

УДК 624.131.37, 624.131.537

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ҐРУНТІВ НА ПРИЛАДІ КРУТІННЯ

А. І. БІЛЕУШ, В. Л. ФРІДРІХСОН, О. І. КРИВОНОГ, В. В. КРИВОНОГ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
03680 Київ – 180, МСП, вул. Желябова, 8/4
igmggs@ukr.net

Одержано 07.04.2014

Наведено результати експериментальних досліджень в'язкості п'яти видів ґрунтів на приладі крутіння та показано, що при руйнуванні структури водонасиченого ґрунту останній переходить у зоні зсуву з твердого стану в стан суміші "ґрунт-вода", яка має всі характерні властивості неньютонівської рідини другої групи, коефіцієнт в'язкості якої змінюється в часі. Результати досліджень показують, що суміш "ґрунт-вода" має змінну в'язкість, яка залежить від величини вертикальних напружень, щільності і гранулометричного складу ґрунту, градієнта швидкості і тривалості зсуву. Розроблений та виготовлений в інституті прилад крутіння, на який отримано патент України, дозволяє отримувати кількісні характеристики в'язкості будь-яких різновидів ґрунтів, які розповсюджені в межах України.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: в'язкість ґрунтів, структура ґрунтів, крутіння, зсув, напруження

Приведены результаты экспериментальных исследований вязкости пяти грунтов на приборе кручения и показано, что при разрушении структуры водонасыщенного грунта последний переходит в зоне сдвига из твердого состояния в состояние смеси "грунт-вода", которая имеет все характерные свойства неньютоновской жидкости второй группы, коэффициент вязкости которой изменяется во времени. Результаты исследований показывают, что смесь "грунт-вода" имеет переменную вязкость, которая зависит от величины вертикальных напряжений, плотности и гранулометрического состава грунта, градиента скорости и продолжительности сдвига. Разработанный и изготовленный в институте прибор кручения, на который получен патент Украины, позволяет определять количественные характеристики вязкости различных грунтов, которые распространены в пределах Украины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вязкость грунтов, структура грунтов, кручение, сдвиг, напряжение

The experimental results of viscosity 5 soil types on the device torsion and shown that the destruction of the structure of saturated soil last moves in the shear zone from the solid state to a mixture of "ground-water which has all the characteristics of non-Newtonian fluid properties of the second group, the viscosity of which varies in time. The results show that a mixture of "ground-water" has a variable viscosity which depends on the magnitude of the vertical stress, density and particle size distribution of the soil, the gradient and duration of the shear rate. Designed and manufactured at the Institute torsion device, which obtained patent of Ukraine allows to determine the quantitative characteristics of the viscosity of various soils, which are common in Ukraine.

KEY WORDS: soil viscosity, structure of soil, torsion, shearing, stress

ВСТУП

Дослідження гідродинамічної та теплової взаємодії різних тіл з потоками рідин і газів має велике практичне значення для різних галузей науки і технологій виробництва. Теоретичною основою цих досліджень є система диференціальних рівнянь, в яких однією з найважливіших характеристик є в'язкість середовища. Середовища, які являють собою щось середнє між пластичними тілами і рідинами, представляють двофазні неоднорідні тіла, складені з твердої фази і рідини. В'язкість таких аномальних середовищ змінюється в залежності від швидкості течії рідини, кількості твердої фази в рідині, ступеню її дисперсії. Для визначення реологічних властивостей таких середовищ, яким притаманні властивості як твердого тіла, так і рідини, можна використати модель в'язко-пластичного середовища (бінгамівської рі-

дини).

1. ОСОБЛИВОСТІ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

Існують рідини, які не повністю підкоряються закону тертя Ньютона. Такі рідини називаються неньютонівськими або аномальними. У більшості з них режим плинності настає тільки після того, як напруження сил внутрішнього тертя між частками τ перевищить деяке визначене для цієї рідини значення початкового напруження τ_0 . Після досягнення значення загальної величини сила тертя τ в рухомій рідині може збільшуватись або зменшуватись.

Напруження сил тертя в аномальній рідині визначається залежністю [1]:

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{\partial V}{\partial n}, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт в'язкості; n – нормаль до напрямку швидкості; V – швидкість.

Характерна особливість неньютонівських рідин полягає в тому, що їх уявна в'язкість μ не є константою цієї рідини. Вона залежить не лише від температури, $\partial V/\partial n$, тиску, але і від швидкості зміщення V , тривалості дії навантаження і інших чинників. Залежно від цих чинників неньютонівські рідини умовно діляться на три групи, кожна з яких підрозділяється на підгрупи.

До першої групи відносять так звані в'язкі або стаціонарні неньютонівські рідини. Дилатантні рідини характеризуються тим, що із зростанням $\partial V/\partial n$ їхня реальна в'язкість збільшується (наприклад, суспензії з великим вмістом твердої фази).

До другої групи відносять неньютонівські рідини, у яких залежність між τ і μ змінюється в часі. У таких рідин уявна в'язкість залежить не лише від градієнта швидкості, але і від тривалості зрушення. Ці матеріали здатні до руйнування структури і збільшення плинності із збільшенням тривалості дії напруження зрушення. Після зняття напруження структура поступово відновлюється, а течія припиняється.

До третьої групи відносять в'язкопружні рідини, які течуть під впливом напруження зрушення, але після зняття цього напруження вони частково відновлюють свою форму як пружні тверді тіла.

2. ПРИЛАД КРУТІННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ҐРУНТУ, ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ҐРУНТУ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

У відділі гідродинаміки гідротехнічних споруд Інституту гідромеханіки НАН України розроблено два зразки приладів крутіння, які відповідають сучасним вимогам практики досліджень характеристик міцності та реологічних властивостей ґрунтів. Зокрема, прилад крутіння, на якому проводили дослідження по визначенню в'язкості ґрунтів і який показано на рис. 1, дозволяє визначати характеристики міцності та реологічні властивості ґрунтів при динамічних навантаженнях в умовах фільтрування рідини крізь зразок ґрунту [2].

Конструкція приладу дозволяє підтримувати або змінювати в процесі дослідження задану швидкість деформації зсуву в діапазоні 0,0001–25 мм/хв., підтримувати в автоматичному режимі задану величину вертикального навантаження, фіксувати зусилля здвигу та зміну товщини зразка ґрунту. Отримана від датчиків інформація про



Рис. 1. Загальний вигляд приладу крутіння

досліджувані параметри передається в блок керування і реєстрації з частотою до 200 вимірів за секунду.

Установка крутіння працює в такий спосіб. Зразок ґрунту поміщають у робочий стакан з набору захисних кілець, встановлюють разом з нижнім ребристим перфорованим штампом, порожнистим диском і піддоном на шків, до якого через датчики під'єднують тягу. На стакан з захисних кілець установлюють верхній ребристий перфорований штамп, на який опирають датчик деформації ущільнення і датчик величини вертикального навантаження. Вертикальне навантаження задається від шагового двигуна.

Дослідження в'язкості ґрунтів проводили наступним чином. Підготовка зразків ґрунтів, товщина яких складала 34–36 мм, проводилась у відповідності до вимог ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) "ґрунти. Методи лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости" [3]. До проведення випробувань визначали фізичні характеристики ґрунтів по ГОСТ 5180. Випробування проводились при повному насиченні водою зразка ґрунту. Після стабілізації зусилля зсуву при заданому вертикальному навантаженні відключали привід і під'єднували тягу з підвіскою для гир. Після цього рівномірно навантажували гирі до моменту зсуву ґрунту. Процес зсуву фіксувався на відеокамеру, що надалі дозволяло визначити його швидкість. Після закінчення випробування і розбирання стакану з кілець проводили фотозйомку зразка з метою визначення товщини зони зсуву. На рис. 2 представлено одну з таких фотографій.



Рис. 2. Зріз водонасиченого крупнозернистого піску

3. ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ҐРУНТУ В ПРИЛАДІ КРУТІННЯ

Характерною особливістю пухких водонасичених незв'язних ґрунтів є їхня здатність переходити в розріджений стан. Явище розрідження водонасичених незв'язних ґрунтів – це повна втрата несучої здатності ґрунту та перехід його зі стану твердого тіла в плинний стан. При розрідженні незв'язний ґрунт веде себе як густа в'язка рідина, яку можна представити у вигляді структурованої суспензії, тобто води з завислими в ній частинками ґрунту. До такого стану насичений водою ґрунт при крутінні доходить тільки в межах зони зсуву, яка має невелику товщину. Для визначення реологічних властивостей структурованих суспензій можна використати модель в'язкопластичного середовища, яка визначається виразом (1).

В ґрунтах залежність між напруженням τ і градієнтом швидкості течії dV/dx – нелінійна, а течія виникає при величині напруження $\tau \geq \tau_o$.

При $\tau < \tau_o$ ґрунт веде себе як тверде тіло з незначною величиною деформації, яку можна розглядати як явище повзучості. Це значить, що τ_o не є статичним (як у законі Шведова–Бінгама), а є динамічною межею напруження зсуву.

При $\tau > \tau_o$ структура ґрунту починає руйнуватись, її руйнування посилюється з ростом відносної швидкості зсуву dV/dx . При цьому в'язкість постійна в межах значення dV/dx , при якому структура ґрунту повністю руйнується. Для повністю зруйнованої структури, коли $\tau_o = 0$, супротив зсуву різко зменшується до величини, рівної $\mu(dV/dx)$.

Розрахункову схему ґрунту в зоні плинності товщиною δ в приладі крутіння показано на рис. 3.

На початку плинності при крутінні структурні

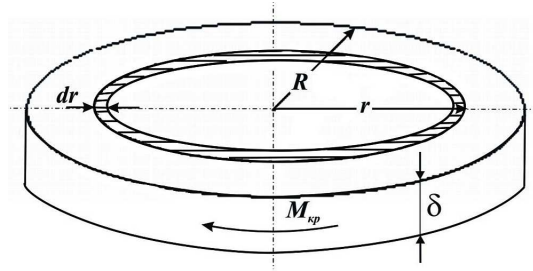


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення коефіцієнта в'язкості

зв'язки, які характеризують опір ґрунту величиною τ_o , будуть зруйновані. Існуюче в приладі дотичне напруження τ розділиться на дві частини: перше τ_o – буде створювати прискорення, друге – $(\tau - \tau_o)$ (будемо надалі вважати як τ) витрачається на в'язкий опір плинного ґрунту. Згідно [4] величина в'язкого опору при крутінні складає:

$$\tau = \mu \frac{\omega r}{\delta}. \quad (2)$$

Силу в'язкого тертя в межах елементарного кільця шириною dr будемо визначати з такого виразу:

$$dF = \frac{2\pi r \mu \omega r}{\delta} dr. \quad (3)$$

Величина опору моменту, що скручує зразок ґрунту, матиме вигляд:

$$dM_{кр} = \frac{2\pi \mu \omega}{\delta} r^3 dr. \quad (4)$$

Проінтегрувавши вираз (4) в межах $0 - R$, отримаємо величину моменту, що скручує зразок ґрунту:

$$M_{кр} = \frac{\pi \mu \omega R^4}{2\delta}. \quad (5)$$

Враховуючи, що $\omega R = V$, отримаємо величину в'язкості в Па·с:

$$\mu = \frac{2M_{кр}\delta}{\pi V R^3}, \quad (6)$$

де

$$M_{кр} = F_1 R_{шк};$$

δ – товщина в'язкого шару ґрунту, м; F_1 – сумарна величина зусилля на зріз плинного ґрунту, що зафіксована двома датчиками, Н; R – радіус зразка, м; $R_{шк}$ – радіус шківів пристрою крутіння, м.

Відповідно коефіцієнт в'язкості буде змінною величиною і залежатиме від величини прикладеного навантаження та вертикального тиску. Нами

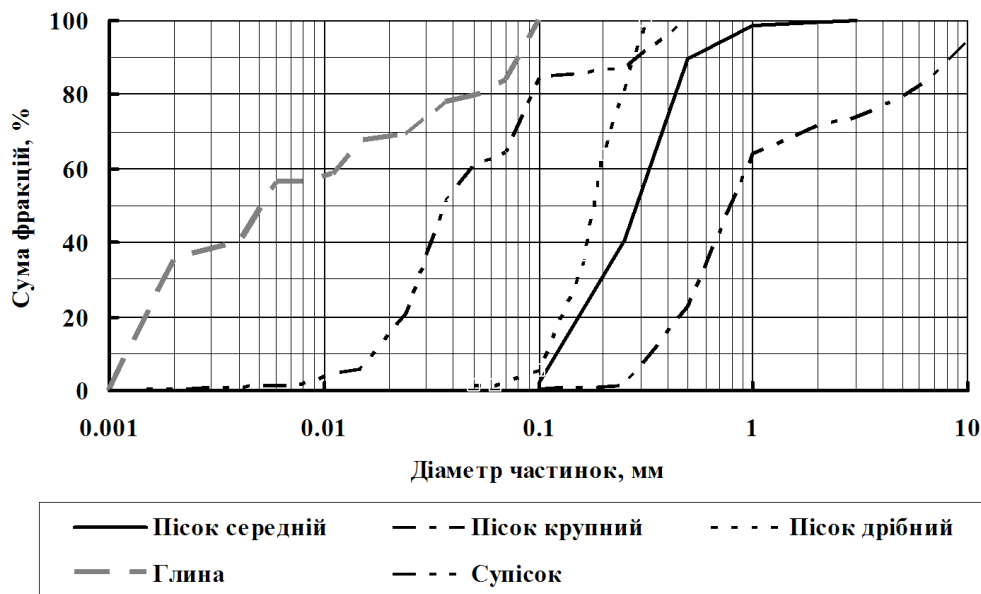


Рис. 4. Гранулометричний склад досліджених ґрунтів

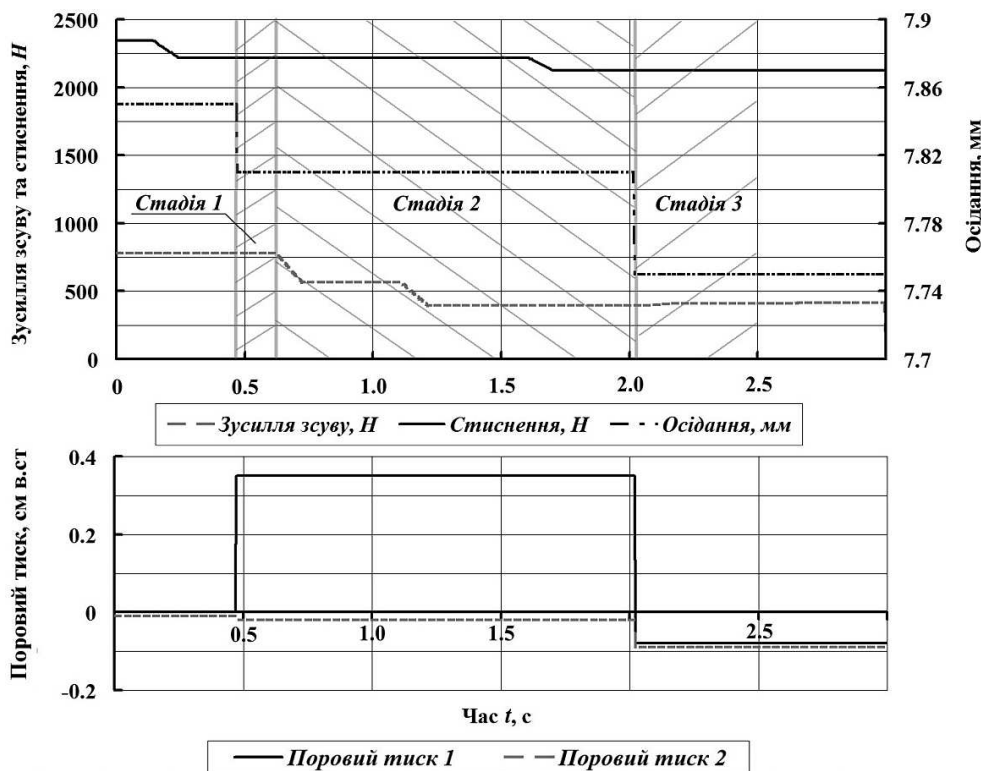


Рис. 5. Діаграми дослідження дрібного піску

вперше отримано значення коефіцієнта в'язкості ґрунтів у залежності від вертикального стиснення на приладі крутіння. Визначивши швидкість че-

рез прискорення для приладу крутіння, розрахунки значення коефіцієнта в'язкості ґрунтів проводили по формулі (6).

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ҐРУНТІВ НА ПРИЛАДІ КРУТІННЯ

Було досліджено три типи незв'язних ґрунтів (піски дрібний, середній та крупний), а також малозв'язний супісок та пістряву глину, гранулометричний склад яких наведено на рис. 4. На рис. 5 показано діаграми зміни в часі зусиль зсуву, стиснення і вертикальної деформації та порового тиску для одного з досліджених ґрунтів. Як бачимо, процес розрідження незв'язних і малозв'язних ґрунтів має три стадії: 1 – руйнування структури ґрунту, як твердого тіла; 2 – розрідження; 3 – подальше ущільнення.

При руйнуванні структури ґрунту шляхом зсуву відбувається втрата контактів між частинками ґрунту, внаслідок чого вони зависають у воді, яка насичує пори, і ґрунт переходить у розріджений стан. Так як миттєвий відтік води з пор неможливий, відбувається зростання порового тиску.

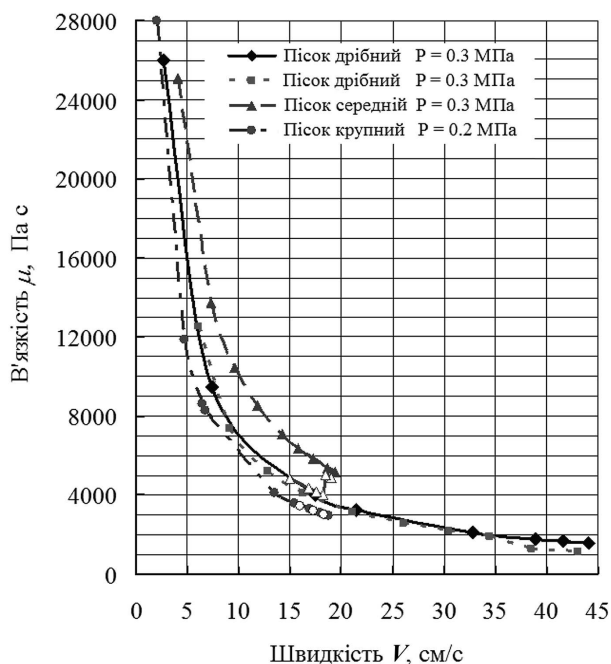


Рис. 6. Залежність $\mu = f(V)$ для пісків

Слід прийняти до уваги, що при руйнуванні структури ґрунту і переході його в розріджений стан щільність укладки ґрунту, тобто об'єм води в одиниці об'єму ґрунту $V_v/V_{гр}$, не змінюється [5].

В подальшому під дією власної ваги частинки ґрунту верхнього ряду намагаються опуститися в проміжки між частинками нижнього ряду, що су-

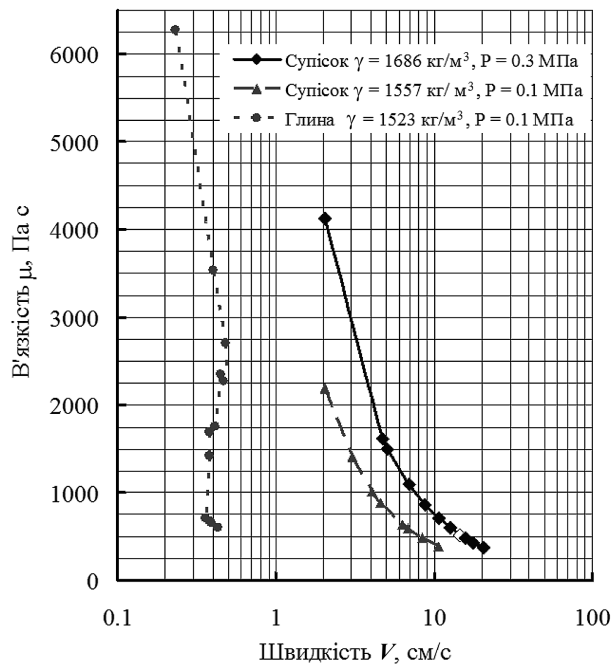


Рис. 7. Залежність $\mu = f(V)$ для супіскової та глини

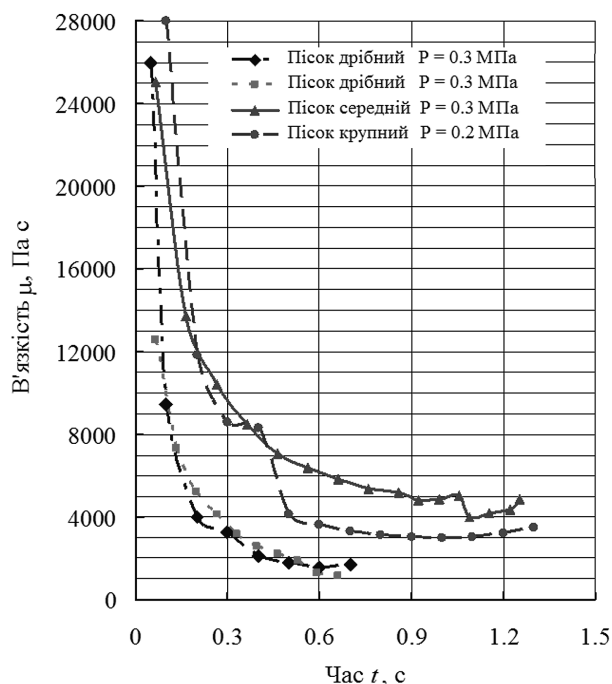
проводжується виток води з в'язкої маси ґрунту. Це викликає зменшення порового тиску в зоні розрідження, тобто проходить процес консолідації ґрунту.

На ділянці від початку руйнування структури ґрунту до повної її руйнації прискорення зсуву дорівнює нулю, і ґрунт веде себе як тверде тіло. Як встановлено проведеними дослідженнями, характер процесу розрідження та консолідації не залежить від гранулометричного складу незв'язних ґрунтів, але в порівнянні з супіском час знаходження піщаних ґрунтів у розрідженому стані значно менший.

При повній руйнації структури ґрунту, коли $\tau_o = 0$, зусилля зсуву різко зменшується, що характеризує перехід ґрунту з стану твердого тіла в стан суміші "ґрунт-вода", яку можна розглядати як неньютонівську рідину,

На рис. 6–7 наведено графіки залежностей $\mu = f(V)$ для пісків і супіскової маси, які можна виразити через нелінійну залежність типу $y = ax^b$. Визначено кількісна характеристика зміни величини в'язкості водонасиченого ґрунту, який в результаті зсуву втратив повну несучу здатність і перейшов з стану твердого тіла в плинний стан, який можна охарактеризувати як суміш "ґрунт-вода".

Для глини пістрявої такої залежності не встановлено (рис. 7), тобто при зрізі глиня веде себе як тверде пластичне тіло, для якого характерна

Рис. 8. Залежність $\mu = f(t)$ для пісків

деформація повзучості.

В деяких дослідях в'язкість ґрунту падає по досягненню певного значення швидкості зсуву, а потім в результаті консолідації ґрунту починає зростати. На рис. 8 наведено графіки консолідації незв'язних ґрунтів, які виражено залежністю в'язкості ґрунту від тривалості зрушення $\mu = f(t)$, і які відображають дві стадії процесу зміни стану ґрунту як твердого тіла, а саме, власне розрідження в часі з подальшим ущільненням, якому характерно поступове зростання в'язкості.

ВИСНОВКИ

На основі проведених дослідів по визначенню в'язкості ґрунтів на приладі крутіння сформулюємо наступні загальні висновки:

1. Встановлено, що водонасичений ґрунт при зсуві в позаграничному напруженому стані переходить з твердого стану в стан суміші "ґрунт–вода". Даними дослідженнями доказано, що така суміш у зоні зсуву має характерні властивості неньютонівської рідини другої групи, коефіцієнт в'язкості якої змінюється в часі.

2. Результати досліджень показують, що суміш "ґрунт–вода" має змінну в'язкість, яка залежить від величини вертикальних напружень, щільності і гранулометричного складу ґрунту, градієнта швидкості і тривалості зрушення.

3. Розроблений та виготовлений в інституті прилад крутіння, на який отримано патент України № 68380, дозволяє отримувати кількісні характеристики в'язкості будь-яких різновидів ґрунтів, які розповсюджені в межах України.

1. Радченко О.П., Мацкевич А.Р. Математическая модель влияния высокочастотных электромагнитных полей на реологические свойства судовых топлив // Вісник СевНТУ: Серія: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь.– 2013.– Вып. 137.– С. 336-340.
2. Білеуш А.І., Фрідріхсон В.Л., Кривоног О.І. та ін. Патент України № 68380. Прилад крутіння.– К.: Бюл. N 6, 2012.– 5 с.
3. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості.– К.: Держкомітет України в справах містобудування і арх-ри, 1997.– 107 с.
4. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости.– М.: Гостехиздат, 1955.– 519 с.
5. Иванов П.Л. Ґрунты и основания гидротехнических сооружений.– М.: Высшая школа, 1985.– 352 с.