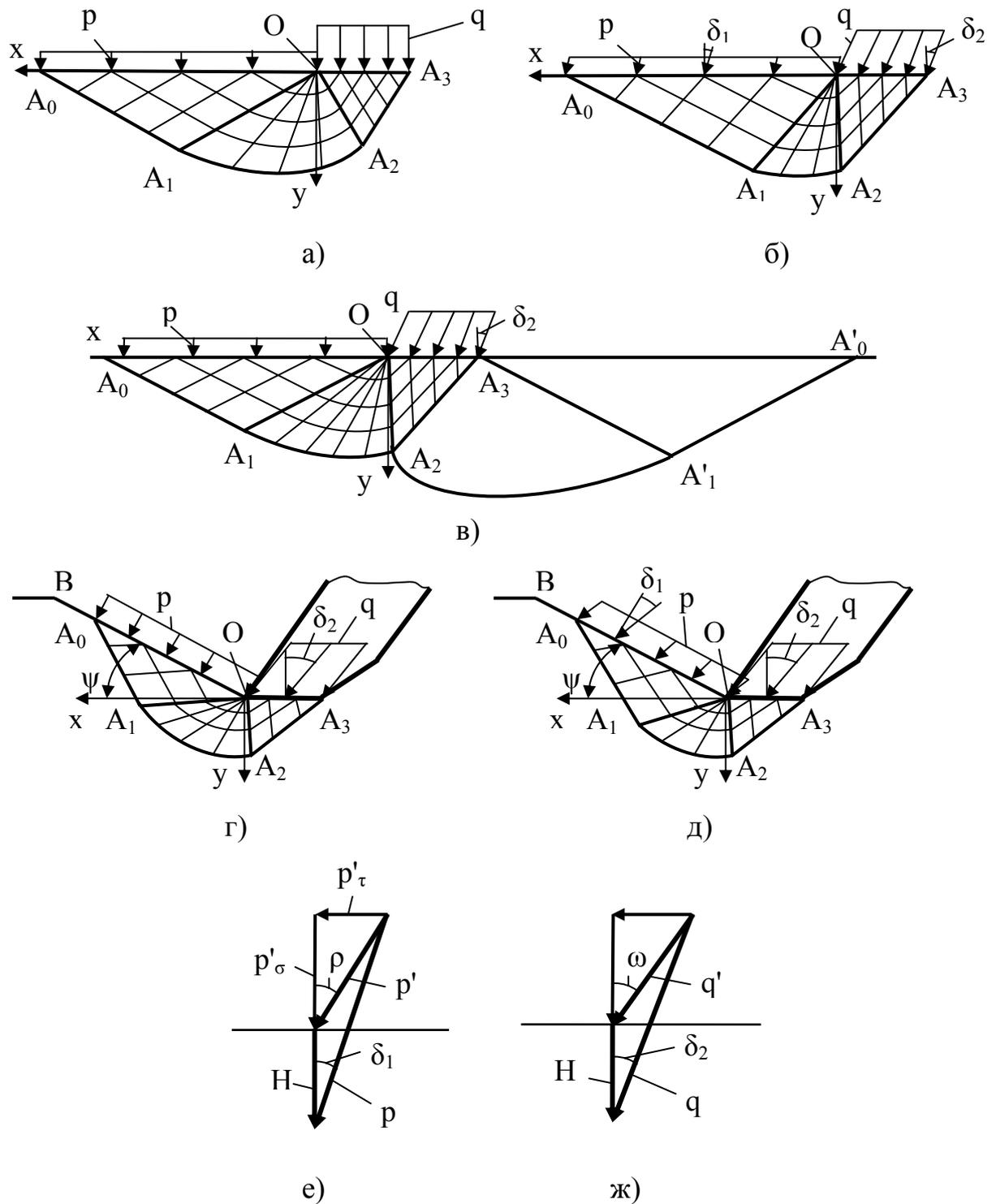


Рис. 1. Расчетные схемы разрушения грунта при заглублении отвала: в начальной стадии неподвижным отвалом (а), подвижным отвалом при движущейся (б) и неподвижной (в) призме волочения; при копании при высокой скорости заглубления (г) и при перемещении срезанного грунта отвалом (д), и схемы для расчета давлений на поверхность грунта при движущейся призме волочения (е) и движущемся ноже (ж).

Из рисунка видно, что если траектория 1 заглубления режущей кромки отвала будет расположена левее предельной траектории, то движущийся от-

вал при заглублении будет перемещать призму волочения. И наоборот, если траектория 2 заглубления режущей кромки отвала будет расположена правее предельной траектории, то при заглублении движущегося отвала его поверхность будет отходить от грунта, и грунт перед отвалом не будет смещаться.

Угловое положение предельной траектории в пространстве (угол  $\alpha_3$ ) определяется так

$$\alpha_3 = \operatorname{arctg} \frac{v_{от}}{v_6} = \alpha_{от}, \quad (15)$$

где  $\alpha_{от}$  – угол резания;  $v_{от}$  – вертикальная скорость заглубления отвала;  $v_6$  – скорость перемещения бульдозера.

Таким образом, при относительно медленном заглублении отвала (угол заглубления меньше угла резания) призма волочения будет перемещаться отвалом, а при относительно быстром заглублении (угол заглубления больше угла резания) грунт перед отвалом не будет смещаться в направлении движения машины.

Для оставшегося случая, при движущемся ноже и неподвижной призме волочения в начальной стадии заглубления, когда удерживающая поверхность грунта будет горизонтальной, для зоны  $A_0OA_1$  остаются в силе уравнения (8), а для зоны  $A_2OA_3$  – уравнения (4).

Тогда уравнение (6) можно записать для этого случая следующим образом

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (16)$$

При этом давление  $p$  и угол его отклонения от нормали определяется по уравнениям (13) и (14).

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 уравнение (10) при  $p=H$ .

Если движущийся отвал заглубляется при высокой скорости под углом, большим чем критический угол, определяемый по уравнению (15), то грунт перед отвалом неподвижен. Обратимся к схеме, изображенной на рис. 2,а и рассмотрим треугольник  $OBD$ .

Силу  $Q_{гр}$ , действующую на поверхность  $BD$  со стороны вышележащего грунта можно найти по формуле

$$Q_{гр} = \rho g H_{np} B l_{BD},$$

где  $B$  – длина отвала;  $l_{BD}$  – длина поверхности  $BD$

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

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

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

Действительное давление  $p'$  от силы  $N$  равно

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

Для определения приведенного нормального давления  $p$  используем формулу  $p = p' + H$ .

Схема разрушения грунта при копании при большой скорости заглубления, и, следовательно, неподвижном грунте перед отвалом будет иметь вид, изображенный на рис. 1,г.

Для зоны  $A_0OA_1$ , находящейся под действием нормальных давлений, уравнения (3) (или уравнения 8) примут вид

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

Для области  $A_2OA_3$  остаются в силе уравнения (4). Тогда

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

При заглублении отвала по траектории, приводящей к движению срезанного грунта по площадке сдвига (рис. 1,д), для определения приведенных давлений, действующих на площадку сдвига, и угла сдвига используем метод расчета, основы которого изложены в работе [2].

Изменение условий нагружения площадки сдвига 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.

Для второго случая пригодно уравнение (7). Применительно к первому случаю, при формировании площадки сдвига, это уравнение упрощается. На ней выполняется условие  $\delta_1 = \rho$  и при этом  $\Delta_1 = \frac{\pi}{2}$ . Эти изменения приводят к изменению уравнений (3), которые примут вид

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

а уравнения (4) не изменятся, тогда получим

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

Таким образом, обобщенная формула (6) позволяет делать вычисления предельного приведенного давления для всех расчетных случаев при соответствующих граничных условиях на поверхности грунта.

Переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется в соответствии с рис. 1,ж.

$$q' = \sqrt{(q \cos \delta_2 - H)^2 + (q \sin \delta_2)^2} . \quad (17)$$

Для того чтобы можно было осуществлять расчеты по формуле (6), необходимо учесть, что при наклонных давлениях угол отклонения  $\delta_2$  приведенного давления  $q$  будет зависеть от величины действительного давления  $q'$  (рис. 1,ж). Поэтому расчеты необходимо осуществлять итерационными методами в следующей последовательности. Задаться некоторой начальной величиной действительного давления  $q'_н$ .

В соответствии со схемой на рис. 1,ж, рассчитать по формулам

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

приведенное давление  $q_n$  и угол его отклонения  $\delta_2^H$ , соответствующие давлению  $q'_н$ , а по формуле (6) вычислить значение предельного давления  $q$ , приводящее к разрушению грунта при угле отклонения  $\delta_2^H$ .

Если полученное по формуле (6) значение приведенного давления  $q$  отличается от начального  $q_n$ , необходимо изменять начальное действительное давление  $q'_н$  и повторять вычисления до выполнения условия

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

где  $\Delta$  – принятая погрешность вычислений.

Однако при этом необходимо рассмотреть и альтернативную возможность разрушения грунта – в сторону задней части ножа. Выпор грунта при заглаблении отвала будет происходить в такую сторону, куда потребуется меньшее разрушающее давление. И если при неподвижном отвале при наличии призмы волочения разрушение грунта произойдет только в сторону задней части отвала, а при отсутствии призмы волочения - в обе стороны, то при движущемся отвале однозначно ответить на этот вопрос невозможно.

Рассмотрим такой 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 (8) при  $p=H$ . Для зоны  $A_2OA_3$  остается в силе первое из уравнений (4), 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

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

Таким образом, при движущемся отвале необходимо рассматривать альтернативный вариант разрушения грунта и выбирать такой случай, при котором приведенное давление  $q$  будет минимальным. Расчеты при движущемся отвале необходимо осуществлять итерационными методами, а переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется по уравнению (17).

Теперь отметим кинематические особенности разрушения грунта площадкой износа при заглаблении. Из рис. 2,б видно, что угол  $\varphi_2$  между направлением наибольшего главного напряжения и осью  $x$  полностью определяет положение площадок скольжения в зоне  $OA_2A_3$  и размеры этой зоны, расположенной под площадкой износа  $OA_3$ . Вместе с тем положение линии  $A_2C$  представляет собой рациональную траекторию заглабления отвала.

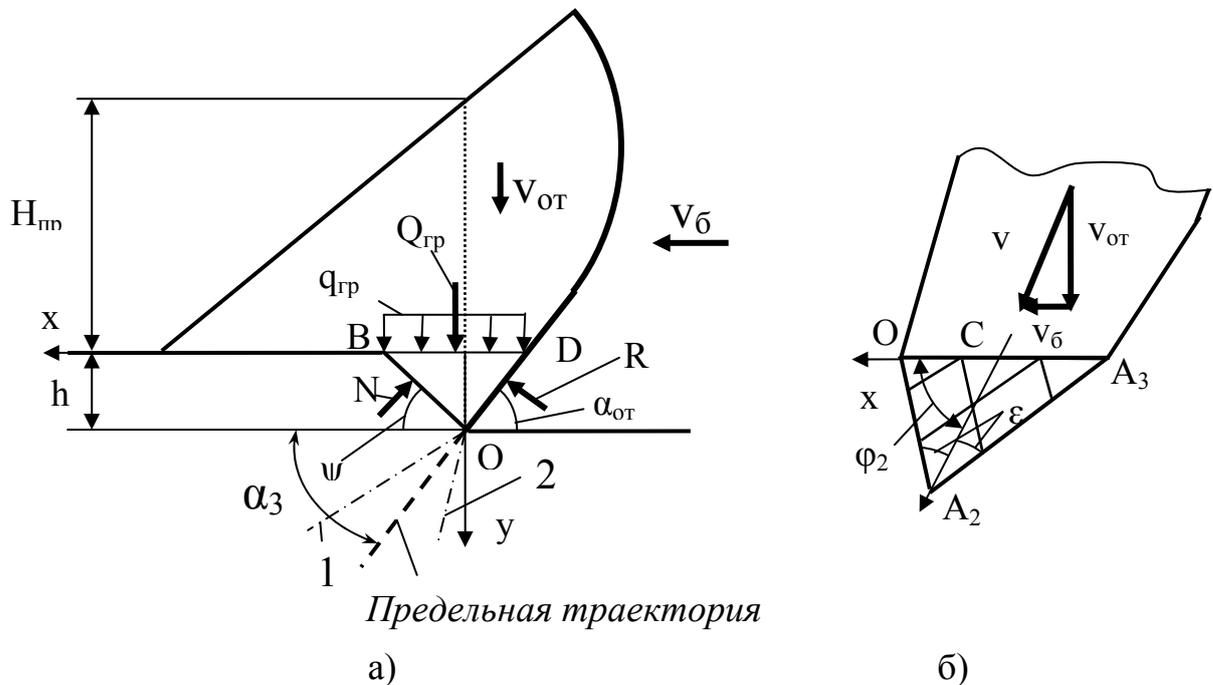


Рис. 2. Схема к расчету предельной траектории заглабления и силовых параметров при высокой скорости заглабления отвала при копании (а) и рациональной траектории заглабления (б).

Действительно, напряжения на площадке износа при заглаблении ножа достигнут предельных значений только при некоторой его осадке. При этом, если траектория заглабления режущей кромки будет расположена под углом  $\varphi_2$ , напряжения будут увеличиваться во всей зоне  $OA_2A_3$  до предельных значений. Если же траектория заглабления будет расположена под меньшим углом, то часть площадки износа ножа, примыкающая к режущей кромке, будет попадать на новый участок грунта, который будет испытывать меньшие давления, чем в остальные участки площадки износа. Это потребует увеличения заглабляющего усилия.

Таким образом, заглабление отвала под углом

$$\beta = \arctg \frac{v_{om}}{v_б} \geq \varphi_2 \quad (18)$$

обеспечивает появление предельных значений, удовлетворяющих уравнению (б) сразу во всей зоне  $OA_2A_3$ , расположенной под площадкой износа ножа.

Минимальная величина этого угла будет при  $\delta_2 = \rho$ . В этом случае, в соответствии с уравнением (4)

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} + \rho \right) = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} = \varepsilon.$$

Рассмотрим заглубление отвала бульдозера Т10М при максимальной высоте призмы волочения 1,3 м и вычислим величину предельных давлений, необходимых для заглубления при разных расчетных ситуациях. Поскольку основным параметром, определяющим прочностные характеристики грунта, является удельное сцепление, то примем его за основу.

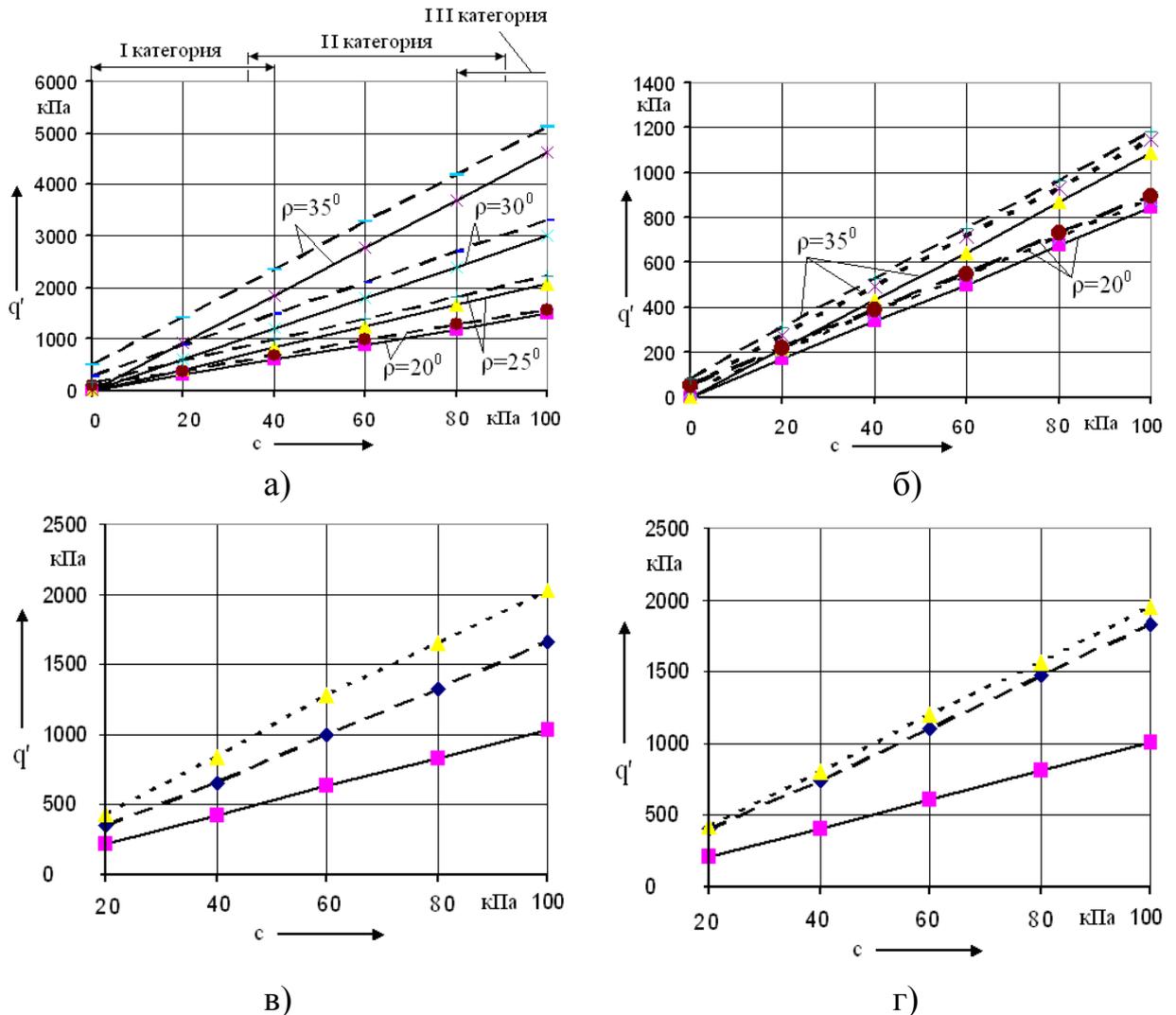


Рис. 3. Влияние удельного сцепления грунта  $c$  на величину разрушающего давления  $q'$  при неподвижном (а) и движущемся по поверхности грунта (б) отвале: сплошные линии - при отсутствии призмы волочения; штриховые линии – неподвижной и точечные линии - движущейся призме волочения; а так же при копании с толщиной стружки  $h=0,05$  м (в) и  $h=0,2$  м (г) при неподвижной призме волочения (штриховая линия), в момент формирования (сплошная линия) и после окончания формирования площадки сдвига (точечная линия).

При неподвижном отвале (рис. 3,а) и отсутствии призмы волочения давление  $q'$  линейно зависит от удельного сцепления грунта (входящего в давление связности  $H$ ). При этом на величину давления существенно влияет

угол внутреннего трения грунта и призма волочения. Но результаты расчетов, показывающие влияние призмы волочения являются условными, поскольку при неподвижном отвале разрушение грунта в действительности произойдет в сторону задней части отвала. Если сравнить рекомендуемые значения вертикального давления [4] со значениями, изображенными на рис. 3,а, то можно заметить их хорошее соответствие друг другу при угле внутреннего трения грунта  $\rho=30^{\circ}$ , наиболее характерного для супесей.

При заглублении движущегося отвала (рис. 3,б) происходит резкое уменьшение разрушающего давления по сравнению с неподвижным отвалом. Призма волочения, как и в предыдущем случае, ухудшает процесс заглубления отвала, но разрушающее давление будет несколько меньшим при движущейся призме волочения.

Перейдем к заглублению отвала при копании грунта. На рис. 3,в и 3,г изображены результаты расчетов при копании с толщиной стружки 0,05 м и 0,2 м, поскольку эти значения практически охватывают диапазон реальных значений толщины стружки при работе бульдозера. Расчеты приведены для грунта с углом внутреннего трения  $\rho=30^{\circ}$ .

Из рисунков видно, что наиболее легко отвал заглубляется непосредственно в момент большого сдвига, а наиболее трудно – сразу после появления устойчивой площадки сдвига. Так, если при  $s=100$  кПа 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 копанию [2].

Причина этих колебаний вытекает из разрушения сцепления грунта на площадке сдвига при копании, что вызывает скачкообразное изменение сил, действующих в зоне разрушения грунта ножом. Но если сила сопротивления копанию при этом уменьшается, то разрушающее давление, а значит и сила, требуемая для заглубления отвала, увеличивается.

Расчеты показывают, что при движущемся отвале альтернативное разрушение грунта в сторону задней части отвала невозможно, так как для этого в рассматриваемых условиях требуется давление в 3,2-5,7 раз выше.

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

В заключение отметим, что рациональный угол траектории заглубления отвала, ограниченный с одной стороны формулой (18), не должен превышать величину угла резания. Это вытекает из того, что разрушающее давление при заглублении отвала будет меньшим при движущейся призме. Но это значит, что рациональный угол траектории заглубления отвала должен находиться в пределах

$$\varphi_2 \leq \beta \leq \alpha_{om}.$$

Подставляя в это уравнение численные значения, полученные при наиболее характерном для грунтов угле внутреннего трения  $\rho=30^{\circ}$ , получим, что при всех значениях удельного сцепления грунта, для рассматриваемых условий границы диапазона будут равны

$$50^{\circ} \leq \alpha_3 \leq 55^{\circ}.$$

Таким образом, полученное обобщенное уравнение для определения предельного разрушающего давления, действующего на поверхность грунта со стороны площадки износа, пригодно для всех расчетных схем, и для них определены граничные условия, обеспечивающие использование этого уравнения при решении прикладных задач.

Проведенные исследования взаимодействия с грунтом затупленных ножей бульдозера при их заглублении подтвердили важность и актуальность этой задачи, поскольку ее изучение позволяет перейти к способам снижения возникающих при заглублении отвала сопротивлений, вследствие чего повышается производительность бульдозера.

#### 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.