

МЕХАНО-МАТЕМАТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА СВЛАЧИЩА-ПОТОЦИ

Н. Ганчева, Л. Хаджиков, Я. Иванов

Институт по механика и биомеханика, БАН, 1113 София

РЕЗЮМЕ. В работата се прави механично-математично моделиране на поведението на свлачища-потоци, образувани в изветрели глинести склонове. Моделирането е направено за подготвителния период, който включва процесите на изветряне, набъбване, слягане, овлажняване на глините. Представено е изменението на физичните и реологичните характеристики на глинестите почви в зависимост от тяхното състояние. Задачата за устойчивост на свлачищата-потоци се моделира чрез решаването на статически неопределената задача на база на конститутивното уравнение на Максвел-Гуревич-Рабинович. Основното предимство на това уравнение е, че отчита пространственото напрегнато състояние на почвения масив. С помощта на уравнението в Лагранжово-Ойлерова постановка се решават следните задачи: еластично решение за определяне на напрегнатото и деформираното състояние на почвения масив (служи за начално условие на нееластичната задача); изследване условията на граничното състояние, като освен параметрите φ и c се включват и реологичните параметри на почвения масив. Процесът на течение на свлачищата-потоци се изследва чрез модифицираните уравнения на Навие-Стокс (с променливи коефициенти). Получено е разпределението на скоростите на течение при различни гранични условия (кораво запъване, еластично запъване и приплъзване. Решаването на тези подзадачи се прави по методите на крайните разлики или крайните елементи.

Получените резултати дават възможност да се прогнозира поведението на свлачищата-потоци.

MECHANIC-MATHEMATICAL MODELING OF VISKO-PLASTIC LANDSLIDES

N. Gancheva, L. Hadjиков, Y. Ivanov

Institute of Mechanics and Biomechanics, BASc, 1113 Sofia

ABSTRACT. In this paper, we consider mechanic-mathematical modelling of the behaviour of viscous plastic landslides, which are formed in weathered clayey slopes.

The moulding of the preparatory stage includes processes: weathering, swelling, settlement, watering of clays. The change of physical and rheological parameters of clayey soils is presented depending on their state.

The slope stability problem is modelled by the Maxwell-Gurevich-Rabinovich constitutive equation. Consideration of three-dimensional soil stress state is equation main priority. The following problems are solved in Lagrange-Euler formulation with the help of above-mentioned equation: solve elastic solution to determine soil massif stress and strain state (initial condition for non-elastic problem); study the boundary state conditions including parameters φ and c , and soil rheological parameters; Navier-Stokes modified equation helps to investigate landslide flow process (with variable coefficients). Flow velocity distribution is obtained at different boundary conditions (rigid fixing, elastic fixing and skidding). Finite element or Fine difference methods solve these tasks.

Results afford opportunities to prognosticate behaviour of viscous plastic landslides.

Свлачища - потоци

Особености

Според Шадунц (1983) свлачище-поток се нарича преувлажнена маса от глинеста, пясъчливо-глинеста или чакълесто-глинеста почва, която се движи по наклонена повърхност и изработва свое русло. Тялото на свлачището не се ограничава от ясно определена хлъзгателна повърхнина – говори се за граница между движещ се слой и неподвижен масив. Образува се в наклонени терени, изградени от глинени със специфичен химичен и минерален състав, податливи на изветряване и неустойчиви при колебание на водното съдържание и температурата. При свлачищата движението на глинестата маса става във вид на вискозопластично течение или комбинация на течение със срязване.

В зависимост от конкретните инженерно-геоложки условия и фазата на развитието им свлачищата-потоци биват:

- затихващи - активно се формира зона на акумулиране, където почвата практически не се движи, а специ-

фиката на местните условия препятства развитието на свлачището в дълбочина.

- нарастващи - намират се в първа фаза на развитие, при тях няма зона на акумулиране.

Механизъм на образуване и развитие

При разкритие вследствие на естествени или техногенни процеси глините са подложени на интензивно изветряване. Основна роля за разрушаването им играят колебанията на водното съдържание и температурата. В следствие на това интензивно протича и процесът набъбване – слягане. Слягането е неравномерно по дебелината на пласта и предизвиква появата на системи от пукнатини. Многократно повтарящите се обемни деформации са причина за бавното пълзене на глините спрямо по-долулежащите пластове. Импулсът, даващ началото на движението, е повишаването на хидродинамичния градиент с местен и временен характер, вследствие повишаването на общата водопропускливост на почвата в местата с пукнатини.

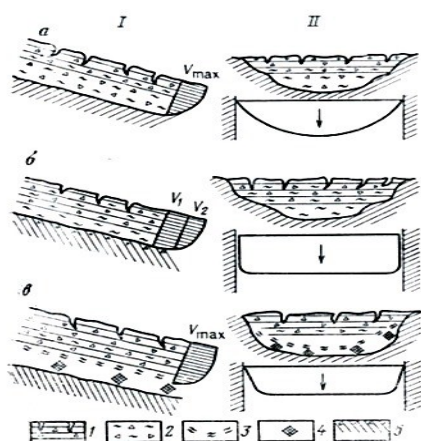
Анализ на свлачищния процес

Изчисляването на механизма на свлачището-поток е възможно при коректно математично описване на етапите на подготовка и движение. При оценка на устойчивостта на глинести склонове поведението на повърхностният пласт от различно изветрели почви може да се опише с три модела на механиката на непрекъснати среди: 1) модел на блоков строеж (почвите са раздробени на отделни блокове); 2) модел на зърнеста среда (ситнораздробен материал, създаващ опън при предаване на натоварването включително и от собствено тегло); 3) еластично-вискозен модел, отчитащ усилията на опън (почва, в която вследствие на физичното и химичното изветряване се променят силите на сцепление).

В различните стадии на процеса глинестите почви могат да се разглеждат като: еластични – в началната фаза, образуват се пукнатити на свиване и разтягане; вискозопластични – начален стадий на движение, когато главна роля играят структурната якост и началните съпротивления на преместване; вискозни – във формираните потоци при достатъчно големи наклони, когато може да се пренебрегне стойността на началното съпротивление. Често в различните части на едно свлачище поведението на почвите може да бъде като на еластични, вискозопластични или вискозни тела.

От значение за достоверната оценка на устойчивостта или скоростта на движение на свлачището е правилното отразяване на особеностите на геоложкия строеж на склоновете в изчислителната схема. По-долу ще разгледаме три често разпространени случая на развитие на свлачище-поток:

1. Ако свлачището-поток е формирано в елувиална почва в участък със стръмен наклон и несъгласно залягане на пластове, то се използва схема “твърдо запъване по контур” (по дъното и бордовете на руслото триенето е доста голямо и скоростта в началото на движението се изменя от нула до максимума V_{max} по парабола отдолу нагоре и от бордовете към средата на потока) (Фиг. 1а).



Фиг. 1. Инженерно-геоложки схеми за изчисление (I – надлъжен разрез, II – напречен разрез и схема на движението в план)

2. При съгласно залягане на пластове, на контакта на изветрелите с отдолулежащите скали се образува смазка от почва с нарушена структура и относително ниска вис-

козност. Възможно е ускорение на движението – “приплъзване”, тогава се разглежда схемата “без запъване по дъното и бордовете” (пренебрегва се триенето) (Фиг. 1б).

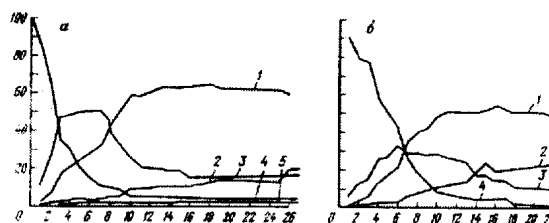
3. Свлачища-потоци формиран като вторични в тялото на древни или съвременни свлачища от други типове. При тях на дъното и при бордовете се образува граничен слой от разрушени глинести почви с ниска вискозност в сравнение с потока и се използва схемата “еластично прикрепяне” (Фиг. 1в).

За прогнозиране възникването на свлачища-потоци и изменението във времето на скоростта им е най-добре да се използва обобщен показател на якостните свойства, например вискозитет – представя се във вид на функция на много променливи и се следи във всички стадии на процеса.

Особености на глинестите почви

Изветряване

Шадунц (1983) представя резултати от лабораторни изследвания на изветряването на аргилити, подложени на облъчване, температурни, водни и химически въздействия. Фиг. 2 показва, че при цикличните натоварвания настъпва раздробяване на почвата и изменение на зърнометричния състав (размерите на частиците намаляват).



Фиг. 2. Изменение на фракциите в % в зависимост от броя на циклите при а) намокряне-изсушаване и б) намокряне-замръзване-размръзване-изсушаване на частици с диаметър 1) 5ч2мм, 2) 2ч1мм, 3) 1ч0,5мм, 4) >10мм, 5) 1ч0,5

За прогнозиране на скоростта на изветряване Шадунц (1983) следи изменението на зърнометричния състав и дебелината на повърхностния раздробен слой, резултатите са отразени в таблица 1. Данните от таблицата показват, че в повърхностния слой намаляват частиците със среден размер.

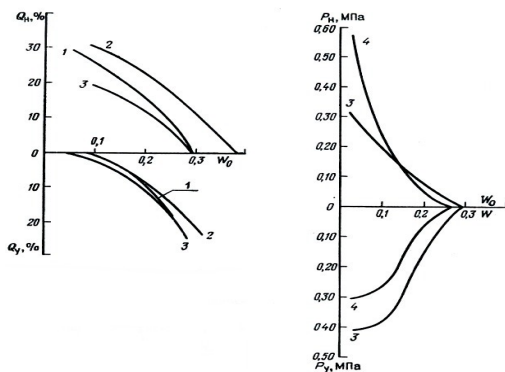
Таблица 1.

Изменение на зърнометричния състав и дебелината на повърхностния раздробен слой

брой цикли	дебелина на слоя, см	маса на слоя, кг	съдържание, %			
			>10 мм	10ч6 мм	5ч2 мм	2ч1 мм
			90	10	-	-
3	3	0,380	85	10	5	-
5	5	0,500	80	15	5	-
8	6	0,900	65	30	5	-
15	9	1,900	50	40	5	5
18	10	2,100	49	40	6	5
20	11	2,300	45	44	6	5
23	11,5	2,400	40	45	10	5
25	11,8	2,450	33	47	12	8

Набъбване - слягане

За изясняване ролята на набъбването – слягането в развитието на свлачищата-потоци е необходимо да се установят: изменението на влажността на почвата в естествени условия, развитието на системите пукнатини при слягане, количественото изменение на якостта в процеса на намокряне. Фиг. 3а отразява зависимостта на степента на набъбване и степента на слягане от началната влажност. Графиките на налягането от набъбване $p_H = f_1(W_0)$ и напрежението на слягане $p_Y = f_2(W)$, показани на фиг. 3б, позволяват да се определят напреженията при изменение на влажността. Появата на пукнатини изменя реалната картина и затова графиките могат да се използват за приблизителни оценки.



Фиг. 3. а) зависимост на степента на набъбване и степента на слягане от началната влажност W_0 б) графики на налягане от набъбване и напрежение на слягане; 1-вулканогенни глинни, 2-кватернерни глинни, 3-елувиални глинни, 4-алувиални глинни, 5-бентонитови глинни

При изменение на почвения обем от водното съдържание в естествени условия е необходимо да се оцени влиянието на температурата върху скоростта на деформация. Това влияе на кратковременните интензивни колебания на водното съдържание: топене на снегове, проливни дъждове и т.н.

Водонасищането на почвите по склоновете става в условия различни от тези на хоризонталната площадка. Възможно е случайно течение на водата, образуване на градиент и значителни колебания във водното съдържание. Пукнатините при слягане се образуват при по-малки градиенти, тъй като в почвата вече действат опънни усилия. Пукнатините се ориентират нормално към повърхността на откоса, а на определена дълбочина са почти паралелни на откоса. Една такава пукнатина може да даде началото на повърхнината на хлъзгане.

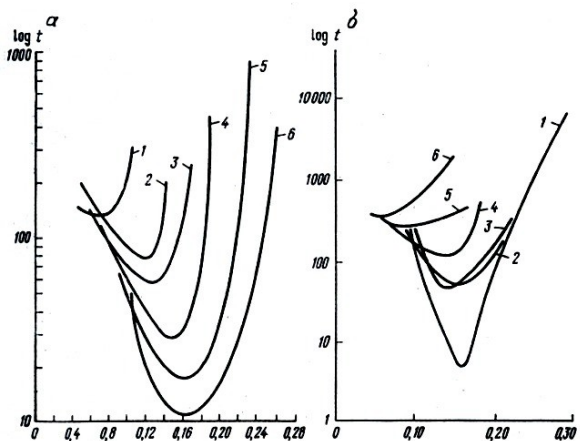
Водоустойчивост

Водоустойчивостта се дефинира като способност на почвите да запазват механичните си характеристики при взаимодействие с вода. Водата влияе чрез: суфозия - изнася почвени частици и почвата се разрушава, водонасищане – в резултат глинестите почви губят якост и свързаност. Намокрянето се свързва с процеса на набъбване – слягане, който деформира структурата и създава системи от пукнатини, те от своя страна подпомагат попадането на вода в почвения пласт и разрушаването на връзките между частиците и агрегатите.

Влиянието на началните плътност и водно съдържание върху времето на водонасищане е изследвано върху образци с нарушена структура, от свлачищен материал - фиг. 4. Следователно съществува определена стойност на водното съдържание за всяка плътност на почвата, при която намокрянето протича особено бързо.

Моделиране на свлачища – потоци

Направеният анализ показва, че описанието на поведението на свлачища – потоци може да стане като се изходи от примерните уравнения за еласто-пластична изотропна среда (уравнения на Рабинович). Те в Ойлерова координатна система (x, y, z, t) имат вида:



Фиг. 4. Зависимост на времето за водонасищане $\log t$ от началното водно съдържание W . а) льосовидна пясъчлива глина, б) глина от свлачище; за плътности 1-1,8; 2-1,7; 3-1,6; 4-1,4; 5-1,3 т/м³

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho \Phi_x = \rho \frac{dV_x}{dt} \quad (1)$$

(x, y, z)

$$V_x = \frac{du}{dt}; V_y = \frac{dv}{dt}; V_z = \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

$$\theta_e = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz} + 3\alpha(\vartheta - \vartheta_0) = \frac{\rho}{k} + 3\alpha(\vartheta - \vartheta_0) \quad (3)$$

Тук Φ - масова сила $\Phi_x = g \sin \beta$; $\Phi_y = g \cos \beta$ ρ - плътност; θ_e - относително изменение на обема; α - коефициент на линейно разширение; ϑ и ϑ_0 - текуща и начална температура; ρ - средно напрежение $3\rho = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$.

Към уравненията (1) и (3) трябва да се прибавят и физическите уравнения, които имат вида:

$$\bar{V}_{\epsilon_i} = \frac{d\epsilon_i}{dt}; i = (1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

$$\bar{V}_{\epsilon_1} = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \bar{V}_{\epsilon_2} = \frac{\partial V_y}{\partial y}; \bar{V}_{\epsilon_3} = \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

$$2\bar{V}_{\epsilon_4} = \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial y}; 2\bar{V}_{\epsilon_5} = \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z};$$

$$2\bar{V}_{\epsilon_6} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \quad (5)$$

Тогава пълната деформация ще има вида:

$$\bar{\epsilon}_i = \bar{\epsilon}_i + \bar{\epsilon}_i^0 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0) \delta_i; i = (1,2,\dots,6) \quad (6)$$

А за пълната скорост на деформация се получава изразът:

$$\frac{d\bar{\epsilon}_i}{dt} = \frac{d\bar{\epsilon}_i}{dt} + \frac{d\bar{\epsilon}_i^0}{dt} + \alpha \frac{d\vartheta}{dt} \delta_i; i = (1,2,\dots,6) \quad (7)$$

тук $\bar{\epsilon}_i$ - еластична деформация; $\bar{\epsilon}_i^0$ - остатъчна деформация, като

$$e_i - \frac{1}{3} \theta_e \delta_i = \frac{(\sigma_i - p \delta_i)}{2G}; i = (1,2,\dots,6) \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{\epsilon}_i^0}{dt} = \frac{3}{2} (\sigma_i - p \delta_i) \frac{1}{\eta^0}; i = (1,2,\dots,6) \quad (9)$$

$$\eta^0 = \eta_0^0 \exp \left\{ - \frac{1}{m^0} \left[\gamma^0 \rho + \left| \frac{3}{2} (\sigma_r - p) \right|_{max} \right] \right\} \quad (10)$$

тук η^0 - вискозитет на средата; η_0^0 - начален вискозитет; γ^0 - обемен коефициент за остатъчна деформация; m^0 - логаритмичен модул на скоростта за остатъчна деформация; σ_r - главни напрежения.

И накрая за свързаните задачи е необходим и законът на Фурие:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{2}{c_v} K \vartheta \frac{\partial \theta}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\lambda_{\vartheta}}{c_v \rho} \right) + \frac{1}{c_v \rho} W_{\vartheta} \quad (11)$$

λ_{ϑ} - коефициент на топлопроводност; W_{ϑ} - производителност на топлина от вътрешни източници; K - модул на обемно свиване; c_v - коефициент на топлемост (топлопоглъщане).

При пренебрегване на еластичната деформация може да се приеме $\vartheta = const$. Тогава поведението на свлачището-поток се описва с уравнението на Навие-Стокс за ненютонова среда:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \Phi_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{3\rho} \left\{ \eta^0 \Delta V_i - 2\epsilon_{ij} \frac{\partial \eta^0}{\partial j} \right\} \quad (12)$$

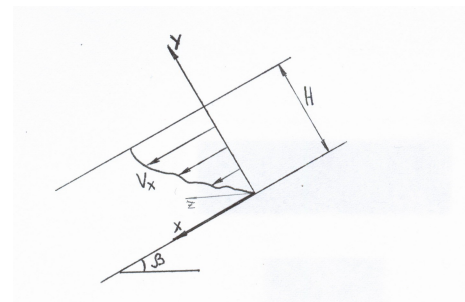
$i, j = x, y, z$

$$\Delta V_i = \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} - \text{Лапласиан.}$$

Към уравнения (12) трябва да се прибавят началните и граничните условия на задачата. Поради това, че задачата е нелинейна, тя може да се реши само числено – по метода на крайните разлики или по метода на крайните елементи.

Опростени схеми на решения

Изследвания проблем е многофакторен, което налага използването на опростени решения. По-долу ще направим оценка на влиянието на най-важния фактор - влажността W върху разпределението на скоростта на свличане V_x по дебелината на пласта, а така също какви са условията за протичането на пласта.



Фиг. 5. Схема на скоростта на свличане в наклонения пласт

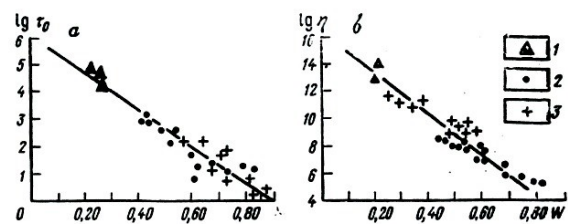
Изхождайки от общите уравнения, модифицираното уравнение на Бингам може да се представи във вида:

$$\tau = \tau_0 + \frac{\eta^0}{\exp \left(\frac{\tau - \tau_0}{m^0} \right)} \frac{dV_x}{dy} + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (13)$$

където $\tau = \gamma_d (1 + W) \sin \beta (H - y)$; $\eta_0^0 = \frac{\eta_0^0(0)}{e^{a_{\eta^0} W}}$

$\sigma_n = \gamma_d (1 + W) \cos \beta (H - y)$; $\tau_0 = \frac{\tau_0^0}{e^{a_{\tau_0} W}}$, γ_d - обемно тегло на скелета.

Параметрите τ_0^0 ; $\eta_0^0(0)$; a_{τ_0} и a_{η^0} се определят от опитни криви $\tau_0 = \tau_0(W)$ и $\eta_0^0 = \eta_0^0(W)$, като тези показани на фиг. 6 Шадунц (1983).



Фиг. 6. Зависимост на а) началното съпротивление на преместване τ_0 , б) динамичният вискозитет η^0 от водното съдържание W . Данни на 1 – Маслов, 2 – Шадунц, 3 – Мостков

Изхождайки от (13) и приемайки $m_G^0 \rightarrow \infty$ получаваме:

$$\tau - \tau_0 - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi = \eta_0^0 \frac{dV}{dy} \quad (14)$$

или
$$dV = \frac{\tau - \tau_0 - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi}{\eta_0^0} dy \quad (15)$$

или
$$dV = \frac{1}{\eta_0^0} [\gamma_d (H - y + HW - yW) (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi) - \tau_0] dy$$

при $W = \text{const}$. Откъдето при $V = 0$ $y = 0$ $c = 0$ получаваме:

$$V = \frac{1}{\eta_0^0} \left[\gamma_d (1 + W) (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi) \left(Hy - \frac{y^2}{2} \right) - \tau_0 y \right] \quad (16)$$

при $y = H$

$$V_H = \frac{H}{\eta_0^0} \left[\frac{H}{2} \gamma_d (1 + W) (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi) - \delta_0 \right]$$

От условието $V_H = 0$ получаваме следното уравнение за определянето на критичната влажност

$$e^{a_{\tau_0} W_{кр}} (1 + W_{кр}) \geq \frac{\tau_0^0}{\frac{H}{2} \gamma_d (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi)} \quad (17)$$

Например за данните от фиг. 6 обобщени в таблица 2 получаваме $W_{кр} = 0,38$, при параметри: $a_{\tau_0} = 15,545$, $\tau_0^0 = 1,26 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, $\beta = 15^\circ$, $\varphi = 12^\circ$, $H = 5 \text{ m}$

$$\gamma_d = 1,9 \frac{t}{m^3} = 18632,45 \frac{\text{Pa}}{m}$$

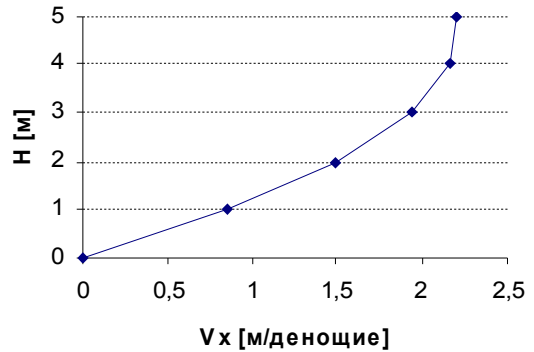
Таблица 2.

Зависимост на началното съпротивление на преместване и динамичният вискозитет от водното съдържание

W	$\eta_0^0(0) \text{ Pa.s}$	$\tau_0^0 \text{ Pa}$
0	$2 \cdot 10^{16}$	$1,26 \cdot 10^6$
0,05	$3,5 \cdot 10^{15}$	$5,79 \cdot 10^5$
0,10	$6,3 \cdot 10^{14}$	$2,66 \cdot 10^5$
0,15	$3,16 \cdot 10^{14}$	$1,22 \cdot 10^5$
0,20	$2 \cdot 10^{13}$	$5,62 \cdot 10^4$
0,25	$3,5 \cdot 10^{12}$	$2,59 \cdot 10^4$
0,30	$6,3 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^4$
0,35	$1,1 \cdot 10^{11}$	$5,48 \cdot 10^3$
0,40	$2 \cdot 10^{10}$	$2,51 \cdot 10^3$
0,45	$3,5 \cdot 10^9$	$1,15 \cdot 10^3$
0,5	$6,3 \cdot 10^8$	$5,3 \cdot 10^2$
0,55	$1,1 \cdot 10^8$	$2,44 \cdot 10^2$
0,60	$2 \cdot 10^7$	$1,12 \cdot 10^2$

0,65	$3,5 \cdot 10^6$	5,41.10
0,70	$6,3 \cdot 10^5$	2,37.10
0,75	$1,1 \cdot 10^5$	1,09.10
0,80	$2 \cdot 10^4$	5,0

Характерът на разпределението на скоростите по височината на пласта е показано на фиг. 7 за $W = 0,5$, $a_{\eta_0^0} = 34,54$, $\eta_0^0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ Pa.s}$.



Фиг. 7. Разпределение на скоростта на свличане V_x по височина на пласта H

По този начин бе показана възможността за използването на водното съдържание като основен параметър за определяне поведението на свлачища – потоци. По аналогичен начин може да се изследва поведението при други закони на водното съдържание по височина на пласта, като например:

$$W = a_W y + W_0; W = a_W y^2 + W_0.$$

Литература

Абелев, М. Ю. 1973. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. М. Стройиздат.
 Артюшков, Л. С. 1997. Динамика неньютоновских жидкостей. Санкт-Петербург. СПбГМТУ.
 Бугров А., Р. Нарбут, В. Спидин. 1987. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Ленинград. Стройиздат.
 Гуревич Г. И. 1974. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М. Наука.
 Маслов, Н.Н. 1955. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М. ГЭИ.
 Месчан, С. Р. 1992. Реологические процессы в глинистых грунтах с учетом особых воздействий. Ереван. Айастан.
 Огибалов, П., А. Мирзаджанзаде. 1970. Нестационарные движения вязко-пластичных сред. М. Издательство Московского Университета.
 Рабинович, А.Л. 1970. Введение в механику армированных полимеров. Наука.
 Селевые потоки и горные русловые процессы. 1968. Сборник докладов на X всесоюзной селевой конференции. Ереван.

- Тер-Мартirosян, З. Г., П. Поршин, А. Власов, М. Мнушкин. 2002. *Отчет инженерно-геологические изискания для Канатно-кресельной дороге на склоне Воробьевых гор г. Москве.*
- Тер-Степанян, Г. И. 1973. Некоторые особенности механизма земляных потоков. *Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них* (труды международного симпозиума). 117-132.
- Тихвинский, И. О. 1968. *Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов.* М. Наука.
- Хаджиков, Л., Я. Иванов, Н. Ганчева. 2001. Влияние на скоростта на деформацията и натоварването на върху поведението на някои видове скали и почви. – *Строителство*, 2, 21-29.
- Шадунц, К.Ш. 1983. *Оползни – потоки.* М. Недра.
- Usha. R., B. Uma. 2003. Weakly Nonlinear Stability Analysis of Condensate / Evaporating Power-Low Liquid Film Down an Inclined Plane. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 70. 915-921.

Препоръчана за публикуване от
катедра "Хидрогеология и инженерна геология", ГПФ