



Doi: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v27i1.3>

UDC 624.131.37, 624.131.537



БИЛЕУШ А.И.

Д-р техн. наук, проф., Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: Igmiggs@ukr.net, тел.: + 38 (066) 794 37 84, ORCID: 0000-0002-7292-999X



ФРИДРИХСОН В.Л.

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: Igmiggs@ukr.net, тел.: + 38 (067) 450 22 95, ORCID: 0000-0003-4001-8646



КРИВОНОГ А.И.

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: Igmiggs@ukr.net, тел.: + 38 (097) 674 80 47, ORCID: 0000-0002-8435-3393



КРИВОНОГ В.В.

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: Igmiggs@ukr.net, тел.: + 38 (096) 869 26 53, ORCID: 0000-0002-3788-6947

НАРУШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАЗЖИЖЕННЫХ ГРУНТОВ

АННОТАЦИЯ

На основании данных литературных источников и исследований авторов, выполнен анализ причин и условий, при которых разжижение линзы или прослойки слабых водонасыщенных грунтов приводит к нарушению устойчивости склонов. В зависимости от своего расположения, линзы разжиженного грунта уплотняются под весом вышележащих грунтов или приходят в движение, что приводит к развитию оползней. Разрушение структуры водонасыщенного грунта происходит в зоне действия критических касательных напряжений и переводит последний из твердого состояния в состояние смеси «грунт–вода», которая имеет все характерные свойства неньютоновской жидкости. В последующем, основная деформация образуется за счет пластического скольжения, которое происходит без изменения объема грунта. Пластическое скольжение продолжает разрушать структуру и приводит к нарушению сплошности грунта.

Режим текучести наступает, когда напряжение сдвига превышает силы трения между частицами

грунта и структурную прочность τ_0 . Характерной особенностью неньютоновских жидкостей является переменная кажущаяся вязкость, она зависит от температуры, давления, скорости сдвига, продолжительности действия нагрузки и других факторов, но в основном – от скорости сдвига.

Проанализированы физические основы нарушения устойчивости склонов при разжижении грунтов в отдельных линзах, в зависимости от их расположения в массиве склона.

Приведена уточненная зависимость для определения максимально возможной скорости смещения оползневых масс, перемещающихся по наклонной линзе разжиженных грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вязкость грунтов, структура грунтов, разжижение, устойчивость склона, сдвиг, оползень

ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ СХИЛІВ ПІД ДІЄЮ РОЗРІДЖЕНИХ ГРУНТІВ АННОТАЦІЯ

На підставі даних літературних джерел і досліджень авторів, виконано аналіз причин і умов,



при яких розрідження лінзи або прошарку слабких водонасичених ґрунтів призводить до порушення стійкості схилів. Залежно від свого розташування, лінзи розрідженого ґрунту ущільнюються під вагою вище розташованих ґрунтів або приходять в рух, що призводить до розвитку зсувів. Руйнування структури водонасиченого ґрунту відбувається в зоні дії критичних дотичних напружень і переводить останній з твердого стану в стан суміші «ґрунт-вода», яка має всі характерні властивості неньютонівської рідини. В подальшому, основна деформація утворюється за рахунок пластичного ковзання, яке відбувається без зміни об'єму ґрунту. Пластичне ковзання продовжує руйнувати структуру і призводить до порушення суцільності ґрунту.

Режим плинності настає, коли напруга зсуву перевищує сили тертя, між частками ґрунту і структурну міцність τ_0 . Характерною особливістю неньютонівської рідини є змінна уявна в'язкість, вона залежить від температури, тиску, швидкості зсуву, тривалості дії навантаження та інших факторів, але переважно – від швидкості зсуву.

Проаналізовано фізичні основи порушення стійкості схилів при розрідженні ґрунтів в окремих лінзах, залежно від їх розташування в масиві схилу.

Наведено уточнену залежність для визначення максимально можливої швидкості зсуву зсувних мас, що переміщуються по похилій лінзі розріджених ґрунтів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: в'язкість ґрунтів, структура ґрунтів, розрідження, стійкість схилу, зрушення, зсув

VIOLATION OF SLOPE STABILITY UNDER THE INFLUENCE OF SOIL LIQUEFACTION

ABSTRACT

Based on the data of literary sources and research of the authors, an analysis of the reasons and conditions under which the liquefaction of a lens or an interlayer of weak water-saturated soils leads to a violation of the stability of slopes has been carried out. Depending on their location, the lenses of the liquefied soil are compacted under the weight of the overlying soils or come into motion, which leads to the development of landslides. The destruction of the structure of water-saturated soil occurs in the zone of action of critical tangential stresses and transfers the latter from a solid state to a state of a "soil-water" mixture, which has all the characteristic properties of a non-Newtonian liquid. Subsequently, the main deformation is formed due to plastic sliding, which occurs without changing the volume of the soil. Plastic sliding continues to destroy the structure and leads to disruption of the soil continuity.

The flow regime occurs when the shear stress exceeds the friction forces between soil particles and the structural strength τ_0 . A characteristic feature

of non-Newtonian fluids is a variable apparent viscosity, it depends on temperature, pressure, shear rate, duration of the load and other factors, but most often on the shear rate.

The physical foundations of the disturbance of slope stability during soil liquefaction in individual lenses are analyzed, depending on their location in the slope massif.

A refined dependence is given to determine the maximum possible displacement rate of landslide masses moving along an inclined lens of liquefied soils.

KEYWORDS: soil viscosity, soil structure, liquefaction, slope stability, shear, land-slide

ВВЕДЕНИЕ

Крупные землетрясения, произошедшие во многих странах мира в последние годы, вызвали многочисленные обрушения склонов, зданий и сооружений и сопровождалась человеческими жертвами [1]. Анализ причин разрушения сооружений показал, что главной из них является недостаточная изученность поведения ґрунтов во время землетрясений, поэтому актуальным является вопрос о возникновении деформации ґрунтов вследствие их разжижения и развития оползней. Быстрое развитие строительной практики требует знания условий, при которых ґрунты в условиях сейсмического или других воздействий теряют несущую способность. Многими исследователями, в последние годы, были получены и опубликованы многочисленные данные о работе ґрунтов при динамических нагрузках [2].

Развитие технологий позволило получить новые данные для проектирования фундаментов и земляных сооружений, с учетом влияния нагрузок, вызванных землетрясениями. Тем не менее, разнообразие и противоречивость полученных материалов препятствует их обобщению. Данная статья анализирует один из аспектов механизма разжижения и текучести ґрунтов, который приводит к нарушению устойчивости склонов. Авторами установлено, что при сейсмических воздействиях часть ґрунтов временно теряет прочность на сдвиг, и такие ґрунты ведут себя скорее как вязкая жидкость, чем как твердое тело, при этом частицы водонасыщенного ґрунта, при перемещении в отдельном слое, приходят в движение, образуя оползень [3]. Проведен анализ возможных механизмов нарушения устойчивости склона при разжижении лінзы ґрунтов. Приведена зависимость времени уплотнения лінзы и скорости смещения оползня, при наклонном положении лінзы в склоне.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованиям вопросов работы песчаных и глинистых ґрунтов, при сейсмических нагрузках,



посвящена книга профессора К. Ишихары [2], в которой приведены данные испытаний грунтов на динамическую нагрузку в полевых и лабораторных условиях. Описан механизм разжижения и текучести песчаных грунтов, при землетрясениях. Приведены примеры испытаний грунтов на динамическую нагрузку с применением современных методик и аппаратуры. Рассмотрены вопросы прочности глин и сопротивления песков разжижению, изложен механизм разжижения грунта и методика оценки потенциала разжижения на строительной площадке.

Профессор Arnold Verruijt в работе [4] представил основные решения задач динамики грунтов. Большинство задач решено в аналитическом виде. При выводе решений уравнений использован метод интегрального преобразования. Для многих задач, которые не могут быть решены аналитически, даны компьютерные программы, числовые данные и графики. Анализируются предельные состояния динамических задач. Анализируя полученные решения, автор приходит к выводу, что для большинства задач водонасыщенный грунт, при динамических воздействиях, может рассматриваться как среда, в которой твердые частицы и жидкость движутся и деформируются вместе.

Соавтором данной статьи, получены решения для определения скорости смещения оползневых масс на склонах водохранилищ при постоянной вязкости глинистого грунта отдельного слоя [5].

В Институте гидромеханики, проведены исследования вязкости грунтов на приборе кольцевого сдвига. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что при разрушении своей структуры водонасыщенный грунт в зоне сдвига переходит из твердого состояния в состояние смеси «грунт-вода», которая имеет все характерные свойства неньютоновской жидкости. Смесь «грунт-вода» имеет переменную вязкость, которая зависит от плотности, гранулометрического состава грунта, величины вертикального давления на него, градиента скорости и продолжительности сдвига (рис. 1, 2). Режим текучести наступает после момента, когда напряжение сдвига превышает силы трения между частицами грунта и структурную прочность τ_0 . Характерной особенностью неньютоновских жидкостей является переменная кажущаяся вязкость. Она зависит от температуры, давления, скорости сдвига, продолжительности действия нагрузки и других факторов, но чаще всего – от скорости сдвига. В неньютоновской жидкости, в отличие от ньютоновской, соотношение между напряжением сдвига и скоростью сдвига не постоянно [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы – изучение причин и факторов, влияющих на изменение структуры водонасы-

щенных грунтов при их разжижении в отдельных слоях или линзах и приводящих к нарушениям устойчивости склонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Основное различие между твердым и жидким состоянием грунта состоит в том, что в твердом

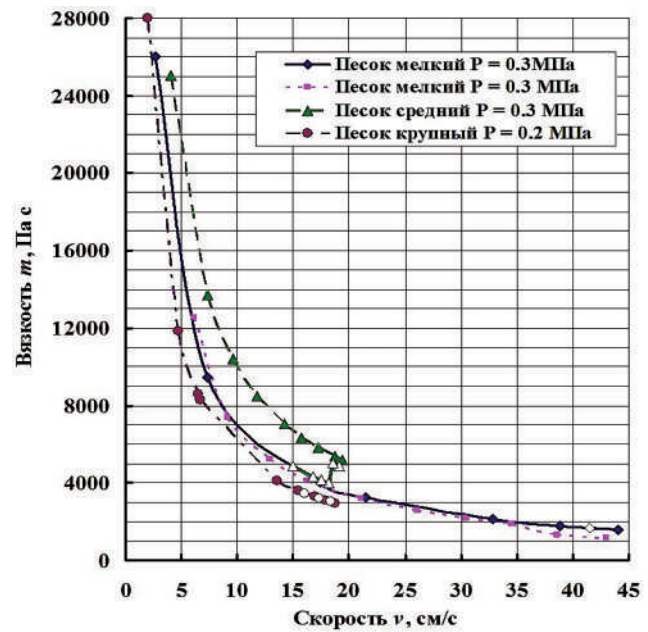


Рисунок 1 – Зависимость вязкости песчаных грунтов от скорости сдвига

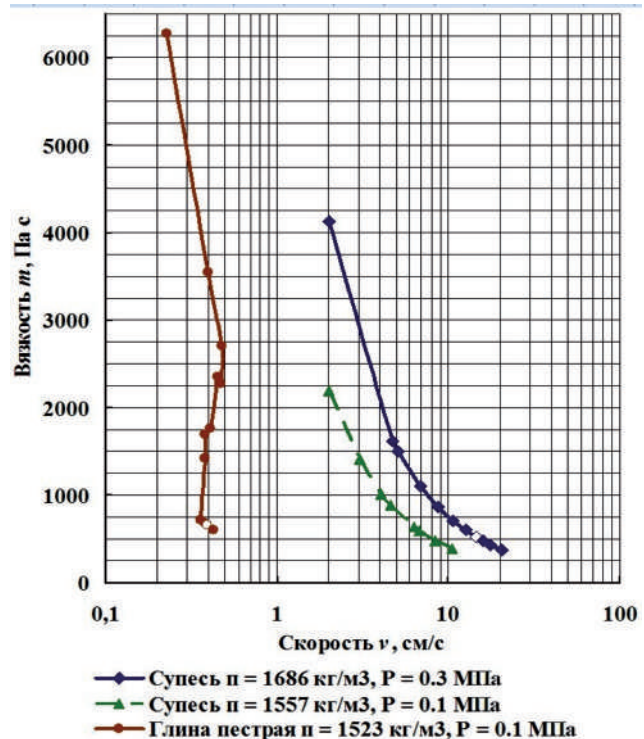


Рисунок 2 – Зависимость вязкости супеси и глины от скорости сдвига



состоянии грунт оказывает сопротивление деформации при воздействии внешних сил, тогда как в жидком состоянии он не обладает этим свойством. Динамические или статические нагрузки, которые выдерживает грунт без разрушения, определяются пределом его структурной прочности τ_0 . Разрушение грунта начинается в зоне действия повышенных отрицательных касательных напряжений (рис. 3). Если касательные напряжения, в определенной части массива водонасыщенного грунта, близки к пределу прочности, то дополнительные силовые воздействия на грунт могут их превысить.

Такие воздействия приведут к разрушению структуры грунта и будут способствовать его разжижению. Например, волны сжатия и сдвиговые волны от импульсной нагрузки, исходящие из нагруженной полосы, например, дороги, увеличивают сдвигающие напряжения в грунте (рис. 4), [4].

Всплеск величин касательных напряжений, в зоне их концентрации приведет к разрушению структурного каркаса грунта. В последующем, основная деформация образуется за счет пластического скольжения, которое происходит без изменения объема грунта. Пластическое скольже-

ние продолжает разрушать структуру и приводит к нарушению сплошности грунта. В водонасыщенных или переувлажненных грунтах в таких зонах происходит его разжижение.

Рассмотрим далее как ведут себя разжиженные грунты в отдельной линзе в зависимости от ее расположения:

- если слой разжиженных грунтов находится в массиве, давление вышележащего грунта полностью передается на неньютоновскую жидкость и далее жидкостью передается во все стороны;
- если разжиженные грунты в линзе расположены вдали от поверхности склона, возросшее, за счет веса расположенных выше грунтов, давление не может вытолкнуть грунты на поверхность склона. В этом случае, происходит уплотнение разжиженного грунта во времени. Под давлением веса вышележащих грунтов в процессе отжатия воды поровое давление в пределах линзы снижается, а в скелете увеличивается, что приводит к нарастанию осадки;
- если слой грунта находится под действием только сжимающих напряжений, то в последующем происходит его упрочнение (рис. 5). Время уплотнения в значительной степени зависит от коэффициента фильтрации грунтов разжиженного слоя и грунтов, прилегающих к нему. Процесс тиксотропного уплотнения грунта приводит к уменьшению давления в линзе разжиженных грунтов. В последующем происходит консолидация, и осадка медленно продолжается. Осадка прекращается, когда закончится уплотнение грунта в пределах линзы.

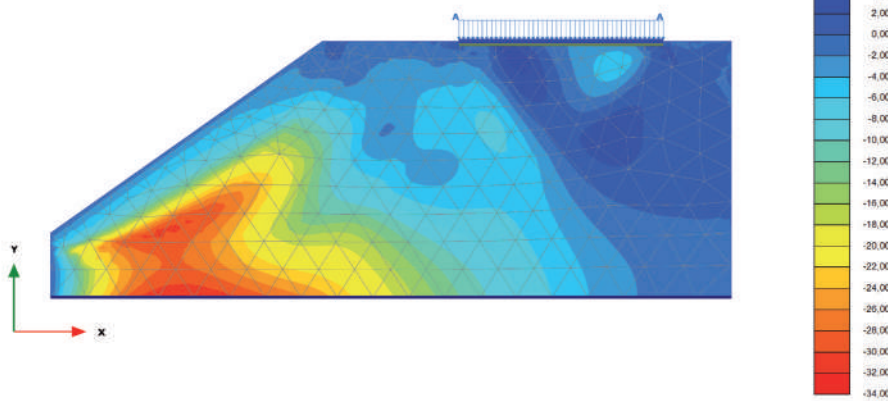


Рисунок 3 – Концентрация касательных напряжений вблизи склона

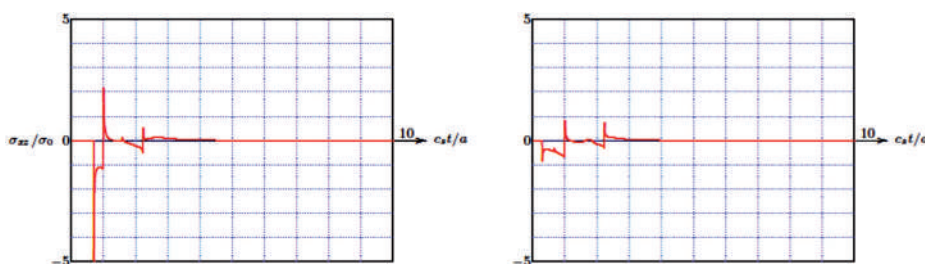


Рисунок 4 – Сдвигающие напряжения в точке $x = a, z = a$, как функция времени для двух значений коэффициента Пуассона: $\nu = 0$ и $\nu = 0.45$

Время рассеивания парового давления воды в линзе под весом вышележащих грунтов для расчетной схемы, приведенной на рис. 5, получим из выражения:

$$t = \left[\frac{1}{\beta(1+0.05S)} + Q \right] \frac{h}{kPn}, \quad (1)$$

где h – высота уровня грунтовых вод над разжиженной линзой грунта, P – давление на разжиженный грунт от масс грунтов, расположенных выше, k – коэффициент филь-

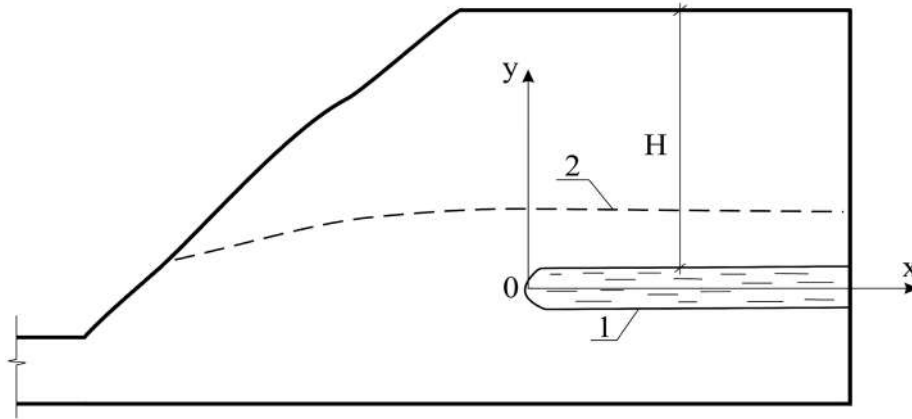


Рисунок 5 – Горизонтальное положение линзы разжиженных грунтов в склоне:

1 – линза разжиженных грунтов; 2 – кривая уровня подземных вод

менем вязкость разжиженных грунтов в линзе уменьшается, скорость смещения возрастает и образовавшийся оползень может перейти в селевой поток.

Максимально возможную скорость смещения оползневых масс U , перемещающихся по наклонной линзе разжиженных грунтов (рис. 7), можно вычислить по следующей уточненной зависимости [5]:

$$U = \frac{P(a-1)h \sin \alpha}{2\eta l \left(2 \ln a - 3 \frac{a-1}{a+1} \right)}, \quad (3)$$

трации грунтов, расположенных выше линзы, n – пористость грунтов, расположенных выше линзы, S – объем газа, растворенного в единице объема воды, m^3/m^3 , Q – объем воды в линзе при давлении P , β – коэффициент упругого расширения чистой воды, определяемый по (2), [7]

$$\beta(1+0.05S) = -\frac{1}{Q} - \frac{\partial Q}{\partial p} \quad (2)$$

Однако время уплотнения конечно. Если линза будет находиться ближе к склону, то за это время может произойти нарушение устойчивости.

При горизонтальном положении линзы разжиженных грунтов, расположенной вблизи поверхности склона, механизм развития оползневой смещения иной. На момент разжижения грунта давление в линзе резко возрастает за счет веса расположенных выше грунтов. Это давление выталкивает на склон часть грунта в его основании, что лишает опоры грунты, расположенные выше по склону (рис. 6).

При разжижении линзы грунтов, находящейся на наклонной поверхности коренных пород, оползневое смещение захватывает всю линзу. При действии в слое касательных напряжений вязкая неньютоновская жидкость приходит в движение. По линзе разжиженного грунта, расположенной наклонно, находящиеся выше грунты начинают смещаться и образуются оползень (рис. 7). Со вре-

где P – давление на разжиженный грунт от масс грунтов, расположенных выше, h – толщина линзы разжиженного грунта, α – угол наклона линзы к горизонту, η – минимальный коэффициент вязкости разжиженного грунта (рис. 1), l – длина линзы по склону, a – отношение минимальной толщины линзы к максимальной.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ АПРОБАЦИЯ

Для расчетов течений неньютоновской жидкости используют тензор напряжений $\sigma_{i,k}$ для ньютоновской несжимаемой жидкости в виде [6]:

$$\sigma'_{i,k} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

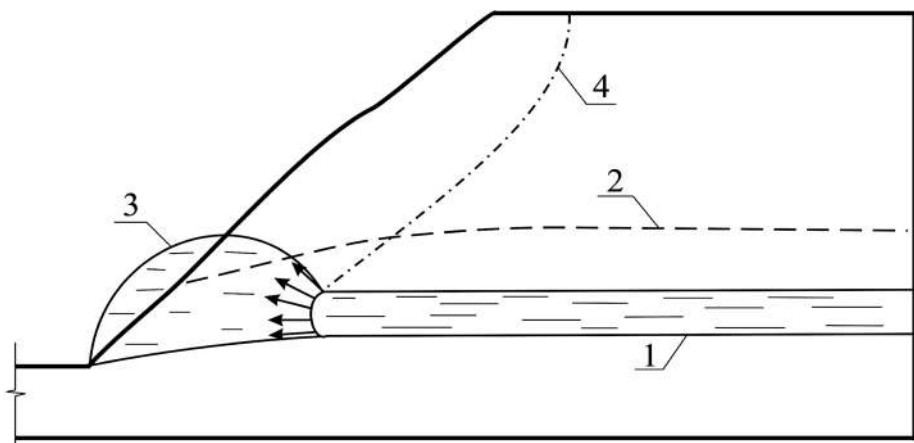


Рисунок 6 – Горизонтальное положение линзы разжиженных грунтов в склоне:

1 – линза разжиженных грунтов; 2 – кривая уровня подземных вод; 3 – выдавленный на склон грунт; 4 – поверхность скольжения

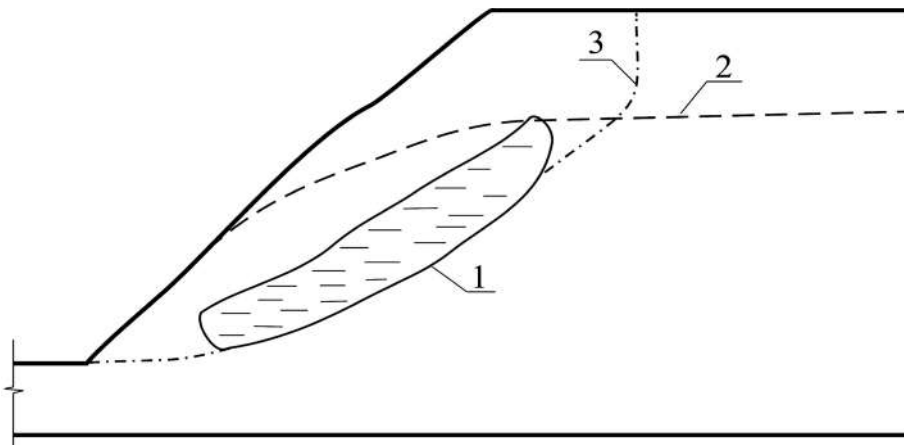


Рисунок 7 – Наклонное положение линзы разжиженных грунтов в склоне:

1 – линза разжиженных грунтов; 2 – кривая уровня подземных вод;
3 – поверхность скольжения

сти крови от скорости сдвига, которые попадают в заштрихованную область (рис. 8). Указанный график по характеру близко совпадает с подобным графиком, представленным на рис. 1, полученным авторами на приборе кольцевого сдвига в Институте гидромеханики. Представленные схемы и механизмы нарушения устойчивости склонов, приведенные в статье, сопоставлены с данными натуральных наблюдений за смещениями реальных оползней, имеющихся в архиве авторов. Сопоставление показало удовлетворительную сходимость.

где η – коэффициент вязкости.

Тогда уравнение Навье-Стокса, описывающее динамику стационарного течения неньютоновской жидкости, будет иметь вид:

$$\rho u_k = -\frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \right\}. \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность, u – проекция скорости, p – давление.

В работе [6], рассматривая кровь как неньютоновскую жидкость, теоретическими расчетами по зависимости (5) и экспериментальными исследованиями получены величины изменения вязко-

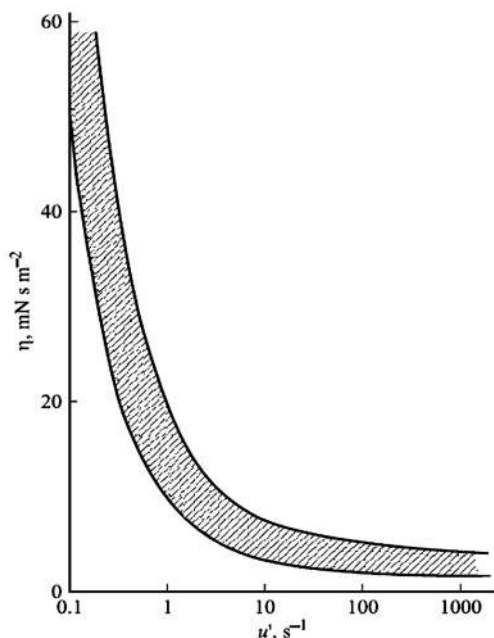


Рисунок 8 – Зависимость вязкости неньютоновской жидкости от скорости сдвига. Данные из [6]

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные схемы и проанализированы физические основы нарушения устойчивости склонов при разжижении грунтов в отдельных линзах.
2. Указаны условия, при которых линзы разжиженных грунтов, расположенные в склоне горизонтально, приводят к нарушению устойчивости склонов.
3. Для разжиженных в отдельных линзах грунтов, которые не нарушают устойчивости склонов, получена зависимость, позволяющая оценить время рассеивания парового давления в линзе.
4. Установлено, что зависимости изменения вязкости водонасыщенных грунтов разрушенной структуры от скорости сдвига, по характеру совпадает с данными других авторов, полученных при исследовании изменения вязкости крови от скорости сдвига.
5. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании нарушения устойчивости склонов и прогнозе развития оползневой активности территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архангельская сейсмическая сеть. ФГБУН ФИЦКИА РАН. URL: <http://fciactic.ru/index.php?page=geoss>.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. Санкт-Петербург: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
3. Білеуш А.І., Фрідріхсон В.Л., Кривоніг А.І., Кривоніг В.В. Дослідження в'язкості ґрунтів на приладі крутіння. Прикладна



- гідромеханіка. Київ, 2014. Т.16(88), №4. С 11-16.
4. Arnold Verruijt, SOIL DYNAMICS. Delft University of Technology 1994. 2008. 425 p.
 5. Билеуш А.И. К оценке величины скорости смещения горных масс на берегах водохранилищ. Экзогенные процессы и проблемы рационального использования геологической среды. Ташкент: Узбекгидрогеология, 1985.
 6. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. М.: Мир, 1981. 624 с.
 7. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М-Л: Госнефтегориздат, 1949. 522 с.

REFERENCTS

1. Arkhangelsk seismic net. N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Retrieved from <http://fciarctic.ru/index.php.page=geoss>
2. Ishihara, K. (2006). Behavior of soils during earthquakes. St. Petersburg: NPO Georekonstruktsiya-Fundamentproekt.
3. Bileush, A.I., Fridrihson, V.L., Kryvonog, A.I., Kryvonog, V.V. (2014). Studies of soil viscosity on a torsion device. Applied Hydromechanics, V.16(88), № 4, 11-16.
4. Arnold Verruijt. (1994, 2008). SOIL DYNAMICS. Delft University of Technology.
5. Bileush, A.I. (1985). To the assessment of the rate of displacement of mountain masses on the banks of reservoirs. Exogenous processes and problems of rational use of the geological environment. Tashkent: Uzbekhydrogeologia.
6. Caro, C.G., Pedley, T.J., Schroter, R.C., Seed, W.A. (1981). The mechanics of the blood circulation. Moscow: Mir.
7. Shelkachev, V.N., Lapuk, B. B.(1949). Underground hydraulics. Moskow – Leningrad: Gosudarstvennoe nauchno tehnikeskoe izdatelstvo neftyanoi i gorno toplivnoi literatury.

Статья поступила в редакцию 22.11.2020 года