

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПНЕВМОПРОБОЙНИКА В ГРУНТЕ

**Б. Б. Данилов<sup>1</sup>, Б. Н. Смоляницкий<sup>1,3</sup>, А. И. Чанышев<sup>1,2</sup>, Д. О. Чещин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: bsmol@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет экономики и управления,  
ул. Каменская, 56, 630099, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения,  
ул. Д. Ковальчук, 191, 630049, г. Новосибирск, Россия

Решена задача определения усилий, требуемых для изменения траектории пневмопробойника при проходке скважин в грунте. Грунтовый массив рассматривается как жесткопластическая среда с условием пластичности Кулона–Мора, а отклоняющее устройство пневмопробойника — как недеформируемое тело. Задача решается в два этапа: внедрение отклоняющего устройства в грунтовый массив и движение пневмопробойника в грунте с отклоненной на некоторый угол задней частью. Рассчитаны нагрузки, действующие на заднюю часть, сила и момент, необходимые для изменения траектории движения пневмопробойника в грунте.

*Скважина, пневмопробойник, отклоняющее устройство, жесткопластическая среда, условие Кулона–Мора, предельные нагрузки*

Разведку и разработку месторождений полезных ископаемых невозможно представить без различных технологий бурения скважин. Скважины широко применяются также при прокладке коммуникаций без вскрытия дневной поверхности, возведении свайных фундаментов, монтаже анкерных и в других сферах.

Для снижения затрат (трудовых, энергетических, финансовых и т. д.) необходимо обоснованно выбирать метод образования скважин при различной твердости пород. В настоящее время среди основных методов можно выделить: вращательный, ударно-вращательный, ударно-поворотный, динамическое и статическое вдавливание.

Для бурения скважин в уплотняемых грунтах эффективен метод динамического вдавливания (метод прокола). Его отличительная черта — простота процесса и компактность оборудования, а отсутствие вращательного движения позволяет свести к минимуму отвод рабочего органа “вверх – в сторону”.

В 60-е годы прошлого столетия в ИГД СО РАН был разработан пневмопробойник — автономно передвигающееся в грунте пневмоударное устройство для проходки методом прокола сравнительно коротких (до 40 м) скважин [1]. При динамическом вдавливании в грунт, по сравнению со статическим, пневмопробойник практически мгновенно приобретает ускорение, что дает возможность снизить негативное влияние отклоняющих факторов и сооружать скважину максимально прямолинейно.

Вместе с тем при использовании этого метода проходка прямолинейных скважин ограничивается длиной до 40 м. Дальнейшее увеличение длины сопровождается уменьшением вероятности выхода проходческого устройства в проектную конечную точку из-за возрастающего действия случайных отклоняющих факторов [1]. Один из способов корректировки направления движения пневмопробойника в грунте — оснащение ее средствами стабилизации [2, 3]. Однако при возникновении различных случайных отклонений стабилизаторы не могут восстановить прежнее направление движения машины, а, напротив, способствуют сохранению нового курса.

Существенно расширить технологические возможности метода прокола удастся за счет обеспечения движения рабочего органа по заданной траектории, в том числе и криволинейной, и выхода скважины в заданную область подземного пространства.

В ИГД СО РАН создан экспериментальный комплекс технических средств для проходки в грунте скважин по заданной траектории, состоящий из пневмопробойника с системой управления на основе активного отклоняющего элемента и приборного комплекса, позволяющего определять положение проходчика в грунте. Он представляет собой серийную машину ИП 4605, на корпусе которой, имеющего диаметр 0.095 м, шарнирно установлен отклоняющий элемент в виде цилиндрического расширителя диаметром 0.15 м [4]. Управление поворотом этого элемента осуществляется с помощью четырех воздушных камер с индивидуальным подводом сжатого воздуха, расположенных между ним и корпусом пневмопробойника. При подаче сжатого воздуха в одну или две смежные камеры расширитель отклоняется в сторону, изменяя направление движения пневмопробойника.

При испытаниях экспериментального образца комплекса доказана его работоспособность. Но очевидным его недостатком является то, что диаметр корпуса пневмопробойника значительно меньше диаметра скважины. Это не дает возможности получить удельную мощность устройства на уровне серийных пневмопробойников.

В развитие этих работ создан и испытан управляемый пневмопробойник [5], выполненный по схеме изменения его внешней формы за счет отклонения задней части (рис. 1). Такое решение имеет следующие преимущества. Во-первых, заднее расположение отклоняющего элемента дает возможность в полной мере использовать для ударного механизма выверенные конструктивные решения, применяемые в серийных машинах. Во-вторых, диаметр корпуса данной конструкции равен диаметру образуемой скважины, что позволяет обеспечить высокую удельную мощность машины. В-третьих, заднее расположение отклоняющего элемента упрощает конструкцию механизма управления за счет использования основного воздухоподводящего рукава для передачи управляющих команд.

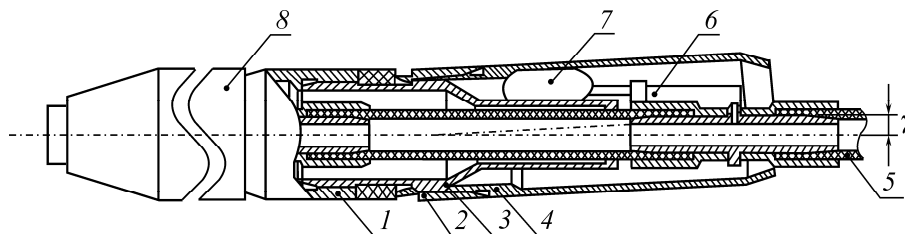


Рис. 1. Схема механизма изменения траектории управляемого пневмопробойника (при отклоненной задней части)

Механизм (рис. 1) представляет собой отклоняющий элемент 4, шарнирно соединенный с задней гайкой 1 пневмопробойника 8 при помощи гайки 2 и втулки 3. Для создания отклоняющего элемента 4 усилия служит эластичная камера 7, управляемая с помощью клапанного механизма 6. Выбор направления отклонения пневмопробойника осуществляется поворотом

воздухоподводящего шланга (рукава) 5. Для отклонения корпуса пневмопробойника в эластичную камеру через клапанный механизм подается давление, создающее усилие для поворота его задней части относительно втулки 3 (и корпуса пневмопробойника 8 за счет их жесткой связи) на некоторый угол  $\gamma$ .

Для отыскания динамических параметров управляемого пневмопробойника необходимо решить следующие задачи: найти усилие, требуемое для внедрения отклоняемого устройства в стенку скважины, определить сопротивление или реакцию грунта (породы) при движении отклоняющего устройства, а также момент силы сопротивления, вызывающего поворот пневмопробойника в грунте (породе).

Существуют различные решения задачи взаимодействия пневмопробойника с грунтом [6, 7]. В [8–10] учитываются упругие свойства грунта и машины, упруго-пластические свойства грунта и упругие свойства машины, неупругие свойства грунта и неупругие свойства машины (для подобных задач применяются вычислительные комплексы типа ANSYS).

Цель задачи — получить достаточно приемлемую инженерную формулу для оценки усилия, которое необходимо приложить к отклоняемому устройству (см. рис. 1) при его внедрении в грунт. Основное внимание обращалось на упругие свойства грунта, а не на его необратимое деформирование. Для этого учитывались такие важные свойства грунта (породы), как разносопротивляемость при растяжении и сжатии, дилатансия при сдвигах. Для проведения расчетов наиболее подходит теория пластичности Друкера–Прагера, основанная на условии предельного равновесия Кулона–Мора и ассоциированном законе течения.

Для решения задачи использовалось условие Кулона–Мора:

$$\max_{\vec{n}} \{ \tau_n + \operatorname{tg} \psi \sigma_n \} = k, \quad (1)$$

где  $\psi$  — угол внутреннего трения породы;  $k$  — коэффициент сцепления;  $\vec{n}$  — нормаль к площадке в декартовой системе координат  $xOyz$ .

Принятая схема деформирования грунта отклоняющим элементом при его вдавливании представлена на рис. 2.

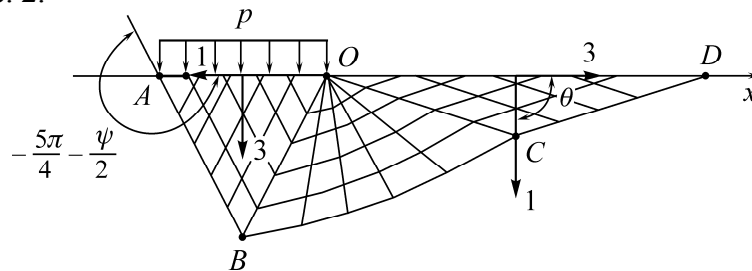


Рис. 2. Схема деформирования грунтового массива под действием приложенного усилия  $p$  к отрезку  $OA$ : 1, 3 — главные оси тензора напряжений  $T_\sigma$

На схеме поворот отклоняющего элемента происходит вокруг точки  $O$ , а его длина равна длине отрезка  $OA$ . В начальный момент он внедряется как плоский штамп, перпендикулярно поверхности грунта. В первом приближении считаем, что здесь плоская деформация среды, когда в направлении, перпендикулярном к плоскости, деформация среды отсутствует. Используя известные результаты [11, 12], можно найти давление под штампом и, умножив его на длину отрезка  $OA$ , вычислить силу, необходимую для вдавливания отклоняющего элемента в грунт.

Для получения более простого решения поставленной задачи считаем, что в области под отрезком  $OA$  (рис. 2) и справа от нее имеет место пластическое состояние грунта с условием пластичности (1). Из диаграммы Мора (рис. 3) следует, что в точке касания большого круга Мора и прямой линии, определяемой уравнением (1), значение  $k$  максимально.

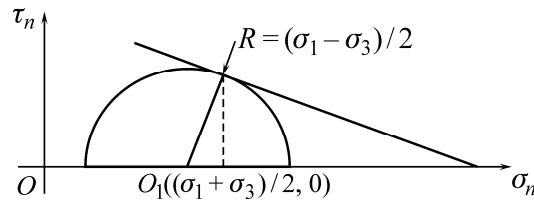


Рис. 3. Диаграмма Мора

В точке касания

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \psi, \quad \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \psi, \quad (2)$$

поэтому из (1) следует, что

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \psi} + \operatorname{tg} \psi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = k \quad (3)$$

или

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \sin \psi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = k \cos \psi. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные оси напряжения тензора напряжений  $T_\sigma$ , нумерация которых выбрана так, что  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Исходя из граничных условий задачи, на рис. 2 показаны направления осей 1, 2, 3 (ось 2 перпендикулярна плоскости рисунка) в областях деформирования  $ABO, OCD$ .

Для решения задачи привлекаются уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Таким образом, решается система из трех уравнений: двух уравнений (5) и условия пластичности (4). Неизвестными являются три напряжения:  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ .

От системы из трех уравнений с тремя неизвестными переходим [12] к системе двух уравнений с двумя неизвестными функциями по следующей схеме.

Вначале вместо трех неизвестных  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  вводим три функции, описываемые следующими формулами:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = T \cos 2\theta, \quad \tau_{xy} = T \sin 2\theta, \quad \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \sigma, \quad (6)$$

где  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  — среднее напряжение;  $T = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  — максимальное касательное напряжение;  $\operatorname{tg} 2\theta = 2\tau_{xy}/(\sigma_x - \sigma_y)$  ( $\theta$  — угол между первым направлением для тензора напряжений  $T_\sigma$  и осью  $Ox$  на рис. 2). Поскольку  $\sigma$  и  $T$  связаны между собой соотношением (4), то можно выразить  $T$  через  $\sigma$  по формуле  $T = k \cos \psi - \sigma \sin \psi$  и подставить это выражение в (6). Разрешая (6) относительно  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ , получаем

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma(1 - \sin \psi \cos 2\theta) + k \cos \psi \cos 2\theta, \\ \sigma_y = \sigma(1 + \sin \psi \cos 2\theta) - k \cos \psi \cos 2\theta, \\ \tau_{xy} = -\sigma \sin \psi \sin 2\theta + k \cos \psi \sin 2\theta. \end{cases} \quad (7)$$

Подстановка (7) в (5) задает систему двух дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка для определения двух неизвестных функций  $\sigma = \sigma(x, y), \theta = \theta(x, y)$ . Эту систему можно трансформировать, т. е. ввести вместо координатных линий  $x = \text{const}, y = \text{const}$  две другие координатные линии с уравнениями

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_1 = \operatorname{tg}\left(\theta + \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right), \quad \left(\frac{dy}{dx}\right)_2 = \operatorname{tg}\left(\theta - \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}\right), \quad (8)$$

вдоль которых вместо (5) будут выполняться дифференциальные соотношения следующего вида:

$$d\sigma[\sin 2\theta dy + (\sin \psi + \cos 2\theta)dx] + 2(\sigma \sin \psi - k \cos \psi)d\theta dy = 0, \quad (9)$$

зависящие от отношения  $dy/dx$ . Отметим, что координатные линии (8) называются [13, 14] характеристиками системы дифференциальных уравнений, а (9) — соотношениями характеристик.

Будем считать, что в треугольнике  $ABD$  под отрезком  $OA$  среда сжата однородными нагрузками  $\sigma_x = \text{const}$ ,  $\sigma_y = \text{const}$ ,  $\tau_{xy} = 0$ , в секторе  $BOC$  координатные линии, описываемые уравнениями (8), образуют веер прямых линий, исходящих из точки  $O$  и пересекаемых кривыми линиями. В треугольнике  $OCD$  все координатные линии прямолинейны, что свидетельствует об однородном напряженном состоянии ( $\sigma_x = \text{const}$ ,  $\sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ ). При этом предполагается, что давление со стороны корпуса пневмопробойника на грунт несоизмеримо меньше давления, оказываемого на отрезок  $OA$ , т. е. давлением на  $OD$  пренебрегаем.

Определим значения угла  $\theta$  в треугольниках  $AOB$  и  $OCD$ . Поскольку нормальное напряжение  $\sigma_n$  на границе  $OD$  треугольника  $OCD$  равно нулю ( $\sigma_y = 0$ ) и вдоль  $OD$  должно быть сжатие ( $\sigma_x < 0$ ), то в силу соотношения  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  первое главное направление тензора  $T_\sigma$  устремлено вниз, как показано на рис. 2, при этом  $\theta = -\pi/2$ . В треугольнике  $AOB$  на границе  $OA$  напряжение  $\sigma_y$  по модулю должно быть больше, чем  $\sigma_x$  (материал сжимается по всей площадке  $AO$ ). По этой причине угол  $\theta$  здесь равен  $-\pi$  (первое главное направление  $T_\sigma$  — вдоль оси абсцисс влево).

Подставляя значение  $\theta = -\pi/2$  в (8), получим следующие семейства характеристик в треугольнике  $OCD$ :

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_1 = \operatorname{tg}\left(-\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right), \quad \left(\frac{dy}{dx}\right)_2 = \operatorname{tg}\left(-\frac{3\pi}{4} - \frac{\psi}{2}\right). \quad (10)$$

Вдоль этих линий решается уравнение равновесия (9).

Найдем напряженно-дифференцированное состояние в треугольнике  $OCD$ . Здесь  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_3 < 0$ . Тогда из (4) следует, что

$$-\frac{\sigma_3}{2}(1 - \sin \psi) = k \cos \psi, \quad (11)$$

откуда

$$\sigma_3 = -\frac{2k \cos \psi}{(1 - \sin \psi)}. \quad (12)$$

Так как  $\sigma_y = \sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_x = \sigma_3$ , то полагаем, что  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  постоянны в треугольнике  $OCD$ , кроме того,  $\tau_{xy} = 0$  (трение на контакте  $OD$  рис. 2 отсутствует). Исходя из этих значений, вычисляем  $\sigma$  во всем треугольнике  $OCD$  и на границах  $OD$  и  $OC$ . В результате имеем

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_3}{2} = -\frac{k \cos \psi}{(1 - \sin \psi)}. \quad (13)$$

Таким же способом находим напряженно-дифференцированное состояние в треугольнике  $ABO$  (рис. 2). Здесь два отличных от нуля напряжения:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ , причем  $\sigma_1 = \sigma_x < 0$ ,  $\sigma_3 = \sigma_y < 0$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_3$ . Напряжение  $\tau_{xy}$  предполагаем равным нулю. Угол  $\theta = -\pi$ , характеристические линии (8) определяются уравнениями:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_1 = \operatorname{tg}\left(-\frac{3\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right), \quad \left(\frac{dy}{dx}\right)_2 = \operatorname{tg}\left(-\frac{5\pi}{4} - \frac{\psi}{2}\right). \quad (14)$$

Поскольку на  $AO$  и в треугольнике  $BAO$  выполняется (4), то отсюда последовательно находим сначала связь  $\sigma_1$  с  $\sigma_3$ :

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3(1 - \sin \psi)}{1 + \sin \psi} + \frac{2k \cos \psi}{1 + \sin \psi}, \quad (15)$$

затем связь  $\sigma_3$  с  $\sigma$ :

$$\sigma_3 = -k \cos \psi + (1 + \sin \psi) \sigma. \quad (16)$$

Последняя формула означает, что для вычисления  $\sigma_3$  (необходимое давление на  $AO$ ) требуется установить значение  $\sigma$  во всем треугольнике  $AOB$ , в том числе на границе  $AO$ . Для этого свяжем значение  $\sigma$  на стороне  $BO$  треугольника  $ABO$  со значением  $\sigma$  на стороне  $OC$  треугольника  $BOC$ . Из (8), (14) следует, что характеристика  $OC$  в треугольнике  $OCD$  наклонена к оси абсцисс под углом  $-\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ , а характеристика  $OB$  в треугольнике  $BAO$  — под углом  $-\frac{3\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ . Это означает, что если ввести полярную систему координат, связанную с точкой  $O$  ( $O$  — полюс), то полярный угол  $\varphi$  будет изменяться в пределах от  $-\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$  до значения  $-\frac{3\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ . Таким образом, угол  $BOC$  составит  $\frac{\pi}{2}$ . На такую же величину изменится угол  $\theta$ : от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $-\pi$ . Этот факт заставляет ввести гипотезу, по которой в области  $BOC$  углы  $\theta$  и  $\varphi$  связаны зависимостью [15, 16]

$$\varphi = \theta + \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}. \quad (17)$$

Учитывая связь полярных координат с прямоугольными декартовыми

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad (18)$$

найдем уравнения характеристических линий (8) в полярных координатах (для области  $BOC$ ). Из (18) следует, что

$$dx = d\rho \cos \varphi - \rho \sin \varphi d\varphi, \quad dy = d\rho \sin \varphi + \rho \cos \varphi d\varphi, \quad (19)$$

где  $dx$ ,  $d\rho$ ,  $d\varphi$ ,  $dy$  — дифференциалы функций.

Подставляя эти значения в (8), получим

$$d\rho \sin \varphi + \rho \cos \varphi d\varphi = \operatorname{tg} \varphi (d\rho \cos \varphi - \rho \sin \varphi d\varphi) = d\rho \sin \varphi - \rho \frac{\sin^2 \varphi}{\cos \varphi} d\varphi, \quad (20)$$

$$d\rho \sin \varphi + \rho \cos \varphi d\varphi = \operatorname{tg}(\varphi - \frac{\pi}{2} - \psi)(d\rho \cos \varphi - \rho \sin \varphi d\varphi). \quad (21)$$

Согласно (20), характеристические линии типа  $OC$  на рис. 2 переходят в лучи, выходящие из точки  $O$  с уравнением  $d\varphi = 0$ ,  $\varphi = \operatorname{const}$ . Характеристики вида  $CD$  переходят в кривые линии с уравнением

$$\rho = \rho_0 e^{\operatorname{tg} \psi (\varphi - \varphi_0)}, \quad (22)$$

где  $\varphi_0 = -\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ ;  $\rho_0 = \operatorname{const}$ ,  $0 \leq \rho_0 \leq |OC|$ ,  $|OC|$  — длина отрезка.

При  $\varphi = -\frac{3\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$  имеем  $\rho = \rho_0 e^{-\operatorname{tg} \psi \left(\frac{\pi}{2}\right)}$ . Это указывает на то, что значение  $\rho$  для данного  $\varphi$

меньше значения  $\rho_0$  для  $\varphi = -\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ .

Исследуем соотношение на характеристических линиях (22). В уравнении (9)  $\varphi = \theta + \frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ ,  $d\varphi = d\theta$ . Кроме того, для этого семейства характеристических линий на основании (8)

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(\varphi - \frac{\pi}{2} - \psi) = -\operatorname{ctg}(\varphi - \psi). \quad (23)$$

Подставляя эти значения в (9), после преобразований получаем уравнение

$$\frac{d\sigma}{\sigma \sin \psi - k \cos \psi} + \frac{2d\varphi}{\cos \psi} = 0, \quad (24)$$

интегрируя которое, находим

$$\sigma \sin \psi - k \cos \psi = (\sigma \sin \psi - k \cos \psi)_0 e^{-2 \operatorname{tg} \psi (\varphi - \varphi_0)}. \quad (25)$$

Константу интегрирования возьмем из условия совпадения значения  $\sigma$  с его значением, определенным из (13) при  $\varphi = \varphi_0 = -\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$ . Тогда при  $\varphi = -\frac{3\pi}{4} + \frac{\psi}{2}$  имеем следующую формулу:

$$\sigma \sin \psi - k \cos \psi = -\frac{k \cos \psi}{1 - \sin \psi} e^{\pi \operatorname{tg} \psi} \quad (26)$$

или

$$\sigma = \frac{k \cos \psi}{\sin \psi} \left[ 1 - \frac{e^{\pi \operatorname{tg} \psi}}{1 - \sin \psi} \right]. \quad (27)$$

По этой причине на основании (16)

$$\sigma_3 = \frac{k \cos \psi}{\sin \psi} \left[ 1 - \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} e^{\pi \operatorname{tg} \psi} \right]. \quad (28)$$

Формула (28) — частный случай более общей формулы, приведенной в [12]. По ней определяется искомое значение  $\sigma_3$  на площадке  $AO$ , которое является отрицательным. Умножив (28) на длину площадки  $AO$ , получаем удельную силу, отнесенную к этому отрезку. Умножив на ширину, найдем силу, необходимую для вдавливания отклоняющего устройства в массив грунта.

При  $\psi \rightarrow 0$  в формуле (28) получаем неопределенность типа  $\left[ \frac{0}{0} \right]$ . Разрешая ее по правилу Лопиталья, находим  $\sigma_3 = -k(\pi + 2)$ , что соответствует вдавливанию плоского штампа в среду с одинаковым сопротивлением при растяжении и сжатии (металлы) [14].

На рис. 4 представлен результат расчетов по формуле (28) для песчаных грунтов с использованием справочных данных, касающихся угла внутреннего трения.

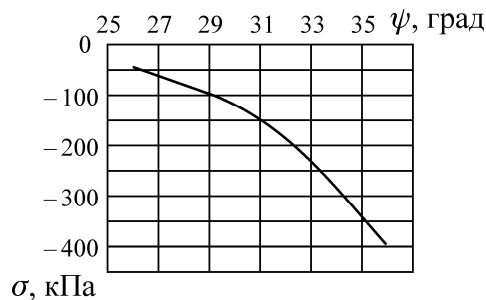


Рис. 4. Зависимость нагрузки на отклоняющее устройство при вдавливании его в грунт от значения угла внутреннего трения

Отмечено нелинейное изменение нагрузки для вдавливания поворотного устройства в грунт при изменении его свойств (угла внутреннего трения). Так, для песчаного грунта плотностью  $1700 \text{ кг/м}^3$  ее повышение на  $6.4\%$  вызовет увеличение требуемой нагрузки на  $90.7\%$ , а при повышении плотности на  $13.7\%$  нагрузка увеличится уже на  $233.6\%$ .

Рассмотрим вторую задачу — определение нагрузки, необходимой для движения пневмопробойника с отклоненным управляющим элементом в грунте, и величины момента силы для изменения траектории движения пневмопробойника в целом.

На рис. 5 представлена принципиальная схема деформирования грунта впереди отклоняющего устройства  $CD$ , движущегося влево вместе с проходчиком (ось абсцисс расположена на поверхности пневмопробойника). Впереди отклоняющего устройства находится грунт, который должен деформироваться пластически и вытесняться вверх. Процесс деформирования напоминает процесс резания грунта с формированием стружки и перемещением ее вверх по рабочему органу, например отвалу бульдозера. В простейшем случае на стружку, а в нашем случае на слой грунта, препятствующий перемещению отклоняющего элемента, действует вес налегающей сверху породы, создающей давление  $\rho gH$ , где  $\rho$  — плотность слоя налегающей породы,  $H$  — толщина вышележащего слоя. Необходимо рассчитать предельную силу сопротивления движению отклоняющего устройства вперед. Она находится как произведение давления на площадь устройства  $CD$ . Зная силу и точку ее приложения (в центре отрезка  $CD$ ), вычислим величину момента, заставляющего проходчик поворачиваться.

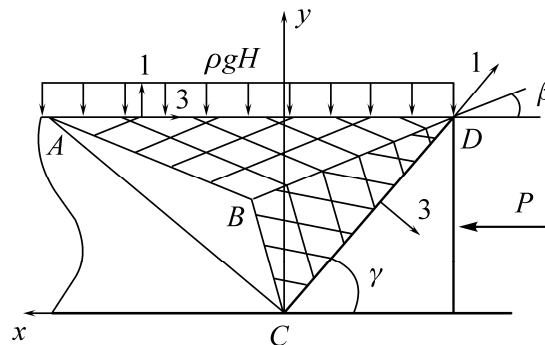


Рис. 5. Принципиальная схема деформирования грунта перед отклоняющим устройством  $CD$

Для расчета предельной нагрузки используем схему жесткопластического тела, которая рассматривалась при решении первой задачи. Предполагаем, что впереди устройства  $CD$  реализуется состояние плоской деформации (деформация по нормали к плоскости рисунка равна нулю). При этом справедливы (8), (9).

На границе  $AD$  треугольника  $ABD$  (рис. 5) первое главное направление тензора напряжений совпадает с осью ординат (на  $AD$   $\tau_{xy} = 0$ ). На этой границе действует вертикальное напряжение от вышележащего слоя породы, полагаем, что  $\sigma_1 = \sigma_y$ . Напряжение  $\sigma_3$  вдоль границы  $AD$  (предполагается, что оно по абсолютной величине меньше вертикального напряжения  $\sigma_y$ ), найдем из условия пластичности Кулона – Мора:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \psi} + \operatorname{tg} \psi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = k, \quad (29)$$

из которого следует

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} - \frac{2k \cos \psi}{1 - \sin \psi}. \quad (30)$$



Отсюда напряженное состояние в треугольнике  $ABD$  определяется выражениями:

$$\tau_{xy}^+ = 0, \quad \sigma_x^+ = -\rho g H \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} - \frac{2k \cos \psi}{1 - \sin \psi}, \quad \sigma_y^+ = -\rho g H. \quad (31)$$

Напряжения выше прямой  $BD$  на рис. 5 записываем со знаком “+” в отличие от напряжений в треугольнике  $BCD$ , которые берутся со знаком “-”. Граница  $BD$  априори неизвестна и будет найдена из условия “равновесия” напряженных состояний в треугольниках  $ABD$  и  $BCD$ . Предполагается, что угол  $\theta$  сохраняет постоянное значение во всем треугольнике  $ABD$  и значение  $\sigma = \text{const}$ .

Рассмотрим теперь отрезок  $CD$ , имитирующий отклоняющий элемент. Впереди него находится массив пород (грунта), подвергаемый нагрузке. Здесь есть нормаль  $\vec{n}$  к границе  $CD$ , совпадающая с осью 3. Нагрузка  $\sigma_3$  по абсолютной величине больше нагрузки по оси 1 (ось 1 направлена по стороне  $CD$ ). Предполагается, что касательное напряжение  $\tau_{nt} = 0$  на  $CD$ , т. е. трением пренебрегаем. В выбранной системе координат  $xOy$  вектор нормали  $\vec{n} = (\sin \gamma, -\cos \gamma)$ . Тогда вектор напряжений Коши  $\vec{p}_n$  на этой площадке будет равен

$$\vec{p}_n = (\sigma_x \sin \gamma - \tau_{xy} \cos \gamma) \vec{i} + (\tau_{xy} \sin \gamma - \sigma_y \cos \gamma) \vec{j}, \quad (32)$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  — орты системы координат  $x, y$ . Если  $\vec{t} = (\cos \gamma, \sin \gamma)$  — орт, направленный вдоль оси 1 по стороне  $CD$ , то

$$\tau_{nt} = (\vec{p}_n \vec{t}) = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\gamma - \tau_{xy} \cos 2\gamma. \quad (33)$$

Поскольку  $\tau_{nt} = 0$  на  $CD$ , то отсюда следует, что

$$\text{tg } 2\gamma = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (34)$$

т. е. угол  $\theta$  равен  $\gamma$  и

$$p_n = (\vec{p}_n \vec{n}) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\gamma - \tau_{xy} \sin 2\gamma. \quad (35)$$

Предполагаем, что всюду в треугольнике  $BCD$  напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  постоянны. Используя (5), находим

$$\sigma_x = \sigma + T \cos 2\gamma, \quad \sigma_y = \sigma - T \cos 2\gamma, \quad \tau_{xy} = T \sin 2\gamma. \quad (36)$$

Считаем, что в каждой точке треугольника  $BCD$  выполняется (4). Тогда  $T = k \cos \psi - \sigma \sin \psi$  и вместо (36) получаем зависимости:

$$\begin{aligned} \tau_{xy}^- &= k \cos \psi \sin 2\gamma - \sigma \sin \psi \sin 2\gamma, \\ \sigma_x^- &= k \cos \psi \cos 2\gamma + \sigma(1 - \sin \psi \cos 2\gamma), \\ \sigma_y^- &= -k \cos \psi \cos 2\gamma + \sigma(1 + \sin \psi \cos 2\gamma), \end{aligned} \quad (37)$$

аналогичные (7).

Особенность решения задачи заключается в том, что априори неизвестны граница, разделяющая области  $ABD$  и  $BCD$ , и значение  $\sigma$  на  $CD$ . Для определения этих величин используем условие непрерывности вектора напряжения Коши на  $BD$ . Имеем уравнения

$$\begin{cases} \sigma_x^- \sin \beta + \tau_{xy}^- \cos \beta = \sigma_y^+ \sin \beta + \tau_{xy}^+ \cos \beta, \\ \tau_{xy}^- \sin \beta + \sigma_y^- \cos \beta = \tau_{xy}^+ \sin \beta + \sigma_y^+ \cos \beta \end{cases} \quad (38)$$

или

$$\begin{cases} (\sigma_x^+ - \sigma_x^-) \sin \beta + \tau_{xy}^+ \cos \beta = 0, \\ -\tau_{xy}^- \sin \beta + (\sigma_y^- - \sigma_y^+) \cos \beta = 0. \end{cases} \quad (39)$$

Уравнения (39) представляют однородную систему двух уравнений для вычисления неизвестных величин:  $\sin \beta$  и  $\cos \beta$  ( $\beta$  — угол наклона  $BD$  к оси  $Ox$ ). Для существования решения необходимо, чтобы определитель системы (39) был равен нулю. Приравняв его нулю, с учетом уравнений (31) (37) получаем квадратное уравнение для определения  $\sigma$ , решая которое находим корни:

$$\frac{\sigma}{k} = \frac{\frac{\rho g H}{k} [1 + \cos 2\psi \sin^2 \psi] + \cos \psi [\cos^2 \psi + \sin \psi 2 \cos^2 \gamma]}{\cos^2 \psi (\sin \psi - 1)} \pm \frac{2 \cos \gamma \left[ \sin \psi \frac{\rho g H}{k} + \cos \psi \right] \sqrt{(1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \psi)}}{\cos^2 \psi (\sin \psi - 1)}. \quad (40)$$

Формула (40) выводится с помощью следующих тождественных преобразований:

$$1 - \sin^2 \psi \sin^2 \gamma = \cos^2 \gamma + \cos^2 \psi \sin^2 \gamma = \cos^2 \psi + \cos^2 \gamma \sin^2 \psi. \quad (41)$$

Угол  $\beta$  находится из любого уравнения системы (39), например второго:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_y^- - \sigma_y^+}{\tau_{xy}^-} = \frac{\sigma(1 + \sin \psi \cos 2\gamma) - k \cos \psi \cos 2\gamma + \rho g H}{k \cos \psi \sin 2\gamma - \sigma \sin \psi \sin 2\gamma}. \quad (42)$$

Если в уравнениях (40) и (42) принять  $\rho g H = 0$ ,  $\psi = 0$  и в (40) взять знак “–”, то тогда  $\frac{\sigma}{k} = 2 \cos \gamma - 1$ , а  $\operatorname{tg} \beta = \frac{1 - \cos \gamma}{\sin \gamma} = \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}$ . Таким образом, угол  $\beta$  будет равен  $\frac{\gamma}{2}$ , как и принято в классических решениях [13]. Следовательно, в (40) необходимо выбирать знак “–” перед радикалом.

Нормальное давление  $\sigma_n$  на  $CD$  вычисляем по (35):

$$\sigma_n = \sigma(1 - \sin \psi) - k \cos \psi. \quad (43)$$

При известной площади отклоняющего устройства с учетом (43) находим силу. Для определения продольной силы в направлении  $x$  используем формулу

$$P = \sigma_n S \sin \gamma. \quad (44)$$

где  $P$  — сила сопротивления грунта на отклоненной задней части машины;  $S$  — площадь поверхности (длина  $CD$ ).

По полученным формулам для песчаных грунтов рассчитаны зависимости силовых характеристик от угла наклона площадки (отклоняющего устройства), показанные на рис. 6.

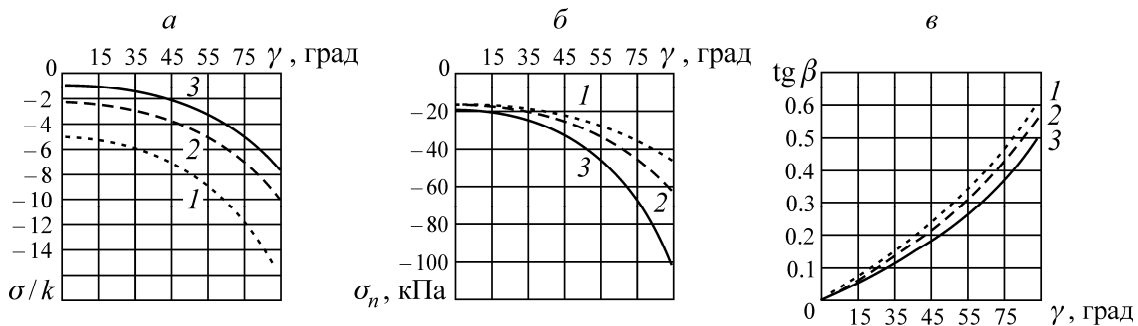


Рис. 6. Зависимости силовых характеристик грунтового массива от угла отклонения задней части машины для следующих характеристик:  $a$  — приведенного среднего напряжения;  $b$  — нормального среднего напряжения;  $v$  — угла наклона  $BD$  к оси  $Ox$  при угле внутреннего трения, град: 1 — 26; 2 — 30; 3 — 36

## ВЫВОДЫ

Решена задача о предельном давлении (по схеме жесткопластического тела), необходимом для вдавливания в грунт отклоняемой части управляемого пневмопробойника. Определено усилие, требуемое для продвижения в грунтовом массиве отклоняющего элемента пневмопробойника, что позволяет определить энергетические параметры, описывающие его движение в грунте при изменении траектории скважин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суднишников Б. В., Костылев А. Д., Тупицин К. К. Пневмопробойники в строительстве и горном деле // ФТПРПИ. — 1970. — № 2. — С. 44–49.
2. Костылев А. Д., Чепурной Н. П. Некоторые результаты исследования прямолинейности пробивания скважин в грунтах пневмопробойниками // ФТПРПИ. — 1969. — № 5. — С. 41–44.
3. Добросельский П. В. Адаптирующиеся пневмопробойники для бестраншейных технологий // Строит. и дор. машины. — 1991. — № 1. — С. 19–21.
4. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чецин Д. О. Обоснование принципиальных схем отклоняющих устройств в установках горизонтального направленного бурения скважин // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 106–117.
5. Пат. 156648 РФ. Устройство для изменения направления движения пневмоударной машины / Б. Н. Смоляницкий, Б. Б. Данилов, Н. Д. Сырямин, Д. О. Чецин // Опубл. в БИ. — 2015. — № 31.
6. Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д. и др. Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 218 с.
7. Белобородов В. Н., Изотов А. С., Исаков А. Л., Земцова А. Е. Исследование процесса разрушения тонкостенных труб коническими расширителями // ФТПРПИ. — 1997. — № 6. — С. 72–77.
8. Тупицын К. К. О процессе взаимодействия пневмопробойников с грунтом // ФТПРПИ. — 1980. — № 4. — С. 75–81.
9. Ткач Х. Б. О проходке скважин в грунте пневмопробойниками // ФТПРПИ. — 1991. — № 6. — С. 69–77.
10. Торская Е. В. Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 2014. — 46 с.
11. Прандтль Л. О твердости пластических материалов и сопротивлении резанию // Теория пластичности. — М.: Изд-во иностр. лит., 1948. — 220 с.
12. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. — М.: ГИФМЛ, 1960. — 121 с.
13. Соколовский В. В. Теория пластичности. — 3-е изд. — М.: Высш. шк., 1969. — 608 с.
14. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Наука, 1969. — 420 с.
15. Караулов А. М., Соловьев Ю. И. Предельное давление дорожной насыпи на слабое основание // Трансп. стр-во. — 1977. — № 7. — С. 42–43.
16. Караулов А. М., Соловьев Ю. И., Крайванов А. В. Модель упрочняющегося грунта и развитие пластических деформаций в основании // Исследование и расчеты оснований и фундаментов в нелинейной стадии работы. — Новочеркасск, 1986. — С. 25–35.

*Поступила в редакцию 27/IV 2017*