

**К. ТЕРЦАГІ**  
**K. TERZACHI**

# **ОСНОВИ МЕХАНІКИ ҐРУНТІВ**

примір

**ДВОУ—ТЕХНІЧНЕ ВИДАВНИЦТВО**

720541  
280

К. ТЕРЦАГІ (K. TERZAGHI)

624.15  
T-35

# ОСНОВИ МЕХАНІКИ ГРУНТІВ

49.0541

1807.

Університетський  
бібліотечний фонд



Бібліотека НУВГП



720541

624.15

T35

Основи механіки ґрунтів

И



ДВОУ. ТЕХНІЧНЕ ВИДАВНИЦТВО  
ХАРКІВ

НУВГП  
1931  
НАУКОВА  
БІБЛІОТЕКА



Укрголовліт № 1082, 28/II 1931,  
Зам. № 3609, Тираж 6,000

## ПЕРЕДМОВА

Ім'я професора Терцагі зажило великої популярності в наукових колах, що цікавляться питанням будівельної механіки ґрунтів, яко революціонера у цій, такій важкій і досі не вивченій царині. Його основна праця „Erdbaumechanik“ становить епоху в теорії ґрунтів. Опрацювання проблеми глини - проблеми доти неопрацьованої — одна з найбільших заслуг Терцагі. Збудована на фізично - механічних основах, Терцагова теорія ґрунтів показує нові шляхи розв'язання таких важливих за нашого часу питань, як, приміром, робота ґрунту, яко підмурку споруд, у шляховому будівництві тощо.

Тим часом „Erdbaumechanik“ чекає на свого перекладача й доводиться задовольнятись дуже скороченим викладом основних ідей Терцагі за його статтями, оголошеними друком ще 1925 року в американському журналі „Engineering News — Record.“ Російським виданням вона вийшла 1926 року як збірка статтів під загальною назвою „Основания механики ґрунтов“. Книжка ця розійшлась відразу, і нині на книжковому ринку її нема, а оригінальна праця „Erdbaumechanik“ малоприступна. Тим то Укрдержтехвидав заходився коло видання українського перекладу згадуваної короткої брошури. Сподіваємось, що будівельно - технічні кола стрінуть цю книжку доброзичливо, й що вона виконає своє призначення — поширити нові ідеї з статіки ґрунтів.

Проф. Ф. А. *Белзков*

## ПЕРЕДМОВА

У жадній іншій галузі своєї роботи інженерові - будівникові не доводиться орудувати так навмання, майже без ніякої наукової бази, як у царині земляних споруд. Для нас цілком або майже ясна гра сил у металевих, дерев'яних, бетонових, залізобетонних та кам'яних конструкціях, але явищ, що відбуваються в ґрунтах, для нас неясні. А втім кожному будівникові, незалежно від його вузької спеціальности, доводиться мати справу з землею.

Наявні теорії сипких тіл, подані в курсах будівельної механіки, звичайно не можна вважати за вдале розв'язання справи. Природний вихід із становища це — оскільки дозволяє сучасний стан нашого знання — вивчати ґрунти за їхніми фізичними та хемічними властивостями. 1913 року американське товариство інженерів-будівників (American Society of Civil Engineers) утворило окрему комісію вивчати ґрунти саме на цій базі. Проте комісія ця хоч зібрала чимало цифрового матеріалу, не дійшла цілком виразних висновків. Але їй пощастило звернути на своє завдання громадську увагу та добутися визнання її за справу державної ваги („La problem of national importance“).

Приблизно того ж самого часу коло вивчання властивостей ґрунтів та землі стосовно до шляхової справи заходилося північно-американське товариство громадських шляхів (U. S. Bureau of Public Roads). Свою науково-дослідчу роботу воно дуже успішно провадить і тепер.

Але епоху в теорії ґрунтів зробив поява книжки Терцагі (Terzaghi) „Будівельна механіка ґрунтів“ (Erdbaumechanik), виданої 1925 року. Професор американського Роберт-коледжу в Константинополі, Карл Терцагі 6-7 років тому заходився коло лабораторного вивчання відношення пісків до води та обтяженню на основі фізичних властивостей цих ґрунтів. Дослідження дали

матеріал для журнальних статів (1920 р.), а тоді Терцагі поширив свої спроби — заходився вивчати глину. Наслідки своєї роботи Терцагі подав у вже згаданій книзі.

Зразу ж після цього Масачузетський технологічний інститут запрохав Терцагі прочитати в цьому навчальному закладі курс механіки ґрунтів, а відомий технічний журнал „Engineering News-Record“ запропонував свої сторінки для викладу теорій Терцагі. Кожний, хто знає, як тяжко авторам більш-менш теоретичних праць добутися місця в цьому журналі, зрозуміє, що редакція журналу не подала б у вісьмох послідовних числах серії статтів Терцагі, якби ці статті не мали практичної ваги для будівників. І дійсно: у журналі за 5 листопада 1925 року редакція, подаючи першу Терцагову статтю, кваліфікує його працю jako „блискучу“ („a drillant series of articles“).

Не маючи з технічних міркувань змоги видати повний переклад книги Терцагі, Трансдрукухвалив випустити лише переклад його статтів з журналу „Engineering News-Record“. Отже ця брошура є переклад згадуваних Терцагових статтів.

Звичайно, ідеї Терцагі спричинили певне замішання в технічних колах, і вражіння, справлене ними, можна до деякої міри порівняти з першим вражінням од Айнштайнової теорії. З листів до редакції журналу „Engineering News-Record“ довідуємось, що на американських інженерів велике справило вражіння Терцагове твердження, ніби вода у капілярах підпадає під розтяжні зусилля, що в ґрунтах є чималі середові сили тощо.

Читача цієї брошури, либонь, уже на перших сторінках її неприємно здивує відсутність виразного розмежування глин та пісків, що до нього ми дуже звикли, базуючись на даних механічної аналізи (тобто на великості часток). Проте, радимо прочитати цю брошуру до кінця й простежити, як автор поволі виявляє різницю між цими ґрунтами. Образне порівняння Терцагі: піску — з купою скалля, а глини — з купкою дрібних клаптиків паперу.

Можливо, ця брошура не дасть нашому читачеві вичерпної відповіді на всі його запитання, але в кожному разі вона багато вяснить.

З цього погляду праця Терцагі безперечно цікава, надто тому, що й у нас наспіла думка вивчати ґрунти цілком інакше, ніж ми це робили дотепер. Слід відзначити праці професорів Павловського, Бернацького та інших, Останні 2-3 роки особливий інтерес

до землі та ґрунтів виявили наші шляховики. У спільній з ґрунтознавцями праці позначили вони власні віхи вивчення ґрунтів та землі й вже успішно заходилися коло цього вивчення <sup>1)</sup>).

Всім зацікавленим новонароджуваною науковою „інженерною теорією ґрунтів“ — радимо прочитати оригінал праці Терцарі німецькою мовою.

Проф. Д. Кринін

Москва,  
Квітень 1926 р.

---

<sup>1)</sup> Між іншими слід відзначити праці лябораторій дослідчого бюра ЦУМТ'а в Ленінграді, а в Москві — Московської вищої технічної школи та Московського окружного управління місцевого транспорту.



## РОЗДІЛ ПЕРШИЙ

### СПІЙНІСТЬ ГЛИНИ

Співвідношення між зовнішнім обтяженням (тисненням на ґрунт) і вологістю. Гідростатичний тиск у масі глини. Зступання та від'ємний гідростатичний тиск. Поверхневий натяг — причина спійності.

У подальшому викладі під умовною назвою глина розуміється пластичні ґрунти, що складаються з суміші часток діаметром од 1 мм. до 0,06 мм. і мають у собі дуже небагато колоїдальних часток (у хемічному цього слова розумінні).

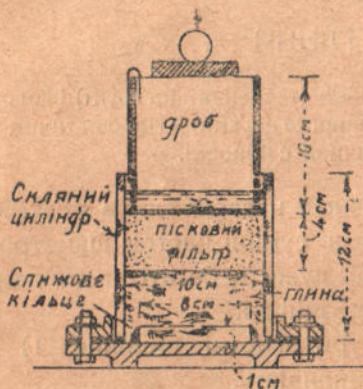
Властивості глини визначають три основні чинники: 1) спійність, 2) вологість та 3) водопроникливість.

Спійність звичайно вважають за відмінну властивість більшої частини ґрунтів. Проте досі не зроблено жадної серйозної спроби дати фізичне з'ясування цієї властивості, вважаючи її мов би за елементарну, непідлеглу дальшій аналізі. У наслідок — механіка глин лишилась у зародковому стані. Ми майже нічого не знаємо про ролі часу та водопроникливості в процесах зступання. Ми не маємо виразного уявлення про причини бубнявіння глин. Тим то нині цілком своєчасно заходиться коло систематичного вивчення цих явищ. Саме в цьому напрямі зроблено чимало лабораторних спроб над ґрунтами.

Залежність між обтяженням (тисненням на ґрунт) та вологістю. Найпростіший процес, що його може зазнати верства глини, це — тиснення під впливом рівномірно розподіленого обтяження під умовою, що верства не може поширюватися в сторони й що поверхневий натяг капілярної води усунено. Щоб добутись останньої умови, робили спроби з розрідженою вільною від повітря глиною. Підчас цих спроб поверхня глини була вкрита водою. Отже, жадні зовнішні, опріч обтяження, сили не діяли на

частки глини. Що пори глини було геть заповнено водою, при стисканні деяка кількість капілярної води повинна була вичавлюватись (витікати) з глини.

Спробу виконували ось як: нижню частину скляного циліндра (рис. 1) наповнювали рідкою, але дуже в'язкою сумішшю глини з водою. Дно циліндра вкривали аркушем тонкого фільтрувального паперу (на рисунку не позначено), а на нього клали спижеве кільце, занурене в глинясту масу. Поверхню маси вкривали аркушем фільтрувального паперу, а поверх нього насипали фільтра-



Прилади визначати співвідношення між тиском та вологістю глини

Рис. 1. Прилад для спроб під низьким тиском

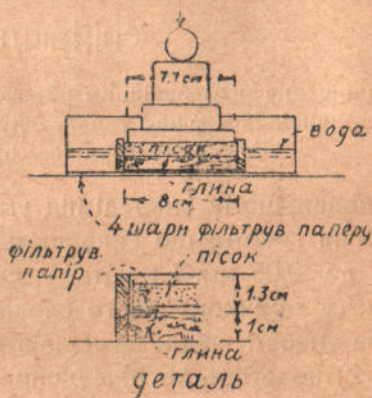


Рис. 2. Прилад для спроб під високим тиском

ційний шар кварцового піску, з зерен діаметром од  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{2}$  мм. Потрібно було близько 24 год., щоб довести до кінця процес стискання глини під вагою пісового шару. Тоді позверх піску становили мосяжеву посудину. Під тисненням її стискання тривало ще один день. Тоді збільшували обтяження, заповнюючи нижню половину посудини шротом (дробом), а ще за два дні заповнювали й верхню половину. Повне обтяження тоді становило 0,1 кг. на кв. см. Щоб виміряти величину стиску, мосяжеву посудину устатковано шкалею. Надалі обтяження збільшували важелем, що передає тиснення на посудину через сталю кулю. Отже тиснення підвищувалось що два дні від 0,1 до 0,2, 0,3, 0,6 і до 1,2 кг. на кв. см.

Щоб добутися вищого тиску вживали прес. Тоді згадуваний прилад розбирали: важіль, посудину з дробом та пісковий шар відкидали геть, дно циліндра відкручували, а глину витискали

толоком. Потім спижеве кільце звільняли від глини навкруги нього, отже лишався тільки шар глини у кільці, завгрубшки рівний височині кільця, тобто 1 см. Зразок одкинутої частини глини вживали для визначення вологости. Кільце, з глиною всередині його, важили й проводили спробу далі за допомогою прилада, поданого на рис. 2. Щоб зменшити втрату води через випаровування, прилади міняли якнайшвидше. Другий прилад складався з квадратної посудини. Дно її вкривали двома шарами грубого та одним шаром тонкого фільтрувального паперу. На фільтрувальний (змочений) папір клали одне на одне двоє спижевих добре притертих (на конус) кілець. Спершу клали нижнє кільце з глиною, а на нього верхнє кільце, обкладене фільтрувальним папером (див. деталь до рис. 2). Тоді горішню поверхню глини вкривали кружком вогкого фільтрувального паперу, позверх нього насипали пісок, а на нього становили спижеві плитки та кулі. Ввесь прилад уміщали в посудину, наповнену водою, й становили під прес.

Під пресом тиск підвищувався протягом 20 хвилин од нуля до 2 кг. на 1 кв. см. а тоді лишався незмінний. Під цим тиском грубина шару зменшувалась спершу швидко, а потім повільніше й приблизно за два дні робилась стала. Це визначало досягнення стану гідростатичної рівноваги. Тоді сифоном видаляли воду з посудини, хутко зводили толлок преса, прибирали спижеві плитки, пісковий шар та верхнє кільце, старанно висушували горішню поверхню глини пропускарльним папером, визначали вагу кільця разом з глиною всередині його, зчищали грудочки глини понад горішнім краєм кільця й важили вдруге. Тоді прилад знову складали й провадили спробу далі.

Отже тиск підвищувався приблизно щодва дні від нуля до 2, 4, 8, 14 і 20 кг./см.<sup>2</sup>. За здобутими даними підраховували координати відповідних точок кривої залежності між тиском та вологістю. Тоді виконали повний цикл, піддаючи ґрунт сталому тискові спершу 8 кг./см.<sup>2</sup> потім послідовно 4, 2, 1, 0, 1, 2, 5, 10 і 20 кг./см.<sup>2</sup>. Відповідний до кожної згаданої величини тиск лишали незмінним протягом двох днів, а тиск 0 — протягом 4—6 днів, щоб забезпечити цілковите насичення водою.

Розпочинаючи спроби, побоювались, що цілковите видалення обтяження перед кожною зміною тиску може стати за серйозне джерело помилок, при дослідженні бо стисливости пісків та інших дуже водопроникливих зернястих ґрунтів виявилось, що подібна

метода не досягає мети. Проте щодо глини ці побоювання не справдилися. Через низьку водопроникливість навіть піскуватих глин чин повторного насичення зовсім малий. Зроблено, наприклад, таку спробу: шар глини в 1 см. завгрубшки піддали тискові 18,9 кг./см.<sup>2</sup>. Тоді, знявши обтяження, занурили його у воду; за годину вологість глини збільшилась лише на 0,15%, а переміжок часу від спроби до спроби ніколи не перевищував двох хвилин.

На рис. 3 подано наслідки спроб. На осі абсцис відкладено тиск, на осі координат — вологість у відсотках від обсягу твердої речовини глини. На нижній діаграмі подано криві для жовтої ганчарної глини та для синьої морської, а на верхній — для сірого піскуватого мулу річкової дельти. Кожна спроба тривала близько 8 тижнів. Окрема галузка кожної кривої зображає вплив поступового збільшення обтяження (складний тиск), а цикли обтяжень подано викривленими петлями гістерези (пружний розшир).

Загаяння стиску. Як уже зазначалось, деформація при стиску, що заходить під впливом даного обтяження, постає не зразу, а поволі. Стану рівноваги досягається, не раніше, як за 24 години, хоча б шар глини був і дуже тонкий. Це дуже важливе явище. Воно визначає, що потрібний деякий час, щоб капілярна вода просочилася зсередини маси глини на поверхню, а тоді витікла через пісковий фільтрувальний шар. Що цей рух може відбуватись лише під гідростатичним напором, а на вкритій водоповерхні глини гідростатичний тиск дорівнює нулеві, обтяження повинне спричиняти додатний гідростатичний тиск у капілярній воді всередині глинястої маси.

Різниця гідростатичних тисків, що від неї залежить рух капіляр-

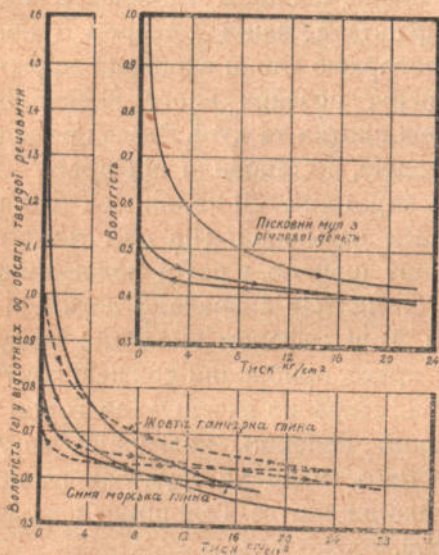


Рис. 3. Криві залежності поміж тиском та вологістю для трьох сортів глини

ної води, витрачається на подолання опорів, на які натрапляє вода у вузьких капілярах глини на путі до поверхні.

Іншими спробами доведено, що рух води у глині додержує закону Дарсі так само точно, як і рух води у піску. Тим то існує проста пропорційність між гідростатичним напором і розміром стиску шару глини в одиницю часу при незмінному обтяженні зменшення бо обсягу глини тотожне з обсягом видаленої (вичавленої) води. Зразу після застосування обтяження швидкість зменшення обсягу глини буває найбільша, отже гідростатичний напір — максимальний. Під кінець спроби гідростатичний тиск в усіх точках шару дорівнює нулеві, грубина шару вже не змінюється (гідростатична рівновага глини).

Описані спроби свідчать, що *тиск та вологість глини сполучені одне з одним такою самою певною залежністю, як зусилля та деформації в твердих тілах*. Єдина різниця — що глина стискається повільно, а зусилля, прикладене до твердого тіла, майже негайно спричиняє відповідну деформацію.

Окрім того, ці спроби доводять, що стискання глини супроводжується рухом капілярної води зсередини глини до поверхні її, а це їй собі вимагає наявності різниці гідростатичних тисків. Інакше кажучи, деформації в масі глини досягають сталої величини лише коли зникає різниця гідростатичних тисків (гідростатичний напір).

Зступання глини. Затямивши ці прості, але важливі факти, можна взятись до другої серії спроб. Наповнимо скляний циліндр рідкою, але дуже в'язкою сумішшю глини з водою, як ми вже робили, лише не вкриватимемо поверхню глини піском, — хай вона, відкрита, стикається з повітрям. Станеться те саме, що й при обтяженні поверхні глини: капілярна вода йде з середини глини на поверхню її й тут випаровується; вологість глини знижується, грубина шару зменшується. Відбувається зступання глини.

*Єдина різниця між природним зступанням і штучним стисканням в тому, що при зступанні (в наслідок випаровування досягається границі, що поза нею обсяг глини лишається незмінний, а при стисканні деформація може перейти цю границю*. Коло границі зступання глина переходить з напівтвердого стану в твердий. До границі зступання шар глини виявляє ознаки бічного стискання: глина відходить від кільця й тріскається. Дійшовши глини границі зступання, міняє звичайно свій колір. Проте

від початку спроби на зступання до деякої точки за границею пластичності процес стискання та процес зступання тотожні всіма сторонами.

Дивно, що ніхто не визнав за потрібне дослідити фізичні причини цієї тотожності. А втім аналіза явищ навертає на нові, дуже важливі висновки. При цій аналізі ми лише повинні пам'ятати, що основні закони механіки твердих тіл і течів прикладні й до складових частин суміші глини з водою.

Від'ємний гідростатичний тиск. Безпосереднім виміром визначено, що вологість шару глини, який повільно зменшується при нормальній температурі, лишається майже однакова на всій глибині шару, в разі ця глибина не перевищує кількох сантиметрів. Це визначає, що існує безупинний рух води зсередини шару до поверхні. Факт руху каже за наявність різниці гідростатичних тисків поміж середовими частинами й поверхнею глини.

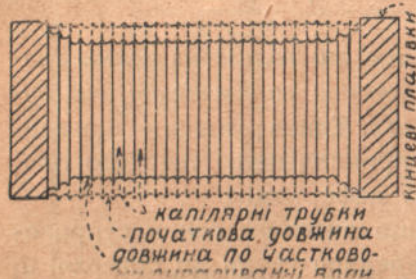


Рис. 4. Жмут капілярних трубок, що вкоротилися в наслідок випарування води з них

У спробі з обтяженням гідростатичний тиск у середових частинах шару глини був додатній. Цей додатній гідростатичний тиск врівноважувало зовнішнє обтяження часток, що поміж них капілярна вода йшла до вільної поверхні. У спробі на зступання зовнішнє обтяження дорівнювало нулеві. А що на відповідну вагу глини проти інших чинних сил можна не зважати, гідростатичний тиск усередині глини дорівнює нулеві. Проте, маючи на увазі що рух капілярної води до випарувальної поверхні потребує наявності різниці гідростатичних тисків, доходимо висновку, що гідростатичне тиснення на випарувальну поверхню повинне бути від'ємне. У спробі з обтяженням поверхневого натягу води не було, вільну бо поверхню глини вкривала вода. Частки глини пересувались униз лише під чином обтяження. У спробі на зступання обтяження не було, проте поверхневий натяг чинив на всю поверхню глини. Отже, гідростатичний напір та від'ємний гідростатичний тиск могли зайти лише в наслідок поверхневого натягу капілярної води.

У капілярі вертикальному вода може підвестись на значну височінь. Поверхневий натяг (на поверхні води), рівний  $T$  дин на сантиметр кола, дає підймальну силу  $\frac{\pi d T}{g}$ , де  $g$  — діаметр капіляра в сантиметрах,  $d$  — прискорення сили тягару в см./сек. <sup>2</sup>. Прирівнюючи цю підймальну силу до ваги стовпця води в капілярі  $h$  см. заввишки та питомою вагою  $w$ , матимемо:

$$h = \frac{4T}{wdg}$$

Підймальна сила тримає вагу стовпця води виключно через *здатність води ставити опір розтяжним зусиллям*, опір бо води щодо дотичних (зрізних) зусиль дорівнює нулеві. Цей натяг, або від'ємний гідростатичний тиск, найбільший на горішній поверхні стовпця води. Тут він дорівнює  $hw$ , а в кожній іншій точці на височині  $h'$  вище рівня води в посудині він дорівнює  $h'w$ . Цілком такий самий натяг існує в глині, коли вона зступається. Саме від цього натягу залежать явища, що заходять підчас висихання глини.

Шар глини в кільці являє собою жмут капілярних трубок (рис. 4), що їхні кінці перебувають на вільних поверхнях шару. Спершу трубки заповнено водою. Випаровування з вільної поверхні намагається знизити рівень води в трубках, але сили натягу перешкоджають цьому. У наслідок — вода заповнює далі всі порожнечі в глині. А що обсяг води через випаровування зменшується, сила натягу води стискає глину. Інакше кажучи — обсяг глини зменшується, а водночас у воді, що в глині, розгортаються сили натягу.

Аналогію між стисненням через обтяження й зступанням через випарування ілюструють діаграми (рис. 5), де вказано напрям руху води й знак гідростатичного тиску всередині маси.

Сили натягу зростають пропорційно кількості випаруваної води, в разі тверда маса глини додержує закону Гука. Вони набувають найбільшої величини, коли вповні розгортається капілярна сила води  $hw$ : це — границя зступання. Дальше випарування знижує рівень води в жмуті трубок, а поверхня глини змінює свій тьмянний відтінок на ясний.

Тиск поверхневого натягу ми називатимемо *капілярний тиск*, а найбільшу вартість його — *перехідний тиск*. Останній становить границю, де напівтверда глина перетворюється на тверду.

Доведено, що капілярні сили спричиняють у капілярній воді натяг, рівний капілярному тиску. Цей натяг не може бути більший за „середовий“ тиск води, але що останній дорівнює близько 21.000 атмосфер, перехідний тиск обмежено лише розміром пор у глині.

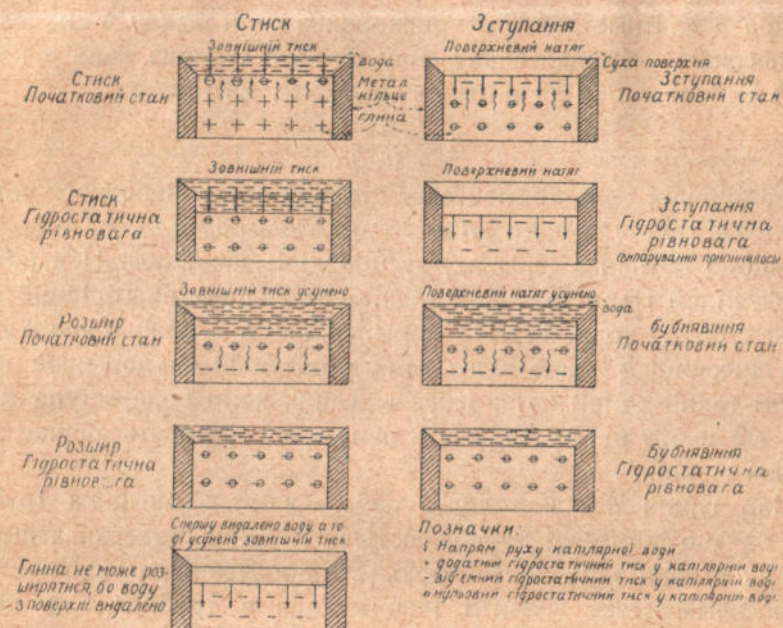


Рис. 5. Діаграми, що ілюструють стиск та зступання глини

Від'ємний гідростатичний тиск, очевидно, тотожний з зовнішнім тиском, потрібним, щоб спричинити те саме зменшення обсягу, як і при зступанні. Тим то перехідний тиск можна визначити тоді, коли відомі вологість, при якій припиняється зступання глини (границя зступання) та зовнішній тиск, потрібний, щоб зменшити вологість глини від початкової величини до величини відповідної до границі зступання. Цією методою визначено, що перехідний тиск жовтої осадової глини дорівнює  $171 \text{ кг/см}^2$ , а синьої морської глини —  $339 \text{ кг. см.}^2$ . Отже, капілярний тиск може бути величезною силою. А втім дотепер і гадки не мали про існування такої сили.

Бубнявіння глини. Як вільну поверхню шару пластичної або напівтвердої глини вкрити водою, поверхневий натяг відразу доходить до нуля, й починається бубнявіння глини. Це бубнявін-



ня тотожне з роширом глини, що заходить по усуненні зовнішнього обтяження (зворотні гілки петель гістерези на рис. 3). Воно являє собою пружний розшир глини, спричинюваний усуненням поверхневого натягу капілярної води, що обсяг збільшується коштом збільшення вмісту води в глині, очевидно, що вода проходить крізь вільну поверхню і іде всередину під впливом різниці гідростатичних тисків на поверхні (де тиск дорівнює нулеві, поверхня бо вкрита водою) й всередині глини (де гідростатичний тиск від'ємний).

Якщо підчас спроби на стиск старанно видалити воду з поверхні, а тоді усунути й зовнішнє обтяження — обсяг глини не зміниться, розшир бо може бути лише при підвищенні вологості, проте вільної води немає. Водночас, в разі обсяг не змінюється, тиск не може зменшитись: поверхневий натяг води заступає зовнішнє обтяження. Подібно до гумової перетинки цей поверхневий натяг становить опір всякому змаганню до розширу.

Отже, всі явища, що стосуються спійності глини, можна з'ясувати самим поверхневим натягом. Спійність — це середовий опір тертя, спричинюваний капілярним тиском. Що причина капілярного тиску — поверхневий натяг капілярної води — причина зовнішня, що чинить на поверхні глини, спійність яко наслідок капілярного тиску, можна назвати видимою спійністю, протилежно до спійності справжньої спричинюваної початковим тертям<sup>1)</sup>. Що початкове тертя за даними спроб становить не більше 20 гр./см.<sup>2</sup> справжня спійність дуже мала проти видимої.

Опір глини зсовові дорівнює здобуткові капілярного тиску на коефіцієнт середового опору. Проте, це справедливе лише щодо пластичного стану. Щождо стану напівтвердого та твердого опір зсовові менший, подібно до того, як опір зрізанню твердих тіл геть менший від здобутку середового тиску на коефіцієнт середового опору. Останнє, очевидно, залежить од наявності чималих вторинних напруг (нерівномірний середовий розподіл напруг).

<sup>1)</sup>Термін „почат.ове тертя“ у вживаному тут розумінні визначає опір глини зсову при відсутності зовнішнього або капілярного тиску. Дослідженням питання про почат.ове тертя виявлено, що воно занадто невелике, щоб з'ясувати властивості, які звичайно розуміють під терміном „спійність“. Середове тертя всередині маси глини, підданої зовнішньому або капілярному тискові, є сума: 1) початкового тертя, власне незалежного від тиску, та 2) опору тертя, спричинюваного тиском і пропорційного йому. Проте й при малих тисках перший доданок проти другого мізерний.

Властивості капілярної води. Що зступання є наслідок поверхневого натягу капілярної води, здавалось би можна обчислити перехідний тиск за пересічним діаметром капілярів у глині. Що питома вага води дорівнює одиниці, найбільший капілярний тиск у грамах на см.<sup>2</sup> дорівнює найбільший капілярній височині  $n$  в см. Дані механічної аналізи дали змогу обчислити для згадуваної жовтої осадової глини найбільшу капілярну височину. Вона дорівнює 30.600 см. і відповідає діаметрові пор коло границі зступання. Отже перехідний тиск мав би дорівнювати 30.600 гр. або 30,6 кг./см.<sup>2</sup>. Та, як, уже зазначалось, безпосереднє визначення переходового тиску для цієї глини дало величину 171 кг./см.<sup>2</sup>. Розбіжність цих двох величин залежить од того, що вода в капілярах діаметром менше 0,1 мікрона (0,1 $\mu$  = 0,0001 мм.) властивостями своїми відмінна від води в ширших капілярах. В'язкість води та швидкість випарування її швидко зростають при менших діаметрах капіляра, що доведено спробами на водопроникливість.

Дуже важливий наслідок цього, що капілярна вода в глині може випаруватись лише частково. Якби капілярна вода в глині могла випаруватись цілком, як випаровується вода в пісках, глина, висохнувши, втратила б свою спійність. А втім спійність висушеної при нормальній температурі глини майже вдвоє більша проти спійності на границі зступання. Спійність оборотного колоїду цілком залежить од поверхневого натягу капілярної води. З цього виходить, що *частина капілярної води назавжди лишається в порожнечах повітряно-сухої глини й випаруватись не може.*

Згідно з визначенням терміну „границя зступання“ діаметр пор глини нижче цієї границі не змінюється, але вологість зменшується й далі. Очевидно рівень капілярної води спадає, спиняючись у найвузжчих місцях капілярної системи. Цей процес зменшує загальну довжину лінії зіткнення води із стінками капілярів, де діє поверхневий натяг. Проте спійність більшає й далі. З цього ми повинні висувати, що поверхневий натяг на одиницю довжини контурної лінії збільшується, подібно до в'язкости, в міру зменшення розміру цих дрібних капілярних жил. Такий висновок потверджує зроблені припущення щодо причини розбіжності між дійсною й теоретичною величинами капілярного тиску.

## РОЗДІЛ ДРУГИЙ

### ОПІР ГЛИНИ СТИСКОВІ

Модуль пружності. Визначення його спробами на стискання кубиків при різній вологості. Відношення модуля пружності до капілярного тиску — величина стала. Пуассонове відношення щодо глини. Аналогія з металами. Неоднорідні ґрунти.

Після згадуваних спроб над зразками глини, поставленими в умови неможливості бічного розширу, зроблено спроби над глиняними кубиками за загальноновживаними до твердих тіл методами. Ці спроби висвітлили трохи інші явища, зокрема — з'ясували вплив повторного насичення, бічний розшир та аналогію між глиною й твердими тілами. Особливу увагу приділено пружним властивостям глиняних кубиків. Це тому, що при стисканні в них заходять явища, безпосередньо стосовні до питання про опір глинястих основ. Тим то ясне розуміння впливу обтяження на кубики дає ключ, щоб зрозуміти складніший вплив обтяження на глинясту основу.

Пружне стискання глини. Для спроб уживали кубиків з сторонами на 2 і на 4 см. Їх формували толоком у призматичних формах, обкладених всередині фільтрувальним папером. Відповідно до мети спроб, кубика випробовували або зразу після формування, або його спершу сушили аж поки вологість його зменшувалась до бажаної величини. Щоб підтримати насиченість повітря водяною парою, кубики підчас спроб становили в циліндер із мосяжевого дроту, уміщений в другий циновий циліндер. Поміж цими циліндрами прокладали насичену водою вату. В таких умовах вологість глини лишалась майже стала протягом кількох днів, тоді як випробовування тривало лише дві години.

Щоб визначити деформацію кубиків, потрібні вельми точні виміри. Отже точність мікрометричного гвинта з електричним

указником контакту виявилась недостатньою. Щоб усунути цю заваду, спроектували інтерференційного вказника контакту, що складався з двох тонких скляних платівок з водяною перетинкою поміж ними та з дуже чутливого мікрометричного гвинта й люпи. Спостерігаючи зміну кольору Ньютонових перснів (що бу-

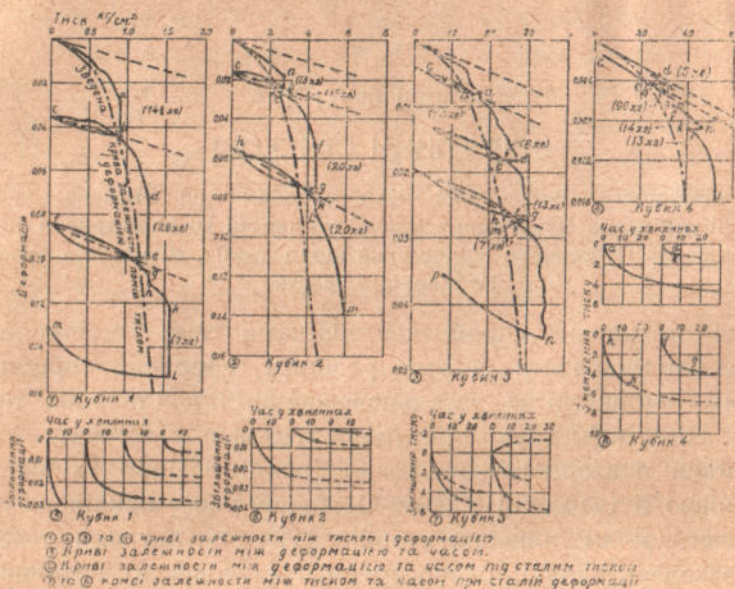


Рис. 6. Стиснення глиняних кубиків. Жовта осадова ганчарна глина, питома вага твердої речовини 2,93, нижня границя текучості 58<sub>0/0</sub>, коефіцієнт пластичності 33,8

	Кубик 1	Кубик 2	Кубик 3	Кубик 4
Зведена вологість (відсотки від обсягу твердої речовини) . . . . .	0,792	0,681	0,490	0, 482
Модуль пружності (кг/см <sup>2</sup> ) . . . . .	115-76	310-195	3760-3460	7300

ває тоді, коли горішня скляна платівка 0,1 — 0,2 мм. завгрубшки стикається з вістрям мікрометричного гвинта), можна визначити становище вістря з точністю понад 0,00001 мм. Ця точність геть перевищує точність мікрометричного гвинта.

Наслідки спроб з кубиками. За приклад наслідків спроб можуть правити діаграми рис. 6. Вони подають криві за-

лежності між зовнішнім обтяженням (тиском) та деформаціями для серії кубиків з жовтої осадової ганчарної глини різної вологості. Ці діаграми дуже подібні до відповідних діаграм для бетону та природного каменю. По осі абсцис одкладено тиск в  $\text{кг./см.}^2$ , а по осі ординат — *зведені деформації*, тобто відношення абсолютної деформації стиску до зведеної височини, тобто до височини кубиків, коли обсяг порожнеч при даному горизонтальному перекрої доведено до нуля. Запровадження зведених деформацій замість звичайних спричинено потребою здобути спільну базу, щоб порівняти одну з одною деформації в кубиках різної вологості.

Загаєння деформації. У спробах з кубиками № 1 та № 2 обтяження спершу повільно підвищували, а тоді лишали на деякий час незмінне. За цей час деформації збільшувались. Попри тому це збільшення поволі загаювалось (див. криві залежності поміж деформаціями та часом). Ця зміна деформацій під сталим обтяженням цілком відмінна від зміни вологості при сталому обтяженні в раніше згадуваних спробах. І ось чому: зміна вологості — наслідок опору, що на нього натрапляє вода, йдучи по капілярах глини, а зміна деформацій відбувається при сталій вологості, тобто при рівновазі капілярної води. Збільшення деформацій кубиків під сталим обтяженням, очевидно, тотожне з пружним наслідком, що супроводжує деформації твердих пружних тіл. Виявлено, що в глині цей пружний наслідок заходить через поступове врівноваження неврівноважених опорів тертя, які спочатку беруть на себе частину обтяження. Існують прості математичні залежності поміж капілярним тиском всередині кубика, зовнішнім тиском та величиною коефіцієнтів, що визначають співвідношення між часом і збільшенням деформацій.

Спроби над кубиками № 3 та № 4 виконувано за допомогою гвинтового преса. У цьому пресі, коли він спиняється, деформація лишається стала, але тиск може змінитися. Подальші діаграми доводять, що коли тиск підтримується таким чином сталий, тиск з часом зменшується. Це явище пояснюється тою самою причиною й додержує тих самих простих законів, що й збільшення деформацій під сталим обтяженням. Що повільніше підвищується обтяження, то непомітніший пружний наслідок, але, водночас, то крутосхиліша крива залежності поміж тиском і деформацією. Крива ця, що відповідає безкрайно повільному збіль-

Шенню обтяження, зветься *зведена крива залежності між тиском та деформаціями* (пунктована крива на рис. 6). Її не тяжко збудувати за допомогою кривих залежності між часом та деформаціями або між часом та тиском.

Цикли обтяжень. Наступна операція при спробах з кубиками полягала в тому, що обтяження зменшувалося до нуля, а тоді знов підвищувалося до попередньої величини (повний цикл). У наслідок виходять петлі гістерези. Ці петлі відрізняються від петель, зображених на раніше згадуваних діаграмах залежності між тиском та вологістю, тим, що осі їхні прямі, а не викривлені. Коли обтяження доходить такої самої величини, що й на початку циклу, крива залежності між тиском і деформацією асимптотично наближується до кривої безупинного збільшення обтяження. Те саме виявилось при позначенні на графіках наслідків спроб, зроблених на дні дослідних колодязів.

Модуль пружності. Термін „модуль пружності“, слід уживати лише щодо оборотної частини деформації кубика, позначеної петлями гістерези. Він дорівнює тангенсові куту поміж віссю деформацій (віссю ординат на рис. 6) і віссю петлі гістерези. Загалом, кут цей завбільшки дуже мало відрізняється від куту, утворюваного з тою самою віссю деформацій дотичною на початковій точці кривої безупинного підвищення обтяження.

Поміж капілярним тиском і величиною модуля пружності існує дуже важливе співвідношення. На рис. 3 абсциси головних гілок кривих залежності поміж тиском та вологістю дають тиски, потрібні, щоб знизити вологість глини у кільці від її початкової величини (під тиском, рівним нулеві) до величини, визначуваної відповідною ординатою, під умовою відсутності поверхневого натягу. Вже зазначалося, що капілярний тиск у середині глини певної вологості дорівнює зовнішньому тискові, що відповідає цій вологості, визначуваному за діаграмою залежності між тиском і вологістю. За цими еквівалентними тисками збудовано криві на рис. 7. Тут абсциси дають капілярні тиски, а ординати — модулі пружності. Величини для кубиків № № 1, 2, 3 і для четвертого кубика, який щодо вологості своєї стоїть поміж кубиками № № 2 і 3, при позначенні на графік дають пряму, відзначену написом: „жовта ганчарна глина“. Розташування цих точок на одній прямій визначає, що *відношення між модулем пружності й капілярним тиском для даної глини — величина*

отала, незалежна від вологости, в разі зразок не насичувано водою вдруге. Позначена на графіку нижня лінія відповідає синій морській глині а дві горішні лінії відповідають двом зразкам піску. Просте співвідношення між капілярним тиском і модлем пружности практично дуже важливе, усталено бо, що опір глини на споді збільшується пропорційно до її модля пружности.

Аналогія поміж глиною та твердими тілами. Спійність глини — наслідок капілярного тиску. Так само спійність твердих тіл є наслідок „середового тиску“, тобто тиску на одиницю поверхні від взаємного притягання молекул. Що своїми

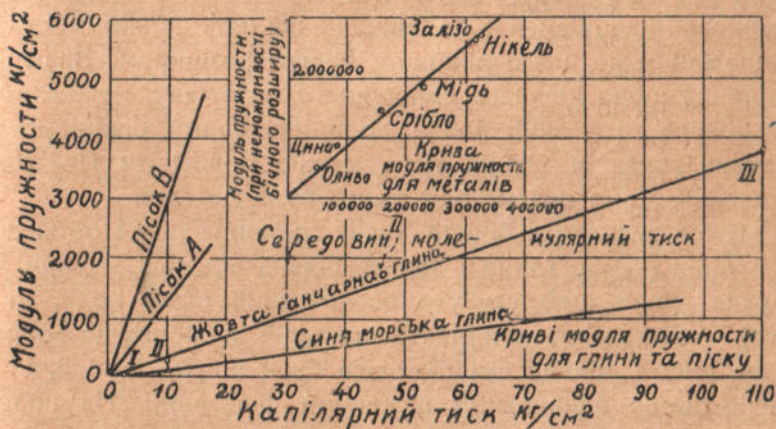


Рис. 7. Співвідношення між модлем пружности та капілярним тиском

пружними властивостями глиняні кубики дуже подібні до кубиків з твердих тіл, постало припущення, ніби відношення між модлями пружности твердих тіл та їхніми середовими тисками так само величина стала. Виявилось, що це припущення справедливе. На верхній діаграмі рис. 7 абсциси подають середовий тиск різних металів за Травбе (Traube), а ординати — модлі пружности для стиску при умові неможливости бічного розширу, обчислені за звичайними модлями пружности та за Пуассоновим відношенням. Всі точки лежать на прямій лінії.

Якби модуль пружности для кожного глиняного кубика був завжди цілком сталий, осі петель гістерези були б пильно паралельні одна до одної. А втім, на діаграмах рис. 6 схил осей трохи збільшується з підвищенням тиску, що буває при початку циклу. Щоб зрозуміти це явище, треба пам'ятати, що підчас

стискання твердого тіла середовий тиск його не змінюється, а обсяг тіла зменшується. Але, зменшуючи середовий тиск в міру збільшення обтяження, можна підтримати сталий обсяг. Щодо глиняних кубиків немає причини змінювати обсягу поки вологість стала, а тому капілярний тиск зменшується із збільшенням обтяження. Це й собі спричиняє зменшення модля пружности та відповідне збільшення скилу петель гістерези. І дійсно: визначивши Пуассонове відношення для кількох глин та обчисливши відносне становище петель гістерези, матимемо наслідок, дуже подібний до експериментальних даних.

Пуассонове відношення. Повторне насичення. Пуассонове відношення — це відношення між лінійним стиском та відповідним до нього лінійним бічним розширом. Знаючи це відношення щодо кожного однорідного матеріалу, можна обчислити бічний тиск, який зайде, коли перепинити бічний розшир. І навпаки: знаючи бічний тиск, можна обчислити Пуассонове відношення. Саме цієї методи вжито було до глин.

З метою визначити бічний тиск, спричинюваний обтяженням шару глини (суміш глини з водою, вільна від повітря, при чому поверхня глина, щоб усунути поверхневий натяг води, вкрита водою), вживали два комплекти приладів, подібних до зображеного на рис. 2. Кільця цих приладів були ширші й вищі, а глину вміщено поміж однаковими пісковими фільтрами. На половині височини кожного шару глини протягали сталъну стьожку, що проходила крізь щілини кільця. В одному шарі пласка сторона стьожки була горизонтальна, а в другому — вертикальна. Щоб глина не вичавлювалась крізь щілини, останні зсередини затуляли невеличкими клаптями грубого фільтрувального паперу. Відношення  $K$  поміж горизонтальним та вертикальним тисками всередині глини дорівнює відношенню поміж силами, потрібними, щоб подолати тертя поміж глиною й сталъними стьожками. Опір тертя вимірювано не раніше трьох днів після застосування тягару, коли усталювалась гідростатична рівновага. За здобутими наслідками обчислено величини Пуассонового відношення  $m$ :

	$K$	$1:m$
Жовта осадова глина . . . . .	0,70	2,73
Синя морська глина . . . . .	0,75	2,55
Вода . . . . .	—	2,00
Оливо . . . . .	—	2,24
Срібло . . . . .	—	2,63



Знаючи Пуассонове відношення та відношення поміж модлем пружности й капілярним тиском, можна обчислити оборотну частину деформації, спричинюваної обтяженням у шарі глини, що в кільці. На діаграмі залежности поміж тиском і вологістю цю оборотну частину зображено викривленими петлями гістерези. Зроблено підрахунки щодо різних гатунків глини. В усіх випадках здобута крива дуже близько збігалася з гілками петель гістерези відповідних діаграм залежности поміж тиском і вологістю. Це підтверджує поправність обчислення Пуассонового відношення.

Гілки петель гістерези на діаграмах залежности між тиском і вологістю звуться *криві повторного насичення*. Це — прості логаритмічні криві. Що вище коефіцієнт повторного насичення, то дужче при цьому насиченні збільшується обсяг і то менше відношення між модлем пружности та капілярним тиском. Цей коефіцієнт найбільший щодо глин багатих на колоїди. Досвід каже, що глина, очевидно, то швидше може зсунутись, що дужче бубнявіє вона, насичуючись водою. Тим то величина коефіцієнта повторного насичення може дати важливі вказівки щодо стійкості природних мас глини.

Неоднорідні глинясті ґрунти. 1921 та 1922 р. р. на одній дослідній станції в Америці зроблено спроби з метою визначити опір на стиск, розрив та зрізання різної глини. Зразки взято з глибини від 1,5 до 1,8 м. нижче дна старого нарізкового кар'єра й випробувано в незайманому вигляді. Здобуті криві залежности між тиском і деформаціями на погляд були дуже подібні до кривих рис. 6. Проте докладнішим вивченням їх виявлено, що поміж них існує й велика різниця.

Для кубиків з кар'єрної глини оборотна частина деформації дуже невелика проти повної деформації, і обчислення дає великі модлі пружности, що здаються цілком невідповідними до низького опору кубиків на стиск.

Так само надзвичайно високі й коефіцієнти середового тертя. Одна з причин цих ненормальностей, очевидно, те, що кар'єрна глина від часу утворення її зазнала багатьох повторних насичувань та зступлень, а кубики на рис. 6 ущільнено безпосереднім стисканням та капілярним тиском.

За авторовими спостереженнями повторні насичення чимало відмінюють відновлення поміж вологістю та капілярним тиском.

Проте й дотепер вплив повторних насичувань ще замало вивчено.

Друга, не менш важлива причина різниці в тому, що кубики (рис. 6) були з однорідного, а кар'єрні кубики з неоднорідного матеріалу. Напр., у жовтій кар'єрній глині часто-густо трапляється коріння рослин, ходи черваків, дрібні тріщини. Кар'єрна сіня глина відзначається крихкістю та ламкістю, — наслідок проходження води та повітря, що оксидують залізясті речовини й спричиняються до утворення покладів у вигляді динамоново-жовтої плівки на площинах розділу. Ці поклади перерізають глину в усіх напрямках. Через цю плівку іноді досить трохи вдарити глину, щоб вона розпалась по цих площинах і перетворилась на крупку масу. Звичайно, такі ґрунти не можна вважати за однорідні: вони посідають проміжне становище між однорідною глиною й грудкуватими ґрунтами. В однорідній глині гідростатичний тиск капілярної води однаковий по всій масі (в разі глина перебуває в стані гідростатичної рівноваги); в грудкуватих ґрунтах частини кожної грудки сполучено одну з одною потужним капілярним тиском, а самі грудки незалежні одна від одної, як і окремі піщини.

Дійсно, маса з сухих грудочок, виявляється, має такі самі пружні властивості, що й сухий пісок, відзначаючись від нього лише більшою стисливістю та меншою пружністю через крихкість грудочок. Вода, що заходить у порожнечі такої грудкуватої маси, лише поволі вбирається нею, водопроникливість бо грудок невелика. При цьому вода пересувається з порожнеч поміж грудками до центрів великих від'ємних гідростатичних тисків, тобто проходить усередину грудок. Проте, навіть дійшовши ґрунт гідростатичної рівноваги являє собою щільникувату масу, непорівнянну з однорідною глиною. Як вода випарується, ця маса знов розсипається на окремі грудки, матеріал бо становить неоднаковий опір чиніві вторинних зусиль.

Отже, грудкувата й однорідна глина мають цілком різні пружні властивості. Першу ще замало вивчено. На щастя, гірші зразки основ (мулкі поклади, м'яка глина та інші) належать майже виключно до категорії однорідних ґрунтів, що їхні фізичні властивості нині вже відомі.

Дані, конче потрібні для характеристики глини. У технічній літературі навряд чи знайдеться бодай один такий опис глини, який давав би виразне уявлення про її властивості.

У найкращому випадку вдовольняються вказівкою на її колір, вологість та хемічний склад. Проте, з досвіду знаємо, що хемічний склад глини має лише слабкий зв'язок з її фізичними властивостями. Щодо вологости — деякі глини з 25% води майже течиво, а водночас інші — з 30% вологости — ще дуже в'язкі. Всебічне дослідження зразків глини вимагає занадто багато часу й праці. Тим то подібні дослідження варто робити лише з науковою метою. Вивчення справи дослідження властивостей глин з технічною метою привело автора до висновку, що програму випробовувань глини бажано змінити відповідно до мети призначення її. Докладний перелік даних, потрібних для характеристики глин, узятих з місць закладання пальових та інших підмурівків, або з місць будування водозатримних гребель, або ж з місць, небезпечних щодо осувів та інш., подано в авторовій книзі „Erdbaumechanik“ (Відень, 1925, стор. 358 та наступні).

Проте, деякі відомості потрібні про всі випадки, незалежно від спеціального призначення глини. Це — відомості, що характеризують співвідношення поміж в'язкістю й вологістю.

Найпростіший та найпевніший спосіб визначати це співвідношення запропонував проф. Аттерберг (Atterberg) для агрономічних цілей, але цілком придатний і до технічних потреб. Він вимагає знати: вологість, питому вагу сухої речовини, нижню границю пластичности та нижню границю текучости.

Вологість визначається звичайним способом: беруть зразок з шурфа або свердловини й кладуть його в пляшку з широкою шийкою та скляною затичкою. Пляшку заповнюють вщерт, щоб поміж глиною й затичкою не лишалося повітря. Лінію зіткнення поміж шийкою й затичкою заливають воском. У лабораторії зразок кладуть поміж двома годинниковими скельцями, зважують його, а тоді сушать при 100° С і знову важать.

Питому вагу сухої речовини визначають пікнометром. Щоб одержати досить точні наслідки, треба нагріти суміш глини з водою до точки кипіння з метою позбутися повітря, що є в глині й воді. Досліджують суміш після охолодження її.

Нижню границю пластичности визначають ось як. До зразку глини додають води, аж поки він зробиться дуже пластичним або, в разі він у природному стані дуже м'який, його сушать до потрібної консистенції. Тоді розкачують зразок у дріт діаметром близько 3 мм., зминають дріт глиняний в одну грудку, знов

розкачують долонею на гладкому чистому аркуші паперу. Цей процес повторюють доти, доки матеріал, замість утворити дріт, починає кришитись та розпадатися на дрібні частки. Тоді визначають вологість. Цю вологість визначену у відсотках від ваги сухого зразку, Аттерберг назвав „нижня границя пластичности“.

З метою визначити нижню границю текучости, беруть пласке порцелянове блюдко (рис. 8), змішують зразок глини з водою, аж поки він зробиться дуже м'який. З суміші роблять коржик діаметром близько 4 см., а завгрубшки 0,8 см. Тоді цього кор-



Рис. 8. Визначення границі текучости (за Аттербергом)

жика розрізають ніклевою лопаткою на дві рівні частини й струшують блюдко. Якщо спідні краї розрізу не спливаються, додають води й повторюють спробу. Вологість, за якої спідні краї зливаються на височині близько 1 мм., зветься *нижня границя текучости*.

Обидві границі слід визначати не менше 2-х разів.

Різниця між цими двома границями зветься *коефіцієнт пластичности*. Поміж цих границь глина пластична, позаними— вона або течиво, або напівтверде тіло. Щодо матеріалів непластичних (пливуні, дуже дрібний кварцовий порошок) коефіцієнт пластичности дорівнює нулеві, тобто обидві границі збігаються. При однакових коефіцієнтах пластичности границя пластичности різних ґрунтів залежить од форми зерен та від відсоткового вмісту гумусу.

Щоб усталити спільну базу для порівнянь, граничну вологість визначають відсотками від обсягу твердої речовини. Попри тому треба орудувати зразками невисушуваними, дуже бо великі капілярні тиски, що заходять при зступанні, можуть зруйнувати багато зерен і зменшити їхній пересічний розмір.

Подані вище відомості— мінімум, потрібний для характеристики глини. Без них опис глини практично нічого не вартий.

Ре зю ме. На підставі описуваних спроб, доходимо ми ось яких висновків:

Спійність глини залежить од двох причин. Перша з них— тиск, спричинюваний поверхневим натягом води— сила, куди більша за всі інші сили, що з ними доводиться стикатися у земляних спорудах. Вона може дорівнювати кільком сотням атмосфер. Вона ущільнює пухкі колоїдальні маси краще, ніж це

можна зробити штучними засобами (окрім потужних лабораторних пресів).

Бубнявіння глини є лише пружний розшир, що заходить у наслідок усунення поверхневого натягу капілярної води. Місцеве випарування капілярної води або місцеве затоплення поверхні глинястих ґрунтів спричиняють вторинні напруги, що завбільшки геть перевищують вагу найважчих споруд. Вони ж правлять за головну причину багатьох пересувань ґрунтів, відомих під назвою осувів.

Друга із згадуваних причин в тому, що властивості води в капілярах діаметром менше 0.0001 мм — інші, ніж властивості звичайної води. У таких капілярах в'язкість та поверхневий натяг збільшуються (зворотно до діаметру капілярів), і вода втрачує свою здібність випаровуватись при зіткненні з повітрям. Отже, капілярна вода в глинах ніби твердне під впливом сил, розвиваних молекулами твердої речовини. Тим то цей капілярний тиск куди більший проти того, яким він був би, в разі поверхневий натяг капілярної води мав нормальну величину.

У фізиці глин капілярний тиск відіграє таку саму роль, що й середовий тиск у фізиці твердих тіл. Тим то пружні властивості глин якісно ідентичні з пружними властивостями зернястих твердих тіл (камень, бетон тощо).

Мінімальні відомості, потрібні для характеристики глини, ось які: вологість, питома вага твердої речовини, нижня границя пластичности та нижня границя текучости.

## РОЗДІЛ ТРЕТІЙ

### ВИЗНАЧЕННЯ ВОДОПРОНИКЛИВОСТІ ГЛИНИ

Прикладність закону Дарсі. Сліхтерова формула та Газенові спостереження. Водопроникливість піску. Спроби над глиною. Прикладність закону Дарсі до напівтвердої консистенції.

Витрату води, що протікає паралельними струминами крізь водопроникливе тіло призматичної форми, визначається формулою Дарсі (Darcy):  $Q = k \cdot F \cdot S$ , де  $Q$  — витрата води в секунду,  $F$  — площа поперечного перекрою тіла та  $S$  — гідравлічний градієнт, рівний відношенню втрати напору до відстані, або  $\frac{h}{e}$

Коефіцієнт  $k$  (вимір його — см.<sup>3</sup> сек.), зветься *коефіцієнт водопроникливості*. Він являє собою швидкість просочування при гідравлічному градієнті, рівному одиниці.

Цей закон чинний лише щодо паралельноструминної течії, а тому неприкладний до руху води в крупному нарінку. Дехто вважає, що він неприкладний і до глини. За загальною думкою він чинний лише щодо руху води в дрібних та середніх пісках при пересічних напорах. Саме в цих умовах його стверджують експериментальні дані.

Пористість та водопроникливість. Пори водопроникливого тіла утворюють ніби систему капілярних трубок. При певному розмірі зерен пори можуть бути ширші або вужчі, залежно від структури піску — більшої або меншої щільності його. Отже, коефіцієнт водопроникливості залежить і від щільності структури та від розміру зерен.

Уже давно проф. Сліхтер (C. S. Slichter) зробив спробу обчислити коефіцієнт водопроникливості піску, гадаючи що його зерна мають одноманітну кулясту форму. Сліхтер виявив, що, залежно

від розташування куль, обсяг пор змінюється від 26<sup>0</sup>/<sub>0</sub> до 47,6<sup>0</sup>/<sub>0</sub> загального обсягу маси. Він дав формулу:  $k = 771 \frac{d^2}{e}$ , де  $d$  — діаметр куль у см., а вартість при температурі 10°С подано в наступній таблиці:

$$\text{Пористість } n = \frac{\text{Обсяг пор}}{\text{Загальний обсяг}}$$

$$n = 0,26 \quad 0,28 \quad 0,30 \quad 0,34 \quad 0,38 \quad 0,42$$

$$\text{Зведена пористість } e = \frac{\text{Обсяг пор}}{\text{Обсяг твердої маси}}$$

$$e = 0,352 \quad 0,388 \quad 0,428 \quad 0,515 \quad 0,612 \quad 0,723 \quad 0,850$$

$$c = 84,30 \quad 65,90 \quad 52,50 \quad 34,70 \quad 24,10 \quad 17,30 \quad 12,80$$

Коефіцієнт водопроникливості, обчислений за цією формулою при пористості 46<sup>0</sup>/<sub>0</sub> (дуже пухке розташування куль), дорівнює 60,3 $d^2$  при 10°С. А втім Аллен Газен (Allen Hazen) експериментально довів, що коефіцієнт водопроникливості дуже чистого, пухкого піску доходить до 116,  $d^2w$  ( $dw$  — чинна<sup>1)</sup> величина зерен за Газеновим визначенням), а в разі зерна мають приблизно однаковий діаметр  $d$  — навіть до 150  $d^2$ .

Розбіжність теоретичної величини, визначеної за Сліхтеровою формулою, і наслідків Газенових спроб залежить од того, що за припущенням Сліхтера всі пори однакові, а втім у піску бувають більші й менші пори. Можна довести, що за однакової пористості й при однаковому розмірі зерен коефіцієнт водопроникливості то менший, що одноманітніший розмір пор. Водночас, співвідношення між щільністю й коефіцієнтом водопроникливості в кожному піску досить добре погоджується з Сліхтеровою теорією.

Теоретичне співвідношення поміж зведеною пористістю та водопроникливістю подано на діаграмі рис. 9, кривою  $S$ . Ця крива відповідає масі, що складається з мікроскопічно дрібних куль однакового діаметру. Верхній та нижній кінці середньої частини кривої (пористість відповідно 47,6<sup>0</sup>/<sub>0</sub> та 26<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, зведена пористість відповідно 0,905 та 0,352) дають крайні границі прикладності Сліхтерової формули. Геометричну частину теорії Сліх-

<sup>1)</sup> Словом „чинна“ перекладено англійський термін „effective“. Як відомо, за Газен'ом, чинна величина — це розмір такого зерна, що дрібніших нього зеренданий ґрунт має 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub> його загальної ваги (прим. ред.).

тера докладно опрацювали Дарапський (Darapsky) та Бурместер (Burmeister). Проте, що форма зерен природних пісків більш неправильна, ніж куляста, ці теоретичні дослідження в кращому разі мають лише академічну вагу.

Водопроникливість піску. Сліхтерова формула для коефіцієнта водопроникливості дуже складна. Тим то автор опрацював напівемпіричну формулу, збудовану на таких ось міркуваннях:

Перекрій найширших частин капілярних каналів, принаймні, в'ятеро більший за перекрій каналів вузьких. Отже, щоб та

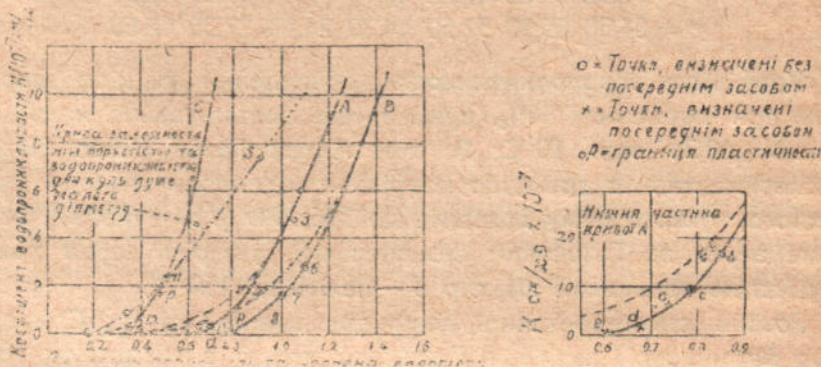


Рис. 9. Криві залежності між водопроникливістю та вологістю для трьох сортів глини

сама кількість води просунулась на одиницю довжини, у вузькому капілярі потрібний напір в 25 разів більший, як у широкому. Тим то фільтрування води крізь пісок можна порівняти з рухом її через ряд сит. Опір просочуванню буває лише поки вода йде крізь сита, а коли вона рухається поміж ситами, на опір її можна не зважати. Хай  $d_w$  — чинна величина зерен у см.,  $n$  — пористість,  $V_o$  та  $V_t$  — коефіцієнти в'язкості води при  $10^\circ\text{C}$  та при температурі  $t_o$ , відповідно,  $C$  — емпіричний коефіцієнт, що величина його, за наслідками спроб змінюється від  $800 V_o$  до  $460 V_o$  залежно від форми зерен та однорідності піску. Тоді:

$$K = \frac{C}{V_o} \cdot \frac{V_o}{V_t} \left( \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_w^2 =$$

$$= (800 \text{ до } 460) \cdot \frac{V_o}{V_t} \left( \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_w^2 \dots \dots \dots (1)$$



Величину 800 здобуто після спроб над пісками з округлими та гладкими зернами; величина 460 стосується пісків з зернами неправильної форми та шерехатими. Вплив однорідності піску на величину  $C$  куди менший за вплив форми зерен. У границях зведеної пористості від 0,352 до 0,905 (тобто при пористості від 26% до 47,6%), крива водопроникливості, збудована за формулою (1) дуже близько збігається з відповідною кривою, збудованою за Сліхтеровою формулою. Може видатися дивним, що два, здається, різні способи визначати співвідношення між пористістю та коефіцієнтом водопроникливості дають майже однакові наслідки. Проте, досвід доводить, що різні спрощувальні міркування щодо форми та розподілу капілярних каналів приводять до висновків, цілком згодних один з одним і з спостереженнями, коли тільки властивості піску належно взято під увагу. Це чимало полегшує тлумачення наслідків спроб.

Вживаючи формулу (1), можна кожний коефіцієнт водопроникливості звести до пористості 50% (зведена пористість дорівнює одиниці) та до нормальної температури 10°С, незалежно від дійсної щільності ґрунту. Визначений таким чином коефіцієнт водопроникливості зветься *зведений коефіцієнт водопроникливості*  $k_r$ . Взявши в формулі (1)  $n = 0,5$  та  $V_o = V_t$  одержимо  $k_r = (174 \text{ до } 100) d_{10}^2$ .

Що величина  $k_r$  не залежить ані від температури, ані від пористості, її можна вживати досліджуючи вплив властивостей зерен та їхньої однорідності на водопроникливість ґрунту. Величини 174 та 100 дають крайні границі цього впливу, коли пісок цілком чистий без найменшої домішки глини. Навіть мізерна кількість глини робить формулу (1) неприкладною. Щоб перевірити теоретичну формулу та визначити емпіричні коефіцієнти, треба спробами визначити співвідношення між пористістю та водопроникливістю.

Спроби над водопроникливістю піску. Щоб добутись безпомилкових наслідків, ані в піску, ані в воді не повинно бути повітря. Для цього вживають циліндричний фільтр (рис. 10), насипаючи пісок на сітку з мосяжевого дроту. Прилад улаштовано так, що воду можна перепускати крізь пісок, на бажання, знизу вгору або згори вниз. Перше, ніж засипати пісок, горизонт води підвищують понад дротяну сітку, видаляючи при цьому прилипли до сітки повітряні бульки. Пісок попереду добре

змочують. Коли воду перепускають знизу вгору, край циліндра править за перелив. Проте спроби роблено, здебільша, посилаючи воду згори вниз. Втрату напору вимірювано поділковою трубкою, сполученою з простором під дротяною сіткою. Виконуючи спробу, відзначають: площу перекрою та грубину піскового шару, спосіб готування його (пухкий, струшений, забутинований), пористість, пересічну питому вагу зерен, їхню форму, кількість фільтрувальної води, втрату напору. Безліч зроблених таким чином спроб потвердили слушність формули (1) залежності між пористістю та коефіцієнтом водопроникливості.

Водопроникливість глини. Якби зерна глини відрізнялись од зерен піску лише своїми розмірами, формула (1) придатна була б так до чистого піску, як і до чистої глини. Проте виявлено, що дрібніші глинясті частки складаються з тонесеньких гнучких мінеральних лусочок, а зерна піскові компактні та тверді. Тим то й капілярні канали в піску мають поперечний перекрій, подібний до кола, а капіляри в глині наче вузькі щілини. Ця різниця дуже впливає на перебіг процесу просочування.

Теоретичне вивчення руху води крізь порошки лускуватих зерен приводить до формули:

$$K = \frac{C}{V_o} \cdot \frac{V_o}{V_t} (e - 0,15)^3 (1 + e) d^2, \dots \dots \dots (2)$$

де  $e$  — зведена пористість, або відношення обсягу порожнеч до обсягу твердої речовини. Беручи під увагу перевірену спробами правильність формули (1) щодо піску, можна було б сподіватися, що й цю формулу для глини також потверджують наслідки спроб. Щоб добути таких наслідків спроб, довелось спершу опрацювати спеціальний спосіб визначати коефіцієнт водопроникливості глини.

Спроби над глиною. Визначити водопроникливість глини вельми тяжко. Перші систематичні спроби в цьому напрямі зробили, здається, американські інженери з гідротехнічною метою (випробовуючи глину, яко матеріал на земляні греблі). У цих спробах грудкувату глину здебільша клали в циліндричну посудину й забутиновували. Шар, звичайно, був заввишки близько 100 см. Попід шаром глини становили пісковий фільтр. Воду перепускали згори вниз. Загалом прилад був такий самий,

як на рис. 10 прилад визначати коефіцієнт водопроникливості піску. Але є серйозні заперечення проти застосування його до глини.

Спостереження свідчать, що коефіцієнт водопроникливості змінюється в надзвичайно широких межах залежно від пористості. Щойно ґрунт з глинястих грудок стикається з водою й грудки бубнявлюють, збільшується й обсяг порожнеч. У дослідному циліндрі цьому бубнявлюнню значно перешкоджає тертя вздовж стінок циліндра, тим то сумнівно, чи однакові пористість зразку

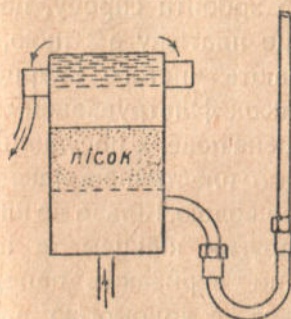


Рис. 10. Прилад на пісок

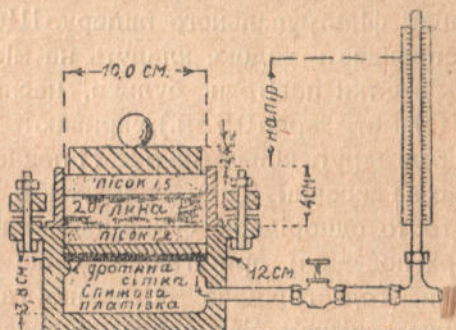


Рис. 11. Прилад на глину

й пористість ґрунту в земляній греблі. Ще: зразки неминуче мають у собі багато повітря. Адже, коли навіть струшувати спорошковану глину з водою в пляшці, чимало прилипло до часток глини повітря лишається там, і видалити його можна лише кип'ятінням. У греблі ґрунтове повітря поволі розчиняється й в розчиненому вигляді його забирає вода, що просочується. Але в лабораторії спроба ніколи не триває досить довго, щоб, бодай частково, вилучити повітря з зразку завгрубшки 100 см. Нарешті, у випробовуваному грудкуватому ґрунті пори куди більші за найбільші окремі частки ґрунту. Фільтруючись вода крізь таку масу, забирає у змуленому стані дрібні частки, відірвані від грудок близько горішньої поверхні зразку. В наслідок неминуче утворюється фільтраційна плівка, й це унеможливує зробити з наслідків спроб певні висновки щодо водопроникливості зразків. Взагалі дуже сумнівно, чи можна якимось безпосередньо визначити коефіцієнт водопроникливості глинястих грудкуватих ґрунтів.

З метою усунути ці джерела помилок, автор збудував прилад, зображений на рис. 11. З цього приладу повітря дуже легко видалити, діаметр зразку глини куди більший за його grubину, а тому тертя понад стінками практично не впливає на обсяг порожнеч. Нарешті, вологість зразку весь час підтримується тим, що зразок перебуває під сталим тиском.

Прилад складається з посудини, що на її внутрішніх виступах лежить дірчаста спижева платівка, вкрита дрібною дротяною сіткою. На сітку насипають пісок, а тоді вкривають її тонким аркушем фільтрувального паперу. Щоб зробити спробу, посудину наповнюють водою, кладуть на місце платівку з сіткою, усувають з сітки повітряні бульки, насипають чистого кварцового піску (діаметр зерен 0,5 мм.), вкривають пісок фільтрувальним папером. Тоді беруть кільце (на рис. 11 покладене поверх посудини) і частково, на височину 2,0 см., заповнюють його пластичною рідкою глиною, тобто однорідною сумішшю глини з водою. Кільце це кладуть поверх посудини, притягаючи до неї другим кільцем та прогоничами. Тоді горішню поверхню глини вкривають папером і засипають піском. Засипання виконується за допомогою важеля. Заповнений водою простір нижче дірчастої спижевої платівки сполучається з вертикальною трубкою, заввишки 100 см. і діаметром 0,6 см.

Під чином обтяження вологість зразку зменшується. Досягнувши рівноваги, вертикальну трубку наповнюють водою, що починає просочуватись крізь глину вгору. Взагалі з невеличкою кільцевою поверхні, довкола засипної плитки, води випаровується більше, ніж надходить, просочуючись крізь глину. Тим то конче треба підтримувати в кільцевому просторі сталий рівень води, доливаючи її в міру потреби.

Рівень води у вертикальній трубці підчас спроби спадає спершу швидко, а тоді де далі повільніше. Рівень води відзначається тричі на день. За швидкістю спадання рівню обчислюється коефіцієнт водонепроникливості.

Водночас переводять три спроби: під обтягом в 60, 125 і 190 кг. (0,75, 1,6 та 2,4 кг. на см.<sup>2</sup>). Звичайно потрібно від чотирьох до шістьох тижнів, щоб уся вода з вертикальної трубки просочилась крізь досить масну глину. Водночас з рівнем води відзначається й покази термометра, що кульку його в мосяжевій трубці (на рисунку не подано) поміщено під дірчастою платівкою.

Зміна температури помітно впливає на коливання рівню води у вертикальній трубці. Тим то спробу треба переводити у підвалі з дуже рівною температурою. Рівнобіжно переводять четверту спробу з приладом трохи іншої будови. Тут випробовують зразок, що вологість його відповідає приблизно нижній границі текучості, без обтяження. У цьому приладі вода просочується згори вниз, надходячи по вертикальній трубці, поставленій понад отвором у спижевій платівці, прикріпленій прогоничами до верхнього краю циліндра з глиною. Скінчивши кожну спробу, беруть зразок глини й визначають вологість його.

Для спроб уживали лише однорідні суміші глини з водою. Що ширина капілярів у цих зразках рівна або менша за діаметр дрібніших окремих часток, немає причин для утворення плівки. Треба лише, щоб воду на спроби брали цілком чисту.

Щоб виявити, чи не утворюється при цих спробах плівка, зроблено рівнобіжні спроби над зразками різної глибини. Якщо плівка утворюється, тонкий шар повинен дати коефіцієнт водопроникливості менший, ніж шар грубий, на рух бо води крізь плівку глибина шару не впливає. Спроби дали однакові коефіцієнти водопроникливості так щодо тонкого, як і щодо грубого шару.

Нарешті, зроблено ще й таку спробу: після спроби з рідким пластичним зразком, поверхню його зішкрябали й спробу повторили. Наслідок був такий самий. На діаграмі рис. 9 точки, визначені приладом (рис. 11), позначено кружальцями.

Для величин вологості близько нижньої границі пластичності коефіцієнт водопроникливості надзвичайно малий, отже визначити його безпосередньо справа безнадійна. Щоб обминути ці труднощі та уможливити вивчення водопроникливості глин і в напівтвердому стані, опрацьовано посередню методу. Вона дає змогу порівняно швидко визначити водопроникливість майже непроникливих зразків. Цю методу ми опишемо далі. Особливість її в тому, що вода циркулює лише всередині зразку, не заходячи й не виходячи з нього. Тут, звичайно, плівка не може утворитись. Майже цілковите збігання точок  $a$  та  $4$  на кривій  $A$  (рис. 9) є новий доказ певності наслідків, здобутих приладом (рис. 11).

Прикладність закону Дарсі. Спроби з описуваним вище приладом кажуть, що закон Дарсі можна прикладати до руху води в глині в границях пластичності. Окрім того, з деяких

інших спроб можна зробити висновок, що закон цей прикладний також і до руху води в напівтвердій глині. Чималі збочення від закону Дарсі помічено лише щодо напіврідких глин: для них зменшення гідравлічного градієнту з 50 до 10 або 15 спричиняє швидке зменшення коефіцієнта водопроникливості й лише при малих напорах коефіцієнт робиться досить сталий.

Проте, це явище може залежати від щільникуватої будови напіврідкої глини. Відношення порожнеч до обсягу твердої речовини тобто зведена пористість для найпухкішого можливого розташування шарів однакового діаметру доходить 0,91 (пористість 47,6%), тоді як для напіврідкої глини відношення це дорівнює приблизно 2. Структура такої маси стійка лише через початкове тертя<sup>1)</sup>, що утримує частки в їх відносному становищі; пересічний діаметр капілярів геть перевищує пересічний діаметр часток глини. При фільтрації води крізь таку масу під чималим напором відбуваються пружні й непружні деформації та переміщення зерен, подібні до деформацій, спричинюваних потоком води, що йде під напором через систему дуже еластичних гумових трубок. Під нижчим гідростатичним тиском пружні деформації зникають, і відповідно змінюється коефіцієнт водопроникливості.

Отже закон Дарсі прикладний, принаймні, до руху води в глинах з середньою або низькою вологістю (пластична або напівтверда консистенція). Треба ще з'ясувати, оскільки коефіцієнти водопроникливості, обчислені за формулою (2), відповідають коефіцієнтам, визначеним експериментально.

Розбіжність з теорією. На рис. 9 подано наслідки трьох серій спроб на водопроникливість. З метою порівняти ці наслідки з формулою (2), автор насамперед визначив вартості  $\frac{C}{V_0}$  та  $d_w$ , при яких здобута за формулою (2), крива пройде якнайближче до експериментально визначених точок 1, 2, 3 та 4 (крива А, точки 1 та 2 поза рисунком). Тоді при тій самій вартості  $\frac{C}{V_0}$  визначено дві інші вартості  $d_w$  таким чином, щоб криві пройшли відповідно через групу точок від 5 до 8 і від 9 до 12 (криві

<sup>1)</sup> Термін „початкове тертя“ вжито тут, щоб визначити опір глини зсону при відсутності тиску (середового або капілярного). Опір цей дорівнює принаймні  $10^{-6}$  дин на кожен точку зіткнення двох часток глини.

В та С). Якщо формула безпомилна, точки обох серій повинні лежати близько відповідної теоретичної кривої. Для пересічних величин вологости криві та спробні точки погоджуються досить добре, але для величин вологости близько границі пластичности розбіжність швидко збільшується. Отже щодо напівтвердої консистенції коефіцієнт, визначений експериментально, в кілька разів менший від коефіцієнту, обчисленого за формулою (2). Границю пластичности (поміж пластичною й півтвердою консистенцією) позначено на рисунку літерою Р. Помилковість формули стає найочевидніша, коли порівняти залежність поміж коефіцієнтом водопроникливости та зведеною пористістю (відношення обсягу порожнеч до обсягу твердої речовини) щодо піску з відповідною залежністю для глини. Із збільшенням зведеної пористости піску з 0,6 до 0,8 вартість коефіцієнту збільшується на 75%, тоді як при аналогічних умовах коефіцієнт водопроникливости глини збільшується на кілька тисяч відсотків.

З вищеподаних причин таку чималу розбіжність годі пояснити лише приблизністю наших припущень. Навпаки, є підстави гадати, що розбіжність ця залежить од фізичної причини, якої не буває підчас руху води в піску. Вона чинна лише коли капіляри робляться дуже вузькі. Якби розбіжність походила з неправильности формули (2), вона була б виявилась лише при зменшенні зведеної пористости нижче певної величини. Але розбіжність неминуче сполучена з напівтвердою консистенцією глини, незалежно від того при якій пористості досягається цієї консистенції (границя пластичности). Спостереження кажуть, що вологість глини, відповідна до границі пластичности, збільшується з зменшенням розміру зерен, коли зерна якісно однорідні. Тим то дуже ймовірно, що границя пластичности має місце лише тоді, коли ширина капілярів стає менша за певну критичну величину, незалежно від чинної величини зерен. У такому разі зауважена аналогія водопроникливости так само повинна залежати від зменшення діаметру капілярів нижче певної критичної величини.

Зміна — в'язкості. З — цих міркувань можна зробити висновок, що фізичні сталі води можуть змінюватись, коли капіляри глини, при зсіданні її, звужаються до певного розміру. Цей висновок підтверджують деякі спроби над випаруванням.

Зформовані з різних сортів глини призми висушують при нормальній температурі (15 — 25° С) Тричі на день визначається втрата

ними ваги та зступання їх. Водночас вимірюється втрата ваги циліндричної посудини, наповненої дистильованою водою. Керуючись здобутими таким чином даними, можна обчислити щодо кожної призми відношення проміж швидкістю випарування води капілярної та відповідною швидкістю випарування води в посудинах (відносна швидкість випарування). Наслідки підрахунку позначено на діаграмі (рис. 12), де абсциси визначають вологість (зведену пористість), а ординати — відносну швидкість випарування. Літерою *P* позначено границю пластичности, літерою *N* — точку, де рівень капілярної води спадає нижче поверхні глини, а літерою *S*

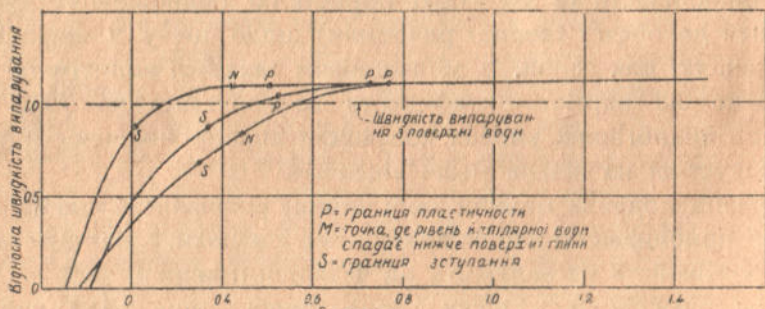


Рис. 12. Швидкість випарування капілярної води глини

*S* — границю зступання. До границі пластичности відносна швидкість випарування однакова — близько 1,10, — але поміж *P* та *N* вона зменшується, хоча рівень капілярної води лишається на поверхні призми.

Отже, одна з фізичних сталих — відносна швидкість випарування — змінюється, дійшовши границі пластичности. Вище вже зазначалось, що коло цієї ж точки змінюється величина поверхневого натягу капілярної води. При таких умовах можна досить певне сказати, що фізична стала, яка визначає швидкість фільтрації, тобто в'язкість води, так само змінює свою вартість близько нижньої границі пластичности.

На основі спостережень автор виснував ось яку формулу, що сполучає розмір капілярів та коефіцієнт в'язкости:

$$V_0^1 = V_0 \left( 1 + \frac{R}{S^8} \right) \dots \dots \dots (3)$$

де  $V_0$  — нормальна величина коефіцієнта в'язкости  $V_0^1$  — в'язкість води, що тече через капіляр завширшки  $2S$  см.,  $R$  — стала, що



її величина поміж  $6 \times 10^{-42}$  і  $2 \times 10^{-43}$  (точну величину не визначено, та для нас досить знати границі). Для капілярів, діаметром менше 0,1 (0,0001 мм.), коефіцієнт в'язкості швидко збільшується.

Виправлена формула коефіцієнта водопроникливості. У наслідок цієї зміни в'язкості формула коефіцієнта водопроникливості набирає нового вигляду, а саме:

$$K = \frac{C}{V_0} \cdot \frac{V_0}{V_t} \cdot \frac{(e - 0,15)^{11} (1 + e)}{(e - 0,15)^8 + \frac{C}{d_w^8}} \dots \dots \dots (4)$$

Визначити чинну величину  $d_w$  зерен глини очевидно дуже тяжко, це бо можна зробити лише відмулюванням. Проте, оскільки формула (4) визначає залежність поміж вологістю й водопроникливістю, нею можна користуватися, навіть, коли  $d_w$  невідома. Треба лише знати наслідок одного дослідження на водопроникливість даної глини. Цей наслідок, тобто величину  $K$  щодо зразку деякої повної вологості, можна використати для визначення величини  $K$  при взятій іншій вологості, обидві бо вартості  $K$  сполучено визначеним формулою (4) законом.

Припустім, що ми маємо дві глини: для одної глини величина зерен  $d_w$  в  $m$  разів більша ( $m$  — невідоме) проти чинної величини зерен другої глини. Окрім того, припустімо, що водопроникливість глини з чинною величиною зерна  $d_w$  визначається формулою<sup>1)</sup>:

$$K_1 = 3,34 \times 10^{-7} \cdot \frac{V_0}{V_t} \cdot \frac{(e - 0,15)^{11} (1 + e)}{(e - 0,15)^8 + 0,0166} \dots \dots \dots (5)$$

Згідно з попереднім, водопроникливість глини з чинною величиною зерен  $md_w$  дорівнюватиме:

$$K_2 = 3,34 \times 10^{-7} \cdot \frac{V_0}{V_t} \cdot \frac{(e - 0,15)^{11} (1 + e)}{(e - 0,15)^8 + \frac{0,0166}{m^8}} \dots \dots \dots (6)$$

Лише один раз випробувавши другу глину на водопроникливість, здобудемо одну точку кривої залежності між вологістю та водопроникливістю. Отже, можемо розв'язати рівняння (6) щодо  $m$ . Знаючи  $m$ , можна за формулою (6) нарисувати всю криву, а

<sup>1)</sup> Вимір величини  $K_1$  та  $K_2$  см/хв.

подальші спроби повинні дати точки, розташовані близько цієї кривої.

Крива *B* на рис. 9 править за приклад, як близько збігаються точки, обчислені та визначені експериментально. Для одної з точок цієї кривої спробою визначено  $K = 40 \times 10^{-7}$  см/хвил., а формулою (6) —  $35 \times 10^{-7}$ . Щодо кривої *C* відповідність між теорією й спробами менш задовільна через велику кількість піску в глині (59,1%). Проте й в цьому ґрунті водопроникливість змінюється в надзвичайно широких границях залежно від його щільності. З усього зазначеного бачимо, що водопроникливість глинястих ґрунтів слід визначати не лише самою цифрою, але цілою кривою залежності від вологости.

Особливості різних глин. При однаковій величині зерен границя пластичности може бути вища або нижча, залежно від форми зерен та ступеню адсорбційного насичення (див. далі). Тим то сталі *C* та *e* в формулі (2) залежать не лише від розміру, але й від властивості зерен. Числові ж величини цих сталих (подібні до поданих вище у формулах (5) та (6) прикладні лише до глин, що їхні зерна властивостями своїми більш-менш однакові. Коли у воді, що просочується крізь глину, розчинено якісь речовини, ці речовини адсорбуються глиною й скупчуються на поверхнях часток її. Вміст розчинних речовин чимало впливає на в'язкість розчинника, а в'язкість розчинника, й собі, помітно впливає на водопроникливість середовища.

Слід ще раз зазначити, що попередні міркування прикладні лише до одноманітної суміші глини з водою. Грудкуваті глинясті ґрунти не належать до однорідних. Фільтрація крізь такі ґрунти неминуче спричиняється, насамперед, до утворення плівки, а тоді — до заповнення більших пор губчастою колоїдальною речовиною, відірваною від горішніх грудок. Тим то фільтрація через грудкові ґрунти сполучена з пересуванням часток, середовою ерозією (розмивом) та з середовими відкладаннями. Це, дуже складне явище, треба ще старанно вивчати. Наслідки спроб над пісками та однорідними глинами аніяк не можна поширювати на грудкуваті ґрунти.

## РОЗДІЛ ЧЕТВЕРТИЙ

### ОСІДАННЯ ТА ТВЕРДНЕННЯ ГЛИНИ

Тверднення — наслідок зменшення вологості під чином обтяження. Зміна гідродинамічного тиску. Приклади розрахунків. Пристосування до визначення коефіцієнта водопроникливості.

Під чином зовнішнього обтяження однорідний шар глини зазнає деформацій, що збільшуються протягом деякого часу від моменту прикладення обтяження. Це явище має велику практичну вагу, з ним бо сполучені безліч випадків осідання, що трапляються на практиці, а також поступове ущільнення глинястих покладів.

Фізичні причини цього явища вже висвітлено вище: обтяження спричиняє гідростатичний тиск усередині глини; цей тиск, і собі, спричиняє рух води до поверхні, що триває аж поки установиться рівновага й гідростатичний тиск дорівнюватиме нулеві. Базуючись на цьому та беручи під увагу все зазначене вище щодо водопроникливості, можемо виснувати залежність поміж тиском, вологістю й часом, тобто розв'язати завдання про осідання в функції часу.

На рис. 13 подано експериментально здобуті криві залежності поміж тиском і вологістю та між вологістю й водопроникливістю одного сорту глини. Припустім, що шар цієї глини перебуває в твердому кільці, й до горішньої поверхні глини (зануреної в воду та захищеної пісковим фільтром) прикладено тягар, що дає тиск  $p_0$  на квадратову одиницю поверхні. Які зміни зайдуть у шарі, коли зовнішній тиск раптом збільшити до  $p_1$  й лишити його сталим?

З діаграми бачимо, що тиск  $p_0$  відповідає вологості  $l_0$ , а вологості  $l_0$  відповідає коефіцієнт водопроникливості  $k_0$ . Із збіль-

шенням тиску величини ці повинні набути вартості  $e_1$  та  $k_1$ . Але що зменшення обсягу сполучено з витисненням капілярної води, даний процес відбувається дуже повільно. Попри тому в кожній стадії його гідродинамічні тиски повинно бути розподілено так, щоб існував гідравлічний градієнт, потрібний підтримувати рух капілярної води. Ця обставина — вихідний пункт для подальших міркувань.

Діаграма на рис. 14 зображає поперечний перекрій шару;  $h$  — глибина, яку мав би шар, коли б обсяг порожнеч звести до нуля (зведена глибина). Початок

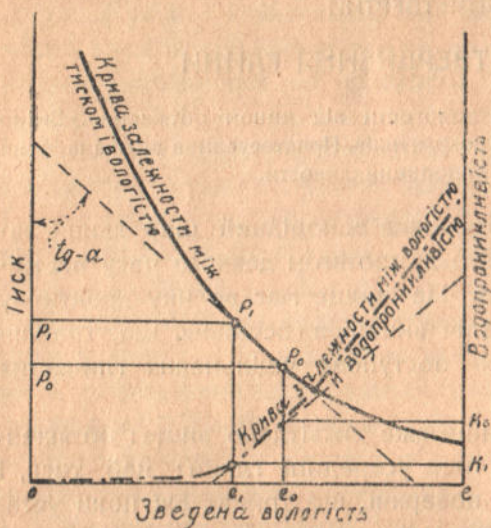


Рис. 13. Криві досліджень зразків глини

координат узято на спідній поверхні шару. Абсциса  $O$  подає тиск  $p_0$ . На горішній поверхні шару тиск сталий і дорівнює  $p_1$ , а гідродинамічний тиск дорівнює нулю. За діаграмою рис. 13 зміна вологості неможлива без відповідної зміни тиску в твердому кістяку глини. Але що вологість шару зменшується, а зовнішнє обтяження лишається stále, мусимо висувати, що чинний у твердому кістяку тиск поступово збільшується. Хай  $dp$  — збільшення тиску  $p$  протягом елементу часу  $dt$  на височині  $z$  вище спідньої поверхні шару. Сума тиску  $p$  в твердому кістяку та гідростатичного тиску  $w$  у тій самій точці повинна дорівнювати  $p_1$  або  $p_1 = p + w$ . Диференціюючи —  $dp = dw$ .

Щоб визначити, як змінюється тиск у функції часу, припустім, що залежність між зміною тиску та відповідною зміною вологості простолінійна. Це можливе, поки різниця між  $p_1$  і  $p_0$  невелика. Залежність цю визначається тангенсом  $a$  куту поміж віссю ординат та дотичною до кривої тиску на рис. 13. Тоді  $de = -adp = adw$ . Кількість води, що просочується в одиницю часу крізь одиницю площі горизонтального перекрою на височині  $z$  понад спідньою поверхнею шару, буде  $Q = ks$ . Тут  $k$  —

коефіцієнт водопроникливості, а  $s$  — гідралічний градієнт, рівний  $-\frac{dw}{dz}$ . Відси  $Q = k \frac{dw}{dz}$ . Але гідралічний тиск  $w$  — також функція часу. Поки вода пересувається з височини  $z$  до височини  $z + dz$  в елемент часу  $dt$ , тиск у глині  $p$  збільшується на  $dp$ , рівне  $-dw$ . Ця зміна тиску спричиняється до зміни вологості

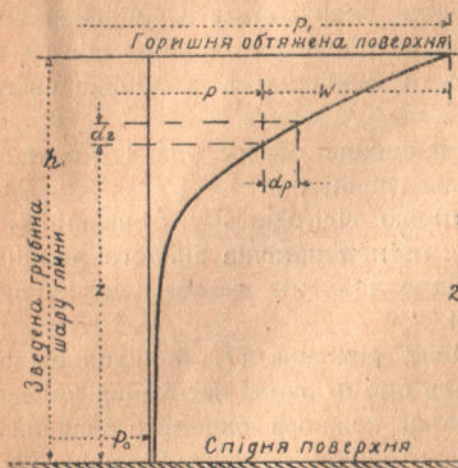


Рис. 14. Розподіл тисків у верстві глини

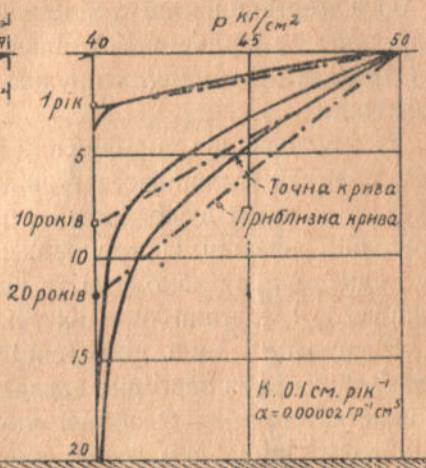


Рис. 15. Розподіл тисків у різні моменти часу

згідно з поданим вище рівнянням  $dc = -a dp$ . Відси з переходом з височини  $z$  на височину  $z + dz$ , витрата збільшується. Маємо:

$$\frac{dQ}{dz} = -\frac{de}{dt} = a \frac{dp}{dt} = -a \frac{dw}{dt}$$

Поставивши вартість  $Q$  з раніше поданого рівняння, матимемо:

$$\frac{kd^2w}{adz^2} = \frac{dw}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

Рівняння це дає розподіл гідродинамічних тисків у глині. Математично воно тотожне з рівнянням лінійного руху тепла через платівку з ізотропного матеріалу  $2h$  завгрушки, з однорідною температурою, ізольовану з бічних поверхней, раптом перенесену у простір з нижчою температурою. Швидкість з якою йде охолодження з горішньої та спідньої поверхней у напрямі до середини, відповідає перебігові ущільнення глини від її горішньої (обтяженої) поверхні вниз до її середини. Ця термодинамічна

аналогія дає змогу перетворити яке завгодно завдання про зміну зступання в часі на завдання термодинамічне. Лише треба замінити: вологість  $e$  — кількістю тепла на одиницю обсягу, модуль стиску  $a$  — теплоємністю, гідродинамічний тиск  $w$  — температурою, коефіцієнт водопроникливості  $K$  — коефіцієнтом теплопровідності. Існує ще інша аналогія, а саме:

1) у термодинаміці теплоємність зменшується з ущільненням тіла, тобто з збільшенням кількості тепла на одиницю обсягу, і в гідравліці тїл модуль пружності зменшується з збільшенням вологості;

2) охолодження спричиняє зменшення обсягу тіла, і зниження вологості спричиняє зступання глини.

Такі аналогії дуже важливу роль відіграють у сучасній застосовній механіці. Наприклад, є термодинамічна аналогія допливу води до ряду колодязів та гідродинамічна аналогія розподілу напруг при крутінні твердих тїл.

Виснуване вище диференційне рівняння (7) прикладне до розв'язання яких завгодно завдань про осідання насичених водою глинястих ґрунтів. Особливі умови кожного окремого завдання впливають лише на математичну методу розв'язувати рівняння (7). Наприклад, у завданні про поступовне ущільнення шару глини під чином рівномірного обтяження, при неможливості бічного розширу, рівняння (7) розв'язано за допомогою ряду Фур'є. Із здобутих наслідків підраховано числові величини, основані на таких даних: глибина шару 20 м., зведена глибина — 13 м., початковий тиск 4 кг./см.<sup>2</sup>, остаточний тиск 5 кг./см.<sup>2</sup>, модуль стискання  $a = 0,00002^{-1}$  см.<sup>5</sup> та коефіцієнт водопроникливості  $k = 0,1$  см. рік<sup>-1</sup>. Вартості двох останніх сталих ( $a$  та  $k$ ) відповідають властивостям масної глини в пластичному стані. Наслідки обчислень подано графічно на рис. 15. Криві визначають, як повільно поширюється тиск од поверхні шару вглиб його. Від цієї повільності залежить поступовість осідання споруд, поставлених на поверхні шарів пластичної глини. Пунктовані лінії визначають наслідки, здобуті приблизним способом, спертим на припущення, ніби розподіл тисків додержує простолінійного закону. Цей спосіб дає досить точні наслідки.

Деякі прикладання теорії. Природне осідання мулких покладів. Припустім, річка, що несе у змуленому стані багато мулу, відкладає його в озері або затоці рівномірно,—

однакову кількість на одиницю площі й в одиницю часу. По деякому часу відкладання припиняються. Питання: як розподілено тиски в масі покладів в який завгодно момент часу та яке щорічне зступання їх.

Не слід плутати гідродинамічний тиск  $w$ , чинний у капілярній воді, з статичним тиском  $p$ , чинним у твердій речовині мулу. З бігом часу відношення  $w : p$  зменшується, але сума цих двох тисків завжди дорівнює зовнішньому обтяженню. У даного випадку вона дорівнює вазі мулу, розташованого вище даного перекрою. Для глиняного кубика, що зступається, зовнішній тиск

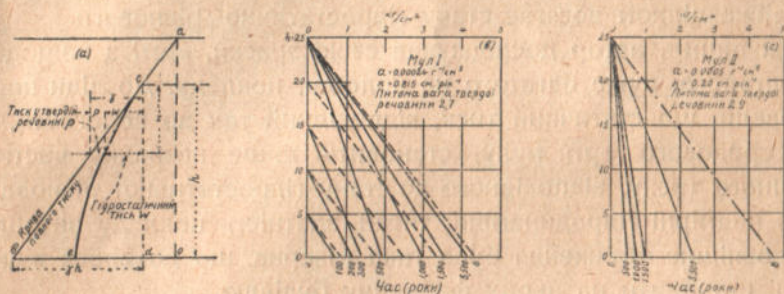


Рис. 16. Зміна гідродинамічного тиску залежно від віку покладу

дорівнює нулеві. З цього виходить, що гідродинамічний тиск  $w$  від'ємний, а тиск  $p$ , що даного випадку зветься капілярним тиском, дорівнює  $w$  і протилежний до нього знаком. Середове тертя дорівнює добуткові з статичного тиску  $p$  на коефіцієнт середового тертя, а гідродинамічний тиск  $w$  не може спричинити якогось середового тертя. Тим то зменшення  $w$  при сталому зовнішньому обтяженні спричиняє не лише збільшення  $p$ , ба й відповідне збільшення середового тертя. Це основне розуміння кожний інженер повинен знати так само добре, як і Гуків закон.

На рис. 16 діаграми  $b$  та  $c$  подають графічно наслідки обчислень, зроблених для мулких покладів, утворюваних із швидкістю 5 куб. см. твердої маси на кв. см. річно:  $b$  відповідає пісковому мулові, а  $c$  — мулові з більшим вмістом колоїдів. Пунктовані лінії, що проходять через горішні кути графіків  $b$  та  $c$ , зображають розподіл тисків при гідростатичній рівновазі, що її досягається через безмір часу. Суцільні лінії поділяють абсциси пунктованих ліній на дві нерівні частини: праву, що відповідає гідродинамічному тиску, та ліву — відповідну до тиску статич-

ного. Коло нижнього кінця кожної суцільної лінії (лінія розподілу тиску) зазначено час, що повинен минути від початку відкладання до стану, відповідного даному розподілові тисків.

З діаграми *c* на рис. 16 (мул, багатий на колоїди) бачимо, що 5000 років згодом по утворенні покладу гідродинамічні тиски ще становлять близько половини тиску від власної ваги покладів. Це визначає, що середове тєртя в мулі під цей час дорівнює лише чверті величини, яку воно мало б, дійшовши стану гідравлічної рівноваги. Поклад, зображений діаграмою *b*,— водопроникливіший і стискається менше, ніж поклад *c*. За 5000 років він майже цілком досягає стану гідростатичної рівноваги.

Між іншим, автор досліджував свіжі зразки, взяті з нещодавно посталою, дуже багатого на колоїди, покладу. Досліди наочно довели, що статичний тиск, відповідний так до вологости, як і до середового тєртя мулу, становить лише незначну частину статичного тиску, відповідного до стану гідростатичної рівноваги. Через надмірні гідродинамічні тиски здатність покладу витримувати зовнішнє обтяження була така мізерна, що довелося відмовитись становити на ньому фабричну будівлю.

Водонепроникливі та водовмісні прошарки. Тепер припустімо, що згадуваний поклад неоднорідний і має в собі мулкий прошарок менш водопроникливий, ніж решта ґрунту. Подібний прошарок впливає на процес висихання так само, як і прошарок з погано теплопровідного матеріалу був би вплинув на охолодження глибших шарів гарячої призми. Вище прошарку мул висихатиме швидше, а нижче—ще довго буде майже течний. На протилежних поверхнях прошарку буде чимала різниця гідродинамічних тисків. Але в разі поклад має в собі замість колоїдального—пісковий прошарок, гідродинамічні тиски на його горішній і спідній поверхнях будуть цілком або майже однакові. Свердловина, доведена до піскового прошарку, дає напірну воду, й поклад висихатиме швидше, ніж раніше, відповідно прискорено й осідаючи.

Автор двічі спостерігав такі явища на практиці. У першому випадку мулистий поклад мав завгрубшки близько 15 м. Щойно, спускаючи кесон, оголили пісковий прошарок, сусідні будівлі помітно осіли. За рік осідання дорівнювало вже кільком сантиметрам, а наступних років зростало поступово-загаюваним темпом, відповідно до теорії. Вода в прошарку опинилась під на



пором. У другому випадку поклад мав завгрубшки 50 м. Підчас розвідчого свердління на глибині близько 15 м. виявлено пісковий прошарок. Свердлового техника здивував удар води, в околицях бо артезійської води не було.

Просихання мулких покладів. Поклади вологого мулу, що на поверхню його діє повітря, поволі просихають. Спостереженнями виявлено, що це, залежне від випарування, просихання спричиняється до утворення напівтвердої або твердої шкорупи. З часом грубина цієї шкорупи збільшується. Вище доведено, що тверднення глини при просиханні спричиняється капілярним тиском, а він і собі супроводжується від'ємним гідродинамічним завбільшки однаковим тиском.

Розглядаючи випарування з фізичного погляду, доходять висновку, що в процесі висихання слід відрізнити два послідовні

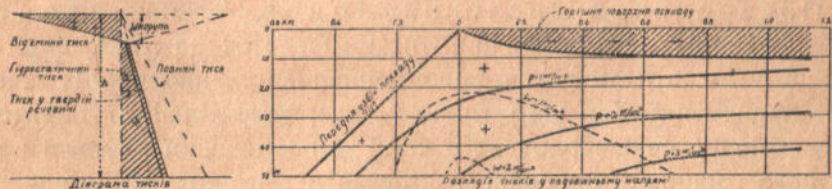


Рис. 17. Розподіл тисків у покладах річкової дельти.

періоди. Перший триває від початку випарування до моменту, коли капілярний тиск на горішній поверхні покладу досягає величини перехідного тиску. При рівних швидкостях випарування й при рівних величинах перехідного тиску грубина шкорупи збільшується першого періоду прямо пропорційно до водопроникливості ґрунту. Для однакових ґрунтів грубина шкорупи на початку другого періоду буде зворотно пропорційна швидкості випарування. Протягом другого періоду грубина шкорупи збільшується надзвичайно повільно й, протилежно до першого періоду, майже не залежить од температури повітря. Спираючись на наслідки, графічно подані на діаграмі *b*, рис. 16, і на допіру зроблені висновки, досліджено розподіл тисків у покладах річкової дельти, яка вганяється в океан із швидкістю 1 м. річно, припускаючи, що капілярна вода випаровується лише з горизонтальної горішньої поверхні покладів. Наслідок дослідження графічно подано на рис. 17. Гідростатичний тиск у капілярній воді шкорупи від'ємний, а під шкорупою — додатний. Найбільша во-

логість — безпосередньо попід шкоруною. Як викопати у покладі рівчак — вода виступатиме через його дно, а частини укосів у границях шкоруни — вбиратимуть воду.

Додатний гідростатичний тиск у капілярній воді попід шкоруною то вищий, що швидше утворився поклад та що менша водопроникливість. Через такий підвищений тиск природні поклади дуже колоїдального мулу мають нахил розпливатись самостійно, без усякої зовнішньої причини. Подібні явища вже спостерігались. Вони відомі під назвою осувів.

Умови, подібні до зображених на рис. 17, трапляються в гідравлічно збудованих греблях протягом деякого часу після спорудження їх. Що менша водопроникливість ґрунту ядра, то більші гідростатичні тиски в капілярній воді його й то дужча небезпека руйнації греблі через прорив рідкого ґрунту з ядра.

Посереднє визначення водопроникливості глин. Теорія гідродинамічних тисків наvertsає на дуже простий спосіб визначати коефіцієнт водопроникливості пластичних та напівтвердих глин. Хай шар глини у твердому кільці з вкритою водою поверхнею перебуває в стані гідростатичної рівноваги. Як до його горішньої поверхні застосувати зовнішнє обтяження, у капілярній воді знайде додатний гідростатичний тиск, що збільшується згори вниз. Водночас чинний у твердому кістяку ґрунту статичний тиск зменшується згори вниз. Як лишити сталє обтяження, вода поволі витискатиметься з ґрунту. Коли ж не зовнішнє обтяження, але обсяг підтримувати сталий (закріпивши голівку преса в іншому становищі), вологість шару не змінюватиметься. Зразу після уставлення головки в новому становищі гідростатичний тиск буде найбільший коло спідньої поверхні, а найменший — коло горішньої поверхні зразку. У наслідок вода посуєне вгору, розводнюючи верхню частину шару, а тиснення преса на шар почне зменшуватись. Що швидкість зменшення тиску залежить од коефіцієнта водопроникливості глини,  $k$  можна визначити, виходячи з величини цієї швидкості.

Потрібні для цього спроби можна зробити за допомогою приладу, на зразок поданого на рисунку 2. Цей прилад складається з цинкової посудини, двох спигових кілець та піскового фільтра. Зразок глини має в діаметрі 8 см. і 4 см. завгубшки. Наслідки спроби подано на рис. 18.

Насамперед доводять зовнішній тиск до  $14,1 \text{ кг./см.}^2$  та за-

кріпляють голівку преса. Протягом наступних годин тиск зменшується й доходить 1,72 кг./см.<sup>2</sup> (крива 1). При цьому швидкість спадання тиску, поступовно зменшуючись, наближається до нуля. Хай  $h$  — зведена grubина шару,  $e_1$  — вологість,  $a_1$  — модуль стиску (визначений за даними головної гілки кривої залежності між тиском і вологістю),  $a_2$  — модуль розширу (здобутий з даних кривої повторного насичення на діаграмі залежності між тиском і вологістю) та  $k_1$  — коефіцієнт водопроникливості, — всі взято під тиском  $p_1$ , та  $c$  — коефіцієнт, що його величину можна обчислити за швидкістю зменшення тиску на голівку преса; тоді

$$k_1 = c_1 - \frac{a_1 h^2 (1 + e_1)}{2 \left(1 + \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right)^2} \dots \dots \dots (8)$$

По двох днях від початку спроби підвищимо тиск з 1.72 кг./см.<sup>2</sup> до 27.3 кг./см.<sup>2</sup> і знов закріпимо голівку преса. Відношення між тиском і часом для цієї другої спроби визначає крива II. Таким самим чином одержують криві III та IV для ще вищих тисків. Ці спроби уможливають докладне досліджування руху води в глинах, підданих під такий високий тиск, що їхній коефіцієнт водопроникливості не перевищує 0,000000007 см./хвил. Отже чутливість цього способу практично необмежена.

Наслідки цих спроб цілком певно доводять, що рух води в глинах, навіть у напівтвердому стані, підлягає законові Дарсі так само точно, як і рух води в пісках.

**Вага теорії.** Припустім, інженер помітив чимале осідання споруди, поставленої на шарі глини, при чому з бігом часу це осідання збільшується з певною швидкістю. Він оголошує свої спостереження, додаючи до них, як заведено, деякі відомості про колір та вологість глини. Кілька

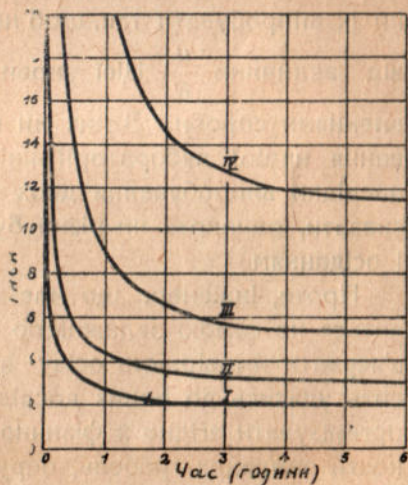


Рис. 18. Криві залежності між тиском і часом у підданому тисковій шарі глини

років згодом інший інженер побажає з'ясувати, чи самісінько так вплине обтяження на шар глини десь в іншому місці. Виконати цього він не зможе, а здавшись виключно на відомості, оголошені його попередником, зробить дуже нерозважно.

Інша річ, коли можна орудувати теорією гідродинамічних тисків, що дає фізичне висвітлення явищ зміни осідання в часі. Основне диференційне рівняння не має в собі ані кольору, ані вологости, але каже, що кількісна сторона процесу осідання залежить виключно від відношення  $\frac{a}{\kappa}$ ; все інше неважне щодо перебігу осідання. Для даних двох глин наслідки можуть бути цілком різні, не зважаючи на їхній однаковий синій колір і однакову вологість. Рівночасно інші глини різних кольорів і неоднакової вологости можуть дати однакові наслідки, в разі величини  $\frac{a}{\kappa}$  однакові.

З метою порівняти дві глини з погляду осідання, треба зразки їх випробувати так, щоб наслідки спроби залежали виключно від величини  $\frac{a}{\kappa}$ . Цієї умови можна додержати кількома поставленнями спроби. З них ми вибираємо ту, що для неї устаткування нашої лябораторії найкраще пристосовано. Порівнюючи наслідки випробування двох глин, можна досить точно наперед сказати, однакова чи різна буде для них залежність між часом і осіданням.

Проте, інженер, що має справу з земляними масами, цікавиться не самою залежністю між часом і осіданням. Бажаючи з'ясувати ймовірність осіву або дослідити якість ґрунту, він мусить удатись до інших досліджень глини. Ці дослідження треба організувати згідно з фізичною теорією осувів та з теорією стійкості земляних гребель, беручи під увагу сталі, істотно важливі для розглядуваних процесів.

Самі спроби можна раціонально поставити лише в тому разі, коли виконавець їх виразно усвідомлює собі суть явища. Проте, інертність техніків у цій царині знання ще занадто велика й навряд чи можна сподіватись у найближчому майбутньому на присутні зміни загальних поглядів. Не зважаючи на дедалі ширший масштаб експериментування в царині механіки ґрунтів, геть не всі дослідники усвідомлюють, яка вийде різниця при аналізі екс-

периментальних даних у двох випадках: коли дослідник аналізуватиме факти на основі таких розпливчастих традиційних розумінь, як „середове тертя“ пісків, „спійність“ глин, або коли він спробує з'ясувати спостережені явища їхніми фізичними першоджерелами: чисте поверхнєве тертя, структурні чинники, поверхневий натяг капілярної води та гідродинамічний тиск.

## РОЗДІЛ П'ЯТИЙ

### ФІЗИЧНА ВІДМІННІСТЬ МІЖ ПІСКОМ І ГЛИНОЮ

Видима відмінність властивостей піску та глини. Розмір зерен та крива однорідності. Форма зерен та будова. Вплив на згупання, спійність, пластичність та осідання.

Вже на поверховий погляд глина й пісок здаються цілком різними матеріялами. Відразу звертає на себе увагу така відмінність між ними:

Глина:

- 1) Пористість може досягати 98<sup>0</sup>/<sub>0</sub>
- 2) Висихаючи, меншає
- 3) Має дуже помітну спійність, залежну від вологости
- 4) Пластична
- 5) Під зовнішнім тиском стискається дуже повільно
- 6) Дуже стислива

Пісок:

- 1) Пористість найбільша близько 50<sup>0</sup>/<sub>0</sub>.
- 2) Висихаючи, не зменшується
- 3) У чистому вигляді спійність мізерна.
- 4) Не пластичний.
- 5) Стискається майже зразу по прикладенні тягара
- 6) Проти глини геть менше стисливий.

Кожна з цих властивостей є наслідок кількох рівночасно чинних причин. Тим то, хоча вказівки цього переліку типові для сучасної літератури про механіку ґрунтів, з фізичного погляду вони аніяк не кращі, ніж, приміром, твердження, що два сорти каміння відрізняються крихкістю або, що два сорти парафіну — консистенцією та тягучістю. Такі розпливчасті та загальні вказівки можуть повернути лише на грубі емпіричні висновки, сполучені до того з небезпекою сплутати властивості, фізично цілком різні. Приміром, Аттерберг сплутав опір напівтвердої глини стисковій з її опором промикуванню голки й, скупчивши такі різнорідні відомості на одній діяграмі, дійшов помилкових висновків.

Щоб точно визначити властивості ґрунтів, слід простежити ці властивості до їхніх фізичних первопричин. Щодо глини — це вже зроблено в попередніх розділах. Лишається так само проаналізувати властивості піску та порівняти їх з властивостями глини.

Розмір зерен та однорідність ґрунтів. Як агрегати зерен, глина та пісок відзначаються розмірами зерен та однорідністю. Ці чинники найкраще визначається графічним зображенням наслідків механічної аналізи. Графік повинен бути

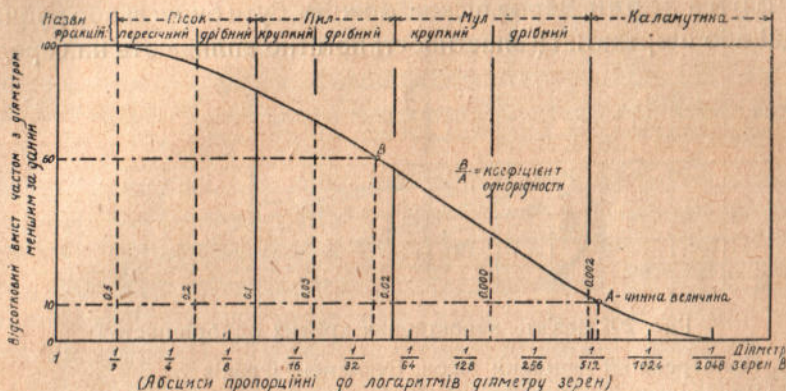


Рис. 19. Крива однорідності

такий, щоб криві однорідності щодо ґрунтів однакової однорідності мали такий самий вигляд, незалежно від величини зерен. Цього можна досягти, зробивши абсциси діаграми, пропорційні до логаритмів діаметру зерен. Напр., на рис. 19  $x = a \log d$ . Відповідно діаметр зерен  $d_2$ , що в  $n$  разів більший за  $d_1$ , зображено буде точкою на повній відстані ( $a \log n$ ) праворуч од точки  $d_1$ , незалежно від абсолютних вартостей  $d_1$  та  $d_2$ . Така діаграма дає вельми наочні криві однорідності.

Криві однорідності. Рис. 20 подає механічну аналізу дев'ятох різних ґрунтів. Абсциси визначають логаритми діаметру зерен, а ординати — загальну вагу зерен з діаметром менше зазначеною абсцисою у відсотках від ваги всієї маси. Точки відповідні до чинної величини, розташовано на горизонтальній лінії з ординатою 10%. Для всіх кривих, що стосуються ґрунтів з однаковим коефіцієнтом однорідності, різниця між абсцисами при 10% і 60% (див. рис. 19) однакова, незалежно від того, буде це крупний нарінок чи колоїдальний порошок.

Що однорідніший нарінок то стрімкіший схил його кривої однорідності. Тим то два ґрунти різної крупкості, але однакової однорідності подано на діаграмі кривими однакового вигляду, а крупність ґрунту (чинна величина) лише визначає їхнє місце по довжині діаграми. Через цю властивість кривих однорідності з рис. 20 зразу видно, що загалом глини куди менш однорідні, ніж піски. Лес являє собою проміжний тип так однорідністю, як і чинною величиною зерен.

**Форма зерен.** Зерна піскові можуть бути округлі або рубчасті, гладкі або шерехаті. Ці властивості помітно впливають на середове



Рис. 20. Дев'ять характерних кривих однорідностей

- A. Прибережний дюновий пісок, Беклемен, Фракія
- B. Прибережний пісок, Румелі Кавак, Фракія.
- C. Льодовиковий пісок, нижній кінець Анногельського льодовика, Австрія.
- D. Мул, верхня частина Золотого Рогу.
- E. Жовта осадова глина, східній беріг Босфору.
- F. Жовта морська глина з обсуву у Фракії.
- G. Лес, Віргіні-Сіті, Іллінойс.
- H. Синя морська глина з обсуву на Чорноморським узбережжі.
- J. Жовта морська глина, вилучена з F

тертя, пружність та водопроникливість піску. Проте всі піски мають одну спільну властивість, що відрізняє їх од глин. Це — компактність та жорсткість їхніх зерен. Лускуваті частки, наприклад, луски лосняку, в піску лише другорядна домішка. Навпаки, глина складається переважно з гнучких лускуватих часток. Щоправда, окремі частки каламуті такі дрібні, що їхню форму годі роздивитися навіть у найпотужнішому мікроскопі. Проте, припущення, що глинясті частки мають лускувату форму, потверджується багатьма доказами. З них ми згадаємо такі.

Вище вже згадувано за інтерференційний указник контакту, що складається з двох скляних платівок з тонкою водяною плівкою поміж ними. Грубина плівки, обчислена за кольорами Нью-



тонових перснів, що оточують водяні плями, становить близько 0, 1  $\mu$ . Для цього інтерференційного вказника автор, замість дистельованої води, уживав воду, що мала в собі у змуленому стані глинясті частки, завбільшки близько 2  $\mu$ , отже, у водяних плямах було багато глинястих часток діаметром од 1  $\mu$  до 2  $\mu$ . Що завгрубшки плівка мала не більше 0,1  $\mu$ , частки глини повинні бути лускуваті.

Цей безпосередній доказ підтверджують докази посередні, здобуті спробами на водопроникливість. Напівемпірична формула (2) для коефіцієнта водопроникливості доводить до такого визначення зведеного коефіцієнта водопроникливості:  $Kr = 1,9 d^2$  см./сек, а відповідна формула (1) для піску дає  $Kr = (174 \text{ до } 100) d^2$ ; в обох формулах  $d$  — чинна величина. Відси виходить, що коефіцієнт водопроникливості для піску в 50 — 80 разів більший, ніж для глини при такій самій чинній величині зерен. Обидві формули стосуються фільтрації при температурі 10°C, через ґрунт, пористістю 50%. Висновуючи формулу (2) для глини, oprіч того, припустили, що хоч пори дуже малі, вода, яка фільтрується через глину, має нормальну в'язкість. Отже, величезну відмінність формул (1) і (2) можна пояснити лише різницею форм часток ґрунту.

Слід пам'ятати, що темін „діаметр глинястої частки“ в жадному разі не стосується діаметру кулястого зерна однакового обсягу, а скоріш діаметру кулястого зерна, що падає у воді так само хутко, як і глинясті частки („еквівалентний діаметр“). Що лускуваті частки завжди поринають так, що їхній плаский бік приблизно горизонтальний, обсяг такої частки становить лише невеличку частину обсягу кулі еквівалентного діаметру. Тим то, коли, навіть, подрібнити пісок до розміру еквівалентного діаметру глинястих часток, і тоді в одиниці обсягу число часток такого подрібненого піску буде в багато разів менше проти числа часток глини. Саме від цього залежить одмінність двох формул коефіцієнта водопроникливості.

У хемії до колоїдів звичайно застосовують лише частки не більше 0,1  $\mu$ . Проте, глинясті частки еквівалентного діаметру до 2  $\mu$  через свою лускувату форму мають такий самий малий обсяг, як і компактні, округлі частки діаметром близько 0,1  $\mu$ . Тим то глина, що її найгрубші зерна мають еквівалентний діаметр 2  $\mu$  або 0,002 мм., має всі властивості колоїду, й Аттерберг цілком слушно називає колоїдальною глиною всі глинясті частки менші 2  $\mu$ .

Тут варто згадати, що досліджуючи Аттерберг колоїдальні порошки, здобуті подрібненням різних мінералів, виявив, що лише мінерали платівчастої або лускуватої будови дають пластичну масу.

Деталь Д на рис. 21 дає мікрокартину зерен крупного мулу (0,02 — 0,006 мм.), здобутого з синьої морської глини. Мікроскопічним дослідженням колоїдальних часток у цьому мулі не виявлено. Проте, як пересувати взад і вперед горішнє скло інтерференційного вказника контакту, з'являється багато колоїдальних часток.



Рис. 21. Частици ґрунтів (збільшені)

- А. Подрібнений кварц.
- В. Льодовиковий пісок (С рис. 20) та їхній формі.
- С. Дюновий пісок (А рис. 20).
- Д. Крупкий мул (з F рис. 20).

Вони мають виразно виявлений Бровнів рух <sup>1)</sup>, а це визначає, що лускуваті частки дуже крихкі. Ця крихкість є, безперечно, одна з причин характерної різниці між кривими однорідності глин і пісків.

Взагалі між пісками й глинами немає, здається, жадної іншої різниці, окрім різниці в розмірі зерен. Проте, далі побачимо, що цієї різниці цілком досить, щоб з'ясувати всі характерні особливості обох матеріалів

Пухка та щільна будова агрегату Зернястий агрегат (пісок або глина) у змуленому стані осідає повільно. Насамперед досягають дна частки, безпосередньо близькі до нього. Припустім, що частина агрегату вже осіла й що нова частка спускається на нерівну поверхню осаду (рис. 22). Рух цієї частки, доти вертикальний, порушується двома новими силами: реакцією осаду та початковим тертям у точці зіткнення між часткою й осадом. В разі частка завбільшки з піскове зерно, початкове тертя мізерне проти ваги зерна. Тоді вага та реакція утворюють пару сил, що скидають частку на дно сусіднього пониження. Утворений таким чи-



Рис. 22. Осаджування дрібного порошку

<sup>1)</sup> Суть Бровнового руху в тім, що змулені в течиві частки роблять безладні рухи, спричинювані ударами в них молекул течива. Що дрібніша частка, то більша швидкість руху. Бровнів рух, очевидно, довічний (прим. ред.)

ном осад матиме пухку будову (рис. 23, вгорі праворуч). Як по-судину струсонуті, будова стане щільна (вгорі ліворуч). Що при цьому майже немає прилипання поміж частками, найбільші порожнечі не можуть обсягом дуже перевищувати відповідні обсяги порожнеч маси куль однакового діаметру, тобто 47,6%. І дійсно: виміром виявлено, що обсяг порожнеч у піску, позбавленому властивості спійності, ніколи не перевищує 50% (зведена пористість 1.0). Навпаки, в разі частки, що падають, дуже малі, спійність, залежна від початкового тертя, може перемогти чин пари сил, отже частки лишаються там, де вони найперше торкнулись осаду. Тоді утворюється губчаста структура (ліворуч унизу рис. 23) з невеличкою зведеною пористістю — за експериментальними даними — близько 4.

Розглянемо ще частки колоїдального розміру. Вони лишаються незавжди змулені, якщо не осадити їх, додавши кілька краплин електроліту. Перед доданням електроліту частки рухаються в течії надзвичайно швидко (Бровнові рухи), відштовхуючись одна від одної через свої електричні заряди. Електроліт нейтралізує електричні заряди, не знищуючи фізичної причини Бровнових рухів. Тим то частки в течії стикаються; при зіткненні починається чин початкового тертя, й частки злипаються. Таким чином утворюються губчасті скупчення, що дають губчастий осад, подібний до згаданого вище. Лише тут, замість окремих часток — скупчення їх. У наслідок виходить будова, що її можна назвати губчаста структура другого порядку (рис. 23, внизу праворуч).

Щонайбільша зведена пористість для простої губчастої структури дорівнює 4, для такої самої структури другого порядку найбільша зведена пористість має бути близько  $4^2$  або 16, що відповідає пористості 94%.

Отже, пункт 1-й переліку різниць між піском і глиною пояснюється просто різницею в розмірі зерен.

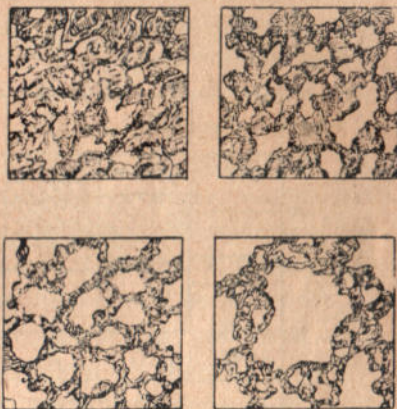


Рис. 23. Головні структурні типи однорідних ґрунтів

Спроби з осаджуванням порошків різної крупності (здобутих відмулюванням ґрунтів) потверджують це пояснення. Як бачимо на діаграмі рис. 24, дрібні порошки, навіть ущільнені дужим струсуванням, не можна було довести до щільності крупніших пухких осадів. Ця спроба дає зрозуміти величезну вагу початко-

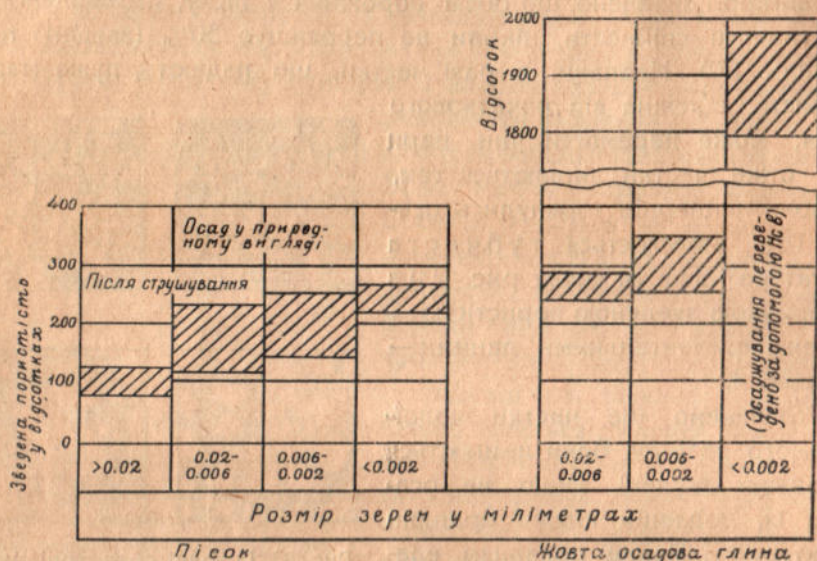


Рис. 24. Зведені пористості пісового та глинястого осадів

вого тертя, коли точок зіткнення на одиницю обсягу осаду дуже багато. Спроби ці зроблено в трубках діаметром 1.6 см. Повільне осідання в ширших посудинах дало б, безперечно, менші величини. Проте наслідки спроби в достатній мірі потверджують вище пояснення.

Різниця зступання. Висихаючи, кисень глини зступається, але пори заповнено водою аж до досягнення границі зступання. Вище зазначалося, що зступання є стискання під чином капілярного тиску та щонайбільша величина капілярного тиску (перехідний тиск) залежить од розміру зерен.

Перехідний тиск дорівнює  $0,1 h$ , де  $h$  — найбільша височина в метрах, що до неї вода може піднятися силою капілярності. Для дуже дрібного піску  $h$  приблизно дорівнює 0,05 м, відки перехідний тиск дорівнює 0,005 кг./см.<sup>2</sup>. Водночас для масних глин тиск становить 200 кг./см.<sup>2</sup> і більше. Тиск у 0,005 кг./см.<sup>2</sup> не може

спричинити хоч трохи помітного стискання ґрунту. Таким чином пояснюється пункт 2 переліку різниці між пісками й глинами.

**Спійність.** Пункт 3 пояснюється так само дуже просто. Найбільша спійність (опір зсовові) зернястого агрегату дорівнює здобуткові з перехідного тиску на коефіцієнт середового тертя. Тим то пісок має дуже невелику спійність.

**Пластичність.** Геть тяжче зрозуміти, чому колоїдальні кварцові порошки (мікроскопічні піски) непластичні, а втім глини однакової дрібності дуже пластичні. Тіло називається пластичне, коли форма його може змінюватись, зберігаючи сталий обсяг. Щоб згадати причину непластичности мікроскопічних пісків, треба згадати відому Райнольдсову спробу з лантухом піску. Райнольдс помітив, що гумовий лантух з сухим піском майже не опирається зміні його форми. А як заповнити порожнечі в піску водою, лантух робиться твердий, як камінь, і може, не міняючи форми, витримати велике обтяження. Це явище пояснюється, очевидно, компактністю форми піскових зерен. Розподіл їх може змінитися лише тоді, коли зерно може перекочуватись через зерно. Ці рухи можливі тільки, коли структура тимчасово робиться дуже пухка, що сполучено із збільшенням обсягу порожнеч. У сухому піску ніщо не перешкоджає зміні обсягу порожнеч, але, коли останні цілком заповнено водою, ще й немає доступу повітря, обсяг порожнеч не може змінитись, отже й зерна не можуть пересуватись, і вміст лантуха справляє вражіння твердого тіла.

Суть цього явища не залежить од розміру зерен. Треба лише, щоб структура піску була не губчаста, а зерняста. Осад з колоїдального кварцового порошку спершу має губчасту будову й рухливий, як і губчастий глинястий осад. Так по випаруванні капілярної води з кварцового порошку, капілярний тиск стискає порошок, надаючи йому зернястої структури. У цьому стані при компактних зернах порошок не може змінити форми, не змінюючи відповідно й обсягу, що й доведено Райнольдсовою спробою. Тим то пластичність не властива ані піскам, ані калоїдальним порошкам з компактними зернами.

Глинясті частки так само стискаються силою поверхневого натягу капілярної води, що й так само дуже, мов би їх уміщено в гумовий Райнольдсів лантух. Та ці частки лускуваті, тим то вони ковзаються одна по одній, і обсяг не змінюється. Саме цьому глини пластичні.

Отже, четверта різниця між пісками та глинами залежить од впливу розміру та форми часток.

Що відмінність розміру та форми зерен відносна, можна сподіватись, що існують матеріяли з різною мірою пластичності. Найкращий спосіб визначати міру пластичности запропонував проф. Аттерберг (див. вище). У таблиці 1 подано перелік характерних границь для колоїдальних порошків, здобутих роздрібненням різних матеріялів. Щодо дрібности всі випробувані порошки були майже однакові. Таблиця виразно зазначає переступні стадії між високою пластичністю (тальк, біотит) та цілковитою відсутністю її (колоїдальні кварцові порошки). Для того самого матеріялу пластичність збільшується із зменшенням пересічного розміру зерен.

Осідання. Пункт 5 знов таки цілком залежить од розміру та форми зерен. Як обтяжити поверхню насиченого водою шару піску, осідання відбудеться майже зразу, отже зайва вода, не зустрічаючи на своєму шляху скількибудь значного опору, швидко витікає із стисненого шару. Навпаки, у глині, через малу водопроникливість її, відтік капілярної води натрапляє на величезний опір, отже осідання під обтяженням відбувається повільно.

Таблиця 1

Пластичність дрібних мінеральних порошків<sup>1)</sup>

Матеріал	Нижня границя пластичности	Нижня границя текучости	Коефіцієнт пластичности (різниця цифр двох попередніх стовпців)
Біотит . . . . .	44	87	43
Тальк . . . . .	48	76	28
Хлорит . . . . .	47	72	25
Каолініт . . . . .	43	63	20
Гематит . . . . .	20	36	16
Лімоніт . . . . .	27	36	9
Кварц . . . . .	35	35	0

<sup>1)</sup> Зерна менші 0,002 мм. Цифри позичено з Аттербергових праць. Вологість визначено у відсотках від ваги твердої речовини.

## РОЗДІЛ ШОСТИЙ

### ПРУЖНІ ДЕФОРМАЦІЇ ПІСКУ ТА ГЛИНИ

Дослідження стисливості піску та його пружних властивостей. Розшир та повторне насичення. Ідеальний кубик з піску та вплив бічного розширу. Порівняння з твердими тілами

Вивчаючи причини відмінної стисливості глини та піску (див. останній пункт переліку відмінностей між піском і глиною), досліджувано й пружні властивості піску. Дослідження це переводили способом, аналогічним до раніше вжитого щодо глини. Пісок насипали в сталеве кільце на полірованій чавунній підставці, а тоді або лишали його в пухкому вигляді, або ущільнювали постукуванням у кільце. Поверхню піску зрізали врівні з краями кільця, вкривали круглою чавунною платівкою й зануряли важелем (під низьким тиском) або ж гвинтовим пресом (під пересічним або високим тисками). Під пересічним або високим тисками вживали кільце діаметром 15 см. і заввишки — 4 см. Деформації вимірювано мікрометричним гвинтом через інтерференційний указник контакту. Ці спроби з сухим піском та з піском, зануреним у воду, жадної не давали різниці.

На діаграмах рис. 25 подано наслідки спроб з пухким і з добре ущільненим піском. В обох випадках вживали чисто кварцовий пісок, здобутий подрібненням білої кварцової ріни, просіяної та промитої. Діаметр зерен дорівнював від 0,25 до 1 мм.

При спробах з пухким піском початкова пористість становила 49,75% (зведена пористість — 0,99). Гвинтовим пресом тиск підвищувано з швидкістю близько 1 кг./см.<sup>2</sup> за хвилину до 7 кг./см.<sup>2</sup>

Добувшись такого тиску, толоч преса закріпили на 10 хвилин (горизонтальна лінія *ab*). Протягом цього часу тиснення піску на закріпленій толоч поменшало приблизно до 5,5 кг./см.<sup>2</sup>. Тоді прес знову пущено в хід і тиск підвищено до 12 кг./см.<sup>2</sup>. Тоді то-

лок знов закріплено на 6 хвилин  $cd$  і обтяження зменшено до  $1,5 \text{ кг./см.}^2$ , а тоді знову збільшено  $ef$ . При цьому виходила повна петля гістерези й продовження початкової кривої залежності між тиском і деформацією. Другий цикл обтяжень узятो під вищим тиском (петля до  $lm$ ).

Діаграми залежності між тиском і часом (рис. 25) подають

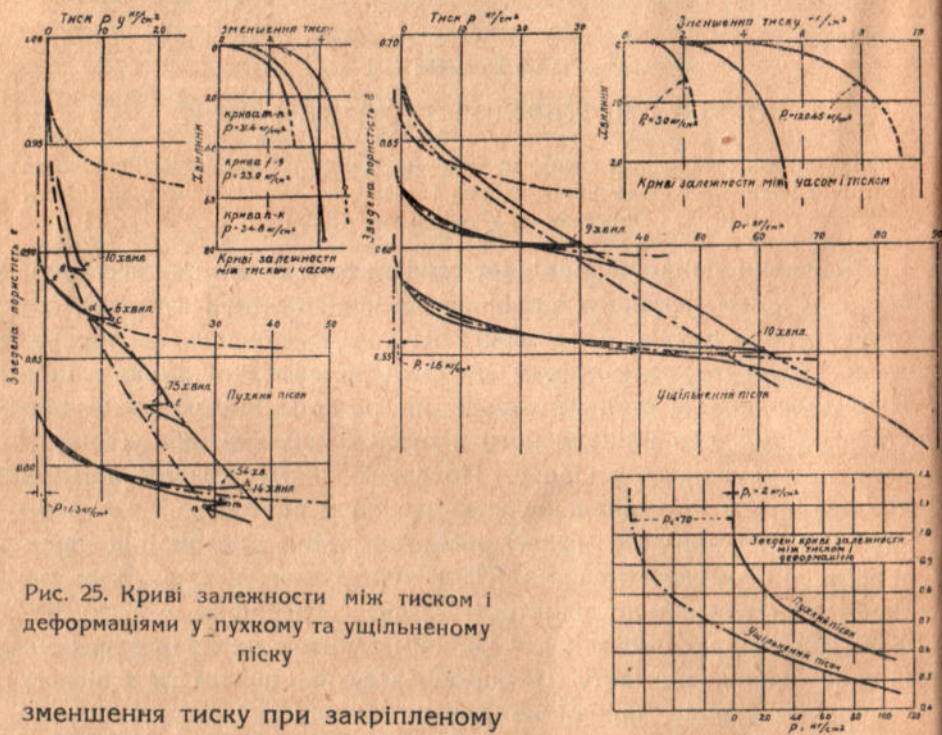


Рис. 25. Криві залежності між тиском і деформаціями у пухкому та ущільненому піску

зменшення тиску при закріпленому толоці. Ці криві дуже подібні до відповідних кривих для глиняних кубиків, ба, навіть мають однакове диференційне рівняння. Поступове зменшення тиску залежить од поступовости взаємного врівноваження неврівноважених опорів тертя, що спершу беруть на себе частину обтяження.

Як підтримувати стале обтяження, деформація збільшується з уповільненою швидкістю, й залежність між деформацією та часом з усіх поглядів аналогічна такій самій залежності щодо глиняних кубиків під сталим обтяженням.

Розшир піску. У спробі з ущільненим піском (рис. 25) початкова пористість дорівнювала  $40,2^0\%$  (зведена пористість



0.673). Крива залежності між тиском і деформацією положистіша, ніж для піску пухкого, але петлі гістерези на обох діаграмах майже однакові. Звертає на себе увагу велика подібність між цими діаграмами та діаграмами для глини. В обох діаграмах цикли обтяжень утворюють викривлені петлі гістерези. У діаграмах для піску (рис. 25) зворотні гілки цих петель являють собою лінію розширу, але з усіх поглядів відповідають лініям повторного насичення в діаграмах для глини й подібно до останніх мають рівняння логаритмічних кривих

$$e = V \log (p + p^i) + C$$

Тут  $p$  — зовнішній тиск у кг./см.<sup>2</sup>,  $p^i$  — початкова стала, що має вимір тиску,  $A$  — коефіцієнт розширу піску та  $C$  — стала, залежна від початкової щільності піску. Коефіцієнт розширу піску відповідає коефіцієнтові повторного насичення глини.

Коефіцієнт розширу майже не залежить од щільності структури піску. Він дорівнює  $1/100$  для піску з дуже гладенькими зернами і  $1/176$  для піску з дуже шерехатими зернами. Коефіцієнт повторного насичення дорівнює: для дуже масної глини —  $\frac{1}{22} \cdot 3$ , для пісної глини —  $\frac{1}{52} \cdot 7$  і для піскуватого мулу —  $\frac{1}{73}$ .

Отже, пружність піску куди менша проти пружності глини. Що більше піску в глиняному ґрунті, то ближче його коефіцієнт повторного насичення до коефіцієнта розширу чистого піску.

„Початковий тиск“  $p^i$  залежить не лише від початкової щільності піску, ба й від тиску, під яким починається розшир. Це пояснюється, почасти, заклинюванням піщинок, почасти руйнацією піщинок під підвищеним тиском. Наприклад, пісок, спершу чистий і вільний від пилу, побувши під тиском 50 кг./см.<sup>2</sup>, мав у собі вже 4,6% пилу. Пересічна вартість  $p^i$  для піску (1,5 кг./см.<sup>2</sup> для пересічного та високого тисків) дуже велика проти глини (близько 0,002 кг./см.<sup>2</sup>).

Вплив невірноважених напруг на вигляд кривої залежності між тиском і деформацією залежить од більшої або меншої поступовості збільшення обтяження. В разі надзвичайно повільного підвищення обтяження виходить „зведена“ крива, позначена пунктованою лінією. Як залежить вигляд цієї кривої від початкової щільності піску, бачимо з 3-ої діаграми рис. 25.

На рис. 26 подано одмітні діаграми залежності між тиском і деформацією для масної глини, пухкого піску та ущільненого піску. Рисунок виразно показує, що різниця між пружними властивостями, позначеними трьома кривими, лише кількісна. Різ-

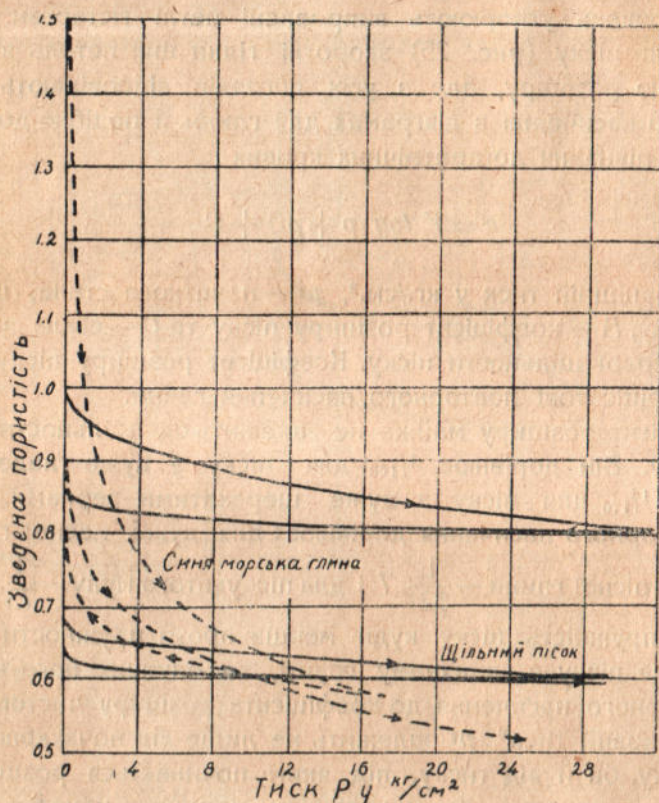


Рис. 26. Криві залежності між тиском і пористістю (деформацією) для глини та піску

ниця ця (зазначена в п. 6 переліку відмінностей між піском і глиною) є очевидний наслідок лускуватої форми глинястих часток. Пісок можна порівняти з купою скалля, а глину — з купкою дрібних клаптиків паперу. Що більше піску в глині, то менші її стисливість та пружність.

Пуассонове відношення для глини обчислено на підставі виміру бічного тиску в обтяженому шарі, що його бічному розширові перешкоджало тверде кільце. Таким самим чином можна

визначити Пуассонове відношення для піску. Воно дорівнює 5,0 (пісковик — 11, граніт — 5,1, мармур — 4,5).

Отже величиною Пуассонового відношення глина приблизно відповідає металам, а пісок — кристалічним гірським породам.

Модуль пружності пісків. Випробовувати глину на роздушування можна у вигляді кубика. Перед обтяженням частки цього кубика зазнають чину лише одної сили — капілярного тиску, що діє як тиск гідростатичний. Припустім, що частки глини замінено частками піску, не змінюючи інтенсивності середнього тиску. Що для стиску, при неможливості бічного розширу, діаграми залежності між тиском і деформаціями так для піску, як і для глини аналогічні легко зробити висновок, що й для піскового кубика крива залежності між тиском і деформацією повинна мати такий самий вигляд, як і для глиняного кубика. Як уже зазначалось, остання діаграма дуже подібна до такої самої діаграми для бетонного кубика.

Проте, випробовувати піскові кубики безпосередньо, звичайно, неможливо. Через великі порожнечі в піску, капілярний тиск дуже малий — такий малий, що частки не можуть триматись компактною масою й розсипаються. Але, разом з тим, кожний кубуватий елемент засипу поза підпорною стінкою можна порівняти з нашим ідеальним кубиком, капілярний бо тиск тут замінюється тиском навкружного піску. Коли підпорну стінку горизонтально насувати на засип, кубічний елемент засипу підпадає під такі самі сили, які чинять на стисаний глиняний кубик. Тим то й діаграма залежності між тиском і деформацією повинна бути така сама. Спроби потверджують це цілком.

Коли підпорна стінка підпадає під тиснення засипання, кожний кубічний елемент засипу зазнає горизонтального видовження. Деформація ця точнісінько відповідає деформації від розтягу глиняної призми. У такій глиняній призмі головні напруги, що чинять під простими кутами до напрямку розтягу, завбільшки однакові й дорівнюють капілярному тискові. А головна напруга, що чинить у напрямі розтягу, є змінної величини стискна напруга, рівна різниці між капілярним тиском і розтяжним зусиллям. Ця результативна напруга, очевидно, повинна бути стискна, а не розтяжна, навряд бо чи можливо, щоб розтяжне зусилля абсолютно своєю величиною перевищувало капілярний рух. Звичайно ця стискна напруга зменшується з видовжуванням призми.

Так само бічний тиск сипкої маси піску на відсігну підпорну стінку повинен, очевидно, зменшуватись у міру відсування стінки.

Усе зазначене стверджує така спроба (див. рис. 27). У дві однакової форми посудини *A* та *B* насипають піску, як показано на рисунку. У стінки кожної посудини на половині височини горизонтально покладено в пісок руба сталеву стьожку між двома аркушами гладкого паперу. У посудині *A* пісок лежить спокійно

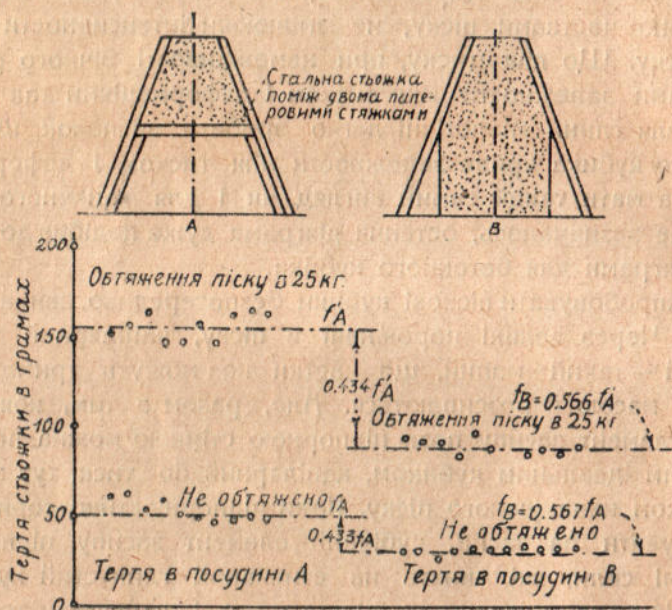


Рис. 27. Бічний тиск піску

після бо засипання вже не зазнає бічного розширу. У посудині *B* горішня половина піскового стовпа лежить на поверхні стисканої спідньої половини. Підчас засипання ця спідня половина стискається. Кожний шар  $\Pi$  суне вниз і, в наслідок нахилу стінки посудини, він, спускаючись, розширяється в бічному напрямі. За вищеподаною теорією, цей розшир повинен зменшувати бічний тиск піску. Ряд вимірів сили, потрібної, щоб витягти стьожку, подано на рисунку окремо для посудин *A* і *B*. В обох випадках нижня група точок стосується піску з необтяженою поверхнею, а верхня група — піску з обтяженням 25 кг. З рисунку бачимо,

що бічний тиск у посудині *B* менший, як у посудині *A* на 43%— очевидно через бічний розшир піску.

Цілкові інші мали наслідки, піддавши пісок дужому струшуванню. З цією метою попід дном посудини *B* примощували підкладки. Після першої серії спроб на витягнення стьожки підкладки прибирали, й дно раптом падало на 2 мм. Вимірний зразу після цього бічний тиск, як виявилось, трохи поменшав проти попереднього, але з бігом часу він зростає, набирає своєї початкової величини, а за 24 години вже дорівнює бічному тискові в посудині *A*. Збільшення тиску, очевидно, залежить од поступового взаємного врівноваження середових опорів тертя, подібних до тих опорів, що спричиняють збільшення тиску в кубіку глини або в шарі піску, як зменшити обтяження та підтримувати сталу височину кубика чи піску.

Вплив бічного розширу на зменшення тиску сипкої маси піску потверджують ще спроби над тиском землі, що їх виконали Дарвін (С. Н. Darwin), Донат (Donath) та автор.

Деякі цікаві співвідносини можна здобути з кривих залежності між тиском і деформаціями щодо піску (рис. 28). Суцільна лінія визначає криву про випадок, коли пісок у твердому кільці й не може розширятись у бік. При цьому бічний тиск менший від вертикального (через обтяження) й відповідає тискові землі в спокійному стані. Застосовуючи Пуассонове відношення, з суцільної кривої можна здобути криву обсягового стиску, що визначає деформацію кубика, підданого рівномірному тискові з усіх боків (тобто тискові капілярному). Цю криву позначено пунктовою лінією. Припустім тепер, що стиск, позначений цією пунктовою лінією, залишено під тиском  $p_1$ . Кожний елемент маса піску перебуває тепер у тих самих умовах, що й глиняний кубик під чином капілярного тиску такої ж величини  $p_1$ . Потім, як збільшувати вертикальне обтяження, підтримуючи сталий тиск, рівний  $p_1$ , та не перешкоджаючи вільному бічному розширові під чином збільшеного вертикального обтяження, здобудемо криву, тотожню з кривою для вертикально обтяженого глиняного кубика. На рис. 28 позначено дві точки кривих, що починаються відповідно під обсяговими тисками  $p_1$  та  $p_2$ . Спробами над глиняними кубиками виявлено, що відношення між модулем пружності та середовим тиском — величина стала. Отже, можна зробити висновок, що спади петель гістерези для цих двох кривих відноситимуться один

до одного, як  $p_2:p_1$ . Інакше кажучи, всі криві виду, поданого для двох вільних кубиків на рис. 28, відзначатимуться лише масштабом абсцис. Таким чином, коли криву  $p_1$  збудовано за експериментальними даними, криву  $p_2$  можна визначити простим збіль-

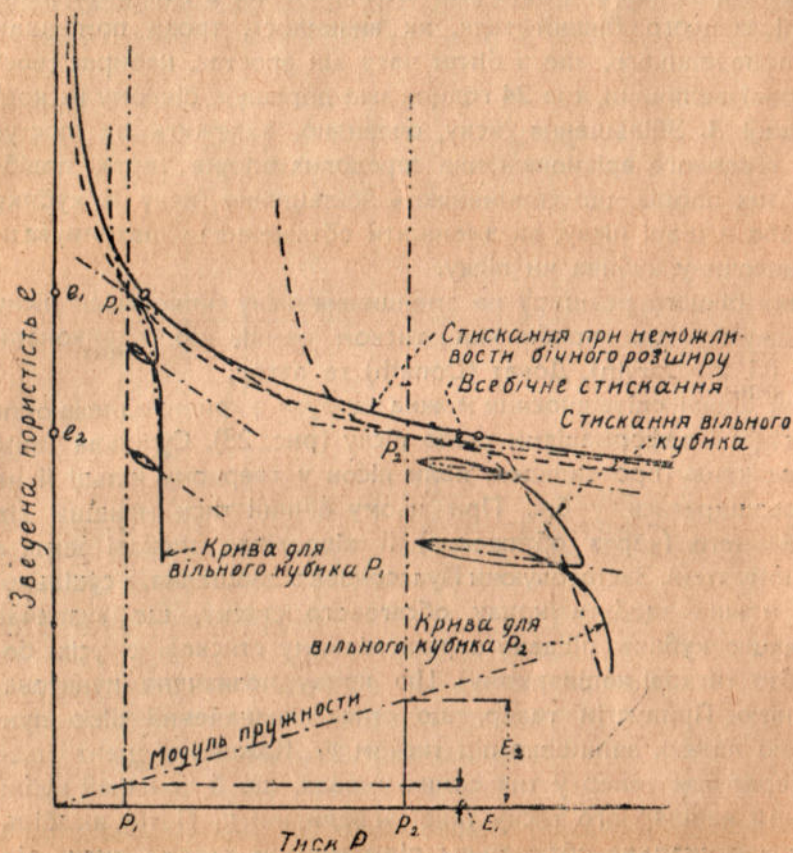


Рис. 28. Крива залежності між тиском і деформацією для піску

шенням абсцис кривої в пропорції  $p_2:p_1$ . Справедливість цього висновку potwierджено багатьма спробами над глиною.

Порівняння глини та піску з твердими тілами. У розділі про спійність глини зазначалося, що відношення модуля пружності до середового (або молекулярного) тиску — величина стала не лише щодо глини, але й щодо металів. Тим то закон,

визначений кривими рис. 28, до певної міри прикладний до всіх матеріалів, незалежно від того, чи частки утримуються молекулярним притяганням (тверді тіла), чи тисненням ваги самого матеріалу (пісок).

Тепер уявім собі пісковий кубик. За експериментальними наслідками можна обчислити, що середовому тискові 1226 кг/см<sup>2</sup> відповідає модуль пружності в 200000 кг./см.<sup>2</sup>. Ця величина приблизно дорівнює модлеві пружності для бетону. Проте, опір бетону стискові становить не більше 300 кг./см.<sup>2</sup>, а кубик пісковий може витримати тягар близько 10.000 кг./см.<sup>2</sup>, якщо середовий тиск не змінюється. Щодо тисків од нуля до 300 кг./см.<sup>2</sup> залежність між тиском і деформацією для піску відповідає законів Гука куди краще, ніж для бетону. Ця обставина є один з безлічі прикладів того, що в твердих тілах співвідношення між опором стискові й середовим тиском надзвичайно мале проти відповідного співвідношення для сипких тіл. Вивчити фізичні причини низької величини цього відношення щодо твердих тіл — одне з найцікавіших завдань сучасних досліджень у царині опору матеріалів.

Через величинь відношення між модлем пружності та середовим тиском щодо піску (від 238 до 419 проти 31 щодо масної глини й близько 10 для металів) вже невеликі бічні розшири піску спричиняють чималі зменшення бічного тиску. Тим то визначити тиск землі в стані спокою безпосередньою метою — дуже тяжко. Отже, доводиться вдаватись до метод посередніх.

Висновок. Наслідки порівняння фізичних властивостей піску та глини подано в таблиці № 2. Зазначені в першому та останньому стовпцях факти вже давно відомі, але причиновий зв'язок поміж цими двома групами фактів виявлено лише тепер. Зв'язок цей куди простіший за сподіване. Ця таблиця, криві рис. 28 та деференційне рівняння

$$\frac{k}{a} \cdot \frac{d^2w}{dz^2} = \frac{dw}{dt}$$

визначають основні принципи механіки ґрунтів і дають ключ до фізичного з'ясування властивостей ґрунтів.

## Порівняння піску та глини

Ознака	Фізичні чинники	Видимий наслідок
Розмір зерен	<p>Початкове тертя на одиницю обсягу.</p> <p>Капілярний тиск та поверхневий натяг капілярної води.</p>	<p>1) Різниця в найбільшій пористості: близько 50% для піску й близько 98% для глини.</p> <p>2) Відмінність зступання: пісок, висихаючи, не зменшується, глина — зменшується.</p> <p>3) Різна спійність: чистий пісок не має спійности, глина має велику спійність.</p>
Розмір зерен та їхня форма (зерна компактні або лускуваті)	Капілярний тиск: особливості руху зерен під час деформації маси. Водонепроникливість.	<p>4) Відмінність щодо пластичности: пісок не пластичний, глина дуже пластична.</p> <p>5) Різниця в швидкості пристосування до обтяження: пісок дає цілковите осідання майже зразу після обтяження; глинясті основи осідають дуже повільно.</p>
Властивості зерен.	Гнучкість часток	6) Відмінність щодо стисливості: глина стисливіша за пісок.



## РОЗДІЛ СЬОМИЙ

### ТЕРТЯ В ПІСКУ ТА В ГЛИНІ

Складна природа тертя в сипких тілах порівняно з тертям твердих тіл. Вимір тертя в піску та в глині. Коефіцієнт середового тертя та коефіцієнт середового опору. Вплив гідродинамічного тиску на тертя в глині.

Рух земляних мас у значній мірі залежить од руху окремих часток усередині маси. Тим то тертя особливу має вагу в механіці ґрунтів.

Вивчати тертя в пісках та глинах заходжуються звичайно (і цілком природно) з розуміннями, позиченими з сучасних поглядів на тертя поміж твердими тілами. Ця метода може навести на помилки. Тертя поміж частками сипких тіл геть відрізняється від тертя поміж твердими тілами й вивчати його треба цілком інакше.

Переважно завдяки останнім працям Гарді (W. B. Hardy) та співробітників його, нині суть тертя в значній мірі з'ясовано. Тепер ми знаємо, що це явище геть складніше, ніж гадали протягом двох останніх століть. Виявляється, що коефіцієнт тертя поміж цілком чистими, гладенькими поверхнями дуже великий і сталий. Проте, в природі не існує цілком чистих поверхней, різні бо речовини, що забруднюють, так або інакше розповсюджуються по всіх поверхнях.

Забруднення геть знижує коефіцієнт тертя. Гарді називає воду антимастилом, вона бо здатна збільшувати коефіцієнт тертя поміж забрудненими гладкими поверхнями, частково неутралізуючи мастильний чин забруднювачів. Вода ніколи не впливає яко мастило. Щодо хемічно споріднених мастил здатність знижувати коефіцієнт тертя збільшується із збільшенням молекулярної ваги. Окрім того, коефіцієнт тертя між нерівними поверхнями залежить од величини тиску на квадратову одиницю зіткнення: тиск цей

може бути такий великий, що найдрібніші виступи проріжуть мастильну плівку й спричинять мікростирання.

Та, не зважаючи на вплив згадуваних чинників, тертя твердих тіл — з фізичного погляду — явище порівняно нескладне. Стичні тіла рухаються рівнобіжно із спільною поверхнею стиску, й умови тертя лишаються досить сталі ввесь час руху, якщо останній відбувається дуже повільно.

Навпаки, відносний рух мас зерен — процес дуже складний, що має в собі не лише поверхнєве тертя, ба й пересування та обертання окремих зерен. Складність руху виявляється в тому, що дійсному рухові передують мікро-рух, спричинюваний дрібнішим пересуванням зерен. Коротше кажучи, опір тертя в піску залежить не лише від тиску та від властивостей стичних поверхней, ба й від щільності піску та від глибини шару, де зерна пересуваються.

Середовє тертя піску. Комісія вивчення природних основ<sup>1)</sup> перевела дуже широкі дослідження з метою визначити коефіцієнт тертя стандартного (Оттавського) піску. Проте, дослідження ці досі не дали змоги дійти якихось простих та загальних висновків. Для досліджень уживано складний кружаловий апарат, де пісок містився у радіально розташованих відділках. Коефіцієнт тертя обчислювали за силою, потрібною, щоб повернути рухому частину апарата. Виявилось, що коефіцієнт цей дуже низький, але коливався в широких границях залежно від числа зроблених обертів. У кожній серії спроб коефіцієнт значно зменшувався (під низьким і пересічним тиском) разом із збільшенням тиску. Наслідки кажуть, що коефіцієнт тертя навіть для стандартного піску має нахил коливатись у надзвичайно широких границях, залежних од умов спроби.

У дійсності не існує єдиного коефіцієнту тертя: величина його залежить і від способу зсову, й від зміни будови піску безпосередньо перед зсовом. При цьому теоретичні міркування та наслідки спроб змушують відрізнити два основні випадки:

1) Відділення маси піску по площині. У границях зони зсову заходить цілковитий перерозподіл зерен. Від часу клясичної Райнольдсової спроби з лантухом піску ми знаємо, що зерна піску не можуть переміняти свого місця, хібащо тимчасово збільшить-

<sup>1)</sup> Комісію вивчення природних основ (Foundation soils committee) заклало американське товариство інженерів - будівників,

ся обсяг порожнеч. Тим то відділення по площині вимагає поступового підпушування піску близько площини поділу, тобто зсов сполучено із збільшенням обсягу порожнеч. Коефіцієнт тертя в площині зсову зветься *коефіцієнт середового тертя*.

2) Загальна деформація маси піску: коли маса зазнає всебічного рівномірного розтягу або стиску, отже зерна переміщуються в усіх точках маси, стійкість структури поступово зростає й, нарешті, доходить максимуму. У цьому графічному становищі опір тертя, що визначає величину відношення поміж крайніми головними напругами, є *коефіцієнт середового опору*. Він являє собою найбільшу можливу вартість коефіцієнту тертя в масі піску даної щільності й може бути куди більший за кут природного укошу.

Випадки 1 та 2 — граничні. Поміж ними може бути безліч проміжних станів. Кожному з них відповідає інший тип середових переміщень та інший коефіцієнт тертя, відповідний до границі рівноваги при цьому окремому типі пересувань.

Отже, коефіцієнт середового тертя залежить од того, чи обмежено зсов зоною в кілька зерен завгрубшки, чи він відбувається в порівняно грубому шарі. Саме в цьому, очевидно, головна причина розбіжності наслідків спроб з підпорними стінками натуральної величини й моделями їх.

Згадувані спроби комісії вивчання природних основ дають приклад надзвичайної складности опору тертя в пісках. З цих і подібних спроб доводиться зробити висновок, що годі сподіватися визначити коефіцієнт тертя з точністю, потрібною для розрахунку тисків у піскових масах за складніших випадків. Цей коефіцієнт можна взяти лише навмання, вибравши якусь пересічну вартість його або визначивши посередньо на основі спостережень.

Середове тертя в глині. Отже, загальне розуміння природи опорів тертя в піску геть не відповідає дійсності. Те саме, ще й в більшій мірі, можна сказати й про глину.

Зазначимо зразу: спроби з метою визначити коефіцієнт середового тертя глини повинні: 1) вилучити поверхневий натяг капілярної води, він бо спричиняє середовий тиск додатково до тиску зовнішнього та 2) мати на увазі, що опір тертя залежить не лише від величини тиску, бо й від часу, протягом якого цей тиск чинить.

Хай пласка поверхня маси вільної від повітря вогкої глини перебуває під деяким зовнішнім тиском. Із збільшенням тиску обсяг глини, як і обсяг кожного пружного тіла, зменшується. Що пори глини заповнено водою, підвищення тиску спричиняє витікання зайвинної води. Та, через малу водопроникливість глини, вода витікає дуже повільно. Підчас витікання зайвинний тиск урівноважується відповідним гідростатичним тиском води в порах. Обтяження, так би мовити, почасти плаває на поверхні, й лише частину його тиску сприймає тверда речовина маси.

Зразу після обтяження глини стиск її близький до нуля, а гідростатичний тиск майже дорівнює обтягові. З витіканням зайвинної води гідростатичний тиск зменшується, наближаючись

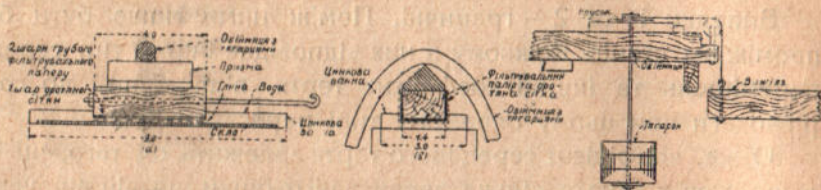


Рис. 29. Прилад виміряти тертя глини

до нуля. Швидкість зменшення його залежить, очевидно, від коефіцієнту водопроникливости та grubини шару глини. *Опір тертя утворюється не гідростатичним тиском, а лише тою частиною тиску, що передається на тверду речовину глини.* Тим то опір тертя збільшується із зменшенням гідростатичного тиску, набуваючи нормальної величини лише тоді, коли зайвинна вода геть уся витече з шару глини.

Саме в цьому фізична причина ковзкості поверхні масної глини. Як стати на трохи похилу глиняту поверхню, нога ковзається, хоча навіть дуже масні глини мають досить високе середове тертя (кут тертя на менш  $11^\circ$ ). При швидкому прикладенні тиску ноги велику частину тіла врівноважує гідростатичний тиск, а тертя від решти ваги тіла замало, щоб запобігти ковзові.

Прилад вивчати тертя. Середове тертя глини автор досліджував приладом, поданим на рис. 29. Він складається з пласкої цинкової ванни, дно якої вкрито склом. Щоб визначити коефіцієнт тертя глини по склу, останнє вкривають тонким шаром пластичної суміші глини з водою (вільною від повітря). На шар глини кладуть дерев'яний брусок, обкладений по боках і на споді двома шарами грубого фільтрувального паперу та ша-

ром мосяжевої дротяної сітки. Сітка потрібна утримувати глину, а фільтрувальний папір — видаляти зайвинну воду. Обтяження складається з тягарців, підважуваних до об'їмиці, що спирається на брусок через призму. Під тиском обтяження грубина глиняного шару зменшується приблизно до 3 мм. Грудочки глини, що виступають понад краї споду бруска зішкрябують ножом, а в цинкову ванну наливають води. Щоб горизонтально пересувати брусок, уживають шворку, перекинуту через коточок і прикріплену до кінця засипного важеля.

Щоб тонкий шар гаразд висхнув або наситився водою, спробу починали не раніше 24 годин після прикладення тягару. З метою визначити коефіцієнт тертя глини по глині замість скла вживали подвійний шар фільтрувального паперу, вкритого мосяжевою дротяною сіткою.

Прилад цей геть не досконалий, роботу бо з ним вимагає великої акуратності, часу та вміння. Проте досі це єдиний прилад, що задовольняє дві перші вимоги, які забезпечують правильні наслідки спроб.

Наслідки спроб. Спробами виявлено, що коефіцієнт тертя глини надзвичайно сталий щодо тисків понад 1 кг./см.<sup>2</sup> і надзвичайно незалежний од багатьох чинників, які впливають на величину коефіцієнта тертя піску. Це, очевидно, залежить од того, що масна глина складається з тонких і дуже гнучких лусок, а пісок — з компактних, досить жорстких зерен. Пісок має таку структуру, що форму його годі змінити, відповідно не змінивши обсяг пор (Райнольдсова спроба), а глина допускає пластичні деформації (не змінюючи обсяг порожнеч).

Коефіцієнт тертя між склом і глиною становить од 0,18 до 0,22 для колоїдального мулу; 0,23 — 0,30 для масних глин та 0,30 — 0,32 — для глин піскуватих. Відповідні коефіцієнти середового тертя глини — 0,23 — 0,28, 0,25 — 0,40 та 0,40 — 0,50. Отже, коефіцієнти середового тертя та середового опору майже однакові. Таким чином, кожному сортові глини відповідає певний коефіцієнт середового тертя. У цьому — присутня різниця між піском і глиною.

По рівній поверхні скла глина зсувається раптово, щойно сила натягу переходить за критичну величину. І навпаки: зсов по площині стику всередині глинястої маси відбувається дуже поступово, нагадуючи течію дуже в'язкого течива. Початкове тертя, що відповідає відсутності тиску, становить близько 20 г./см.<sup>2</sup>. Що мен-

ший тиск, то більший вплив початкового тертя на величину коефіцієнту (див. рис. 30).

В усіх спробах дійсному зсовові передують мовби підготовчий мікро-зсов. Він починається, звичайно, щойно горизонтальна сила досягає близько 0,6 критичної величини. Причина мікро-

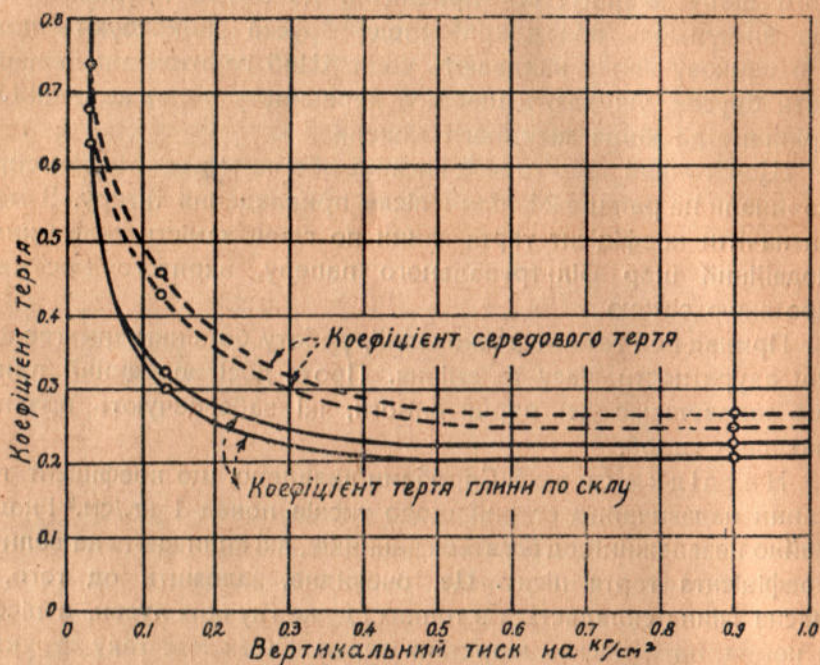


Рис. 30. Статичне тертя жовтої глини

зсову, очевидно, в тому, що будова розтягнутої глини пристосовується до зміненого стану напруг. Якщо горизонтальну силу лишити незмінною, перше, ніж вона дійде критичної величини, мікро-зсов дедалі повільнішає, а тоді цілком спиняється не пізніше, як за 24 години. По цьому дальше збільшення горизонтальної сили не спричиняє жодного мікро-зсову.

Коефіцієнти середового тертя та середового опору глин, очевидно, цілком однакові. У розділі I зазначалось, що опір зсовові пластичної глини дорівнює здобуткові з капілярного тиску на коефіцієнт середового опору. Тим то існує суперечність між низьким коефіцієнтом середового тертя й великою спійністю деяких масних глин, залежна від великих тисків у капілярній воді цих глин.

Висновки. Кількісна сторона явищ, сполучених з тиском землі, залежить од величини коефіцієнта середового опору. Десятик років розвиток механіки ґрунтів гальмувала традиційна звичка отожднювати закони опори тєртя в сипких масах із законами, виснуваними із спроб над тєртям твердих тїл.

У попередньому викладі зроблено спробу схарактеризувати явища тєртя в глині та в піску й подати безліч їхніх відзнак.

Виходячи з повищих міркувань та беручи під увагу старанні дослідження від Гарді та інших тєртя твердих тїл помашених і немашених, доходимо таких висновків.

1) Тєртя поміж гладкими й цілком чистими поверхнями твердих тїл — процес суто-фізичний, спричинюваний безпосереднім молекулярним взаємочином.

2) Тєртя поміж не цілком гладкими поверхнями твердих тїл залежить не лише від цього молекулярного взаємочину, ба й від того, що поверхня стирає поверхню. А втім з фізичного погляду явище це нескладне.

3) Щодо піску коефіцієнт тєртя залежить не лише від властивостей зерен та від будови, але й від причин зсову та від змін, що заходять у піску безпосередньо перед зсовом. Цей коефіцієнт не має певної величини. Він коливається між двома границями: коефіцієнтом середового тєртя (тєртя, чинне в площині розділу) та коефіцієнтом середового опору (опір при деформації всієї маси піску).

4) Щодо глини коефіцієнт тєртя під пересічним і високим тисками дуже сталий. Для низьких тисків він збільшується із зменшенням тиску, початкове бо тєртя, рівне близько 20 г./см.<sup>2</sup>, під малими тисками стає істотною складовою частиною загального тєртя. Швидка зміна тиску спричиняє у воді, що міститься в глині, додатний або від'ємний гідростатичний тиск. Коефіцієнт тєртя досягає своєї нормальної величини (коефіцієнт статичного тєртя) лише тоді, коли гідростатичний тиск по всій масі дорівнює нулю. До досягнення стану гїдралічної рівноваги коефіцієнт тєртя (коефіцієнт гїдродинамічного тєртя) може мати яку завгодно додатну вартість і змінюється залежно від часу.

## РОЗДІЛ ВОСЬМИЙ

### ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ

Історія експериментального вивчення ґрунтів. Наступні завдання. Теорія моделей. Класифікація ґрунтів. Метода еквівалентів.

Всупереч до швидкого розвитку технічних знань у царині статистики, динаміки та гідравліки, у вивчанні механіки ґрунтів останнього століття панував цілковитий застій. Відтоді, як Кулон та Ранкін подали свої клясичні теорії тиску сипких тіл, практично не зроблено ані кроку вперед, і широке поле механіки пластичних ґрунтів ледве порушено. Тим то, з погляду доцільности проектування, техніка земляних споруд перебуває нині приблизно на тому самому рівні, що й будівельна справа та механіка двісті років тому. Головна причина цього застою — величезні труднощі дослідного вивчення різних явищ у ґрунтах. Але останніх років дослідники звернули свою увагу й на цю галузь техніки. У попередніх розділах уже подано огляд експериментальних авторових даних. Дальші дослідження цієї галузі плянують різні наукові заклади американські. Можна сказати, що загальну кампанію з метою розв'язати основні проблеми механіки ґрунтів уже розпочато. Тим то своєчасно буде підсумувати виконану роботу та накреслити подальші перспективи.

**Інженерна геологія.** Перші кроки зроблено в напрямі розвитку інженерної геології. Першу книгу з цього питання написано ще півстоліття тому. Останніх десятиліть багато інженерів визнавали за конче потрібне нав'язати кращий зв'язок поміж геологією та інженерною справою.

В Італії та Бельгії закладено окремі наукові установи опрацьовувати проблеми інженерної геології. По інших державах геологів притягають до участі в усіх важливих будівельних заходах. З інженерної геології написано чимало дуже гарних книг.



Але загалом наслідки кампанії в царині інженерної геології не справили покладених на них надій.

Як далі поглиблюватись у царину інженерної геології, наочніші стають властиві їй обмеження. У своєму сучасному стані ця наука може бути корисна в таких випадках, як вибір місця для споруди або визначення пунктів розташування та числа розвідчих свердловин. Та це лише мізерна частина потрібного нам. Інженерна геологія не дає точних указівок щодо механічних та фізичних властивостей матеріалів, що утворюють геологічні верства. Не дає вона й належної бази для визначення та класифікації ґрунтів.

Експериментальне вивчення ґрунтів. Отже, потроху дійшли висновку, що для належного уґрунтування техніки земляних мас конче треба вивчати ґрунти не лише з геологічного, ба й з фізичного погляду. Перших свідомих заходів ужило в цьому напрямі американське товариство інженерів-будівників. 1913 року воно виділило комісію в справі вивчення природних основ (див. примітку на стор. 72), доручивши їй „зібрати дані сучасної практики щодо опору ґрунтів, як основ, та опрацювати питання про фізичні властивості ґрунтів, важливих у техніці інженерних споруд“.

Комісія поставилась сумлінно до покладеного на неї доручення. Діяльність її була вельми плідотворча. Того ж року шведське міністерство залізниць утворило Геотехнічну комісію досліджувати фізичні властивості ґрунтів у місцевостях, де трапляються обсуви, та вишукати заходів проти них. Отже конечну потребу досліджувати ґрунти одночасно визнано й в Америці, й в Європі.

Протягом десятиох років свого існування комісія вивчення природних основ подала цілий ряд дуже цікавих спроб над тертям, досліджувала стисливість різних ґрунтів, випробовувала зразки глини в природному стані на стиск, розтяг та зсов. Проте, якихось загальних висновків комісія не дійшла. Отже здобуті нею дані не можуть бути дуже корисні на практиці, не визначено бо основних співвідносин поміж окремими властивостями ґрунтів. Причини зрозумілі: кожна з так званих фізичних властивостей ґрунту — середове тертя, спійність, пластичність, опір стисковій тощо — сама з себе така складна, що її годі поставити в простий зв'язок з якоюсь іншою властивістю. Для цього, насамперед, потрібно виязити ті елементарні фізичні чинники, що до них при-

вводиться ці властивості. Спроби, не підперті знанням елементарних чинників, дають лише накопичення неприкладних відомостей і не з'ясовують закономірності залежностей.

Дослідження в новому напрямі. Свідомий потреби інших способів фізичного вивчення ґрунтів, автор 1927 року уложив збудовану на нових засадах програму спроб і заходився виконувати її, починаючи з вивчення пружних властивостей піску. У цій роботі автор велику мав користь від методи навчання. Суть її у можливому спрощуванні кожного завдання та у використанні наслідків одної спроби для визначення робочої гіпотези щодо причин спостережених явищ. Дальші спроби стверджували або відкидали цю гіпотезу. Крок за кроком простежено багато фізичних властивостей ґрунтів до чотирьох основних чинників:

- 1) Тертя поміж поверхнями зерен, у тому — й початкове тертя;
- 2) в'язкість капілярної води;
- 3) поверхневий натяг капілярної води;
- 4) вплив розміру пор на фізичні властивості води.

Виявилось, що величезну різницю між сипкими й спійними ґрунтами можна цілком з'ясувати цими чотирма фізичними чинниками, при чому міра їхнього впливу істотно залежить од розміру та форми часток ґрунту.

Прикладання механіки ґрунтів. Щоб прикласти механіку ґрунтів на практиці, треба насамперед:

1) *Опрацювати теорію моделей.* Без цієї теорії годі зробити правдиві висновки з наслідків спроб на стиск та з випробовувань моделей (напр. моделі греблі).

2) *Скласти класифікацію ґрунтів.* Конче треба вміти характеризувати ґрунти та визначати числом співвідношення між ними.

3) *Опрацювати розрахункові норми.* Нова наука повинна визначити спосіб здобувати всі потрібні відомості, щоб доцільно проектувати споруди, що складаються з земляних мас або доторкаються земляних мас.

Теорія моделей. Теоріям моделей (законові подібності) у сучасній техніці належить дуже видатне місце. Щоб ілюструвати потрібність цих теорій у техніці земляних мас, подамо такий приклад.

Комісія вивчення природних основ з метою експериментального вивчення чину обтяження на основи, зробила зручний прилад, що за допомогою його можна здобути точні діаграми за-

лєжности між тиском і осіданням. Проте, досі немає жадних ука-  
зівок, як ці діаграми прикласти. За Штрошнайдером (Strohschnei-  
der) повний опір чистого, добре збитого піску дорівнює 0,29,  
0,42 та 0,91 кг./см.<sup>2</sup> відповідно для площин 0,8, 1,25 та 1,78 кв. см.,  
а угрунтований на цьому піску стовп діаметром 1 м. може витри-  
мати, без шкідного осідання, обтяження в кілька разів більше.  
З цього зрозуміло, що опір піску тискові швидко збільшується  
із збільшенням площі обтяження. Навпаки, щодо пластичної гли-  
ни опір тискові майже не залежить од розміру обтяженої площі.  
Проміжні між піском і глиною ґрунти мають проміжні властиво-  
сті. Отже, без теорії моделей не можна зробити ніяких висновків  
з наслідків досліджень. Конче треба для кожного ґрунту визначити  
формулу залежності наслідків од розміру споруди або моделі.

Навіть за наявности такої формули постають труднощі при  
застосуванні даного ґрунту до того або іншого типу, визначува-  
ного цією формулою. Ґрунти неоднорідні та верстуваті завдають  
нових ускладнень і майже унеможливають суто теоретичний  
підхід. Тим то доводиться опрацьовувати теорію моделей комбі-  
нованим емпірично-теоретичним способом. Для цього автор тео-  
ретично аналізував кожну спробу (що, власне, є випробовування  
моделі), виявляв залежність між різними фізичними чинниками  
та визначав цю залежність якнайточнішою формулою. Коефіціє-  
нти цієї формули визначувано потім з окремих випадків, де  
вартості формули відомі.

Опір природних основ. Ось деякі наслідки, здобуті зга-  
дуваним способом. Опір природної основи залежить од питомої  
ваги та щільности структури ґрунту, від гладкости поверхні зер-  
ен та величини капілярного тиску. Інакше кажучи — від спій-  
ности ґрунту. Формули опору ґрунтів, як основ, мають за неза-  
лежно змінні: питому вагу ґрунту  $w$ , капілярний тиск  $P_k$ , радіус  
обтяженої поверхні  $r$  та відношення  $\frac{t}{r}$  глибини закладення основи  
до радіусу обтяженої поверхні.

У мокрому піску капілярний рух проти тиску від зовнішнього  
обтяження мізерний, і опір збільшується пропорційно до раді-  
юсу  $r$  та відношенню  $\frac{t}{r}$ .

Навпаки, у пластичній та напівтвердій глині капілярний рух  
дуже великий і порівняно з ним тиск од зовнішнього обтяження

мізерно малий. При таких умовах, як каже теорія, опір ґрунту майже зовсім не залежить ані від радіюсу, ані від відношення  $\frac{t}{r}$ . Практичні випадки здебільша перебувають поміж цими граничними випадками. При даному відношенні  $\frac{Pk}{w}$  збільшення розміру обтяженої площі  $w$  утворює умови, що наближаються до граничного випадку сипкого піску.

Хоча теорія в сучасному її стані уможлиблює подані вище висновки, а разом допомагає опрацьовувати спеціальні дослідження верстуватих ґрунтів, її, проте, не можна вважати за досконалу. Так само недосконалі й методи лябораторних досліджень. А втім здобуті наслідки доводять плідотворчість комбінованої емпірично - теоретичної методи. І хоч метода ця потребує ще дальшого опрацьовування, проте, нині вже можна визначити співвідношення між лябораторними спробами на стискання ґрунтів і практичними випадками опору природних основ. Не визначивши загодя лябораторними дослідженнями, що спійність глини є наслідок від'ємного гідростатичного тиску капілярної води; що капілярна вода в дуже дрібних порах властивостями своїми відрізняється від води в ґрунтах крупних (грубозернястих); що середове тертя ґрунтів — явище складне, залежне від кількох чинників — не визначивши цього лябораторно, не можна було б дійти поданих вище наслідків.

Теорію моделей прикладають і з іншою метою. Напр., згадуваний прилад, що його запропонувала комісія, щоб вивчати опір ґрунтів, призначено для обтяження поверхні діаметром 34.7 см. при засипанні навкружного ґрунту шаром піску 70 см. завгрубшки. Тут відношення  $\frac{t}{r}$  дорівнює близько 4. Емпірично - пісковий засип лише захисний, саме для цього його призначалось. Проте, теоретично, засип може або ніяк не впливати на наслідки спроб, або ж може збільшити опір ґрунту в кілька разів, залежно від більшої або меншої спійности ґрунту. Тим то доводиться виснувати, що спроби з метою здобути розрахункові відомості для проектування піскової основи невеликого завглибшки закладання ( $\frac{t}{r}$  дуже мале) треба зробити так, щоб і відношення  $\frac{t}{r}$  так само було невеличке. В противному разі наслідки можуть бути по-

мильні. Навпаки, щодо ґрунтів високої спійности вплив захисного шару мізерний.

Саме через відсутність теорії моделей у техніці панують дивні й цілком довільні погляди на значіння спроб з моделями земляних споруд. Дослідники, що роблять спроби у великому масштабі, здобувають наслідки, дуже відмінні від наслідків спроб у малому масштабі. Цю розбіжність звичайно складають на помилковість спостережень при спробах у невеличкому масштабі. А втім дійсна причина розбіжності — це відсутність теорії моделей, що, й собі, залежить од недостатнього знання фізичної суті явищ. Кожна видима розбіжність між наслідками спроб у малому й великому масштабі є ознака неповности наших знань. У механіці ґрунтів жадне завдання не можна вважати за розв'язане, доки дослідник неспроможний цілком з'ясувати причини такої розбіжності. Тим то спроби у малому масштабі треба вважати за вельми важливе доповнення до досліджень у великому масштабі. Абсолютні цифри сами з себе нічого не варті: нам потрібні не цифри, а залежність між елементами.

Клясифікація ґрунтів. Кожна споруда являє собою дорогу, натуральної величини, спробу. Якщо ми можемо точно схарактеризувати ґрунт під будівлею — вага наслідків спроби не оціненна. Навпаки, як не знати ґрунту, то сама спроба практично не має ваги в розумінні використання наслідків її у майбутньому. Тим то метода характеристики має таку саму велику вагу, як і теорія моделей.

Вище визначено, що різні властивості ґрунтів залежать од відповідної різниці в формі та розмірі часток ґрунту, від неоднакової вологости та структури його. Якби знати ці чотири чинники — завдання щодо клясифікації ґрунтів було б дуже легко розв'язати. Вагу цих чинників оцінила й згадувана комісія вивчення природних основ. Її клясифікація ґрунтів бере їх на увагу, хоча в практично неприкладній формі. Дійсно: властивості ґрунтів здебільша залежать од властивостей їхніх, так званих, колоїдальних часток, а одна з найважливіших характеристик цих часток — їхня форма — не підхиляється під кількісне визначення. На такі самі труднощі натрапляємо ми й при оцінці другого, дуже важливого чинника — хемічних властивостей адсорбованих складових. Що колоїдальні процеси надзвичайно складні — завдання порівняння ґрунтів дуже тяжке.

Основ клясифікації. Фізичних властивостей ґрунтів (пружність, спійність, водопроникливість тощо) дуже багато. Кожна з них є наслідок комбінованого чину кількох причин. Проте клясифікацію ґрунтів найдоцільніше будувати саме на цих властивостях, їх бо можна точно визначити цифрами коефіцієнтів та діяграмами.

Наступна таблиця подає повний перелік цих властивостей. У сукупності своїй вони визначають усі деталі найскладніших властивостей окремих складових частин ґрунту, подібно до того, як пружні властивості металю визначають природу його складної молекулярної будови.

Відомості, потрібні, щоб схарактеризувати фізичні властивості однорідних ґрунтів

#### *А. Ґрунт у природному стані*

1. Пористість. Для глинястих ґрунтів опріч того; мікроскопічна структура (однорідна, грудкувата тощо).
2. Вологість у відсотках од ваги твердої речовини.

#### *В. Ґрунт у зміненому стані*

3. Форма зерен (визначається мікроскопом, дуже бажані ескізи).
4. Питома вага зерен (визначається пікнометром).
- 5-а (щодо пластичних ґрунтів). Вологість для границь текучости, пластичности, напівтвердої та твердої консистенції.
- 5-в (щодо піску та сипких ґрунтів). Гранична зведена пористість найпухкішої та найщільнішої будови.
6. Коефіцієнт середового тертя (найменша та найбільша величини) визначається за відсутности капілярного тиску.
7. Пуассонове відношення (визначається за відсутности капілярного тиску).
8. Опір кубиків на стиск (кубики висушується при 100° С).

#### *С. Характерні криві*

9. Крива однорідности.
10. Діяграми залежности між тиском і пористістю під дедалі більшим та циклічним обтяженнями.

11. (лише щодо пластичних ґрунтів). Діаграми стиску для кубиків певної вологости під дедалі більшим та циклічним обтяженнями (комбінація діаграми 10 та 11 дає змогу визначити модуль пружности).

12. Діаграми залежності між водопроникливістю та пористістю. Щоб схарактеризувати ґрунт, потрібна безліч відомостей.

Отже, вичерпне вивчення зразка ґрунту можливе лише з науковою метою. Але теорія й досвід кажуть, що властивості, зазначені в таблиці під літературою *B* та *C*, всі перебувають у взаємній залежності, хоча точну форму цієї залежності ще не визначено. Щоб визначити її, потрібне систематичне експериментальне дослідження. Випробувавши за поданою в таблиці програмою 50 або більше ґрунтів, різноманітних властивостями своїми, можна сподіватися, що зіставлення наслідків виявить взаємовідношення поміж фізичними властивостями. Тоді дослідження, потрібні щоб схарактеризувати ґрунт, спростяться остільки, що їх можна буде виконати при всякій розвідці. Частковим викриттям цих взаємовідносин авторові пощастило спростити спосіб обчислювати капілярний рух, чинний на різних глибинах мулкого покладу, заощадивши цим 90% часу, раніше потрібного на дослідження зразків.

З цього прикладу бачимо, як корисно вивчати взаємовідносини поміж властивостями ґрунтів. А тимчасом, поки ці взаємини ще не вивчено, досліджувати ґрунти належить за скороченою програмою, відміняючи її відповідно до призначення ґрунту.

Розрахункові норми. У механіці ґрунтів, як і в усіх інших галузях техніки, для приблизної аналізи та розрахунків уживають спрощених емпіричних припущень. У гідравліці ми вважаємо воду за нестисливу, в опорі матеріалів визнаємо цілковиту слухність Гукового закону, так само в механіці ґрунтів допускаємо правильність таких ось принципів:

1) *Відношення між модулем пружности та середовим тиском — величина стала;*

2) *Крива залежності між тиском та деформацією про випадок стискання при вільному бічному розширенні є параболою.*

3) *Закон Дарсі прикладний цілком.*

Припущення ці надзвичайно прості, а втім з ними практичні завдання можна розв'язати, здебільша лише застосовуючи дуже складних варіаційних обчислень. Навіть коли б ґрунти додержу-

вали Гукового закону, просте завдання, як розподілити напругу в трапецоїдальному земляному насипу, було б надзвичайно тяжко розв'язати, а при параболічному законі це завдання не можна розв'язати. Щоб обминути ці труднощі, треба спростити ще й форму *розрахункових еквівалентів*, тобто наближень, подібних до прикладуваних в інших галузях техніки (наприклад, розраховуючи залізні мости, припускають у вузлах ідеальні сугасти); в разі потреби ці приблизні припущення визначаються потім окремими коефіцієнтами.

Згаданої методи еквівалентів можна вживати таким чином, вивчаючи, наприклад, чин обтяження на ґрунт, вплив часу на тертя паль тощо, треба, насамперед, визначити, які саме фізичні чинники впливають на даний процес. Належне розуміючи фізику ґрунтів, це не тяжко зробити. Тоді добирають еквівалент, що заміняє даний взаємочин фізичних чинників іншим, дуже до нього подібним, але таким, що допускає досить просту математичну аналізу. Збудовані на цьому еквіваленті формули дають виразне розуміння відносного впливу різних фізичних чинників на дійсний процес, хоча, власне, формули ці лише приблизні.

Наприклад, за еквівалент округлого підмурівку править циліндричний стовп ґрунту, оточений циліндричним кільцем з того самого ґрунту. Горішня поверхня стовпа відповідає обтяженій поверхні. Обтяжений стовп виявляє бічне тиснення на середову поверхню кільця. Належне співвідношення між радіусом стовпа, його височиною та глибиною кільця можна визначити за зробленими через скло фотографічними світлинами пересуву зерен, що зайшов під чином зовнішнього обтяження.

Формули, визначені після прикладення такого еквіваленту, відповідають наслідкам спроб краще за формули, здобуті якимось іншим способом, до того ще й викривають інші цікаві співвідношення — приміром, вплив швидкості збільшення обтягу на опір ґрунту (щодо вологої глини) або вплив форми підмурівку (коло чи прямокутник).

Окрім безпосереднього застосування до визначення розрахункових норм, метода еквіваленту корисна ще й при опрацюванні класифікації ґрунтів з практичною метою. Знаючи фізичні чинники та як вони впливають на перебіг даного явища (напр., на стійкість укосів або на опір ґрунту тискові), зразок ґрунту можна лабораторно дослідити щодо тих саме коефіцієнтів, од



яких залежать ці фізичні чинники. Тоді можна зробити висновок, що кожний інший ґрунт, маючи приблизно такі самі вартості згаданих коефіцієнтів, щодо цього явища не відзначатиметься від даного ґрунту. Інші фізичні чинники можна знехтувати, що ані трохи не вплине на наслідок.

Належне застосовуючи методу еквівалентів, можна уникнути й хибних узагальнень. У зв'язку із завданням про підпорні стінки такі узагальнення надто звичайні. Наші клясичні теорії тиску землі являють собою прості розрахункові еквіваленти в допіру зазначеному розумінні: зроблено спрощувальні припущення, ніби пісок має сталий коефіцієнт середового тертя; ніби можна знехати впливом деформації ґрунту на розподіл тисків тощо. Всіх цих припущень можна вживати лише щоб добрати еквівалент. А втім цим припущенням часом надають ваги незаперечних істин, ба, іноді навіть вдаються до вищої математики, щоб обчислити криві найменшого опору ковзові або інші деталі, що їхня вага мізерна порівняно з помилками в наслідок знехтування пружних властивостей ґрунту.

Так само не раз пробували прикладати теорію Ранкіна до визначення опору ґрунтів тискові, геть спускаючи з уваги, що частки ґрунту близько спідньої поверхні обтяження утворюють ніби склепіння, отже не можуть пересуватись у бічному напрямі. Цих прикладів досить, щоб виявити, які небезпечні необачні узагальнення в механіці ґрунтів.

Перспективи. Нині практика будови земляних споруд та природних основ залежить ще (як будівельна справа сто — двісті років тому) від технічного чуття набагатьох осіб, од випадкових відкриттів та досліджень. Доцільно складений проєкт тимчасом є більше наслідок передбачення, аніж справжнє досягнення. А наявні в цій царині досягнення поодиноких осіб не можна досить широко використати через нашу невмілість характеризувати та порівнювати ґрунти, ще й через відсутність опрацьованої теорії моделей.

Лише нове покоління інженерів, добрих знавців фізики ґрунтів, інженерів, що зуміють дати собі раду з різноманітними явищами практики земляних споруд, лише ці інженери здійснять поступ у цій царині. Для цієї мети потрібний такий великий обсяг знання, що викладувані у вищих школах курси інженерної геології та основ явно недостатні. Розгорнути ці курси, водночас не скоро-

чуючи час, приділюваний іншим важливим дисциплінам, здається, неможливо. Тим то єдиний вихід із становища — запровадити нову спеціалізацію земляних споруд та основ. Студенти, що працюють за відповідним навчальним пляном, повинні студювати, між іншим, докладний курс інженерної геології та, бодай елементарний, курс хемії колоїдів.

Друга основна вимога стосується характеру діяльності інженерів, що працюють у царині техніки земляних споруд та основ. Годі сподіватися на якийсь технічний поступ, доки, принаймні, деякі з цих інженерів не підтримуватимуть постійного контакту з наукою й не перевірятимуть на практиці досягнень її. Поступ у техніці в значній мірі залежить ще й від якості технічної літератури. Остання в розглядуваній галузі досі мала чимало незадовільного матеріалу, не існувало бо достатнього критерію, щоб одрізнити важливе від другорядного.

Нарешті, потрібний, принаймні, один науково-дослідний інститут техніки земляних споруд, устаткований належними лабораторіями та забезпечений досвідченим персоналом. Цей інститут найдоцільніше закласти при якійсь вищій технічній школі. Він має не лише готувати інженерів та провадити науково-дослідну роботу, а й розглядати та опрацьовувати наслідки найважливіших спостережень, зроблених і поданих од інженерів-практиків, та визначити, підперті науковими принципами, польові методи досліджувати ґрунти.

Пляново розгортаючись, механіка ґрунтів може за короткий час зробитись важливим чинником інженерної науки. Колиж не запровадити до цієї справи пляновости, піде наш досвід марно, як і досвід наших попередників

## КОРОТКИЙ ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИЧОК

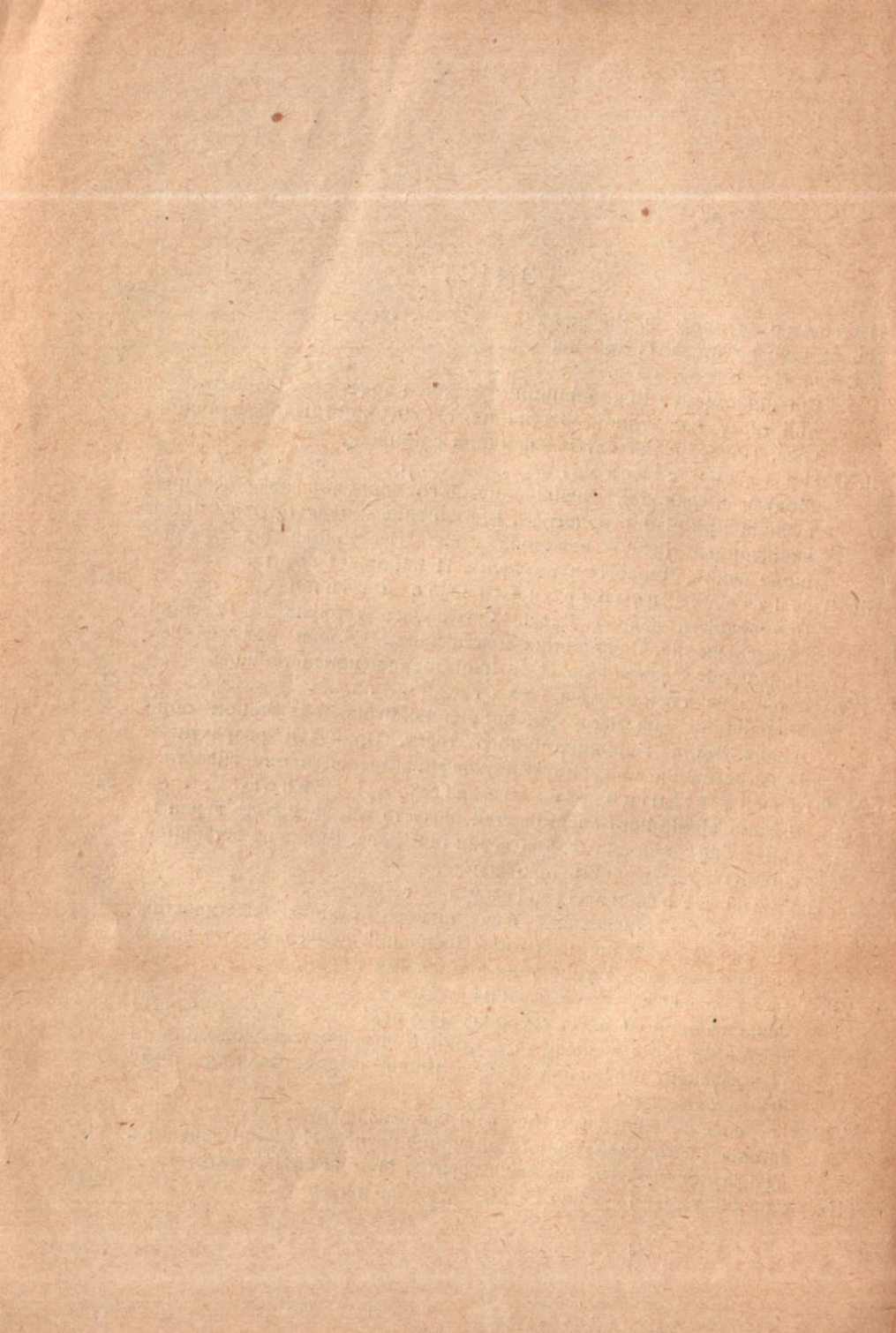
- Бічний (розшир) — боковое (расширение)
- Бубнявіння — набрякание.
- Важіль — рычаг.
- Вартість (мат) — значение.
- Верства (геол.) — пласт.
- Взаємочин — взаимодействие.
- Випаровування, випарування — испарение.
- Випарувальна поверхня — поверхность испарения.
- Від'ємний (тиск) — отрицательное (давление).
- Відкладання — отложение (процесс).
- Відмулювання — отмучивание.
- Вірвант — обойма.
- Вміст — содержимое.
- Водовмісний — водоносный.
- Водозатримна (гребля) — водозадерживающая (плотина).
- Водопроникливість — водопроницаемость.
- Вологість — влажность.
- Границя — предел.
- Грубина — толщина.
- Грудуватий (грунт) — комковатая (почва)
- Грунтознавець — почвовед.
- Додатний (мат.) — положительный.
- Дотична (мат.) — касательная.
- Жмут — пучок.
- Забутинований — утрамбованный.
- Загаєння — замешление.
- Зведений (мат.) — приведенный (коэффициент, пористость т. г.).
- Змулений — взвешенный (физическое состояние жидкости).
- Зсов — сдвиг.
- Зступання (грунту) — усадка (почвы)
- Каламутина, каламуть — муть.
- Крихкість — хрупкость.
- Крупкий — крупнозернистый.
- Крупкість — крупнозернистость.
- Куля — шар.
- Кулястий — шарообразный.
- Лосняк — слюда.
- Луска — чешуйка.
- Лускуватий — чешуйчатый.
- Масний — жирный.
- Мастило — смазка.
- Мосяжевий — латунный.
- Мул — ил.
- Мулкий — илистый.
- Нарінок — гравий.
- Насичення (хем.) — насыщение.
- Натяг — натяжение.
- Оборотний — обратимый.
- Обсяг — объем.
- Об'яження — нагрузка (процесс).
- Оливо — свинец.
- Осадочний — осадочный.
- Осідання (грунту) — осадка (почвы)
- Осув, обсув — оползень.
- Пальовий — свайный.
- Перетинка — перепонка.
- Під'імальний — Под'емный.
- Підмурівок — основание.
- Пісний — тощий.
- Платівчастий — пластинчатый
- Подрібнення — раздробление.

Поклад (геол.) — отложение (результат процесса).  
Прикладність — применимость.  
Прогонич — болт.  
Прошарок — прослойка.  
Пружність — упругость.  
Пухкий — рыхлый.  
Рінь — галька.  
Розріджений — разреженный.  
Роз'яжне (зусилля) — расягивающее (усилие).  
Розчинник — растворитель.  
Св'рдловина — буровая скважина.  
Середовий — внутренний.  
Скалля — щебень.  
Спiжевий — бронзовый.  
Спiйність — связность.  
Сталий (мат.) — постоянный.  
Стиск, стискання — сжатие.

Стисливість — сжимаемость.  
Сустав — шарнир.  
Схил — наклон, уклон.  
Тертя — трение.  
Течиво — жидкость.  
Тиск, тиснення — давление.  
Тягарок — гирька.  
Толок — поршень.  
Узбіч — откос.  
Укіс — откос.  
Ущільнення — уплотнение.  
Цинамоновий — коричневый.  
Циновий — оловянный.  
Чин (процес) — действие.  
Чинна величина — действующая величина.  
Ша — сл. й.  
Шкорпа — корка.  
Шріг — дробь.

## ЗМІСТ

	Стор.
Передмова проф. Ф. Белякова . . . . .	3
Передмова проф. Г. Криніна . . . . .	4
I. Спійність глини . . . . .	7
Співвідношення між зовнішнім тиском і вологістю. Гідростатичний тиск масі глини. Зступання та від'ємний гідростатичний тиск. Поверхневий натяг — причина спійности.	
II. Опір глини стискові . . . . .	17
Модуль пружности. Визначення його спробами на стискання кубиків при різній вологості. Відношення модуля пружности до капілярного тиску — величина стала. Пуассонове відношення щодо глини. Аналогія з металами. Неоднорідні ґрунти.	
III. Визначення водопроникливості глини . . . . .	28
Прикладність закону Дарсі. Сліхтерова формула та Газенові спостереження. Водопроникливість піску. Спроби над глиною. Прикладність закону Дарсі до напівтвердої консистенції.	
IV. Осідання та тверднення глини . . . . .	41
Тверднення — наслідок зменшення вологости під чином обтяження. Зміна гідродинамічного тиску. Приклади розрахунків. Пристосування до визначення коефіцієнту водопроникливості.	
V. Фізична відмінність між піском і глиною . . . . .	52
Видима відмінність властивостей піску та глини. Розмір зерен та крива однорідности. Форма зерен та будова. Вплив на зступання, спійність, пластичність та осідання.	
VI. Пружні деформації піску та глини . . . . .	61
Дослідження стисливості піску та його пружних властивостей. Розшир та повторне насичення. Ідеальний кубик з піску та вплив бічного розширу. Порівняння з твердими тілами.	
VII. Тертя в піску та в глині . . . . .	71
Складна природа тертя в сипких тілах поріняно з тертям твердих тіл. Вимір тертя в піску та в глині. Коефіцієнт середового тертя та коефіцієнт середового опору. Вплив гідродинамічного тиску на тертя в глині.	
VIII. Перспективи та основні завдання . . . . .	78
Історія експериментального вивчення ґрунтів. Наступні завдання. Теорія моделей. Класифікація ґрунтів. Метода еквівалентів	
Короткий термінологічний словничок . . . . .	89





40<sup>00</sup>

Ціна 50 коп. (Р)

