

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.05.051>

УДК 552.578.1

В.П. Коболев, <https://orcid.org/0000-0001-5625-5473>

С.Ф. Михайлюк, <https://orcid.org/0000-0001-9534-6183>

А.М. Сафронов, <https://orcid.org/0000-0001-7242-2534>

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

E-mail: kobol@igph.kiev.ua, slawa52@ukr.net, sseveneleven561@gmail.com

Експериментальний лабораторний комплекс для утворення та вимірювання фізичних властивостей штучно сформованих газогідратовмісних донних осадів

Представлено членом-кореспондентом НАН України В.П. Коболевим

Наявність метаногідратів у морських донних відкладах значно змінює їх фізичні властивості, за рахунок чого вони можуть бути виявлені за допомогою дистанційних геофізичних спостережень. Фізичні властивості газогідратовмісних донних осадів (ГВДО) є надзвичайно важливою інформацією для виявлення присутності цих сполук, визначення кількості захоплених газових гідратів осадами, а також розробки методів використання цього ресурсу. Наразі спостерігається помітна ескалація масштабів експериментальних досліджень штучних метаногідратів, спрямованих на визначення кінетики утворення та фізичних властивостей в їх чистому вигляді. Але дуже мало відомо про фізичні властивості саме ГВДО, через що їх виявлення за допомогою дистанційних геофізичних досліджень є надто складним. Розробка і створення експериментального лабораторного модульного комплексу для формування та вимірювання фізичних властивостей штучних газогідратів метану в різноманітних літолого-гранулометричних матрицях (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо) дасть можливість підвищити ефективність геофізичних методів їх пошуку та оптимізувати технологію розробки родовищ метаногідратів.

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

Природні газогідрати (ГГ) — це один з найпотужніших резервів нетрадиційних джерел вуглеводнів. Про це свідчать прогнози оцінки світових обсягів метану в газогідратній формі, які багаторазово перевищують загальні ресурси традиційного природного газу [1]. В осяжному майбутньому ГГ мають істотно збільшити сучасний енергетичний баланс природних вуглеводневих ресурсів палива. Прогрес у їх вивченні може бути забезпечений діалектичною єдністю теоретичних і експериментальних досліджень, сфокусованих головним чином на термодинаміці, кінетиці та фізичних властивостях.

Цитування: Коболев В.П., Михайлюк С.Ф., Сафронов А.М. Експериментальний лабораторний комплекс для утворення та вимірювання фізичних властивостей штучно сформованих газогідратовмісних донних осадів. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 5. С. 51–60. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.05.051>

Основна частина природних ГГ зосереджена в акваторії Світового океану. Наявність ГГ у морських донних відкладах значно змінює їх фізичні властивості, за рахунок чого вони можуть бути виявлені за допомогою морських дистанційних геофізичних спостережень. Таким чином, дані про фізичні властивості гідратовмісних донних осадів (ГВДО) є надзвичайно важливими для виявлення присутності ГГ, визначення їх обсягів, а також для розробки технологій видобутку метану та оцінки руйнування ГГ у природних умовах [2].

В останні десятиліття спостерігається помітна ескалація масштабів експериментальних досліджень штучних гідратів метану в чистому вигляді, спрямованих на визначення кінетики їх утворення та фізичних властивостей [2–5]. Однак наразі бракує надійних експериментальних даних стосовно вимірювань фізичних властивостей ГВДО, які проблематично утворювати та стабілізувати в лабораторних умовах. Насамперед це стосується матеріалів експериментальних досліджень фізичних властивостей ГВДО різного гранулометричного і речовинного складу, що значно ускладнює їх пошук та розвідку за допомогою геофізичних методів і технологічні розробки промислового видобутку.

У статті наведено результати розробки макета оптимального програмно-апаратного забезпечення багатоцільового експериментального комплексу зі змінною внутрішньою архітектурою вимірювальних модулів для утворення та вимірювання фізичних властивостей гідратовмісних різноманітних літолого-гранулометричних донних відкладів (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо).

Методи формування штучних газогідратів. Протягом останніх десятиліть у лабораторіях різних країн світу штучні зразки ГВДО отримують з використання дво- і трифазного методів утворення гідратів, які імітують природні термодинамічні умови [3, 4]. Двофазний метод формування ГГ передбачає пропускання метану через зразки осадових відкладів, насичених морською або прісною водою. Найширшого застосування набув технічно простіший і набагато менш трудомісткий трифазний метод, який включає додавання вільного газу до крижаних зерен льоду. Останній уявляється найбільш прийнятним для вимірювання фізичних властивостей ГВДО, оскільки дає можливість отримувати зразки з високою насиченістю гідратів, чого важко досягти за допомогою двофазного формування [4].

На рис. 1 наведено термодинамічну фазову діаграму синтезу гідрату метану трифазним методом [3]. На ній затемнена область відповідає полю стабільності гідрату метану, а суцільна крива розділяє метастабільний стан H_2O (лід/рідина). Штрихові лінії та стрілочки між точками А–F вказують на зміни *PT*-умов під час синтезу. За температури 250 К (точка А) суміш просіяного гранульованого льоду (H_2O) піддається тиску метану до 25 МПа (точка В). Нагрівання суміші до 290 К (точки С–D–Е) сприяє повному та ефективному перетворенню льоду в газогідрат. Потім зразки охолоджують до 250 К (точка F).

Таким чином, зразки гідрату метану можуть бути ефективно синтезовані шляхом змішування і подальшого повільного, регульованого нагріву суміші просіяного гранульованого льоду з чистої води (H_2O) та стисненого газу CH_4 у 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 дає можливість компенсувати всмоктування газу з газової фази в посудині.

Як зазначено в [3], отримані таким методом штучні зразки ГВДО придатні для вимірювань фізичних властивостей, але залишаються деякі невирішені проблеми. А саме: зазви-

Рис. 1. Фазова діаграма синтезу гідрату метану (за [3] зі змінами). Пояснення у тексті

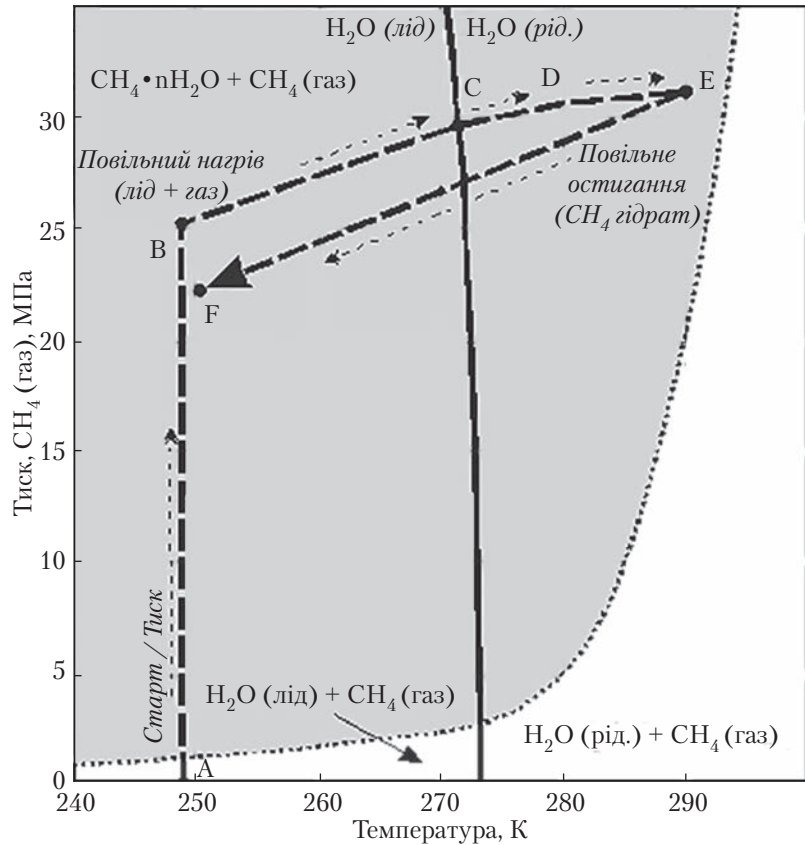
чай зразки ГВДО містять надлишок H_2O у вигляді рідкої води або у вигляді льоду, який може впливати на подальші вимірювання фізичних властивостей. Синтетичний гідрат, утворений з постійного перемішування зерен льоду, не дає змоги контролювати параметри зерен, які можуть сильно вплинути на фізичні властивості. Для повного та ефективного формування ГГ без сегрегації в об'ємній фазі кристалів льоду води в процесі замерзання вологих і водонасичених тонкодисперсних донних осадових матеріалів необхідно дотримуватися таких процедур:

1) підтримання високого надлишкового тиску метану (10–25 МПа) вище рівноважної кривої утворення гідрату метану; 2) рівномірне підведення тепла (~5–12 К/год) з подальшим доведенням температури до 273–290 К (за 8–12 год); 3) використання невеликих початкових розмірів кристалів гранульованого льоду з чистої води (< 300 мкм). Для успішного перетворення кристалів льоду в зерна гідрату потрібно звести до мінімуму дефекти та домішки.

Слід також підкреслити, що вищезазначені процедури контрольованого формування метаногідрату в матрицях різного гранулометричного складу потребують точного знання пористості кінцевого зразка щодо кількісної оцінки об'єму порового простору досліджуваного штучного матеріалу.

Макет експериментального комплексу для утворення та вивчення фізичних властивостей ГВДО. В Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України створено макет і продовжуються роботи з виготовлення експериментального лабораторного модульного комплексу для утворення та вивчення фізичних властивостей штучно сформованих ГВДО [6] (рис. 2).

Дослідження фізичних властивостей ГВДО вимагає використання обладнання під тиском для формування зразків у лабораторних умовах та їх стабілізації під час вимірювання. Основними компонентами гідратного блоку є дві посудини високого тиску, виготовлені із нержавіючої сталі, завдовжки 350 мм, діаметром 70 мм, з товщиною стінки 12 мм та внутрішнім об'ємом 550 мл. Посудини на двох протилежних сторонах мають відповідні з'єднання



і фітинги для під'єднання газових трубопроводів та електричних виводів від датчиків вимірювання температури і фізичних параметрів (теплових, електричних, акустичних). Система з двох посудин розміщується в термостаті, який, у свою чергу, для відтворення температур нижче 0 °С поміщається в морозильну камеру. Термостат об'ємом 80 л заповнюється сумішшю етиленгліколю і води в рівних об'ємних пропорціях. Перша посудина (камера) служить для стабілізації температури газу, який подається в робочу посудину, де проходить реакція утворення ГГ.

Температура термостата вимірюється за допомогою двох платинових термоперетворювачів опору (ТЕРА ТСП - Pt100) T1 і T2, які розташовані всередині нього – один у верхній частині, а інший поблизу дна (див. рис. 2). Температурний режим термостата контролюється і виставляється за допомогою вимірювача типу ТРМ101 (ОВЕН). Для вимірювання та встановлення температурного градієнта 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 манометрів високого тиску, цифрових манометрів високого тиску (0–250,00 МПа) та датчиків тиску компанії Dwyer Instrumens Inc. (США), а їх 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.

Вимірювальні модулі для дослідження фізичних властивостей. Серед усього комплексу фізичних параметрів найбільша увага прикута до теплових властивостей (теплопровідність, температуропровідність і теплоємність), оскільки ГГ характеризуються аномально низькою теплопровідністю у природних термодинамічних умовах, що відрізняє їх від льоду. Розуміння механізмів, що призводять до такого ефекту, дасть можливість покращити основні знання з фізики ГГ для вдосконалення технологій промислового видобутку метану та оцінки їх реального впливу на зміну клімату. Вважається, що низька теплопровідність пов'язана з процесами розсіювання акустичних фонів під час передачі енергії коливань між локалізованими гостьовими включеннями ГГ та господарськими ґратками [7].

Аналіз відповідної наукової літератури свідчить про те, що більшість теплофізичних вимірювань було здійснено за допомогою циліндричного зонда на зразках ГГ, приготованих із використанням зернистого льоду [8]. У модулі для вимірювання теплофізичних властивостей штучно сформованих ГВДО також був використаний метод циліндричного зонда, блок-схема якого зображена на рис. 3. Незважаючи на те, що така технологія життєздатна в лабораторних умовах, зазначений метод було нелегко адаптувати для визначення теплових властивостей ГВДО. Вирішальним є процес формування штучних ГВДО в посудині з уже встановленим зондом, що забезпечує тісний контакт між ним і зразком.

Циліндричний зонд, розміщений уздовж осі зразка, можна апроксимувати як безперервне лінійне джерело тепла. Теплофізичні властивості зразка можуть бути розраховані шляхом вимірювання підвищення температури зонда для тестової теплопровідності на одиницю довжини дроту за одиницю часу для заданого радіуса зонда [9]. Як первинні перетворювачі температури використовуються мініатюрні прецизійні тонкоплівкові платинові терморезистори, підключені за допомогою ратіометричної схеми до аналогового цифрового перетворювача.

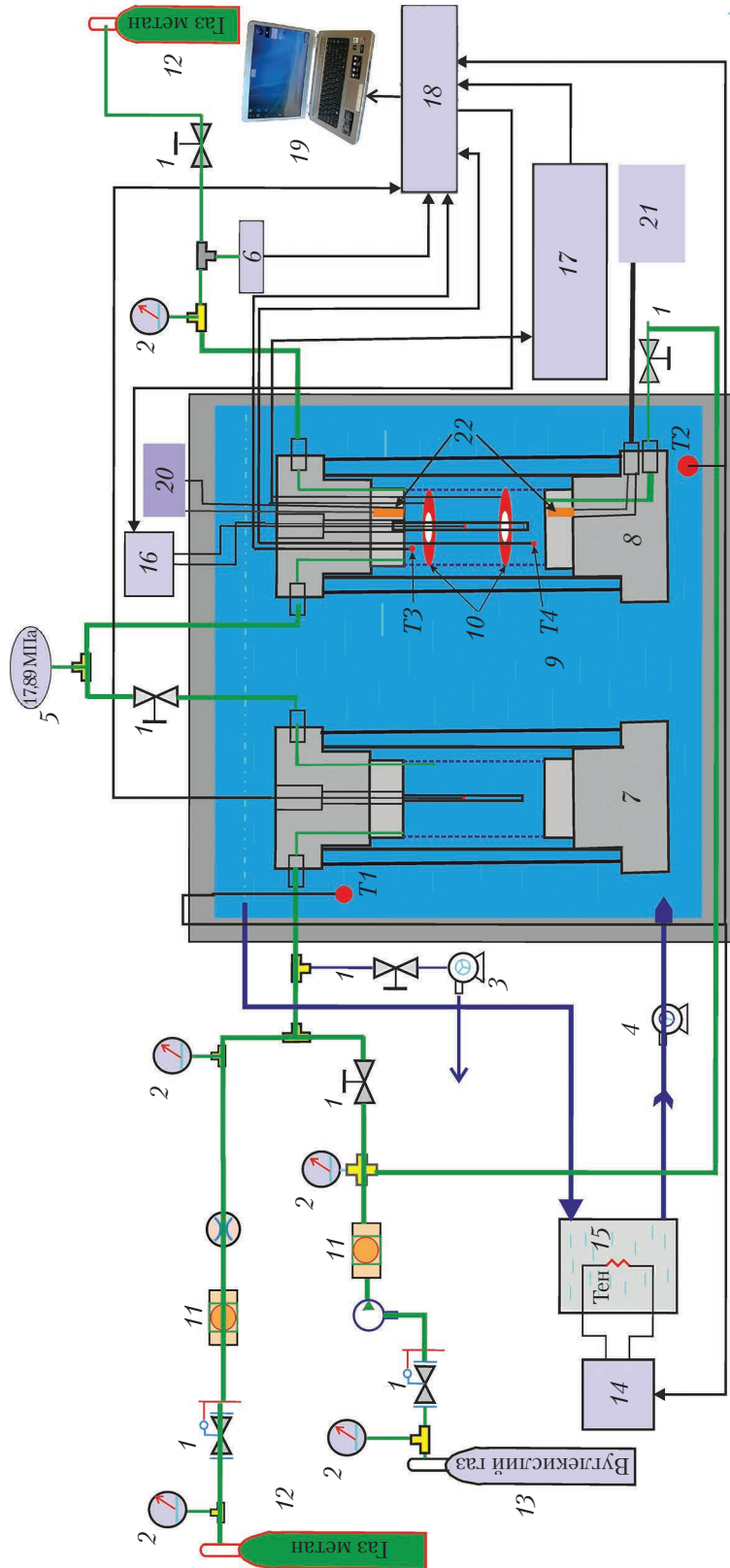
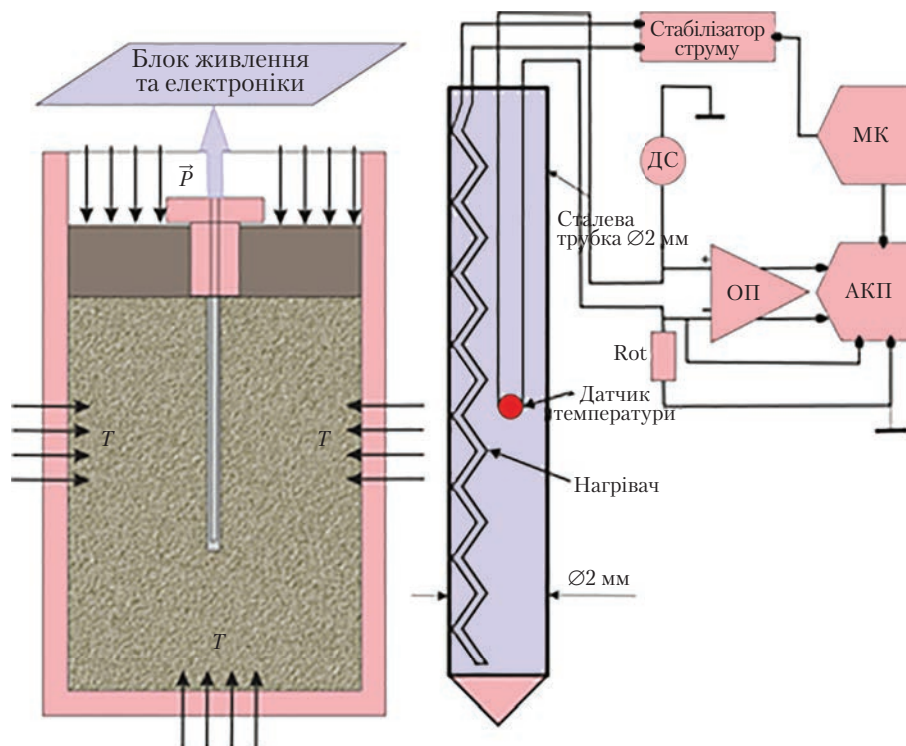


Рис. 2. Блок-схема експериментального лабораторного комплексу для вивчення фізичних властивостей штучно сформованих ГВДО [6]. 1 – входні/вихідні вентилі; 2 – манометри високого тиску 0–20 МПа; 3 – безмасляний форвакуумний насос; 4 – гідравлічний насос; 5 – електронний цифровий манометр; 6 – перетворювач тиск–напряга; 7, 8 – посудини високого тиску; 9 – камера з теплоносієм; 10 – срібні електроди; 11 – витратоміри газу; 12, 13 – балони високого тиску для метану та вуглекислого газу; 14 – блок управління підгрівом теплоносія; 15 – камера підгріву теплоносія; 16 – блок вимірювання теплопровідності; 17 – блок вимірювання електропровідності; 18 – багатоканальний аналого-цифровий перетворювач; 19 – комп’ютер; 20 – генератор імпульсів; 21 – обчислювач пружних швидкостей; 22 – п’єзоелектричні датчики; T1–T4 – датчики температури



▲
Рис. 3. Блок-схема вимірювання теплових параметрів сформованих ГВДО

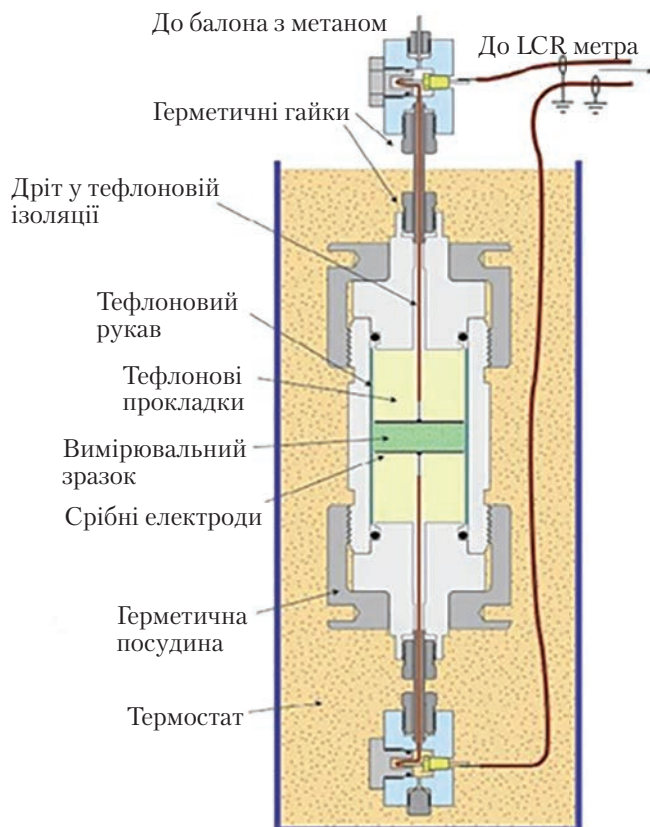


Рис. 4. Модуль вимірювання електропровідності штучно сформованих ГВДО

З метою вимірювання електричних властивостей ГГ у лабораторіях різних наукових центрів створюються установки для утворення газогідрату в чистому вигляді та з домішками осади. Зазвичай досліджуються зразки з відомими характеристиками, щоб краще зіставити електричні властивості з виміряними в природному середовищі значеннями концентрації гідрату газу і характеру його поширення. Електропровідність (σ) вперше була виміряна на зразках чистого гідрату метану [10] і дорівнювала $6 \cdot 10^{-5}$ См/м при 5°C , що приблизно на п'ять порядків нижче, ніж морської води. Ця різниця уможлиблює використання електромагнітних методів (ЕМ), щоб відрізнити менш провідні газогідратні осади від водонасичених відкладів.

Надалі проводяться вимірювання на зразках гідрату метану, змішаного з осадом, кварцовим піском, та скляних кульок з кремнезему в різних об'ємних пропорціях. На рис. 4 наведена схема макета модуля вимірювання електричних властивостей ГВДО.

Електропровідність ГГ має типову експоненціальну залежність від температури:

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

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

Електропровідність чистого гідрату метану (тобто без осаду) коливається від 10^{-5} до 10^{-4} См/м, а провідність з чистого льоду приблизно на 400 % вища. Провідність ГГ набагато менша, ніж морської води ($\sim 10^{-1}$ до 10 См/м), і набагато більша, ніж кварцу (< 10 –18 См/м).

Параметричні дослідження пружних характеристик ГВДО в лабораторних умовах необхідні для сейсмічної розвідки під час пошуку ГГ. Дані про сейсмічні швидкості ГВДО використовують як функцію концентрації газових гідратів [11].

Вимірювання часу поширення пружних хвиль у зразку здійснюється на розробленій двоканальній ультразвуковій імпульсній установці. Одночасно вимірюється час поширення поздовжніх і поперечних пружних хвиль, сигнали яких розділені по амплітуді і частоті. Похибка розрахунку швидкостей з урахуванням похибки вимірювання часу поширення 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 експериментальних вимірів акустичних властивостей розроблений спеціальний модуль, який призначений для вимірювання швидкостей поздовжніх (P) і поперечних (S) хвиль ГВО. Поширення P-хвиль відбувається в напрямку поздовжнього руху частинок. На відміну від цього, S-хвилі спричиняють 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 у відповідності з рівняннями

$$V_P = ((K_b + 4/3G) / \rho_b)^{1/2},$$

$$V_S = (G / \rho_b)^{1/2},$$

де ρ_b – об'ємна щільність осаду; V_P і V_S – величини швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль.

Відмінності в способах їх поширення треба мати на увазі, тому що P- і S- хвилі чутливі до різних властивостей осаду. Так, модуль об'ємної пружності K_b 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 ГВДО, оскільки вони є основою для всіх досліджень і практики використання. Методами вивчення цих властивостей ГВДО здебільшого є польові сейсмічні дослідження, лабораторні вимірювання та теоретичний аналіз. В експериментальних лабораторіях в основному вимірюють криві пружної деформації, міцності, характеристики розпаду і теплові властивості ГВДО, 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 надзвичайно важливим для пошуків ГГ за допомогою сейсмічних або ехолотних методів і може стати ключовим інструментом для моніторингу процесів дисоціації гідрату та її можливого зв'язку зі зміною клімату. Акустичні властивості газоносних речовин, як відомо, істотно залежать 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.

Висновки. Аналіз наявного експериментального матеріалу вказує на те, що лише вимірювання, зроблені безпосередньо на штучно сформованих зразках газогідратів метану у різноманітних літолого-гранулометричних матрицях (пісковики, аргіліти, алевроліти тощо), дадуть достовірні результати для оцінки теплових, електричних та пружних властивостей ГВДО у відповідних термодинамічних умовах Чорного моря. Таким чином, створення експериментального модульного комплексу для формування та вимірювання фізичних властивостей штучних ГВДО, дасть можливість підвищити ефективність геофізичних методів пошуку і розвідки та оптимізувати технологію розробки родовищ метаногідратів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Makogon Y.F. Natural gas hydrates — a promising source of energy. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2010. **2**. P. 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.12.004>
2. Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D., Dugan B., Espinoza D.N., Germaine J., Jang J., Jung J.W., Kneafsey T.J., Shin H., Soga K., Winters W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Rev. Geophys.* 2009. **47**. P. 1–38. <https://doi.org/10.1029/2008RG000279>
3. Stern L.A., Kirby S.H., Durham W.B., Circone S., Waite W.F. Laboratory synthesis of pure methane hydrate suitable for measurement of physical properties and decomposition behavior. *Natural gas hydrate, in oceanic and permafrost environments*: Max M.D. (ed.). Dordrecht: Springer, 2000. P. 323–348. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5_25
4. Sloan E.D., Koh C.A., Sum A.K. Gas hydrate stability and sampling: The future as related to the phase diagram. *Energies*. 2010. **3**. P. 1991–2000. <https://doi.org/10.3390/en3121991>
5. Klar A., Deerberg G., Janicki G., Schicks J., Riedel M., Fietzek P., Mosch T., Tinivella U., De La Fuente Ruiz M., Gatt P., Schwalenberg K., Heeschen K., Bialas J., Pinkert S., Tang A.M., Kvamme B., Spangenberg E., English N., Bertrand C., Parlaktuna M., Sahoo S.K., Bouillot B., Desmedt A., Wallmann K. Marine gas hydrate technology: state of the art and future possibilities for Europe. WG2 report, COST Action ES1405, 2019. https://doi.org/10.3289/MIGRATE_WG2.2019
6. 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. С. 22–33. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.022>

7. Duchkov A.D., Istomin V.E., Sokolova L.S. A geothermal method for detecting gas hydrates in the bottom sediments of water basins. *Russ. Geol. Geophys.* 2012. **53**. P. 704–711. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.05.009>
8. Von Herzen R.P., Maxwell A.E. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method. *J. Geophysics. Res.* 1959. **84**. P. 1629–1634. <https://doi.org/10.1029/JZ064i010p01557>
9. Blackwell J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. *J. Appl. Phys.* 1954. **25**, № 2. P.137–144. <https://doi.org/10.1063/1.1721592>
10. 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>
11. Zillmer M. A method for determining gas-hydrate and free-gas saturation of porous media from seismic measurements. *Geophysics.* 2006. **71**. P. N21–N32. <https://doi.org/10.1190/1.2192910>

Надійшло до редакції 23.06.2022

REFERENCES

1. Makogon, Y. F. (2010). Natural gas hydrates — a promising source of energy. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2, pp. 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.12.004>
2. Waite, W. F., Santamarina, J. C., Cortes, D. D., Dugan, B., Espinoza, D. N., Germaine, J., Jang, J., Jung, J. W., Kneafsey, T. J., Shin, H., Soga, K., Winters, W. J. & Yun, T.-S. (2009). Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Rev. Geophys.*, 47 (RG4003), pp. 1-38. <https://doi.org/10.1029/2008RG000279>
3. Stern, L. A., Kirby, S. H., Durham, W. B., Circone, S. & Waite, W. F. (2000). Laboratory synthesis of pure methane hydrate suitable for measurement of physical properties and decomposition behavior. In Max, M.D. (Ed.). *Natural gas hydrate, in oceanic and permafrost environments* (pp. 323-348). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5_25
4. Sloan, E. D., Koh, C. A. & Sum, A. K. (2010). Gas hydrate stability and sampling: The future as related to the phase diagram. *Energies*, 3, pp. 1991-2000. <https://doi.org/10.3390/en3121991>
5. Klar, A., Deerberg, G., Janicki, G., Schicks, J., Riedel, M., Fietzek, P., Mosch, T., Tinivella, U., De La Fuente Ruiz, M., Gatt, P., Schwalenberg, K., Heeschen, K., Bialas, J., Pinkert, S., Tang, A. M., Kvamme, B., Spangenberg, E., English, N., Bertrand, C., Parlaktuna, M., Sahoo, S. K., Bouillot, B., Desmedt, A. & Wallmann, K. (2019). Marine gas hydrate technology: state of the art and future possibilities for Europe, WG2 report, COST Action ES 1405. https://doi.org/10.3289/MIGRATE_WG2.2019
6. Kobolev, V. P., Mikhailyuk, S. F. & Safronov, A. M. (2021). Experimental laboratory complex for studying the physical properties of artificially formed gas-hydrate-containing sediments. *Geology and mineral resources of World Ocean*, 17, No. 3, pp. 22-33 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.022>
7. Duchkov, A. D., Istomin, V. E. & Sokolova, L. S. (2012). A geothermal method for detecting gas hydrates in the bottom sediments of water basins. *Russ. Geol. Geophys.*, 53 pp. 704-711. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.05.009>
8. Von Herzen, R. P. & Maxwell, A. E. (1959). The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle probe method. *J. Geophysics. Res.*, 84, pp. 1629-1634. <https://doi.org/10.1029/JZ064i010p01557>
9. Blackwell, J. H. (1954). A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. *J. App. Phys.*, 25, No. 2, pp.137-144. <https://doi.org/10.1063/1.1721592>
10. Du Frane, W. L., Stern, L. A., Weitemeyer, K. A., Constable, S., Pinkston, J. C. & Roberts, J. J. (2011). Electrical properties of polycrystalline methane hydrate. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09313. <https://doi.org/10.1029/2011GL047243>
11. Zillmer, M. (2006). A method for determining gas-hydrate and free-gas saturation of porous media from seismic measurements. *Geophysics*, 71, pp. N21-N32. <https://doi.org/10.1190/1.2192910>

Received 23.06.2022

V.P. Kobolev, <https://orcid.org/0000-0001-5625-5473>

S.F. Mikhailyuk, <https://orcid.org/0000-0001-9534-6183>

A.M. Safronov, <https://orcid.org/0000-0001-7242-2534>

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: kobol@igph.kiev.ua, slawa52@ukr.net, sseveneleven561@gmail.com

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

The presence of gas hydrates in marine bottom sediments significantly changes their physical properties, so they can be detected by remote geophysical observations. Physical properties of gas hydrate-containing sediments (HCS) are extremely important information 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 and measurement of physical properties of artificial methane gas hydrates in various lithological-granulometric matrices (sandstones, argillites, siltstones, etc.) will increase efficiency geophysical methods of their exploration and optimize of technology of methane hydrate deposits development.

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