

<https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.022>

В.П. Коболев, член-кор. НАН України, д-р геол. наук, проф., гол. наук. співроб.

E-mail: kobol@igph.kiev.ua

ORCID 0000-0001-5625-5473

С.Ф. Михайлюк, наук. співроб.

E-mail: slawa52@ukr.net

ORCID 0000-0001-9534-6183

А.М. Сафронов, асп.

E-mail: sseveneleven561@gmail.com

ORCID 0000-0001-7242-2534

Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

03142, Київ, пр. Палладіна, 32

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШТУЧНО СФОРМОВАНИХ ГАЗОГІДРАТОВМІСНИХ ОСАДІВ

Фізичні властивості газогідрат-вміщуючих осадів (ГВО), являють собою надзвичайно важливу інформацію для розробки методів їх пошуку та розвідки. Наявність газогідратів в морських донних відкладах значно змінює їх фізичні властивості, за рахунок чого вони можуть бути виявлені за допомогою морських дистанційних геофізичних спостережень. Фізичні властивості ГВО дуже важливі для виявлення присутності цих сполук, оцінки кількості захоплених газових гідратів осадами, а також розробки методів використання цього ресурсу. Наразі дослідження фізичних властивостей стосувались в основному штучних газогідратів у процесі формування та розпаду при різноманітних термодинамічних умовах в їх чистому вигляді. Тому дуже мало відомо про фізичні властивості саме ГВО, що робить їх виявлення за допомогою дистанційних геофізичних досліджень надто складним. Розробка та створення експериментального лабораторного модульного комплексу для формування штучних газогідратів метану у різноманітних літолого-гранулометричних матрицях (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо) та вимірювання їх фізичних властивостей в термодинамічних умовах донних відкладів Чорного моря, дозволить підвищити ефективність геофізичних методів їх пошуку, розвідки та оптимізувати технологію розробки родовищ метаногідратів. В експериментальних умовах поряд з тепло-електропровідністю та швидкостями поперечних хвиль штучних ГВО будуть вимірюватися параметри пружної деформації, міцності, характе-

Цитування: Коболев В.П., Михайлюк С.Ф., Сафронов А.М. Експериментальний лабораторний комплекс для вивчення фізичних властивостей штучно сформованих газогідратовмісних осадів. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2021. 17, № 3: 22—33. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.022>

ристики розпаду, що дозволить виконати теоретичний аналіз для побудови моделей, заснованих на різних гіпотезах їх генезису.

В Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України створено макет установки для утворення та вивчення фізичних властивостей ГВО. Розробка базується на сучасному технологічному рівні досліджень в області термобаричного петрофізичного експериментального моделювання геологічних середовищ, а також на використанні сучасного програмно-апаратного забезпечення лабораторних досліджень з метою отримання фізичних властивостей донних відкладів різноманітного літолого-гранулометричного складу.

Ключові слова: газіві гідрати, морські відклади, метан, моделювання, фізичні властивості.

Вступ

З кожним роком у світі все більш виразно спостерігається тенденція до збільшення споживання паливно-енергетичних ресурсів. Багато країн, маючи незначні запаси класичних видів енергоносіїв, повністю залежні від кон'юнктури світового ринку енергетичної сировини. Для економіки України це також важливе питання. Одним з найактуальніших сучасних завдань світових наукових досліджень є розробка та пошук альтернативних, або додаткових, джерел енергії. Одне з таких джерел — газіві гідрати (ГГ).

Обсяг запасів газу в газогідратній формі багаторазово перевищує ресурси традиційного природного газу, що дозволяє вважати його одним з найбільш значних нетрадиційних джерел вуглеводнів. Основна частина природних ГГ зосереджена в акваторії світового океану [1, 5]. Першочерговим об'єктом для пошуково-розвідувальних робіт на субаквальні ГГ для України визначена зона переходу від шельфу до глибоководної западини в північно-західній акваторії Чорного моря [6].

Наявність ГГ в морських донних відкладах значно змінює їх фізичні властивості, за рахунок чого вони можуть бути виявлені за допомогою морських дистанційних геофізичних спостережень. Таким чином, фізичні властивості газогідратвміщуючих осадов (ГВО) являють собою надзвичайно важливу інформацію для розробки методів їх пошуку та розвідки. Існуючі технології виявлення ГВО ґрунтовані на використанні фізичних властивостей гідрату та їх вмісних донних осадов.

Фізичні параметри ГВО також важливі як для виявлення присутності цих сполук і оцінки кількості захоплених ГГ осадами, так і для розробки методів використання цього ресурсу. В лабораторіях різних країн світу створені різноманітні установки для утворення і дослідження фізичних властивостей штучних ГГ метану в чистому вигляді. Але наразі дуже мало відомо про фізичні властивості ГВО різного гранулометричного та речовинного складу, що значно ускладнює їх пошук та розвідку за допомогою дистанційних геофізичних методів. Присутність ГГ в морських відкладах суттєво змінює їх фізичні властивості, що надає можливість виявлення присутності цих сполук за допомогою геофізичних досліджень.

Вивчення фізичних характеристик газогідратних систем вимагає різноманітних підходів, що включають прямий відбір зразків, каротаж свердловин і геофізичні дослідження. Через складність одержання зразків з морського дна, в кінцевому підсумку науковці прагнуть отримати максимум інформації з каротажних діаграм і геофізичних даних. На жаль, складність і неоднорідність природних систем часто ускладнює інтерпретацію таких непрямих даних. Як засіб

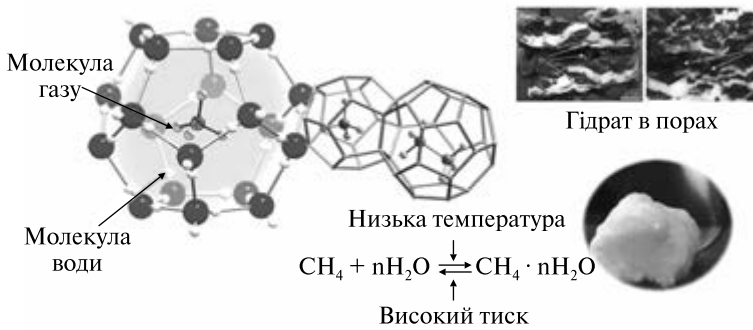


Рис. 1. Молекулярний склад гідрату метану, формула сполуки та загальний вигляд зразків в природних порох

калібрування каротажних діаграм і результатів геофізичних спостережень використовують лабораторні дослідження контрольованих систем з відомими щільнісними характеристиками, термобаричними умовами утворення і концентрацією ГГ. Такі лабораторні вивчення фізичних властивостей ГВО можуть призвести не тільки до появи нових ефективних моделей середовищ і сумішей, які можна використати при інтерпретації геофізичних даних, а й до кращого механістичного опису взаємодії між гідратами і осадами.

Перед авторами стояло завдання розробки та створення експериментального лабораторного модульного комплексу для формування штучних газогідратів метану у різноманітних літолого-гранулометричних матрицях (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо) та вимірювання їх фізичних властивостей в термодинамічних умовах донних відкладів Чорного моря, що дозволить підвищити ефективність геофізичних методів їх пошуку, розвідки та оптимізувати технологію розробки родовищ метаногідратів. Розробка базується на сучасному технологічному рівні досліджень в області термобаричного петрофізичного експериментального моделювання геологічних середовищ [3]. Результати створення оптимального програмно-апаратного забезпечення багатопільового експериментального комплексу зі змінною внутрішньою архітектурою вимірювальних модулів для дослідження фізичних властивостей гідратвміщуючих різноманітних літолого-гранулометричних донних відкладів наведено у дійсній статті.

Штучні методи утворення газогідратів

Газові гідрати являють собою кристалічні сполуки, в яких молекули або іони (частинки-гості) знаходяться в порожнинах іншої молекули або просторового каркасу речовини-господаря та пов'язані з ним нековалентними зв'язками (іонними, водневими, донорно-акцепторними та іншими) (рис. 1).

Більшість природних газів (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , CO_2 , N_2 , H_2S , ізобутан та ін.) утворюють гідрати або клатрати — кристалічні структури, у яких газ знаходиться в оточенні молекул води, утримуваних разом низькою температурою і високим тиском. ГГ утворюються завдяки включення молекул газів (молекули-гості, чи гостьова підсистема) в порожнині подібного льоду каркасу, побудованого воднево-зв'язаними молекулами води (каркас господаря чи підсистема господаря) без формування хімічного зв'язку між молекулами гостей и господаря.

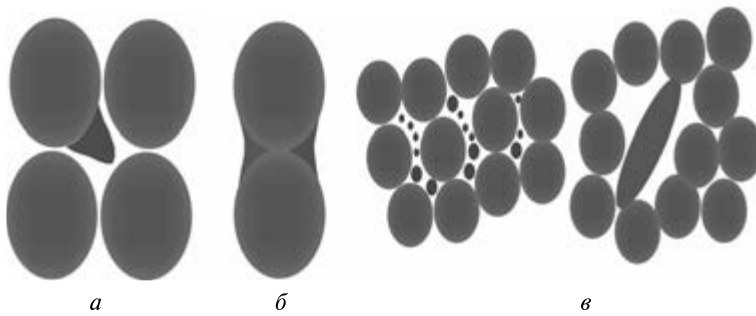


Рис. 2. Зв'язки гідратів з осадами, які найбільш часто зустрічаються в природі. Пояснення у тексті

Стабілізація водних клатратних каркасів, термодинамічно менш стабільних за гексагональний лід (при $T < 273$ К) чи воду (при $T > 273$ К) забезпечується за рахунок ван-дер-ваальсових взаємодій гість-господаря. Загальний вигляд складу газових гідратів описується формулою $M \times n\text{H}_2\text{O}$, де M — молекула гідрат утворюючого газу, n — число, що покаже кількість молекул води, які припадають на одну молекулу газу (n може змінюватися від 5,75 до 17) [4].

Вплив гідратів на фізичні властивості осадів, в яких вони знаходяться, залежить від їх розташування в поровому просторі. Існує три способи зв'язку гідратів з осадами, які найбільш часто зустрічаються в природі (рис. 2):

- гідрати зароджуються на межах зерен осаду і зростають повільно в порах, використовуючи два або більше зерен (рис. 2, а). В цьому випадку, гідрат, насамперед, впливає на кількість об'ємної рідини осаду, що зумовлює зміни його твердості та провідності [14];
- мости з гідрату, які з'єднують сусідні молекули і сприяють механічній стабільності гранульованого скелету, ставши частиною несучого каркаса (рис. 2, б). Заповнення пор гідратом, природно, перетворюється в гідрат насичені осад, коли простір насичення пор гідратом перевищує $Sh = 25 \div 40$ % [7];
- гідрати цементують міжкристалічні зв'язки (рис. 2, в). Навіть невелика кількість гідрату може різко збільшити параметри зсувної та об'ємної жорсткості осаду шляхом з'єднання сусідніх кристалів [10].

Таким чином, різні лабораторні методики формування гідрату можуть призвести до їх різних утворень і, отже мати різні фізичні властивості при ідентичних відкладах та однакової насиченості.

Штучні зразки гідрату полікристалічного метану можуть бути ефективно синтезовані шляхом реакції CH_4 (газ) + $6\text{H}_2\text{O}$ (молекул—рідина) \rightarrow $\text{CH}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$. Цей продукт утворюється шляхом змішування і подальшого повільного, регульованого нагріву суміші просіяного, гранульованого льоду з чистої води (H_2O), та стисненого газу CH_4 в постійному співвідношенні газ—вода, що залежить від об'єму реакційної камери.

В статичному режимі газ додається повільно з перервами в посудину високого тиску через барботер, що дозволяє компенсувати всмоктання газу з газової фази. Цей метод більш подібний газоутворенню в умовах морського дна, де співвідношення метан—вода не змінюється, тому цей процес ймовірно відбувається за рахунок дифузії.

Невід'ємною частиною повного і ефективного перетворення льоду в газо-гідрат без виникнення чистих кристалів льоду при замерзанні вологих і водонасичених тонко-дисперсних осадових гірських порід в об'ємній фазі розплаву визначені наступні три експериментальні параметри: 1 — підтримання високого надлишкового тиску метану ($10 \div 25$ МПа) вище рівноважної кривої утворення гідрату метану; 2 — рівномірний підвід тепла ($\sim 5 \div 12$ °К/год) з подальшим доведенням температури до $273 \div 290$ °К (за $8 \div 12$ годин); 3 — використання невеликих початкових розмірів реагуючих кристалів матеріалу (< 300 мкм). Для успішного перетворення кристалів льоду за їх гідратації потрібно враховувати специфічні способи отримання льоду, з тим щоб звести до мінімуму дефекти, домішки або межі кристалів, які можуть виступати в якості об'єктів для розплаву.

Макет експериментального комплексу для утворення та вивчення фізичних властивостей ГВО

В Інституті геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України створено макет та продовжуються роботи по виготовленню та вдосконаленню експериментального лабораторного комплексу для утворення та вивчення фізичних властивостей штучно сформованих ГВО (рис. 3).

Основним компонентом гідратного блоку є два сосуди високого тиску, виготовлені із нержавіючої сталі довжиною 350 мм, діаметром 70 мм, товщиною стінки 12 мм та внутрішнім об'ємом 550 мл (рис. 4). Сосуди на двох протилежних сторонах мають відповідні з'єднання та фітинги для під'єднання газових трубопроводів та електричних виводів від датчиків температури, теплопровідності, електропровідності та акустичних датчиків. Система з двох посудів розміщується в термостаті, який у свою чергу, для відтворення температур нижче 0 °С, поміщується в морозильну камеру. Термостат об'ємом 80 літрів заповнюється сумішшю етиленгліколю і води в рівних об'ємних пропорціях. Перший посуд (камера) служить для стабілізації температури газу, який подається в робочий посуд де проходить реакція утворення ГГ.

Температура термостату вимірюється за допомогою двох платинових термометрів опорного типу (ТЕРА ТСП — Pt100) T1 і T2, які розташовані всередині термостату — один у верхній частині і другий поблизу дна. Температурний ре-

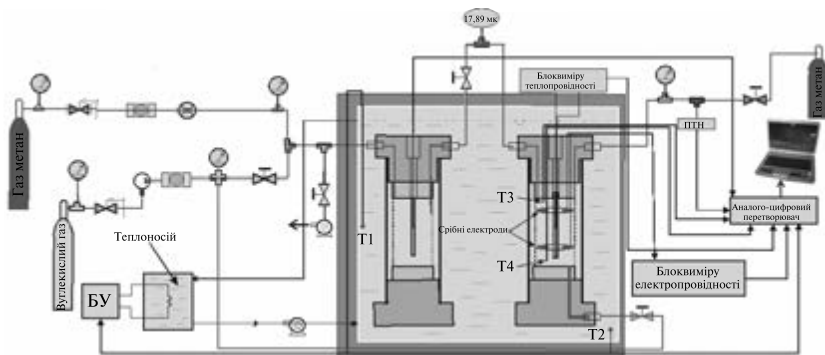


Рис. 3. Блок-схема експериментального лабораторного комплексу для вивчення фізичних властивостей штучно сформованих ГВО. Пояснення у тексті



Рис. 4. Загальний вигляд посудин високого тиску

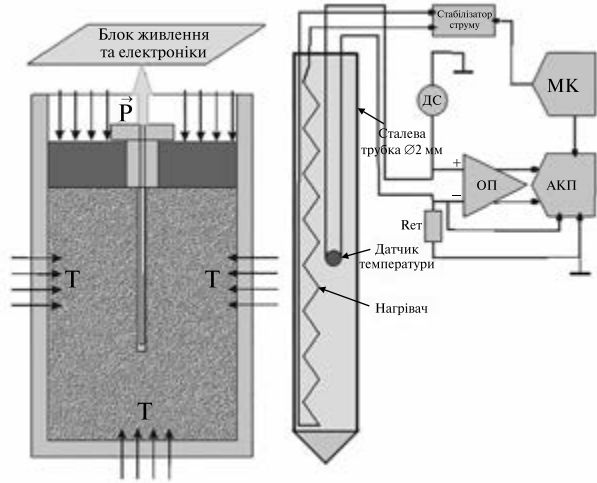


Рис. 5. Блок-схема вимірювання теплопровідності штучно сформованих ГВДО

жим термостату контролюється та виставляється за допомогою вимірювача типу ТРМ101 (ОВЕН). Для вимірювання та встановлення температурного градієнту вздовж довжини робочої камери під час процесу утворення (розпаду) газогідрату використовується декілька температурних датчиків ТЗ,4 (ТЕРА ТС — Pt1000). Тиск всередині посудин вимірюється за допомогою датчиків тиску компанії *DWYER INSTRUMENTS Inc.* (США), а його значення як і значення температури безперервно реєструються вимірювачами ОВЕН типу ТРМ-202 та ТРМ-101 з подальшим під'єднанням до комп'ютера через перетворювач інтерфейсу USB/RS485 з відповідним програмним забезпеченням.

Теплофізичні властивості. Серед всього комплексу фізичних властивостей найбільша увага приділяється тепловим параметрам (теплопровідність, температуропровідність і теплоємність), оскільки вони контролюють процеси формування і розпаду газових гідратів [2]. Для вимірювання теплопровідності гідратовміщуючих осадів застосовується метод циліндричного зонда (Von Herzen, R.P. & Maxwell, A.E., 1959). Блок-схема зонда представлена на рис. 5.

Постійний струму I подають на нагрівальний елемент з опором R . Ефективна потужність Q якого визначається по формулі, $Q = 2 \times I^2 R$, де множник 2 враховує геометрію нагрівального дроту, який розміщений по всій довжині голки зонда у вигляді петлі. Тепло від нагрівача призводить до зміни температури T , вимірюваної всередині зонда, за законом [8]:

$$\Delta T = A \times \ln(t) + B, \quad (1)$$

де t — час у секундах, на протязі якого розігрівається зразок.

Теплопровідність λ розраховується за формулою:

$$\lambda = 1/A \times Q/4 \pi. \quad (2)$$

Температуропровідність κ , розраховується за формулою:

$$\kappa = (r_s^2/4) \times \exp[B/A + \gamma - 2\pi\lambda/H], \quad (3)$$

де r_3 — радіус зонда, 1,0 мм; γ — постійна Ейлера, 0,5772; H — параметр, що відповідає за якість теплового контакту між зондом і зразком, який визначається за формулою:

$$H = Q \times Z_2 / Z_1, \quad (4)$$

де Z_1 і Z_2 параметри для початкової та перехідної залежності ΔT від часу [8]:

$$\Delta T = Z_1 \times t - Z_1 \times Z_2 \times t_2 + Z_1 \times Z_2 \times Z_3 \times t^{2,5}, \quad (5)$$

У рівнянні (5), момент часу $t = 0$ прирівнюється до початку нагрівання зразка. Оскільки перехідна зміна температури триває всього ~ 2 сек для гідратів, то час затримки між подачею струму на нагрівальний дріт зонду і часом, в якому зонд починає нагрівання зразка не можуть бути проігноровані [12]. Ця затримка має бути визначена за допомогою калібрування [18].

Після вимірювання λ і k , обчислюється теплоємність c_p , згідно з формулою для c_p [16]:

$$c_p = \lambda / (\rho \times k), \quad (6)$$

де ρ — об'ємна густина зразку.

У якості первинних перетворювачів температури використовуються мініатюрні прецизійні тонкоплівкові платинові терморезистори Pt1000. Дані терморезистори при температурі 0°C мають опір 1 кОм, а в діапазоні температур від -5 до 20°C його опір змінюється лінійно від 0,95 до 1,1 кОм. Перед тим як монтувати датчик теплопровідності проводились тестування терморезисторів Pt1000 в посуді Дьюара при температурі плавлення льоду та температурі плавлення воску (табл.). Контрольні виміри температури проводились за допомогою ртутного термометра з ціною поділок $0,01^\circ\text{C}$ і зразкового платинового термометра опору. Для вимірювання опору використовувався прецизійний LCR вимірювач Protek 9216 а.

Для діапазону вимірів температури від -200 до 0°C величина опору розраховується за формулою:

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + c (t - 100^\circ\text{C}) t^3],$$

а для діапазону вимірів від 0 до 850°C :

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2),$$

де R_t — опір ТР, Ом, за температури t , $^\circ\text{C}$, R_0 — номінальний опір ТР, Ом, за температури 0°C . Значення постійних:

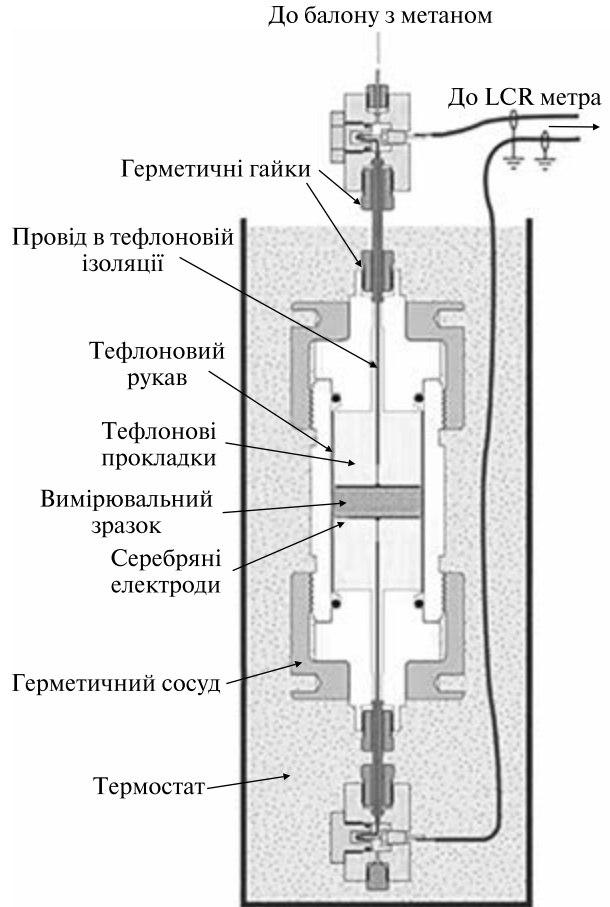
$$a = 3,9083 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}; b = -5,775 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2; c = -4,183 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}.$$

Таблиця. Результати тестування терморезисторів

Номер терморезистора	Опір при 0°C , Ом	Опір при 42°C , Ом
1 t	1000,05	1163,6206
2 t	1000,23	1165,9206
3 t	1000,16	1165,0206
4 t	1000,03	1163,3902
5 t	1000,01	11631298
6 t	1000,01	1163,1298
7 t	1000,11	1164,3854
8 t	1000,09	1164,1376
9 t	1000,04	1163,5178
10 t	1000,06	1163,7695

Рис. 6. Модуль вимірювання електропровідності штучно сформованих ГВО

В якості прецизійного цифрового термовимірювального приладу доцільно використовувати сігма-дельта аналоговий цифровий перетворювач (АЦП) і радіометричну схему (Texas Instruments Inc., 2013) з підключенням температурного датчика. В схемі послідовно з терморезистором під'єднується один прецизійний опорний резистор $R_{оп}$, з якого знімається напруга $U_{оп}$ для сігма-дельта АЦП. Цей резистор повинен мати малий температурний коефіцієнт опору (ТКО), тому що саме від нього залежить додаткова температурна похибка каналу термометрії. Так, наприклад, при використанні прецизійних резисторів із ТКО $\pm 10 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ додаткова температурна похибка для термо-



датчика при зміні температури на 10°C складе $(0,002...0,003)^\circ\text{C}$. Опір цього резистора повинен бути не менше максимального опору датчика у всьому робочому діапазоні температур. Оскільки максимальний опір терморезистора становить $1,20\text{ кОм}$, то $R_{оп}$ вибирається рівним $2,00\text{ кОм}$.

Електричні властивості. З метою вимірювання електричних властивостей ГГ в лабораторіях різних наукових центрів створюються установки для утворення газогідрату в чистому вигляді та з домішками осадів. Зазвичай досліджуються зразки з відомими характеристиками, щоб краще співставити електричні властивості з вимірними в природному середовищі значеннями концентрації гідрату газу і характеру його поширення. Вперше електропровідність (σ) була виміряна на зразках чистого гідрату метану [9] і дорівнювала $6 \times 10^{-5}\text{ См/м}$ при 5°C , що приблизно на п'ять порядків нижче, ніж морської води.

Ця різниця дозволяє використовувати електромагнітні методи (ЕМ), щоб відрізнити менш провідні газогідратні осадки від водонасичених відкладів. Надалі проводяться вимірювання на зразках гідрату метану, змішаного з осадами, кварцовим піском та скляних кульок з кремнезему в різних об'ємних пропорціях.

Електропровідність ГГ має типову експонентну залежність від температури:

$$\sigma(T) = \tau \times e^{-E_a / RT}, \quad (7)$$

де τ — постійна, E_a — енергія активації, R — газова стала, T — температура.

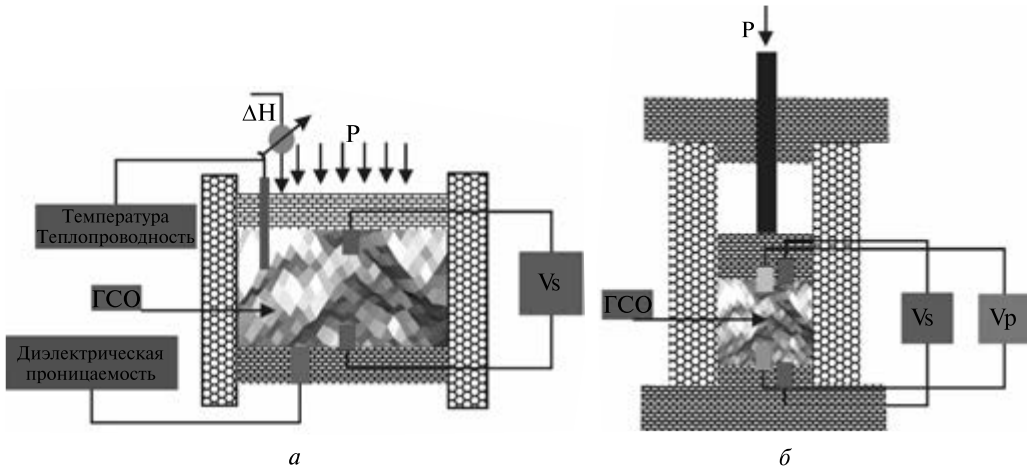


Рис. 7. Схематичний вигляд модуля вимірювання швидкостей поздовжніх (P) і поперечних (S) хвиль ГВО

Електропровідність чистого гідрату метану (тобто не має осаду) коливається від 10^{-5} до 10^{-4} См/м, а провідність чистого льоду на $\sim 400\%$ вище. Провідність ГГ набагато менше ніж морської води ($\sim 10^{-1}$ до 10 См/м) і набагато більше, ніж кварцу ($< 10 \div 18$ См/м). Вимірювання електричних властивостей ГВО виконуються за допомогою експериментального пристрою (рис. 6).

Механічні та акустичні властивості (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, швидкості повздовжніх (V_p) та поперечних (V_s) пружних хвиль). Параметричні дослідження механічних характеристик осадів насичених газогідратами на основі піску, мулу і глини (наприклад, сейсмічні швидкості), що вимірюються в лабораторних умовах при малих деформаціях механічних характеристик, необхідні для забезпечення еталонних значень при калібруванні приладів і результатів сейсмічної розвідки, отриманих при пошуках гідратних формувань.

Вимірювання часу розповсюдження пружних хвиль у зразку здійснюється на розробленій двоканальній ультразвуковій імпульсній установці. Одночасно вимірюється час розповсюдження повздовжніх і поперечних пружних хвиль, сигнали яких розділено по амплітуді і частоті. Похибка розрахунку швидкостей з урахуванням похибки вимірювання часу розповсюдження імпульсів і довжини зразка в умовах високого тиску і температури становить не більше $\pm 1\%$ для V_p і $\pm 1,2\%$ для V_s .

Для проведення експериментальних вимірів акустичних властивостей розроблені спеціальні модулі, які призначені для вимірювання швидкостей поздовжніх (P) і поперечних (S) хвиль ГВО (рис. 7). Поширення P-хвиль відбувається в напрямку поздовжнього руху частинок. На відміну від цього, S хвилі викликають деформації зсуву частинок, перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Швидкість поширення акустичних хвиль залежить від модуля об'ємної деформації осаду K_b та модуля зсуву G , відповідно до рівняння:

$$V_p = ((K_b + 4/3G) / \rho_b)^{1/2}; V_s = (G / \rho_b)^{1/2}, \quad (8)$$

де ρ_b — об'ємна щільність осаду та V_p і V_s — величини швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль.

Відмінності в способах їх поширення треба мати на увазі, тому що Р і S хвилі чутливі до різних властивостей осаду. Так модуль об'ємної пружності K_v , визначається як зернами так і властивостями рідини, яка заповнює простір пор, а модуль зсуву G , залежить від жорсткості гранульованого скелета.

Дуже важливо постійно уточнювати механіко-акустичні параметри ГВО, так як вони є основою для всіх досліджень і практики використання. Методами вивчення цих властивостей ГВО, в основному, являються польові сейсмічні дослідження, лабораторні вимірювання та теоретичний аналіз. В експериментальних лабораторіях в основному вимірюють криві пружної деформації, міцності, характеристики розпаду і теплові властивості ГВО, а також проводять теоретичний аналіз для побудови моделей, заснованих на різних гіпотезах.

Розуміння акустичних властивостей гідратів у рідині, у бульбашкових рідинах, та у відкладах, що містять рідини та/або газ є життєво важливим для пошуків ГГ за допомогою сейсмічних або ехолотних методів і може стати ключовим інструментом для моніторингу процесів дисоціації гідрату та її можливий зв'язок зі зміною клімату. Акустичні властивості газоносних речовин, як відомо, мають сильну залежність від частоти збудження. Однак, табличні значення швидкості звуку гідратів найчастіше вимірюються на високих частотах (>200 кГц), незважаючи на сучасні методи визначення місця їх розташування, які використовують частоти нижче ~ 100 кГц.

Дані про сейсмічні швидкості у свердловині отримали широке застосування при характеристиці ГВО в регіональних масштабах під час польових дослідженнях. Акустичний каротаж свердловин часто використовується для оцінки насиченості гідратами [11, 17]. Для отримання інформації про присутність ГГ та їх концентрацію в природному середовищі використовуються вертикальне сейсмічне профілювання [15], дані з донних сейсмостанцій [13], а також проводиться аналіз розвідувальних даних з використанням сучасних сейсмічних методів обробки [19]. У багатьох з цих досліджень використовують сейсмічну швидкість як функцію концентрації газових гідратів з долученням макромасштабних і мікроструктурних зв'язків, отриманих емпіричним шляхом.

Висновки

Розробка та створення експериментального лабораторного модульного комплексу (ЛМК) для формування штучних газогідратів метану у різноманітних літолого-гранулометричних матрицях (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо) та вимірювання їх фізичних властивостей в термодинамічних умовах донних відкладів Чорного моря, дозволить підвищити ефективність геофізичних методів їх пошуку, розвідки та оптимізувати технологію розробки родовищ метаногідратів.

В експериментальних умовах поряд з тепло- й електропровідністю та швидкостями поздовжніх і поперечних хвиль штучних ГВО передбачено вимірювання параметрів пружної деформації, міцності, характеристики розпаду, які дозволять виконати теоретичний аналіз для побудови моделей, заснованих на різних гіпотезах їх природного генезису.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб., ВНИИОкеангеология, 1994, 192 с.
2. Дучков А.Д., Истомин В.Е., Соколова Л.С. Геотермический метод обнаружения газовых гидратов в донных осадках акваторий. *Геология и геофизика*, 2012. **53**, №7. С. 922—931.
3. Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П. Петрофизическое глубинное моделирование Украинского шита. Киев: Наук. думка, 2013. 312 с.
4. Кузнецов Ф.А., Истомин В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований. *Российский химический журнал*. 2003. **47**, № 3. С. 3—18.
5. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы. *Газовая промышленность*. 2001. № 5. С. 10—16.
6. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Гошовский С.В. Дорожная карта освоения Черноморских газогидратов метана в Украине. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2018. № 3. С. 5—21.
7. Berge L.I., Jacobsen K.A., Solstad A. Measured acoustic wave velocities of R11 (CCl₃F) hydrate samples with and without sand as a function of hydrate concentration. *J. Geophys. Res.* 1999. № 104. P. 415—424. <https://doi.org/10.1029/1999JB900098>.
8. Blackwell J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. *J. app. Phys.* 1954. 25(2). P. 137—144.
9. Du Frane W.L., Stern L.A., Weitemeyer K.A., Constable S., Pinkston J.C., Roberts J.J. Electrical properties of polycrystalline methane hydrate. *Geophys. Res. Lett.* 2011. № 38. L09313. <https://doi.org/10.1029/2011GL047243>
10. Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D. Elasticity of marine sediments: Rock physics modeling. *Geophys. Res. Lett.* 1999. № 26. pp. 1781—1784. <https://doi.org/10.1029/1999GL900332>,
11. Guerin G., Goldberg D. Sonic waveform attenuation in gas hydrate-bearing sediments from the Mallik 2L—38 research well, Mackenzie Delta, Canada. *J. Geophys. Res.* 2002. 107 (B5). P. 17781—17795.
12. Hammerschmidt U. Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Volumetric Specific Heat. *Thermal Conductivity*. 2005. **27**. P. 313—327.
13. Hardage B.A., Sava D., Backus M.M., Remington R., Graves R., Graebner R., Roberts H.H. Evaluation of deepwater gas hydrate systems. *Leading Edge*. 2006. **25**. P. 572—576. <https://doi.org/10.1190/1.2202661>.
14. Helgerud M.B., Dvorkin J., Nur A., Sakai A., Collett T. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: Effective medium modeling. *Geophys. Res. Lett.* 1999. **26**. P. 2021—2024. <https://doi.org/10.1029/1999GL900421>.
15. Holbrook W.S., Hoskins H., Wood W.T., Stephen R.A., Lizarralde D. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from Vertical Seismic Profiling. *Science*. 1996. **273**. P. 1840—1843.
16. Kittel C., Kroemer H. Thermal Physics. W.H. Freeman & Co., New York. 1980. 473 p.
17. Tinivella U., Carcione J.M. Estimation of gas-hydrate concentration and free-gas saturation from log and seismic data. *Lead. Edge*. 2001. № 20 (2). P. 200—203.
18. Waite W.F., Gilbert L.Y., Winters W.J., Mason D.H. Estimating thermal diffusivity and specific heat from needle probe thermal conductivity data. *Review of Scientific Instruments*. 2006. **77**, 044904. <https://doi.org/10.1063/1.2194481>
19. Zillmer M. A method for determining gashydrate and freegas saturation of porous media from seismic measurements. *Geophysics*. 2006. № 71. N21—N32. <https://doi.org/10.1190/1.2192910>

Стаття надійшла 02.09.2021

V.P. Kobolev, NAS Corresponding Member, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Prof., Chief Researcher

E-mail: kobol@igph.kiev.ua

ORCID 0000-0001-5625-5473

S.F. Mikhailiuk, Research Scientist

E-mail: slawa52@ukr.net

ORCID 0000-0001-9534-6183

A.M. Safronov, graduate student

E-mail: sseveneleven561@gmail.com

ORCID 0000-0001-7242-2534

IGP by S.I. Subbotin of the NAS of Ukraine

03142, Kyiv, 32 Palladina Ave.

EXPERIMENTAL LABORATORY COMPLEX FOR STUDYING THE PHYSICAL PROPERTIES OF ARTIFICIALLY FORMED GAS-HYDRATE-CONTAINING SEDIMENTS

Physical properties of gas hydrate-containing sediments (HCS) are extremely important information for the development of methods for their search and exploration. The presence of gas hydrates in marine bottom sediments significantly changes their physical properties, so they can be detected by marine remote geophysical observations. The physical properties of HCS are very important for detecting the presence of these compounds, estimating the amount of captured gas hydrates by sediments, as well as developing methods for using this resource. Currently, the study of physical properties concerned mainly artificial gas hydrates in the process of formation and decomposition under various thermodynamic conditions in their pure form. Therefore, very little is known about the physical properties of HCS, which makes their detection by remote geophysical surveys too difficult.

Development and creation of experimental laboratory modular complex for formation of artificial methane gas hydrates in various lithological-granulometric matrices (sandstones, argillites, siltstones, etc.) and measurement of their physical properties in thermodynamic conditions of bottom sediments of the Black Sea, will increase efficiency technology of methane hydrate deposits development. Under experimental conditions, along with the thermal conductivity and velocities of longitudinal and transverse waves of artificial HCS, the parameters of elastic deformation, strength, and decay characteristics will be measured, which will allow performing theoretical analysis to build models based on different hypotheses of their genesis.

At the S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine created a model of the installation for the formation and study of the physical properties of HCS. The development is based on the modern technological level of research in the field of thermobaric petrophysical experimental modeling of geological environments, as well as on the use of modern software and hardware laboratory research to obtain physical properties of bottom sediments of various lithological and particle size distribution.

Keywords: *gas hydrates, marine sediments, methane, modeling, physical properties.*