

ДВИЖЕНИЯ МАССИВА, КАК ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ СРЕДА ПО ТВЕРДЫМ СЛОЯМ ПРИ НАРУШЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА ОТ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

Самедов А.М. д.т.н., проф., Мани А.Д.Д., аспирант, Дзядевич В.В. –
студент НТУУ «КПИ», г. Киев, Паничаров Г.Х., к.т.н. Варненский
Свободный Университет г. Варна, Болгария.

Рассмотрены проблемы движения массива по твердым слоям, как вязкопластическая среда при нарушенной устойчивости склона от подземной выработки.

Предложены дифференциальные уравнения движения массива с изменением вязкости грунта и даны решения с помощью касательных напряжений, характеризующие вязкопластическое движение массива. Для решения были приняты тригонометрические и гиперболические функции, которые позволяли привести задачи к краевым задачам и решения удовлетворяли задачи Дирихле.

Ключевые слова: массив грунта, вязкопластическая среда, твердый пограничный слой, устойчивость склона, трещины, вода как смазывающая, поровое давление, вязкость грунта, напряжения, скорость деформации, мульды оседаний, подземная выработка.

Цель работы: Изучить влияние подземной выработки при добыче полезных ископаемых на устойчивость склонов, состоящих из вязкопластических массивов на твердом пограничном слое из горных пород.

The problems of traffic on an array of solid layers, as viscoplastic medium with impaired stability of the slope of the underground workings.

Proposed equations of motion of the array with a change in viscosity of the soil and give solutions with shear stress characterizing the viscoplastic movement of the array. Decisions have been made for trigonometric and hyperbolic functions, which allows us to reduce the problem to the solution of boundary value problems and satisfy the Dirichlet problem.

Keywords: *array of soil viscoplastic media, the solid boundary layer, the stability of the slope, cracks, water as lubricity, pore pressure, the viscosity of the soil, stress, strain rate, trough subsidence, underground development.*

Purpose: *To study the influence of the underground production of mining on the stability of slopes consisting of arrays of solid – viscoplastic boundary layer of rocks.*

Изложение результатов исследований:

Во многих литературных источниках рассматриваются проблемы оползневых явлений и защиты от них с помощью подпорных сооружений [1÷6]. Однако отсутствуют математические моделирования, которые позволяют прогнозировать процесс движения.

Рассмотрим массив склона состоящего из глинисто-гравийного отложения, которые при сдвигении и деформации земной поверхности от подземной выработки образовались мульды оседаний и трещины. Попадая в эти трещинах вода разрушала структуры на определенной глубине, расчленил массив на отдельные блоки и изменял влажности до твердого пограничного слоя. (рис.1)

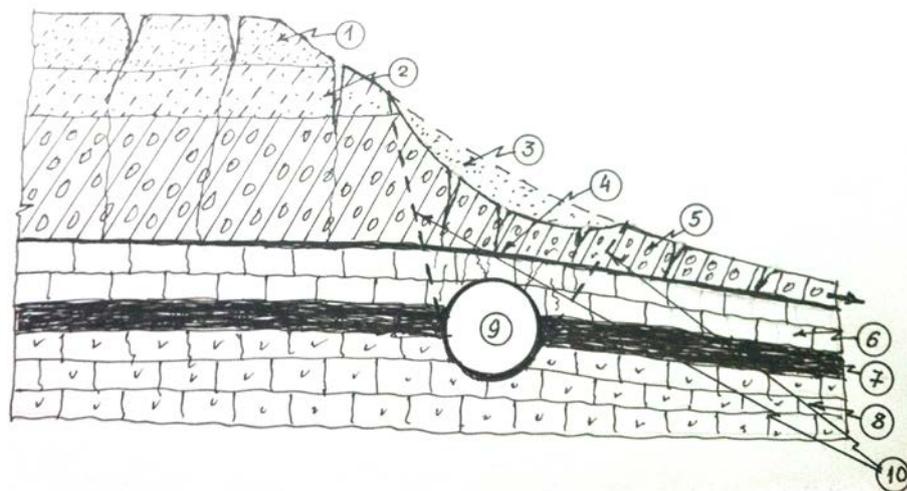


Рис. 1. Схема движения массива как вязко пластическая среда по твердым пограничным слоям.

1 – супесь, 2 – суглинок, 3 – мутьды оседаний, 4 – пограничный твердый слой, 5 – глинисто – гравийное отложение, 6 – твердый трещиноватый аргеллитовый слой, 7 – каменный уголь, 8 – твердые глинисто – сланцевые породы, 9 – подземная выработка при добыче угля, 10 – расслабленная зона массива от подземной выработки.

На контакте выветренного и выветренного пограничного слоя вода играла роль смазки. Импульсом, вызывающим начало движения массива могли быть различные факторы, в том числе, гидростатическое давление в трещинах. При этом блоки массива скользят по твёрдым пограничным слоям подобно твёрдым телам по слою смазки до тех пор, пока не происходит изменение уклона или изменение характера распределения влажности. Учитывая что после начала смещения массива затрудняется поступление атмосферной влаги в контактную зону, трещины в нижней части закрываются быстро и уровень насыщения поднимается вверх. Происходит общее увеличение влажности слоя, в том числе и за счет миграции влаги на смазке. При этом оползень либо останавливается, либо начинается **вязкопластическое** течение. По мере перемещения оползня в

приконтактной зоне вязкопластического массива с твердым пограничным слоем происходит разрушение структурной связи, повышается поровое давление, увеличивается вязкость и массив имеет скольжение по твердому слою.

Изменения вязкости массива по глубине может подчиняться по закону

$$v(z) = v_0 e^{-2\xi z}, \quad (1)$$

где $v(z)$ – изменения вязкости грунта, Па·с, по глубине z , м; v_0 – вязкости массива на контакте твердого пограничного слоя, Па·с; ξ – коэффициент, получаемый на основании наблюдений за режимом влажности и экспериментального определения зависимости v от влажности W .

При отсутствии экспериментальных данных вязкости для практических расчетов величины вязкости v для глинистых грунтов можно принимать в виде

$$lgv = 16,3 - 20,12W.$$

Изменение влажности по глубине массива приводит к изменению вязкости по глубине. Тогда движения сползающего массива будет зависеть от изменения вязкости массива по глубине и может быть выражено дифференциальными уравнениями следующего вида:

$$\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2\xi \frac{\partial V_x}{\partial z} = - \frac{X}{v(z)} \quad (2)$$

Если считать, что движения оползневого массива является установившемся, тогда дифференциальные уравнения будут сводится к следующему виду:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0, \quad (3)$$

где связь между напряжениями и скоростями деформаций (V_x) описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \left[\nu(z) + \frac{\tau_0}{H} \right] \frac{\partial V_x}{\partial y} ; \\ \tau_{xz} &= \left[\nu(z) + \frac{\tau_0}{H} \right] \frac{\partial V_x}{\partial z} .\end{aligned}\quad (4)$$

В формулах F_x – функция движения по оси x ;

X – неизвестная функция зависящая от вязкости.

Примем граничные условия:

$$V_x \Big|_{\substack{z=0, \\ y=0, \\ y=B}} = 0 \quad \frac{\partial V_x}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } z_0 = H - \frac{\tau_0 - \tau_x}{\gamma \sin \alpha};$$

B – отрезок по оси y ; T_x – сдвигающая сила, кН; γ – удельный вес массива, кН/м³; H – толщина слоя до пограничной зоны, м.

Решение нелинейных дифференциальных уравнений (2) с учетом (3) является математически сложным, поэтому принимаем условия, что компоненты касательных напряжений равны, т.е. $\tau_{xy} = \tau_{xz}$. Тогда будет:

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial V_x}{\partial z}$$

и

$$\tau_{xy} = \tau_{xz} = \begin{cases} \nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \\ \nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \end{cases} = \begin{cases} \nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \\ \nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (6)$$

В правом уравнении (6) $\frac{\partial V_x}{\partial y} < 0$ или $\frac{\partial V_x}{\partial z} > 0$; $\frac{\partial V_x}{\partial z} > 0$
 во втором $\frac{\partial V_x}{\partial y} < 0$ или $\frac{\partial V_x}{\partial z} < 0$ $\frac{\partial V_x}{\partial y} > 0$ $\frac{\partial V_x}{\partial z} > 0$
 В таком случае получим:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \nu(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = \nu(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} + \nu'(z) \frac{\partial V_x}{\partial z}. \quad (7)$$

Поскольку $\nu'(z) = -2\xi\nu(z)$, то

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = \nu(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2\xi\nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} \quad (8)$$

и уравнение (2) можно представить в виде:

$$\nu(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \nu(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2\xi\nu(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} = -F_x \quad (9)$$

или

$$\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2\xi \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{X}{\nu(z)}$$

Максимальную скорость течения вязкопластического массива определяем, решая следующее уравнение с учетом принятой вязкости грунта (1):

$$\frac{\partial^2 V_{\max}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_{\max}}{\partial z^2} - 2\xi \frac{\partial V_{\max}}{\partial z} = -\frac{X}{\nu(z)} = \frac{X}{\nu_0} e^{2\xi z}, \quad (10)$$

Принимаем начальную:

$V_{\max}(\mathbf{0}; z) = V_{\max}(\mathbf{b}; z) = \mathbf{0}$; в области $z \in [0, H]$; граничную условием

$$V_{max}(y;0) = 0; V_{max}(y;H) = 4V_{max}(by-y^2)/b^2; \text{ в области } y \in [0,b] \quad (11)$$

Решение задач (10) и (11) будем искать в виде ряда тригонометрических функций следующего характера:

$$V_{max}(y,z) = \sum_{m=0}^{\infty} f_m(z) \sin \frac{(2m+1)\pi y}{b} \quad (12)$$

где $f_m(z)$ – некоторые неизвестные функции подлежащие определению;

b – отрезок по оси y (см. рис.1)

Подставляя $V_{max}(y,z)$ из (12) в уравнение (10) и граничные условия (11), получаем краевую задачу следующего вида:

$$f_m''(z) - 2\xi f_m'(z) - \frac{(2m+1)^2 \pi^2}{b^2} f_m(z) = -\frac{4X}{(2m+1)\pi v_0} e^{2\xi z} \quad (13)$$

$$f_m(H) = \frac{32V_{max}}{(2m+1)^3 \pi^3} \quad (14)$$

Уравнение (13) имеет общее решение в виде гиперболических функций следующего характера:

$$f_m(z) = C_{1,m} e^{\xi} \operatorname{sh} qz + C_{2,m} e^{-\xi} \operatorname{sh} qz + \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 v_0} e^{2\xi z} \quad (15)$$

где $q = \sqrt{\xi^2 + \frac{(2m+1)^2 \pi^2}{b^2}}$; $C_{1,m}, C_{2,m}$ – интегральные постоянные.

Остается подобрать произвольные постоянные $C_{1,m}, C_{2,m}$ так, чтобы выполнялись краевые условия (14). Для этого $f_m(z)$ из (15) подставляем в (14) и получаем систему двух линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_{1,m} \cdot 0 + C_{2,m} \cdot 1 &= -\frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} \\ C_{1,m} e^{\xi H} shqH + C_{2,m} e^{H\xi} chqH &= \\ &= \frac{32V_{\max}}{(2m+1)^3 \pi^3} - \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} e^{2\xi H} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из первого уравнения системы (16) следует, что

$$C_{2,m} = -\frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} \quad (17)$$

Из второго уравнения (16) находим

$$C_{1,m} = \frac{1}{e^{\xi H} shqH} \left[\frac{32V_{\max}}{(2m+1)^3 \pi^3} - \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} e^{2\xi H} + \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} e^{\xi H} chqH \right] \quad (18)$$

В результате простых преобразований будем иметь:

$$C_{1,m} = \frac{32V_{\max} e^{-H\xi}}{(2m+1)^3 \pi^3 shqH} - \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} \cdot \frac{e^{H\xi} - chqH}{shqH} \quad (19)$$

$$C_{2,m} = \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} \quad (20)$$

Значения $C_{1,m}$, $C_{2,m}$ из (20) вносим в (15), и после некоторых упрощений приходим к окончательному выражению:

$$f_z(z) = \frac{32V_{\max} e^{\xi(z-H)}}{(2m+1)^3 \pi^3} \cdot \frac{shqz}{shqH} - \frac{4Xb^2}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu_0} \cdot \left[e^{-z\xi} \frac{e^{H\xi} shqz + shq(H-z)}{shqH} - 1 \right] \quad (21)$$

Теперь $f_m(z)$ подставляем в (12) и получаем решение задачи Дирихле

в виде:

$$V(y, z) = \frac{32}{\pi^3} V_{\max} e^{\xi(z-H)} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \cdot \frac{shqz}{shqH} \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y - \frac{4b^{2x}}{\pi^3 V} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \left[e^{-z\xi} \frac{t^{H\xi} shqz + shq(H-z)}{shqH} - 1 \right] \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y \quad (22)$$

Решение $V(x, y)$, построенное по формуле (22), обладает следующими свойствами:

а) функция $V(x, y)$ и ее первые производные по y и z непрерывны в замкнутом прямоугольнике, аппроксимирующем поперечное сечение оползня-потока: $0 \leq y \leq b$; $0 \leq z \leq H$;

б) решение $V(x, y)$ согласно принципу максимума принимает наибольшее значение на границе указанного прямоугольника, а именно в

точку $y = b/2$, $z = H$; в этой точке функция $\frac{4V_{\max}}{b^2}(by - y^2)$ принимает наибольшее значение V_{\max} .

Определим V_{\max} из условия равенства сил:

$$v \int_0^b \frac{dV}{dz} \Big|_{z=H} dy = T, \quad (23)$$

где T – составляющая по x веса единицы длины пригружающего слоя за вычетом сил трения под бортовым разделом между оползающим и неподвижным пограничным слоям.

Сначала вычислим $\frac{\partial V}{\partial z}$, дифференцирующая (22) по переменной z ; имеем:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V}{\partial z} = & \frac{32\xi}{\pi^3} V_{\max} e^{\xi(z-H)} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \cdot \frac{shqz}{shqH} \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y + \\
& + \frac{32}{\pi^3} V_{\max} e^{\xi(z-H)} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{q}{(2m+1)^3} \cdot \frac{chqz}{shqH} \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y - \\
& - \frac{8\xi b^2 X}{\pi^3 \nu} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \left[e^{\xi} \frac{e^{\xi H} shqz + shq(H-z)}{shqH} - 1 \right] \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y - \\
& - \frac{4\xi b^2 X}{\pi^3 \nu} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\xi e^{-\xi} (e^{\xi H} shqz + shq(H-z))}{shqH} + q e^{\xi} \frac{chqz + chq(H-z)}{shqH} \right] \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y
\end{aligned} \tag{24}$$

Внесем сюда $z = H$ и воспользуемся разложением:

$$(25) \quad \frac{4V_{\max}}{b^2} (by - y^2) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{32V_{\max}}{(2m+1)^3 \pi^3} \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y$$

В результате будем иметь:

$$\begin{aligned}
\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_{z=H} = & \frac{4\xi}{b^2} V_{\max} (by - y^2) + \frac{32}{\pi^3} V_{\max} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{qchqH}{(2m+1)^3} \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y + \\
& + \frac{4b^2 X}{\pi^3 \nu} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \left(qe^{-H\xi} \frac{e^{\xi H} chqH - 1}{shqH} - \xi \right) \cdot \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y
\end{aligned} \tag{26}$$

Заметим, что

$$\int_0^b (by - y^2) dy = \frac{b^3}{6} \int_0^b \sin \frac{(2m+1)\pi}{b} y dy = \frac{2b}{(2m+1)\pi} \tag{27}$$

Подставляя (26) в (27) и учитывая при интегрировании по y равенство (27), приходим к соотношению:

$$b v V_{\max} \left[\frac{2}{3} \xi + \frac{64}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{q \operatorname{cth} q H}{(2m+1)^4} \right] =$$

$$T + \frac{8b^3 X}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} \left[q \left(\operatorname{cth} q H - \frac{e^{-\xi H}}{\operatorname{sh} q H} \right) - \xi \right]$$

из которого получаем:

$$V_{\max} = \frac{T + \frac{8b^3 X}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} \left[q \left(\operatorname{cth} q H - \frac{e^{-\xi H}}{\operatorname{sh} q H} \right) - \xi \right]}{\frac{2}{3} b v \left[\xi + \frac{96}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{q \operatorname{cth} q H}{(2m+1)^4} \right]} \quad (28)$$

Учитывая, что $\xi H > 1$ и $qH > 1$ лучше пользоваться показательной функцией ξ с отрицательными значениями. Формула (28) может быть использована и для расчета скорости течения оползня-потока с постоянной по глубине вязкости v грунтового массива. В этом случае достаточно принять $\xi = 0$.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Мульды оседаний поверхностей склона, возникшие в результате подземной выработки при добыче полезных ископаемых является причиной образования трещин и накопления атмосферной влаги, которая расчленяет массив на отдельные блоки и вода играет роль смазки между блоками и твердой горной породой, как пограничный слой, и резко увеличивает вязкость массива, приводит массив к вязкопластическому течению.
2. Массив склона при изменении вязкости теряет устойчивость и имеет движения. Эти движения могут переходить к оползням – потокам или смещению поверхностных земляных масс в пределах глубины пограничного твердого слоя.

3. Составлены и решены дифференциальные уравнения движения массива с изменяющимися вязкостями массива, которые позволяют прогнозировать опасности движения массива.

Литература.

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя./ Г.Шлихтинг. – М.: Наука,1974. – 711с. – Библиогр.: с.707÷709. – 1000экз.

2. Маслов Н.Н. Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных сооружений. / Н.Н.Маслов. – М.: Энергия,1968. – 160с., - Библиогр.:к.157÷158 – 2000экз.

3. Самедов А.М. и др. Расчет на устойчивость борта карьера, сложенного сланцевыми горными породами. / А.М.Самедов, Е.А. Жданова.XIII Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika – Geotechnics, 2008, Materialy Naukowe. Gliwice – Ustron: (Польша), 2008, с.59÷69.

4. Самедов А.М. и др. О расчете подпорных сооружений в склонах, состоящих из намывных песков и лессовых просадочных пород при увлажнении горячей водой. Меж.ведомств. научно-техн. сборник «Строительное производство» - вып. 49, - 2008, с.3÷10.

5. Самедов А.М. и др. Взаимосвязь вязкопластического течения масс пород с инфильтрацией водного раствора в процессе закрепления оснований сооружениями. /А.М.Самедов, Е.В.Скобленко. – Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво», вип..18,2009. – с.27÷34.

6. Самедов А.М. и др. Моделирование гидродинамических воздействий с учетом деформаций земной поверхности, вызывающих смещение массива в склонах. /АМ Ссамедов, М. Куличь. – тая украинская научно – техническая конференция, механика грунтов и фундаментов строительства/ , Киев, 14÷16 ноября 2000г., стр. 153÷161.