

УДК 627.324.2/3

**Жеребятьєв О. В., к.т.н., доцент, Кухнюк О. М., к.т.н., доцент**

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ КОНСОЛІДАЦІЇ

**Наведені результати є продовженням досліджень, що присвячені теорії консолідації ґрунтів. В результаті опрацювання накоплених теоретичних і експериментальних даних, пропонується модель, що дає змогу покращити розуміння природи і прогнозування поведінки консолідованих ґрунтів, з врахуванням енергетичних підходів.**

**Ключові слова:** консолідація ґрунтів, енергетичний підхід, модель фільтраційної консолідації.

**1. Вступ.** Як на території України, так і у всьому світі побудовано та експлуатується значна кількість водосховищ. Аналіз даних натурних спостережень за станом ґрунтових водопідпірних споруд та їх основ вказує на існування, в багатьох випадках, надлишкового порового тиску та фільтрації. Розсіювання цього порового тиску іноді триває роками і навіть десятиліттями [1].

Взаємопов'язані процеси деформування і фільтрації (консолідації) в насичених водою ґрунтах, що складають тіло основи споруд, і є причиною різноманітних технологічних впливів як на стадії проектування, так і під час зведення та експлуатації гідротехнічних споруд. Важливу роль в її розвитку відіграє розуміння і можливість прогнозування цих процесів, інтерпретація і обробка експериментальних даних.

Сучасний етап розвитку теорії консолідації дозволяє проводити розрахунки порового тиску з урахуванням різноманітних факторів –

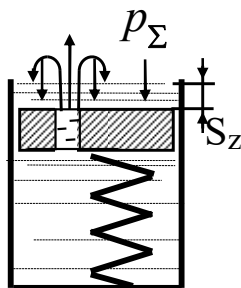


Рис. 1. Модель фільтраційної консолідації  
*Терцагі-Герсеванова*

пружних і пластичних властивостей ґрунтів, поетапності прикладення навантажень, змінення напорів на межах області ущільнення, впливу газоподібної складової тощо.

В останні роки зацікавленість до теорії фільтрації посилюється, про що свідчить зростання публікацій на цю тематику [1; 2].

Однак, на сьогоднішній день при розгляді процесу консолідації вплив фізико-хімічних факторів в рідині, на перебіг цих

процесів, кількісно не враховується. Найбільш поширена модель глинистого ґрунту, в якому відбуваються процеси консолідації (механічна модель *Терцагі-Герсеванова*) базується на тому, що ґрунт представляється як циліндр з пористим поршнем. Під впливом зовнішнього тиску вода із циліндра витискається крізь пори у поршні доти, доки він не буде зрівноважений реакцією стиснутої пружини, яка моделює скелет ґрунту.

Математична модель консолідації насиченого пористого середовища під дією зовнішніх поверхневих сил включає в себе сумарне рівняння руху фаз, умови нерозривності (баланс мас), закон фільтрації, реологічні співвідношення для пористого скелету, граничні і початкові умови.

В спрощеному варіанті теорії фільтраційної консолідації вважається, що рідина і матеріал часток абсолютно не піддаються стисненню, пориста матриця деформується пружно, а рідина фільтрується за законом Дарсі.

Проте опис властивостей реального пористого середовища вимагає ускладнення співвідношень, що їх визначають [4]. Закон фільтрації також, в цілому ряді випадків, може мати більш складний характер, ніж закон Дарсі [3; 4; 7].

Крім того, як показують натурні дослідження на деяких греблях, за даними порівняння розрахункових напорів за математичною моделлю та замірними в греблі зафіксовані суттєві розбіжності [2]. Це пов'язано, очевидно, з недостатньою адекватністю математичної моделі, що можна усунути за допомогою так званого «калібрування коефіцієнтів». Однак такі рівняння моделі консолідації мають разове використання. З точки зору системного підходу, доцільним є введення нових фізичних закономірностей, які поки що не задіяні в діючій моделі консолідації.

Найбільш доцільними, на думку авторів, в цьому відношенні є використання рівнянь, що характеризується поверхневою енергією взаємодії між рідкою і твердою фазою. Цей підхід має дві складових: по-перше, консолідацію ми можемо розглядати як трансформацію потенційної енергії води пов'язану, з одного боку, з тиском у замкненому середовищі та поверхневою енергією молекулярних та капілярних сил (адсорбція води на поверхні частинок) у кінетичну енергію руху води, з іншого; по-друге, такий підхід дає змогу визначати вплив на перебіг консолідації таких факторів як дисперсність та активність глинистих частинок, засолення ґрунту, що укладається, здатність до набухання ґрунтів, вплив капілярності та інші фактори, що не враховуються моделлю Терцагі-Герсеванова.

**2. Енергетична модель процесу консолідації.** З точки зору ґрунтознавства, енергетичний стан ґрунту характеризується комплексом

факторів (певним потенціалом) у працях С.В. Нерпіна, Мічурина Б.Н., Онищенко В.Г. [3; 4; 7].

В основі кількісного описання стану вологи в ґрунті лежать енергетичні (термодинамічні) підходи, що відтворюють взаємний зв'язок двох змінних: *капілярно-адсорбційний тиск – вологість ґрунту* [P-W], *гідрравлічна провідність – вологість* (потенціал вологості) ґрунту [K-W] та [K-P], *дифузність – вологість ґрунту* [D-W].

Таким чином в реальних ґрунтах тиск, вологість, водопровідність та дифузність є функціями багатьох змінних

$$\begin{aligned} P &= f(S, \rho_n, \theta, \sigma, T), \\ K &= f(S, \rho_n, \theta, \sigma, T), \\ D &= f(S, \rho_n, \theta, \sigma, T), \end{aligned}$$

де  $S$  – площа питомої поверхні,  $\rho_n$  – щільність ґрунту,  $\theta$  – кут змочування,  $\sigma$  – поверхневий натяг,  $T$  – температура.

Процес консолідації шару ґрунту в умовах наявності градієнта концентрації порового розчину можна простежити на запропонованій в роботі [2] фізико-хімічній моделі (рис. 2), яка є розвитком згаданої вище механічної моделі *Терцагі-Герсеванова*. На бічній поверхні основного циліндра знаходиться додатковий циліндр з поршнем, який може, незалежно від основного циліндра, збільшувати (зменшувати) надлишковий тиск в рідині. Цей елемент моделює вплив фізико-хімічних явищ, які відбуваються у ґрунті (осмос, адсорбція, дифузія тощо). Інтенсивність силового впливу на другий поршень задається ззовні і відповідає активності вказаних процесів. Внаслідок

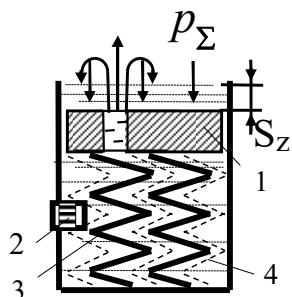


Рис. 2. Енергетична модель консолідації

- 1 – перший поршень (зовнішній тиск)
- 2 – другий поршень (фізико-хімічний елемент)
- 3 – стиснута пружина, яка моделює скелет ґрунту
- 4 – зв'язана вода, що заповнює поровий простір

наявності додаткового циліндра ґрунтова модель відображає ущільнення ґрунту з врахуванням фізико-хімічних процесів. Вода в цій моделі розглядається як вільна, капілярна та зв'язана, в двох останніх випадках вона взаємодіє із скелетом ґрунту.

В розрізі вищевикладеного, можна представити тиск вологи величиною роботи, що витрачається на подолання водоутримуючих сил при переміщенні з ґрунту одиниці її об'єму

$$P_w = \frac{dA}{dV}; \quad H_w = \frac{P_w}{\gamma_w}. \quad (1)$$

Тиск та потенціал вологи пов'язані величиною густини води

$$\varphi_w = P_w \cdot \rho_w. \quad (2)$$

Повний потенціал  $\varphi_w$  або тиск  $P_w$  вологи в ґрунті складаються з окремих складових, що включають в себе як фізичні, так і хімічні процеси

$$\varphi_w = (\varphi_a + \varphi_o + \varphi_k + \varphi_g + \dots + \varphi_i), \quad (3)$$

де  $\varphi_a$  – адсорбційний,  $\varphi_o$  – осмотичний,  $\varphi_k$  – капілярний,  $\varphi_g$  – гравітаційний потенціали.

Метою енергетичної оцінки води в ґрунті є отримання залежностей  $P=f(W)$  або  $\varphi=f(W)$ . Для цього застосовуються прямі і непрямі методи [7], наприклад метод гідравлічної рівноваги.

Так, при збільшенні на ґрунт зовнішнього тиску відбувається перехід частини потенційної енергії взаємодії між водою та поверхнею частинок у кінетичну енергію руху води. Рівняння балансу енергії вільної рідини в середині водонасиченого ґрунту нехтуючи температурними втратами можна записати у вигляді:

$$E_{p1} - E_{p2} = \Delta E_p = E_c, \quad (4)$$

де  $E_{p1}$  та  $E_{p2}$  – потенційна енергія рідини в одиничному об'ємі ґрунту до докладання певного зовнішнього навантаження і після нього;

$E_c$  – кінетична енергія рідини після докладання навантаження.

Зміну потенційної енергії рідини можна представити у вигляді роботи сил в гравітаційному полі ( $\Delta A$ ) і виразити рівністю

$$\Delta E_p = \Delta A \cdot g = H \cdot g \cdot \Delta M = P_w \cdot \Delta W = P_w \Delta h S = \frac{mv^2}{2}, \quad (5)$$

де  $H$  – висота капілярного підняття,  $\Delta M$  – зміна маси води при капілярному всмоктуванні,  $\Delta W$  – зміна вологості ґрунту,  $P_w$  – тиск води,  $h$  – товщина водної плівки,  $v$  – швидкість руху води,  $m$  – маса води, що відтискається.

Закон фільтрації також може мати складніший характер ніж закон Дарсі [3; 4; 7], наприклад у вигляді рівняння Дарсі – Кюта для руху фільтрації у ненасиченій зоні:

$$v = K_w \left( \frac{dp_w}{dz} - 1 \right), \quad (6)$$

де  $K_w$  – коефіцієнт волого переносу, що відповідає коефіцієнту фільтрації у водонасиченій зоні, що залежить від вологості,  $P_w$  – тиск у поровій волозі,  $z$  – висота точки над площиною порівняння.

**3. Залежність адсорбційного тиску ґрунтової води від товщини плівки** (зв'язаної і частково зв'язаної води) можна продемонструвати

на наступному прикладі. Загальний вміст води в ґрунті  $W$  складається з води, що адсорбується на поверхні часток у вигляді молекулярної плівки (полімолекулярної плівки  $W_{пл}$ ) та води, що знаходиться в порах між частинками ( $W_k$ )

$$W = W_{пл} + W_k. \quad (7)$$

Розглянемо граничний випадок, коли у ґрунті є тільки плівкова вода  $W = W_{пл}$  і тиск визначається товщиною плівки

$$P_h = f(h). \quad (8)$$

Оскільки дійсне значення товщини адсорбованої водної плівки невідоме, то уявимо всю воду у формі плівкової води. Товщину водної плівки в цьому випадку знаходиться за формулою

$$h = \frac{W}{\rho \cdot S}. \quad (9)$$

Використовуючи це співвідношення, можна перетворити функцію тиск – вологість ґрунту за різних значень питомої поверхні у функцію тиск – товщина водної плівки. Такі результати наведено в роботі [3] (див. рис. 3). З цих даних випливає, що зі збільшенням питомої

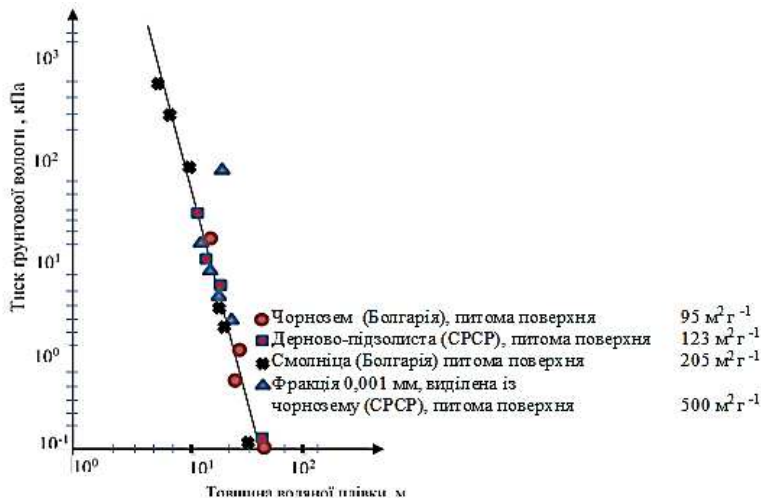


Рис. 3. Залежність тиску води в ґрунті від товщини водної плівки [3]

площі поверхні і зменшенням вологості, відношення приросту тиску і приросту товщини водної плівки прямує до межі. При чисельних значеннях  $S \geq 100 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{г}$  товщина водної плівки при даному тиску однакова для всіх полідисперсних систем

$$\frac{W_1}{S_1} = \frac{W_2}{S_2} = \dots = \frac{W_i}{S_i} = h = \text{const при } P = \text{const}. \quad (10)$$

Залежність тиску від товщини водної плівки, що зображена на рис. 3, можна відобразити формулою

$$P = 5 \cdot 10^2 \cdot h^{-4}, \quad (11)$$

де  $P$  – тиск вологи, кПа;  $h$  – товщина плівки, м.

Можливість за цією залежністю розділити усю вологу, що утримується ґрунтом, на об'ємну та плівкову доводить необхідність і можливість врахування останньої у вищенаведеній енергетичній моделі (рис. 2 (4)).

Наступні залежності допоможуть виробити певні усталені коефіцієнти, аналогічні коефіцієнту консолідації, для енергетичної моделі консолідації.

**4. Залежність між тиском та приведеною потенційною енергією ґрунтової вологи.** З іншого боку розглянемо потенційну енергію притягнення між водою та ґрунтовими частинками. Потенційна енергія деякого об'єму води складається з енергії гравітаційної (або об'ємної) та енергії поверхневої:

Робота сил в гравітаційному полі ( $\Delta A$ ) виражається рівністю

$$\Delta A \cdot g = H \cdot g \cdot \Delta M = P \cdot \Delta W. \quad (12)$$

Робота сил поверхневого напруження

$$\Delta A \cdot g = \sigma \cdot \Delta S, \quad (13)$$

де  $H$  – висота капілярного підняття, м;  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $M$  – маса води, кг/кг;  $P$  – тиск вологи, кПа;  $\sigma$  – поверхневий натяг води кН/м;  $S$  – питома поверхня м<sup>2</sup>/кг.

Поверхневі сили і поверхнева енергія зростає пропорційно площі питомої поверхні, тоді як вага і об'єм зростає пропорційно масі води, що всмоктується.

Відносне значення об'ємних і поверхневих сил можна характеризувати відношенням гравітаційної енергії до поверхневої енергії, тобто величиною так званого приведенного капілярно-адсорбційного тиску

$$P_{kc}^* = f(W). \quad (14)$$

На рис. 4 експериментальні дані, що відносяться до ґрунтів з питомою поверхнею 29-220 м<sup>2</sup>/г<sup>-1</sup>, представлено відповідною графічною залежністю [5]. Таким чином, графічну залежність між приведеним капілярно-сорбційним тиском та вологістю можна розглядати як узагальнену характеристику для ґрунтів з наведеною питомою поверхнею при зміні всмоктувального тиску від 0,1 до 2290 атм.

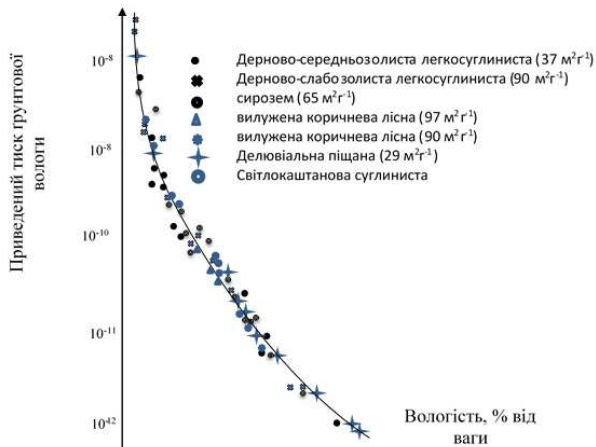


Рис. 4. Залежність приведенного капілярно-адсорбційного тиску від вологості ґрунту

Для визначення залежності  $P(W)$  конкретного ґрунту (з відомою питомою поверхнею), за даними рис. 4, можна визначити величину приведенного тиску при будь-якому значенні вологості ґрунту. Тим самим прослідковується чіткий зв'язок (14).

Отже, наведені підходи дозволяють враховувати енергетичні принципи як для більш адекватного опису, так і для отримання більш достовірних практичних результатів, відходячи від доволі спрощеної фізичної моделі Терцагі – Герсеванова, і враховувати складні, в тому числі і хімічні, процеси в ґрунтах, що консолідуються.

1. Жеребят'єв О. В. Порівняльна оцінка результатів математичного моделювання фільтраційної консолідації тіла та основи ґрунтової греблі за наявності масопереносу солей / Жеребят'єв О. В., Власюк А. П., Мартинюк П. М. // Світ геотехніки. – 2006. – № 3. – С. 4–9. 2. Жеребят'єв О. В. Консолідація глинистих ґрунтів в умовах наявності значних градієнтів концентрації порового розчину / О. В. Жеребят'єв, А. П. Власюк // Вісник Українського будинку економічних та науково-технічних знань. – 1999. – № 2. – С. 146. 3. Нерпін С. В. Фізика почв / Нерпін С. В., Чудновський А. Ф. – Изд. «Наука», 1976. 4. Роде А. А. Основи учения о почвенной влаге / А. А. Роде. – Т. 1. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 664 с. 5. Мичурин Б. Н. Общая теория капиллярно-сорбционного потенциала (давления почвенной влаги) / Мичурин Б. Н., Онищенко В. Г. // Сб.тр. по агрон. физике. 6. Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами / ПНИИИС – М. : Стройиздат, 1989, 64 с.

Рецензент: д.т.н., професор Бабиш Є. М. (НУВГП)

**Zherebiatiev O. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Kukhniuk O. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **BASIS OF THE ENERGY THEORY OF CONSOLIDATION**

**The results are continuation of researches, devoted to theories of consolidation of soils. As a result of working of theoretical and experimental information, a model which enables to improve understanding of nature prognostication of conduct of the consolidated soils is offered, taking into account power approaches.**

***Keywords:* consolidation of soils, energy approach, model of filtration consolidation.**

---

**Жеребятъев А. В., к.т.н., доцент, Кухнюк О. Н., к.т.н., доцент**  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## **ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КОНСОЛИДАЦИИ**

**Приведенные результаты являются продолжением исследований, посвященных теории консолидации грунтов. В результате обработки накопленных теоретических и экспериментальных данных, предлагается модель, позволяющая улучшить понимание природы и прогнозирования поведения консолидированных почв, с учетом энергетических подходов.**

***Ключевые слова:* консолидация грунтов, энергетический подход, модель фильтрационной консолидации.**

---