

О. Л. ТЮТЬКІН (ДПТ)

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГЛИНИСТОГО ПОРОДНОГО МАСИВУ ЯК В'ЯЗКО-ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

В статті наведені теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву з позиції положень теорії в'язко-пружно-пластичного середовища.

В статье приведены теоретические основы определения напряженно-деформированного состояния глинистого массива с позиций теории вязко-упруго-пластической среды.

In the article the theoretical bases of determination of the stressed-and-strained state of clay massif from positions of the theory of viscous-elastic-plastic medium are presented.

Проблема, що розглядається в даній роботі, не відрізняється новизною теоретичних досліджень [1-20], але в той же час не одержала систематично оформленого виду теорії, як, втім, і достатньої практичної реалізації. Більшість теоретичних досліджень [1, 3, 5, 7, 14, 20] у даній області достатньо складно реалізувати у вигляді інженерних методик внаслідок крайньої заматематизованості, яка часто приховує чіткий фізичний зміст. Також ряд досліджень [3, 5, 10, 13, 20] через специфічні особливості математичного апарату відриває фізичне значення, оперуючи лише математичними абстракціями.

Перш ніж перейти до послідовних кроків рішення поставленої проблеми, слід висловити деякі передумови подальших теоретичних побудов.

1. Глинистий грунт породного масиву розглядається як в'язко-пружно-пластичне середовище внаслідок того, що всі середовища матеріального миру володіють трьома первинними реологічними властивостями [10, 13-17, 19]: в'язкістю, пружністю, пластичністю (перший постулат реології по Рейнеру [16]), але в різному ступені (другий постулат реології по Рейнеру [16]). Експериментальні дослідження ряду учених також свідчать, що глинисті ґрунти володіють пружністю (присутність деформацій, що відновлюються), пластичністю (наявність залишкових деформацій) і в'язкістю (розвиток деформацій в часі) [14, 15].

Складність подальших теоретичних побудов для дослідження в'язко-пружно-пластичного середовища полягає у тому, що сумісний опис її напружено-деформованого стану (НДС) у разі пластичних і реологічних явищ вважається неможливим [13, 15-17, 20].

2. Важливою передумовою є той факт, що

рішення даної проблеми для глинистого ґрунту реалізується лише для випадку його неводонасиченого стану, тобто всі процеси первинної консолідації завершені [15]. Дана передумова обмежує існування рішення проблеми тільки випадком повзучості/релаксації (випадок вторинної фільтраційної консолідації) [15], оскільки рішення впливу чинника часу на два процеси, що відбуваються одночасно, – дія води, що віджимается, у разі первинної консолідації, і деформація структури ґрунту у разі фільтраційної консолідації – дуже складне в описовому і математичному плані. Проте, випадок неводонасичених ґрунтів глинистих формацій з природною вологістю можливо вважати найпоширенішим, оскільки цим ґрунтам властиві водотривкі властивості [2].

3. Важливою концептуальною передумовою є розділення залишкових деформацій на пластичні і в'язкі. Ця передумова знімає складність в операції з цими типами деформацій, яку відзначав П. Пежина [13], тим паче, що таке розділення не є штучним. Розділення деформацій можливе через причину, що їх викликає. Пластичні деформації є залишковими, виникаючими після перетину напруженнями межі пружності [1, 2, 15], в'язкі залишкові деформації виникають при будь-якому рівні напружень, і їх причиною є чинник часу (третій постулат реології по Рейнеру [15]). Слід зазначити, що акцентування автором уваги на таких загальних місцях не є тривіальним теоретизуванням, а має задачею визначити фундамент подальших побудов, які хоча і будуть оригінальними побудовами автора, базуються на фундаментальних поняттях механіки суцільного середовища.

Також слід привести в даному обговоренні, що останнім часом розвиток реології загалом і

теорії повзучості зокрема (наприклад, теорія ковзання Батдорфа–Будянського [6, 20]), дозволила деяким дослідникам описувати і пластичну, і в'язку (деформація повзучості) деформації одними і тими ж рівняннями [20], мотивуючи це тим, що у даних типів деформацій однаковий характер, а саме – залишковий. Таке мотивування використовуваних рівнянь виходить з того, що теорія ковзання спирається на фізичні уявлення в той час, як більшість теорій повзучості феноменологічні, тобто базуються на принципі «чорного ящика» [2, 8, 10, 11, 13, 15]. Але теорія ковзання не отримала широкого розвитку з причини несистематизованого підходу до процесу деформації.

Ще одним доводом для розділення в'язких і пластичних деформацій є те, що однакове слідство їх характеру (залишковість) ще не доводить одну і ту ж причину, оскільки відомо, що вони різні. Також, П. Пежина підкреслює, що використовуючи підходи реології, слід обмежитися тими станами, які не викликають пластичну течію, а використовуючи методи теорії пластичності виключити з цих процесів явища повзучості і релаксації [13]. Протилежне формою, але що однозначно свідчить про користь розділення деформацій, висловлене в роботах С. С. Вялова [14] і Ю. К. Зарецького [5]: запропоновані ними концепції повзучості і в'язко-пластичної течії ґрунтів дозволили на теоретичному рівні достатньо чітко описати НДС глинистих ґрунтів.

4. Останньою передумовою подальшого рішення проблеми НДС глинистих ґрунтів як в'язко-пружно-пластичного середовища є феноменологічний підхід. Поза сумнівом, критика цього підходу з позицій фізичних уявлень про природу деформації, заслужена і дозволяє розширити рамки уявлень про неї. Але застосування фізичного підходу не завжди приводить до достовірних результатів, оскільки строгість побудов даного підходу часто перекреслюється неточністю проведених експериментів. Останній вислів дещо парадоксальний, оскільки не зменшує важливості фізичного підходу, в той же час свідчить про відсутність таких точних результатів. Дане питання відноситься більше до проблеми співвідношення трудомісткості і математичної складності вживаного методу і точності результатів, а точніше необхідності точності. Дещо спрощеним доводом може бути і те, що варіація результатів експериментального дослідження ґрунтів в 20 % вважається нормальною [2, 8, 15], таким чином, і застосування грубішого, по відношенню до фізичного, фено-

менологічного підходу є обґрунтованим.

Висловивши деякі передумови дослідження представленої проблеми, слід зазначити, що застосування феноменологічного підходу дозволяє ввести автору нові оригінальні прийоми до її рішення. Як і фізичний, так і феноменологічний підходи прагнуть до отримання аналітичних, а в ідеалі – замкнених рішень. Але одержані рішення, претендуючи на універсальність, універсальними не є, що відображається в їх критиці (наприклад, критика чотирьох теорій повзучості в роботах С. С. Вялова [14] і Ю. М. Работнова [15]). Тому автор, розуміючи, що створення універсальної теорії в'язко-пружно-пластичного середовища неможливе, про що свідчить наявність великої кількості теорій і взагалі несистематизованого підходу до неї, вважає, що можливим рішенням буде розробка несуперечливої системи закономірностей і понять у кожному конкретному випадку.

Природно, основним недоліком даного підходу є наперед запропонована відмова від універсальних закономірностей, але перевагою є конкретний підхід до кожного випадку. Даний підхід явно феноменологічний, але пропонує не надбудувати над експериментальними даними окремих теорій (як це робиться, наприклад, в теоріях старіння, течії і зміцнення [6, 7, 15, 16]), а користуватися цими результатами як первинною інформацією для отримання несуперечливої моделі ґрунту, не пов'язаної з додатковими розробками. Тобто з ланцюжка феноменологічного підходу «експериментальні дані – розробка теорії – застосування теорії в подібному випадку» виключається друга ланка, і вона виглядає так – «експериментальні дані – модель поведінки на їх основі». Конкретність даного авторського підходу дозволяє проводити практично ті ж побудови, що і раніше запропоновані, але в ньому відсутня трудомістка робота з приведення результатів до існуючих теорій, пов'язана з введенням додаткових гіпотез і спрощень.

Переходячи від загальних передумов, слід висловити закономірності поведінки глинистих ґрунтів, як в'язко-пружно-пластичного тіла:

1. При рівні напружень нижче за межу пружності  $\sigma_e$  деформації є пружними, повністю зворотними.

Слід уточнити, що ґрунтам властиві і миттєві пластичні деформації (рис. 1), пов'язані із закриттям мікротріщин і дефектів (на відрізку 0А), але їх значення в порівнянні з пружними деформаціями настільки малі, що ними можна нехтувати.

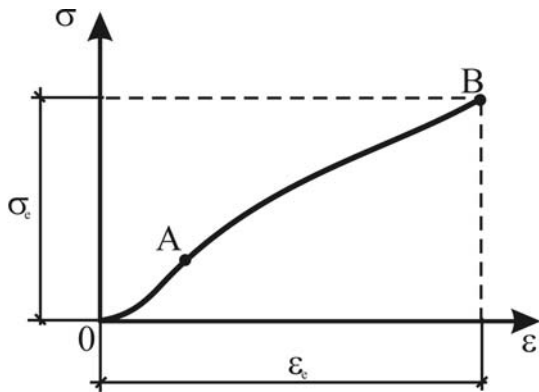


Рис. 1. Графік пружної деформації глинистого ґрунту

2. При рівні напружень вище за межу пружності  $\sigma_e$  деформації стають пластичними і носять нереверсивний (залишковий) характер (рис. 2., відрізок BC).

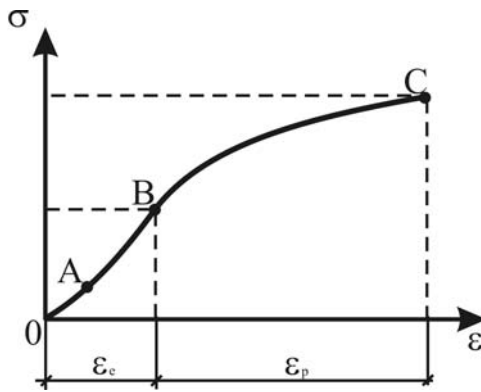


Рис. 2. Графік пружно-пластичної деформації глинистого ґрунту без розвантаження

У точці С відбувається руйнування ґрунту. З'ясувати величину пластичних залишкових деформацій можна експериментальним методом розвантаження, тобто довівши зразок до точки С, слід його розвантажити: пружні деформації  $\epsilon_e$  відновляться, а пластичні деформації  $\epsilon_p$  залишаться (рис. 3).

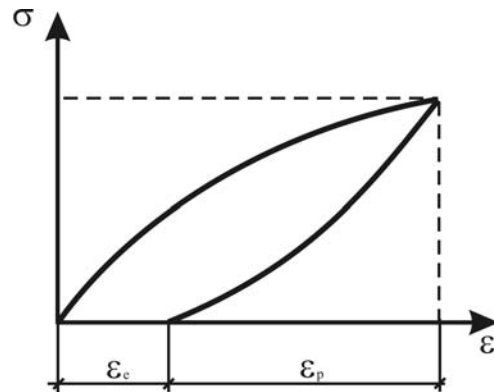


Рис. 3. Графік пружно-пластичної деформації глинистого ґрунту з розвантаженням

Перші дві закономірності поведінки глинистих ґрунтів одержані з умови швидкого завантаження, тобто процес деформації вважається незалежним від часу, і в'язкі деформації відсутні. Неоднозначність в деформації з'являється у разі повільного завантаження, коли вплив в'язкості починається виявлятися достатньо. Неоднозначність пов'язана з тим, що реологічні властивості діляться на дві категорії: склерономне (пружність і пластичність), не залежні від часу, і реономне (в'язкість) – від нього залежне [15]. Відповідно, слід зробити вибір між декількома існуючими для опису цих явищ теорій, положення яких часто суперечать одне одному.

3. При повільних завантаженнях, а, точніше, при завантаженні з постійним значенням напруження розвивається явище реології повзучості:  $\sigma = const, \epsilon \rightarrow \infty$ . Експериментальні дані цього процесу часто відображаються у вигляді сімейства кривих повзучості, побудованих для постійних напружень  $\sigma$ , рівних часткам руйнуючого напруження при швидкому завантаженні  $\sigma_p$  (рис. 4.).

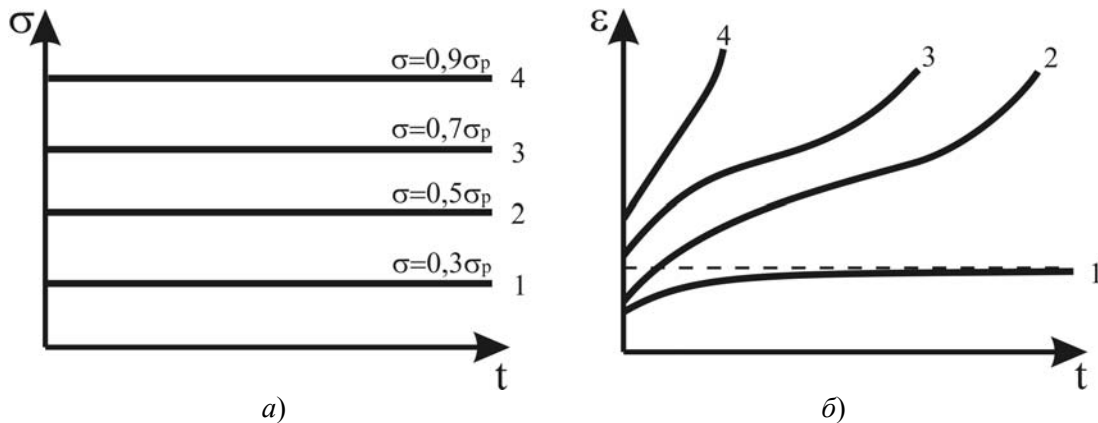


Рис. 4. Сімейство кривих повзучості: а) залежність  $\sigma - t$ ; б) залежність  $\epsilon - t$

Як видно з рис. 4, б, криві 1 і 2 подібні одна одній, крива 3 вже не подібна їм, а крива 4 різко відрізняється від них. Дана відмінність свідчить про різний характер деформації, що буде

розглянуто нижче.

Якщо провести експеримент з розвантаженням, то можна спостерігати картину післядії (рис. 5).

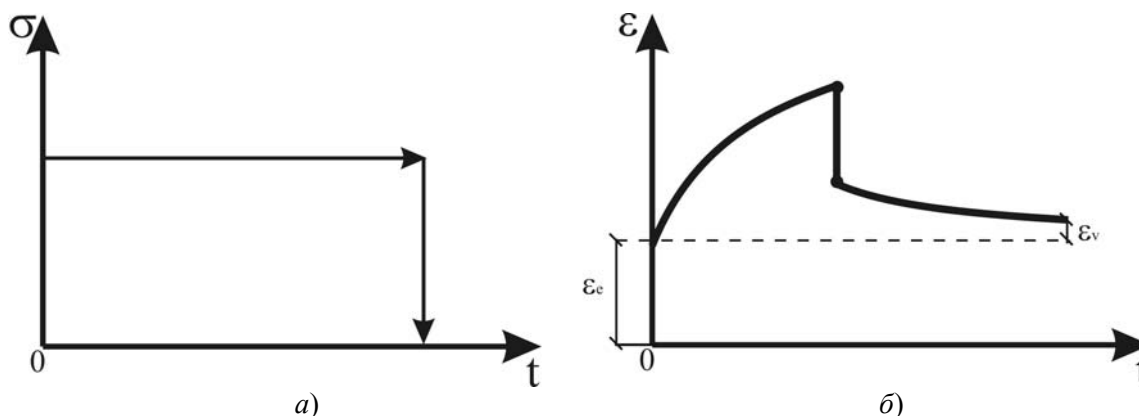


Рис. 5. Графік післядії в експерименті з розвантаженням: а) характер навантаження; б) розвиток деформації післядії

Приєм розвантаження свідчить про можливість застосування принципу суперпозиції деформацій, тобто доводиться їх взаємно невпливаючий характер. Таким чином, підтверджуючи відмінність в'язких і пластичних деформацій, можна дійти значного висновку: пружність, пластичність і в'язкість – взаємно невпливаючі властивості тіла або середовища. Звідси виходить можливість застосування принципу суперпозиції деформацій або, як він називався раніше [14, 17], «принцип накладення деформацій». У подальших теоретичних побудовах для ухвалення принципу суперпозиції достатньо прийняти взаємну незалежність деформацій, викликаних окремою реологічною властивістю.

Принцип накладення деформацій, запропонований академіком П. А. Ребіндером [17], доводить можливість розділення типів деформацій і той факт, що компоненти загальної деформації повністю зберігають свої значення в перебігу всього часу деформації і можуть бути розділені після розвантаження. Цей важливий концептуально принцип критикувався академіком Ю. Н. Работновим [14], який ним розумівся не як постулат деформації середовища в часі і під навантаженням, а лише як принцип, що спрощує обчислення в практичних розрахунках. Але критика Ю. Н. Работнова базувалася на розгляді результатів експериментів на повзучість сталі, що знаходиться при високій температурі, або деяких полімерів у високоеластичному стані [14]. З цього виходить, що принцип накладення деформацій (або їх суперпозиції) достатньо обґрунтований в широкій області деформації середовищ.

Відповідно, яке-небудь конкретне значення деформацій складається з трьох компонент:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^v + \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{ij}$  – загальний тензор деформацій;  $\varepsilon_{ij}^v$ ,  $\varepsilon_{ij}^e$ ,  $\varepsilon_{ij}^p$  – в'язкий, пружний і пластичний компоненти загального тензора, відповідно.

Слід зазначити, що скрізь, де вживається термін «в'язко-пружно-пластичне середовище» в авторській інтерпретації і із збереженням написання (з дефісами), мається на увазі середовище з незалежними одна від одної реологічними властивостями (в'язкість, пружність і пластичність).

З цим записом формули (1), який прозоро і однозначно інтерпретує деформований стан в'язко-пружно-пластичного тіла, в ґрунтовній оглядовій роботі полемізує П. Пежина [13]. У теорії в'язкопластичності слід розрізняти в'язкопружно-в'язкопластичне (у П. Пежини – elastic-viscoplastic) і пружно-в'язко-пластичні (у П. Пежини – elastic/viscoplastic) середовища. У першій в'язкість виявляється в пружній і пластичній областях навантаження, у другій – тільки в пластичній. Основною проблемою першого середовища є встановлення критерію переходу середовища з в'язкопружного у в'язкопластичний стан [13], друге середовище математично описується набагато простіше з використанням узагальненої моделі Максвелла або її модернізацій В. В. Соколовського і Молверна. У зв'язку з цим в радянській літературі навіть з'явився постулат Пежина [13]: в'язкість виявляється себе в процесі деформації тільки в області пластичного навантаження.

Поза сумнівом, застосування пружно-в'язко-пластичної моделі усуває проблему пошуку критерію переходу з в'язкопружного у в'язкопластичний стан, описаний Нахді і Мерчем [13], оскільки початкова умова текучості залишається такою ж, як і в теорії пластичності. Задача зводиться до відшукання змін поверхні текучості, на яку впливає в'язкість. Але, користуючись принципом суперпозиції деформацій і його окремим слідством про взаємну незалежність компонент деформацій, можна засумніватися в зміні пластичних властивостей середовища, а саме зміни поверхні текучості за рахунок в'язкості. Застосування принципу суперпозиції і рівняння (1) дає можливість створення несуперечливого теоретичного опису в'язкопружно-пластичного середовища, яким є глинистий ґрунт.

Рівняння (1) є тим «розумним обмеженням» Друккера, яке дозволяє однозначний опис в'язких і пластичних властивостей середовища [6, 7, 13, 19] (для в'язкопружно-в'язкопластичного середовища таким обмеженням є постулат Друккера про позитивну роботу зовнішніх сил). Але дане питання відрізняється неоднозначністю, оскільки деякі автори відзначають зміцнюючу дію процесу повзучості на пластичну деформацію, якщо вона відбувається після нього [20]. Дане питання слід аналізувати, як представляється автору, не з позиції зміни поверхні текучості і, відповідно, процесу пластичної деформації, за рахунок в'язкості, а з позиції зміни структури середовища в процесі повзучості. Дійсно відомо, що повзучість, викликана навантаженням менше межі пружності  $\sigma_e$  або рівним йому (повзучість з постійною швидкістю) перебудовує структуру глинистого ґрунту за рахунок взаємодії пружних і в'язких коагуляційних зв'язків, зміцнюючи її, що доводилося в авторських експериментах [11, 12]. Поза сумнівом, пластична деформація, що відбулася після деякого часу процесу повзучості, відрізнятиметься від такої ж деформації, не залежної від часу (у разі швидкого навантаження). Але з цього не виходить, що в'язкість якимсь чином змінила межу текучості і пластичну деформацію в цілому.

Розглянуті положення НДС глинистого ґрунту як в'язко-пружно-пластичного середовища явно феноменологічні, оскільки оперують макропараметрами, такими як напруження, деформація і час. Розгляд деформації з фізичної точки зору, тобто оперування мікропараметрами, такими як зміна густини, накопичення дефектів, деформації внутрішніх зв'язків, значно

ускладнює дослідження процесу. Це обумовлено конкретним характером одержуваних результатів, які неможливо розповсюдити на інші випадки деформації, оскільки поведінка глинистих ґрунтів відрізняється великою різноманітністю. Відомо, що структура глинистих формацій володіє проміжними властивостями між коагуляційними (в'язкі зв'язки) [2, 4] і конденсаційними (крихкі зв'язки) [4, 15] структурами. Як з'ясовано М. Н. Гольдштейном [2], до ґрунтів можна застосовувати підхід, як до твердих тіл, розглядаючи реологічні явища як фізичний процес накопичення дефектів (субмікротріщин), але практична реалізація цього підходу значно ускладнена. Розгляд процесу повзучості, як процесу, обмеженого деформацією у межах домежевого стану, може вважатися вірним, оскільки розслаблення саме в'язких зв'язків в часі є його причиною. В той же час процес пружно-пластичної деформації пов'язаний з руйнуванням крихких зв'язків і перебудовою структури.

Слід також відзначити, що представлені вище міркування про природу зв'язків в деякій мірі умовні, оскільки ряд зв'язків має проміжний характер, залежний від виду напруженого стану. Наприклад, у разі триосного стиснення часто не відбувається руйнування у вигляді сколювання в разі пружно-пластичної деформації, що свідчить про включення в'язких або проміжних зв'язків в процес деформації. Таким чином, ще раз підкреслюється неоднозначність фізичного підходу в порівнянні з феноменологічним.

Таким чином, основним висновком вищевикладеного є наступне:

1. Компоненти в'язких, пружних і пластичних деформацій є взаємно незалежними і до них можна застосовувати принцип суперпозиції і накладення.

2. Для теоретичних вирішень проблеми НДС глинистого ґрунту, як в'язко-пружно-пластичного середовища слід прийняти авторський феноменологічний підхід, що полягає у відшуванні конкретних закономірностей, а точніше моделі поведінки ґрунту, яку практично можна реалізувати за допомогою набору нескладних експериментальних досліджень.

## БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Глушко В. Т. Реология горного массива / В. Т. Глушко, В. П. Чердиченко, Б. С. Усатенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 172 с.
2. Гольдштейн М. Н. Механические свойства ґрунтов. Напряженно-деформативные и прочност-

- ные характеристики. – М.: Стройиздат, 1973. – 304 с.
3. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и её приложения. – М.: Наука, 1964. – 405 с.
  4. Жихович В. В. Практическая реология грунтов / В. В. Жихович, Ю. А. Жихович. – Одесса: Астропринт, 2001. – 176 с.
  5. Зарецкий Ю. К. Новая концепция вязкопластического течения грунтов // Тр. Третьего Всесоюзн. симп. по реологии грунтов, Ленинград, 3-8 сентября 1979. – Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1980. – С. 58-73.
  6. Качанов Л. М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 455 с.
  7. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высш. школа, 1976. – 277 с.
  8. Маслов Н. Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1984. – 176 с.
  9. Месчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
  10. Мизюмский В. А. Закономерности деформирования глинистых пород с естественной структурой // В сб. межвуз. тр. «Вопросы геотехники», № 7. – Д.: ДИИТ, 1964. – С. 32-43.
  11. Петренко В. Д. Анализ реологических явлений вокруг выработки кругового очертания / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Зб. наук. пр. «Будівництво» – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2002. – Вип. 11. – С. 33-37.
  12. Петренко В. Д. Реализация свойств упруго-вязко-пластического массива с помощью «грунтовых» элементов / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, Т. А. Селихова // Міжвід. зб. наук. пр. «Геотехнічна механіка». – Д.: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2004. – Вип. 50. – С. 270-277.
  13. Пэжина П. Основные вопросы вязкопластичности. – М.: Мир, 1968. – 176 с.
  14. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
  15. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
  16. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
  17. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1958. – Серия IV, № 39, 40. – 64 с.
  18. Zahorski S. Small additional deformation in non-linear viscoelasticity // Bull Acad. pol. sci. Ser. sci. techn. – 1966. – Vol. 14, № 1. – P. 17-22.
  19. Biot M. A. Mechanics of Incremental Deformation. – N-Y.: John Wiley and Sons, 1965. – P. 506.
  20. Русинко Н. К. Теория пластичности и неустановившейся ползучести. – Львов: Изд-во при Львовском ун-те «Вища школа», 1981. – 148 с.

Надійшла до редколегії 01.04.2008.