

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2022.1\(488\).14](https://doi.org/10.15589/znp2022.1(488).14)  
УДК 551.465

## METHANE EMISSIONS FROM THE BOTTOM OF THE WORLD OCEAN. ECOLOGICAL ISSUES. TECHNICAL SOLUTIONS

### ЕМІСІЯ МЕТАНУ З ДНА СВІТОВОГО ОКЕАНУ. ЕКОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ

Oleksii V. Zurian

alexey\_zuryan@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2391-1611

О. В. Зур'ян,

канд. техн. наук, ст. наук. співр.

*Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

*Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України, м. Київ*

**Abstract.** Global climate change in recent decades has taken a significant place in the public consciousness in a number of global environmental issues. There is a tendency in many countries to toughen greenhouse gas emissions and to develop technologies that reduce greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere. Among greenhouse gases, methane gas ranks second after carbon dioxide. Therefore, assessing the role of methane in global climate change and the introduction of technologies to reduce this impact on the environment is an important and urgent scientific task.

*Purpose.* On the basis of analytical and experimental research to assess the role of methane in climate change on the basis of various indicators used in research and recommendations for objective assessment of the role of methane in global environmental planetary processes. Perform an analysis of existing methodical and technical solutions to reduce methane emissions from emissions from the ocean floor into the Earth's atmosphere.

*Method.* The following methods are used in the article: analysis, synthesis, deduction, extrapolation method, comparative method and inductive method.

*Results.* A study of the ratio of anthropogenic and natural methane emissions, an assessment of the ratio of different emission sources. It is scientifically substantiated that one of the environmentally dangerous sources of degassing of the Earth is the infiltration of methane from the bottom of the World's Oceans to the water surface. Data on degassing of the Black Sea area are given. The focus is on total methane emissions into the atmosphere and on the increase in methane concentrations in the world in recent years.

*The scientific novelty* is a new approach to reducing greenhouse gas emissions by creating methodical and technical means of capturing methane gas from the bottom deposits of gas hydrates, screes and mud volcanoes with their subsequent transportation and storage for use in industry and energy.

*Practical importance.* The results of the research can be used in the educational process of students, and can be the basis for further research on deep degassing of the Earth and the significant impact of these natural processes on the environment and the formation of energy and other vital resources.

**Key words:** climate change; methane emissions; seeps of gas; mud volcanoes; degassing of the Black Sea.

**Анотація.** Глобальна зміна клімату за останні десятиліття у суспільній свідомості посіла істотне міцне місце в низці глобальних екологічних проблем. Спостерігається тенденція багатьох країн до жорсткішого ставлення до викидів парникових газів та розроблення технологій, що забезпечують зменшення викидів парникових газів в атмосферу Землі. Серед парникових газів друге місце після вуглекислого газу посідає газ метан. У зв'язку з цим оцінка ролі метану у глобальній зміні клімату та запровадження технологій зменшення цього впливу на довкілля є важливим та актуальним науковим завданням.

*Мета* – на підставі аналітичних та експериментальних досліджень оцінити роль метану у зміні клімату на основі різних показників, які використовуються у наукових дослідженнях і рекомендаціях, у разі об'єктивної оцінки ролі метану в глобальних екологічних планетарних процесах; виконати аналіз наявних методичних та технічних рішень для зменшення викидів метану внаслідок емісії з дна Світового океану в атмосферу Землі.

*Методика.* У статті використано такі методи, як: аналіз, синтез, дедукція, метод екстраполяції, порівняльний метод та індуктивний.

*Результати.* Проведено дослідження співвідношення антропогенних і природних викидів метану, виконана оцінка співвідношення різних джерел викидів. Науково обґрунтовано, що одним з екологічно небезпечних джерел дегазації Землі є просочування метану з дна Світового океану на водну поверхню. Наведено дані щодо дегазації акваторії Чорного моря. Зосереджено увагу на загальній емісії метану в атмосферу і зростанні концентрації метану у світі останніми роками.

*Наукова новизна* полягає в новому підході до зменшення викидів парникових газів за рахунок створення методичних та технічних засобів улавліювання газу метану з донних покладів газогідратів, сипів та грязьових вулканів з подальшим їх транспортуванням та зберіганням для використання в промисловості та енергетиці.

*Практична значимість.* Результати дослідження можуть бути використані в навчальному процесі студентів, а також можуть стати основою для подальших наукових досліджень процесів глибинної дегазації Землі та істотного впливу цих природних процесів як на навколишнє середовище, так і на формування енергетичних та інших життєво важливих ресурсів.

**Ключові слова:** зміна клімату; викиди метану; сипи; грязьові вулкани; дегазація Чорного моря.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метан є продуктом природних процесів, що відбуваються в біосфері, та виділяється у процесі промислової діяльності людини. Газ метан, на думку багатьох дослідників, посідає друге місце після  $\text{CO}_2$  серед парникових газів. У зв'язку з цим дослідження ролі метану у глобальній зміні клімату є актуальним та важливим. Завданнями статті є: а) аналіз аналітичних та експериментальних досліджень про роль метану у зміні клімату; б) дослідження співвідношення антропогенних і природних викидів метану; в) узагальнення даних щодо дегазації акваторії Чорного моря; г) аналіз наявних та розробка нових методичних і технічних засобів зменшення викидів метану з аквальних покладів газогідратів, сипів і грязьових вулканів з подальшим їх транспортуванням і зберіганням для використання у промисловості та енергетиці.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останнім часом багато уваги приділялося темі дослідження зростання викидів парникових газів та заходів щодо запобігання зміні клімату. Оцінка рівня впливу зміни концентрації діоксиду вуглецю, метану, оксиду азоту та водяної пари на температуру атмосфери Землі була проведена в дослідженнях С.М. Семенова, Р.Д. Jones, Д.М. Etheridge [1; 2; 3]; проблемні питання зростання викидів в атмосферу на фоні інших парникових газів саме газу метану досліджено в роботах К. Shine, М. Etminan та інш. [4; 5]; дослідження ресурсу газу метану в аквальних покладах газогідратів Світового океану було проведено в роботах М.В. Яблокова, Ю.Ф. Макогона [6; 7]; Чорне море як велике джерело природної емісії метану розглядали А.Ю. Леін, Е.Ф. Шнюков [8; 9]; а розрахунки ресурсів газу метану сипів та грязьових вулканів у Чорному морі було проведено в дослідженні Ю.Г. Артёмова, Ю.Ф. Макогона, Є.Ф. Шнюков та інш. [10; 11; 12]; в роботі С.В. Гошовського [13] було виконано аналіз наявних методів розробки газу

метану із сипів, грязьових вулканів та морських родовищ газогідратів.

## ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Вплив парникових газів на клімат є предметом постійного обговорення та наукових досліджень, а останніми роками особливо активно ведуться дискусії щодо так званого «вуглецевого сліду» (Carbon footprint). Вуглецевий слід включає прямі та непрямі викиди парникових газів (зазвичай у  $\text{CO}_2$ -екв./одиноцю продукції). Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінити емісії парникових газів для різної продукції по всьому життєвому циклі або в процесі отримання продукту. Це дає можливість як об'єктивно порівнювати різні джерела отримання енергії, у тому числі відновлювані та невідновлювані, так і об'єктивно визначати «гарячі точки», на яких необхідно зосередити заходи щодо скорочення викидів парникових газів. Разом із тим залишаються не досить дослідженими співвідношення антропогенних і природних викидів газу метану в атмосферу Землі та оцінка співвідношення різних джерел цих викидів. Мають перспективу дослідження якісних та кількісних показників просочування метану з морського дна Світового океану на водну поверхню та розробка методичних та технічних засобів зменшення викидів метану з аквальних покладів нетрадиційних вуглеводнів.

**Мета дослідження** – на основі аналітичних та експериментальних досліджень оцінити роль метану у зміні клімату на основі різних показників, які використовуються у наукових дослідженнях і рекомендаціях, у разі об'єктивної оцінки ролі метану в глобальних екологічних планетарних процесах; виконати аналіз наявних медичних та технічних рішень зменшення викидів метану в атмосферу.

**Методи.** У статті використано такі методи, як: аналіз, синтез, дедукція, метод екстраполяції, порівняльний метод та індуктивний.

**Об'єктом дослідження** є екологічно небезпечні процеси емісії метану з дна Світового океану.

**Предметом дослідження** є теоретико-методичний інструментарій дослідження впливу емісії газу з акумулятивних покладів метану в загальному балансі парникових газів на підвищення температури атмосфери Землі.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У загальному впливі парникових газів вклад метану не є домінуючим. Основним чинником, звісно, є зростання концентрації вуглекислого газу. Однак і проблема метану вже значною мірою усвідомлюється світовою спільнотою. Натепер глобальні концентрації метану в поверхневому шарі Землі досягли 1800 ppb і більше. Найтриваліший ряд спостережень за атмосферою концентрацією метану, які тривають і досі, належить обсерваторії Мауна Лоа на Гаваїях. Спостереження було розпочато на початку 80-х років ХХ століття. Такі спостереження проводяться за допомогою аналізу проб повітря, відібраних у спеціальні фляги, на газовому хроматографі. За даними багаторічних експериментальних досліджень середній міжрічний темп зростання концентрації  $\text{CH}_4$  становив  $7,3 \text{ млрд}^{-1}$  [14].

Основними показниками, за якими оцінюють динаміку зміни концентрації метану в атмосфері, є тренд та сезонний хід. Тренд відображає характер довгострокових змін і вказує на те, як швидко зменшується чи збільшується концентрація. Сезонний хід, як витікає з назви, демонструє зміну концентрації  $\text{CH}_4$  внаслідок зміни сезонів року. У Північній півкулі вміст метану в атмосфері досягає свого максимуму у зимові місяці, мінімуму – влітку. У Південній півкулі – навпаки. При

цьому амплітуда сезонного ходу в Північній півкулі майже удвічі більша, ніж у Південній.

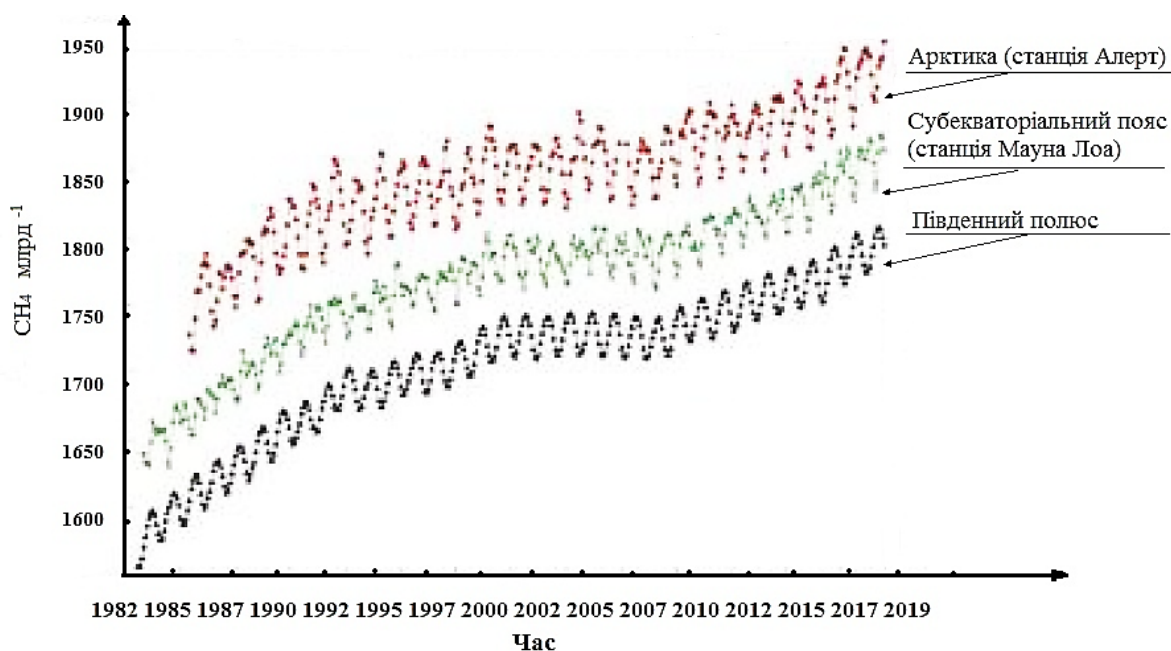
На рис. 1 представлений часовий перебіг концентрації метану для трьох станцій, розташованих у різних широтних поясах: Південний полюс, субекваторіальний пояс (станція Мауна Лоа) та Арктика (станція Алерт).

Тимчасовий хід концентрації метану на Південному полюсі має яскраво виражений сезонний хід без будь-яких різких змін, що зумовлено віддаленістю джерел метану та добре перемішаним повітрям. Просочуючись від Південного полюса до Північного, загальний рівень концентрації та амплітуда сезонного ходу збільшуються – позначається близькість континентальних джерел  $\text{CH}_4$ .

Джерела метану зазвичай поділяють на дві великі групи: природні (тобто природного походження) та антропогенні (що утворилися в результаті діяльності людини). Деяка частина джерел метану може бути змішаного типу.

В атмосфері метан перебуває, в основному, у приземному шарі, в тропосфері, товщина якого становить 11–15 кілометрів. Концентрація метану практично не залежить від висоти в інтервалі від поверхні Землі до тропопаузи, оскільки в межах 0–12 км велика швидкість перемішування (1 місяць) порівняно з часом наявності метану в атмосфері [15].

У таблиці 1 наведено дані оціночних доповідей Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) про загальний викид метану від природних та антропогенних джерел.



**Рис. 1.** Часовий перебіг атмосферної концентрації метану за даними станцій, розташованих у різних широтних зонах (графіки побудовані за даними з WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases) [14])

**Таблиця 1.** Джерела викидів метану в атмосферу, млн т/рік [14]

Природні викиди		Антропогенні викиди	
Джерела	млн т/рік	Джерела	млн т/рік
Болота	217	Жуйні тварини	89
Океан	54	Відходи	75
Озера та річки	40	Нафто-газова галузь	50
Дикі тварини	15	Рисові поля	36
Терміти	11	Спалення біомаси	35
Гідрати	6	Інше	46
Пожежі	3		
Вічна мерзлота	1		
Природні викиди		Антропогенні викиди	
Всього, млн т/рік	347	Всього, млн т/рік	311
Всього, %	57,9	Всього, %	45,1

З таблиці видно, що водні ресурси займають лідируючу позицію за природними викидами метану в довкілля.

Усі природні води містять розчинені гази. Саме у системах газ-вода формуються, стабільно існують та руйнуються поклади природних газів.

У надрах Землі розчинений газ виділяється з водного насиченого розчину у вигляді мікробульбашок. У разі сприятливих термобаричних умов скупчення мікробульбашок, об'єднуючись, можуть формувати великі поклади вільного газу або поклади газогідрату. За вертикальної або латеральної міграції газонасичених водних розчинів змінюються тиск, температура і ступінь газонасиченості розчину, при цьому гази можуть як розчинятися, так і виділятися з розчину.

Уже перші дослідження розчинності природних газів у воді в умовах утворення гідрату [16] показали різку зміну співвідношення кількості молекул води та газу до утворення та після утворення гідрату. Були встановлені умови формування та руйнування покладів вільного газу та газогідратних покладів у системах газ-вода. Зоною утворення гідрату є товща порід, у якій тиск і температура відповідають термодинамічним умовам стабільного існування гідрату газу.

Так, на більшій частині Чорноморської мегавпадини у придонному шарі осадів за глибини моря 600–650 м існують сприятливі термобаричні умови для формування та стабільного існування газогідратів. Потужність зони гідратоутворення істотно залежить від величини градієнта температури або теплового потоку. У зонах з низьким тепловим потоком (25–30 мВт/м<sup>2</sup>) потужність пласту гідратоутворення становить 350–400 м, зі збільшенням теплового потоку до 40 мВт/м<sup>2</sup> вона зменшується до 200–250 м, а за значень потоку 60 мВт/м<sup>2</sup> і більше – скорочується до десятків метрів. У зонах аномально високих потоків

(80–100 мВт/м<sup>2</sup>) газогідратний пласт, найімовірніше, відсутній [9].

Наразі встановлено, що донні відклади Чорного моря, починаючи з глибин 550–600 м, загазовані метаном. Потужні виходи газу у вигляді численних сипів, фонтанів, грязьових вулканів зафіксовані практично по всьому периметру Чорного моря. Натепер в акваторії Чорного моря виявлено 4 тис. газових факелів (сипів), локалізованих по периферії, зокрема, на північному заході Чорного моря, болгарському шельфі, Керченсько-Таманському шельфі, вздовж берегів Кавказу. Даних про газові факели біля берегів Туреччини мало. Однак рій газових факелів виявили під час пошукових робіт для траси газопроводу «Блакитний потік» на материковому схилі та шельфі Туреччини [9].

В умовах стійкої стратифікації водної товщі та слабого перемішування поверхневих і глибинних вод під розташованим на глибинах понад 100 м шаром пікнокліну в Чорному морі сформувалася велика безкиснева зона з надзвичайно високим вмістом розчиненого метану.

Ще порівняно недавно під час визначення бюджету метану у Чорному морі основним механізмом надходження метану у водний стовп вважали діагенетичні процеси у донних відкладах.

Однак у 1989 р. було відкрито явище метанових струменевих газовиділень (метанових сипів) в аноксичній зоні Чорного моря та підтверджено значний масштаб його розповсюдження. У зв'язку з цим питання, що пов'язані з бюджетом метану у Чорному морі, знову потрапили у фокус уваги різних груп дослідників.

Найбільш детально за всі роки дослідження було вивчено район палеоруслу р. Дніпро (де на площі 345 км<sup>2</sup> було зареєстровано 1295 сипів у діапазоні глибин 141,4–725,5 м. Для кожного з 1295 сипів були отримані оцінки потоку емісії струменевого метану з морського дна).

Згідно з результатами досліджень, цей район може розглядатися як один з найбільш активних районів метанопроявів, як частини великого конуса виносу, що акумулює величезні маси органічного матеріалу з усієї північно-західної частини Чорного моря з прилеглими річками [17]. Причому в аноксичну товщу вод Чорного моря струменевий метан емітують в основному сипи, розташовані нижче за верхню межу пікнокліну (140 м) і вище за верхню межу зони стабільності газогідратів (725 м). Струменеві газовиділення кисневої зони значну частину вільного метану виносять в атмосферу, а метан, що розчинився під час підйому газових бульбашок, найбільш імовірно піднімається до поверхні моря, ніж долає градієнт щільності, проникає в анаеробну зону з більш високою концентрацією розчиненого метану.

Для активних газовиділяючих ділянок у масштабах усього Чорного моря потік метану вважався

пропорційним площі ділянки та оцінці просторової щільності потоку струменевого метану, зробленої для великої ділянки континентального схилу в районі палеоруслу р. Дніпро. Оцінки потоку для кожної з виділених ділянок материкового схилу наведено у табл. 2.

**Таблиця 2.** Оцінка потоку струйного метану в аноксичній зоні Чорного моря на різних ділянках материкового схилу [16]

№	Район	Площа (км <sup>2</sup> )	Потік метану (x10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> у рік)
1	Північно-північно-західний сектор (палео-Дніпро)	739	33,3
2	Румунський сектор (палео-Дунай)	5180	233,6
3	Болгарський сектор	2812	126,8
4	Захід турецького сектору	1004	45,3
5	Прибосфорський район	2326	104,9
6	Центр турецького сектору	5917	266,9
7	Схід турецького сектору	2532	114,2
8	Грузинський сектор	3911	176,4
9	Схід російського сектору	1663	75,0
10	Північно-північно-східний сектор (палео-Дон)	1655	74,6
	ВСЬОГО	31373	1251,0

Відповідно до табл. 2 з метанових сипів у воді Чорного моря надходить щорічно близько  $1,2 \times 10^9$  м<sup>3</sup> метану. У вагових одиницях ця величина відповідає 0,9 Тг рік (1 Тераграм Тг =  $10^{12}$  грам).

Аналіз міжнародних патентних баз показав великий інтерес дослідників і конструкторів з усього світу до питання розробки аквальных покладів газу метану, що вселяє певні надії як для розв'язання екологічної проблеми, так і перспективи розробки цього нетрадиційного джерела вуглеводневих газів.

З огляду на те, що газогідрати генетично пов'язані з полями газових факелів, патентний пошук було здійснено за ключовими словами, що охоплюють усі методи та технології як для розробки газогідратних родовищ загалом, так і зі збирання вільно спливаючого газу з морського дна як з автономних газових факелів, так і отриманих у процесі розробки газогідратного родовища [18].

Встановлено, що на сьогодні зареєстровано велику кількість патентів з перспективними методами отримання вуглеводневого газу з нетрадиційних родовищ, у тому числі з аквальных газогідратів та сипів. Впевнено можна сказати, що провідними країнами у сфері патентних розробок способів видобутку газу з аквальных нетрадиційних родовищ є США, Японія, Канада та Китай.

Аналіз патентного пошуку свідчить, що найбільший відсоток та місце у всіх групах, безумов-

но, мають патенти, пов'язані з питаннями розробки аквальных покладів газогідратів. Навіть усередині самої групи методів і пристроїв руйнування (дисоціації) газогідратів, яка є найбільшою, існує свій поділ як на більш часто застосовані авторами – традиційні (класичні), так і методи та технології, які мають на меті одержання тих самих результатів, але використовують інші фізичні підходи – нетрадиційні.

Особливістю розробки аквальных покладів гідрату метану є необхідність створення різних систем збирання метану, що вільно спливає на поверхню. Це питання у великій кількості патентних розробок вирішується за рахунок застосування парасолькових систем різної конструкції.

Безумовний інтерес мають методичні та технічні рішення щодо збирання розчиненого у воді газу, який вільно спливає з дна моря, розроблені в Україні. Так, автори патенту України UA 115636 пропонують спосіб видобутку природного газу у відкритому морі. Спосіб включає збирання газу з донних газових факелів над газовиділяючими ділянками морського дна, як і в попередніх розробках, за допомогою куполовидного газозбірника. При цьому транспортування газу на поверхню моря виконують трубопроводом. Каркас газозбірника виконано з пустотілих гнучких трубок, які перед зануренням наповнюють рідиною з певною питомою вагою. Перед експлуатацією всередині трубок збільшують тиск, забезпечуючи необхідну стійку форму газозбірника.

На рис. 2. схематично показано комплекс для видобутку газу у відкритому морі з різними положеннями куполовидного газозбірника в морському середовищі, а саме: на рис А газозбірник знаходиться на відстані від морського дна у складеному вигляді, а на рис В газозбірник опущений на дно моря у розгорнутому вигляді.

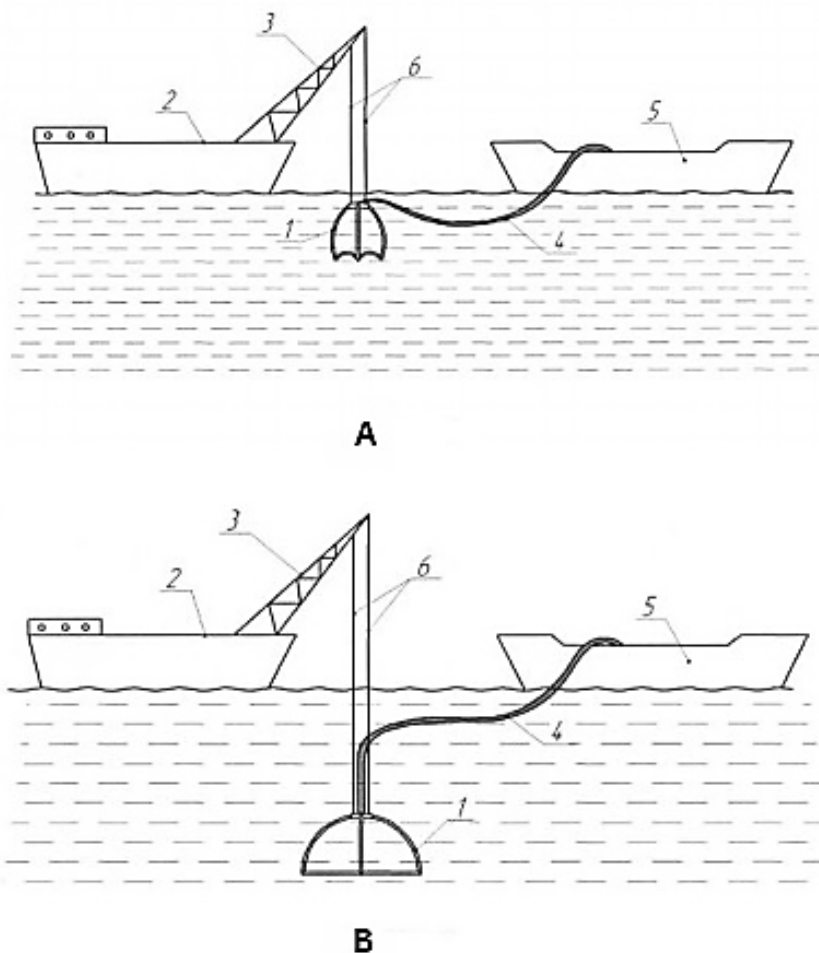
Принцип роботи пристрою є таким: перед початком занурення газозбірника 1 в гнучкі порожнисті трубки, з яких складається каркас газозбірника 1, закачують рідину із заздалегідь визначеною питомою вагою. Потім за допомогою кранової лебідки 3, яка знаходиться на допоміжному судні 2, плавно занурюють пристрій на дно моря. Позаяк трубки, з яких складається каркас газозбірника 1, виконані гнучкими, пристрій під час занурення перебуває у складеному вигляді. Після того, як газозбірник опустили на морське дно, у внутрішній простір трубок додатково подають рідину під високим тиском, і каркас газозбірника 1 набирає потрібну стійку форму. Далі відбувається процес уловлювання газу в герметичний купол. Після закінчення процесу вловлювання у каркас подається газ з питомою вагою менше, ніж у воді для полегшення підйому апарату, каркас перестає бути стійким, тобто газозбірник 1 знову перебуває у складеному вигляді, зручному для транспортування на поверхню.

Аналіз українських патентів показує, що дослідники та конструктори значною мірою зосередили свої зусилля не стільки на модернізації конструкції куполовидного газозбірника, скільки на способах транспортування та зберігання одержаного з морського дна газу. Так, автори патенту України UA 109492 запропонували спосіб видобутку газу у відкритому морі, який полягає у збиранні газу з газових факелів над газовиділяючими ділянками морського дна за допомогою куполовидного газозбірника, що знаходиться в морському середовищі. При цьому особливість конструкції полягає в тому, що здійснюється передача газу з газозбірника в буферну акумуляційну ємність. Вона плаваюча і відкрита знизу, а зверху з'єднана з вивідним трубопроводом.

Авторами патенту України UA 109790 запропоновано спосіб видобутку газу у відкритому морі, де збір газу з донних газових факелів здійснюється над газовиділяючими ділянками морського дна за допомогою газозбірника. Транспортування газу на поверхню

моря виконують через трубопровід у разі збирання газу з неглибоководного джерела, а у разі збирання газу з глибоководних джерел газ із газозбірника подають на газгольдер. При цьому газгольдер встановлено над газовиділяючою ділянкою дна моря, а транспортування газу на поверхню моря виконують шляхом відокремлення газгольдера від газозбірника та забезпечення його подальшого спливання. У газгольдері перед транспортуванням газ зріджують шляхом його дотискання компресором. Перед проведенням видобутку газу проводять пошукові та/або розвідувальні роботи для точного встановлення місцезнаходження газових сипів та оцінки їх параметрів, а збирання газу сипів здійснюють газозбірником, який розташовують на дні моря або у водному середовищі на вибраній відстані від морського дна.

Недоліком таких способів є низька продуктивність та високі енерговитрати. Низька продуктивність методів із застосуванням ерліфта викликана тим, що принцип ерліфта, який застосовують на великих гли-



**Рис. 2.** Спосіб видобутку природного газу у відкритому морі (Патент України UA115636): А – газозбірник знаходиться на відстані від морського дна у складеному вигляді; В – газозбірник опущений на дно моря у розгорнутому вигляді; 1 – газозбірник; 2 – допоміжне судно; 3 – кранова лебідка; 4 – рукав подачі газу на основне судно; 5 – основне судно; 6 – трос лебідки.

бинах, малоефективний. Також за такого способу будуть великі втрати газу і дуже відчутний вплив на екосистему морського дна. Підвищена енерговитратність зумовлена тим фактором, що транспортування газу з «підкупольного» простору газозбірника здійснюється трубопроводом в умовах термодинамічної нестабільності спливаючого газу. У таких умовах можливий зворотний процес переходу його в гідратний стан (тверду фазу) та закупорка каналів відведення газу, що вимагає додаткового очищення або застосування способів, що запобігають повторному утворенню гідратів у трубопроводі. Цей процес відомий з експлуатації наземних газопроводів.

Таких недоліків позбавлена система біологічної розробки газу метану з аквальних покладів газогідратів, що запропонована авторами патенту України UA 135811 (Система біологічної розробки газу метану з аквальних покладів газогідратів), яка містить судно або платформу, насосно-компресорну станцію, трубопровід зі спеціальними баками для розподілу і подачі води, вузол підготовки вод, вимірювальні прилади для контролю за подачею води, акумулятор та робочий інструмент, що руйнує газогідрати та виробляє електричну енергію. Як руйнівний інструмент використовуються спеціальні мікробні паливні елементи (МПЕЛ) на основі біологічних систем (рис. 3).

Вищевказаний пристрій виконано у вигляді покрівлі, що встановлюється над місцем розробки газогідратного шару, до якого підведені повітропровід для подачі кисню з насоснокомпресорної станції, яка встановлена на судні або платформі. До покрівлі газогідратного шару, яка конструктивно складається з двох камер – анодної та катодної, поділених іоноселективною мембраною. Верхній шар покладів газогідратів та мікробна асоціація (бактерії) знаходяться в анодній камері в анаеробних умовах. Отримання електричної енергії в мікробних паливних елементах, якими є така мікробна колонія, відбувається за рахунок окислення молекул метану, які знаходяться всередині кристала льоду (клатрата) з виділенням двоокису вуглецю, що заміщає метан всередині клатрата. Таким чином, бактерії в процесі життєдіяльності здійснюють транспорт електронів на зовнішню поверхню клітинної мембрани, які потім акцептуються анодом. Катод перебуває в анаеробних умовах. Мембрана пропускає протони з анодної камери в катодну і перешкоджає попаданню кисню до анодної камери. Анод з'єднаний з катодом електричним ланцюгом. Електрони проходять до кінцевого акцептору – протону в катодній камері через анод і електричний ланцюг, створюючи таким чином електричний струм, який надходить в акумулятор-інвертор, що знаходиться на

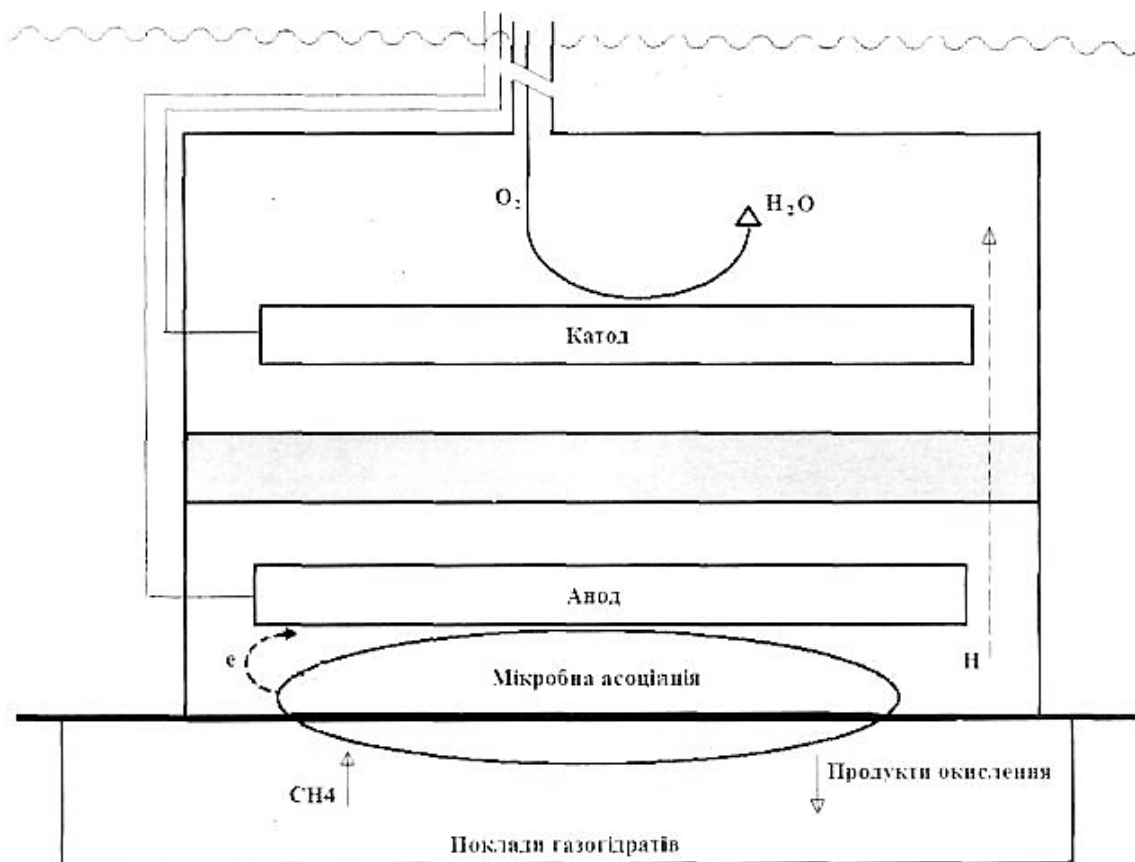


Рис. 3. Руйнівний інструмент на основі біологічних систем (Патент України UA 135811)

судні або платформи, з подальшим транспортуванням її надводною або підводною системою до споживачів.

Така система забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії системи за рахунок того, що для розробки газу метану з аквальних покладів газогідратів застосовано спеціальні мікробні паливні елементи (МПЕЛ) на основі мікробних біологічних систем, що здійснюють переробку газогідрату за рахунок окислення метану та виробництво електричної енергії, що дозволяє забезпечити більш ефективний процес руйнування кристалічної клатратної решітки загалом та високоефективну розробку газогідратної товщі по всій площі покладу як у сприятливих, так і несприятливих умовах зокрема.

Тим часом остаточні висновки можна робити тільки після проведення як спеціальних лабораторних досліджень на макетах систем, що розробляються, так і в реальних умовах експлуатації на місцевості.

### ВИСНОВКИ

1. В абсолютному вираженні найважливішим парниковим газом є CO<sub>2</sub> тому, що зростання обсягів його глобальної емісії набагато перевищує зростання викидів інших газів. Метан має менше значення, але збільшення його глобальних концентрацій помітні.

2. Метан бере участь у фотохімічних процесах, що протікають в атмосфері, і тим самим впливає на те, яким буде вміст інших компонентів повітря

(у тому числі парникових газів), тому, незважаючи на те, що метан не затримується в атмосфері так довго, як вуглекислий газ, він набагато руйнівніший для клімату через те, що він ефективно поглинає сонячне тепло, нагріваючи атмосферу.

3. Час життя метану у атмосфері становить 8–12 років. Він безповоротно витрачається головним чином у реакціях з гидроксидом (переважно у тропосфері) і атомарним хлором (переважно у стратосфері). Такий невеликий порівняно з вуглекислим газом час життя CH<sub>4</sub> привертає останнім часом до нього підвищену увагу у разі вирішення проблеми регулювання викидів парникових газів.

4. Основні природні джерела метану: заболочені території, різні водні об'єкти (озера, ріки, моря та океани).

5. Серед розглянутих джерел надходження струменевого метану у води Світового океану найбільший внесок здійснюють метанові сипи на аноксичних глибинах до 725 м, внесок інших джерел на порядок менший.

6. Мають перспективу подальші дослідження у галузі створення методичних і технічних засобів уловлювання газу метану з покладів газогідратів, сипів та грязьових вулканів з подальшим їх транспортуванням та зберіганням для використання у промисловості та енергетиці.

### REFERENCES

- [1] Semenov, S. M., Popov, I. O. (2011). Svrnitelnyie otsenki analiza izmeneniy kontsentratsiy dioksida azota, metana, zakisi azota i vodyanogo para na radiatsionno-ravnovesnyuyu temperaturu zemnoy poverhnosti [Comparative estimates of the analysis of changes in the concentrations of nitrogen dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the earth's surface]. *Meteorologiya i gidrologiya*. No. 8. Pp. 34–43.
- [2] Jones, P. D., Harpham, C. (2013). Estimation of the absolute surface air temperature of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Vol. 118. Pp. 3213–3217. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50359>.
- [3] Etheridge, D. M., Steele, L. P., Francey, R. J., Langenfelds, R. L. (2002). Historical CH<sub>4</sub> Records Since About 1000 A.D. From Ice Core Data. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center; Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.*
- [4] Shine, K., Berntsen, T., Fuglestedt, J., Skeie, R., Stuber, N. (2007). Comparing the climate effect of emissions of short- and long-lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A* No. 365. Pp. 1903–1914. Retrieved from: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2050>.
- [5] Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*. Vol. 43. Pp. 12614–12623.
- [6] Yablokov, M. V. (2006). Vzryvchatka na okeanskom dne. *Inzhener*. [Explosives on the ocean floor]. No. 10. Pp. 14–15.
- [7] Makogon, Yu. F. (2003). Prirodnyie gazovyye gidraty: rasprostranenie, modeli obrazovaniya, resursy [Natural gas hydrates: distribution, formation models, resources]. *Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. Ob-va im. D. I. Mendeleeva)*. т. XLVII. Vol. 3. Pp. 70–79.
- [8] Lein, A. Yu., Ivanov, M. V. (2005). Krupneyshiy na Zemle metanovyyiy vodoem [The largest methane reservoir on Earth]. *Priroda*. No. 2. Pp. 18–26.
- [9] Shnyukov, E. F., Starostenko, V. I., Kobolev, V. P. (2006). Gazogidratonosnost donnyih otlozheniy Chernogo morya [Gas hydrate content of bottom sediments of the Black Sea]. *Geofizicheskiy zhurnal*. T. 28. No. 6. Pp. 29–38.
- [10] Artemov, Yu. G., Egorov, V. N., Polikarpov, G. G., Gulín, S. B. (2007). Methane emission to the hydro and atmosphere by gas bubble streams in the Dnieper paleo-delta, the Black Sea. *Mar. Ecol. J.* Vol. 6. No. 3. Pp. 5–26
- [11] Makogon, Yu. F. (2010). Gazogidraty. Istoriya izucheniya i perspektivy osvoiniya [Gas hydrates. History of study and prospects for development]. *Geologiya i korisni kopalini Svitovogo okeanu*. No. 2. Pp. 5–21.
- [12] Shniukov, Ye. F., Koboliev, V. P., Hoshovskyi, S. V. (2018). Dorozhnia karta osvoinnia chornomorskykh hazohidrativ metanu v Ukraini [Road map for the development of Black Sea gas hydrates for methane in Ukraine.]. *Heolohiia i korisni kopalyny Svitovoho okeanu* No. 40 (3). Pp. 5–21. Retrieved from: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.005>.

- [13] Hoshovskiy, S. V., Zurian, O. V. (2018). Sposoby i tekhnologii vydobutku hazu metanu z akvalnykh hazohidratnykh formuvan [Methods and technologies of methane gas production from aqual gas hydrate formations]. *Mineralni resursy Ukrainy*. No. 4. Pp. 26–31. Retrieved from: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.26-31>.
- [14] Ishkov, A. G. (2011). Rol metana v izmenenii klimata [The role of methane in climate change]. *Nepravitelstvennyy ekologicheskyy fond imeni V. I. Vernadskogo. NIPE*. 133 p.
- [15] Bazhin, N. M. (2000). Metan v atmosfere [Methane in the atmosphere]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. T. 6. No. 3. Pp. 52–57.
- [16] Artiymov, Yu. G., Egorov, V. N., Gulin, S. B. (2019). Postuplenie struynogo metana v anoksicheskie vody Chernomorskoy vpadiny [Jet methane supply to the anoxic waters of the Black Sea depression]. *Okeanologiya*. T. 59. No. 6. Pp. 952–963.
- [17] Goshovskiy, S. V., Zurian, O. V. (2017). Gazogidratnye zalezhi: formirovaniye, razvedka i osvoineniye [Gas hydrate deposits: formation, exploration and development]. *Geologiya i poleznyye iskopaemye Mirovogo okeana*. No. 4 (50). Pp. 65–78. Retrieved from: <https://doi.org/10.15407/gpimo2017.04.065>.
- [18] Goshovskiy, S. V., Zurian, O. V. (2018). Razrabotka gaza metana iz sipov, gryazevyih vulkanov i morskikh mestorozhdeniy gazogidratov [Development of methane gas from seeps, mud volcanoes and offshore gas hydrate deposits]. *Geologiya i poleznyye iskopaemye Mirovogo okeana*. No. 14 (3). Pp. 22–36. Retrieved from: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.022>.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Семенов, С. М., Попов, И. О. (2011) Сравнительные оценки анализа изменений концентраций диоксида азота, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности. *Метеорология и гидрология*. № 8. С. 34–43.
- [2] Jones, P. D., Harpham, C. (2013) Estimation of the absolute surface air temperature of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Vol. 118. Pp. 3213–3217. URL: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50359>.
- [3] Etheridge, D. M., Steele, L. P., Francey, R. J., Langenfelds, R. L. (2002) Historical CH<sub>4</sub> Records Since About 1000 A.D. From Ice Core Data. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.*
- [4] Shine, K., Bernsten, T., Fuglestedt, J., Skeie, R., Stuber, N. (2007) Comparing the climate effect of emissions of short-and long-lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A* No. 365. Pp. 1903–1914. URL: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2050>.
- [5] Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P. (2016) Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*. Vol. 43. Pp. 12614–12623.
- [6] Яблоков, М. В. (2006) Взрывчатка на океанском дне. *Инженер*. № 10. С. 14–15.
- [7] Макогон, Ю. Ф. (2003) Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. Т. XLVII. № 3. С. 70–79.
- [8] Леин, А. Ю., Иванов, М. В. (2005) Крупнейший на Земле метановый водоем. *Природа*. № 2. С. 18–26.
- [9] Шнюков, Е. Ф., Старостенко, В. И., Коболев, В. П. (2006) Газогидратоносность донных отложений Черного моря. *Геофизический журнал*. Т. 28. № 6. С. 29–38.
- [10] Artemov, Yu. G., Egorov, V. N., Polikarpov, G. G., Gulin, S. B. (2007) Methane emission to the hydro and atmosphere by gas bubble streams in the Dnieper paleo-delta, the Black Sea. *Mar. Ecol. J.* Vol. 6. No. 3. Pp. 5–26.
- [11] Макогон, Ю. Ф. (2010) Газогидраты. История изучения и перспективы освоения. *Геология і корисні копалини Світового океану*. № 2. С. 5–21.
- [12] Шнюков, Е. Ф., Коболев, В. П., Гошовський, С. В. (2018) Дорожня карта освоєння чорноморських газогідратів метану в Україні. *Геология і корисні копалини Світового океану*. № 40 (3). С. 5–21. URL: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.005>.
- [13] Гошовський, С. В., Зур'ян, О. В. (2018) Способи і технології видобутку газу метану з аквальних газогідратних формуваль. *Мінеральні ресурси України*. № 4. С. 26–31. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.26-31>.
- [14] Ишков, А. Г. (2011) Роль метана в изменении климата. *Неправительственный экологический фонд имени В. И. Вернадского. НИИПЭ*. 133 с.
- [15] Бажин, Н. М. (2000) Метан в атмосфере. *Соросовский образовательный журнал*. Т. 6. № 3. С. 52–57.
- [16] Артёмов, Ю. Г., Егоров, В. Н., Гулин, С. Б. (2019) Поступление струйного метана в аноксические воды Черноморской впадины. *Океанология*. Т. 59. № 6. С. 952–963.
- [17] Гошовский, С. В., Зурьян, А. В. (2017) Газогидратные залежи: формирование, разведка и освоение. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. № 4 (50). С. 65–78. URL: <https://doi.org/10.15407/gpimo2017.04.065>.
- [18] Гошовский, С. В., Зурьян, А. В. (2018) Разработка газа метана из сипов, грязевых вулканов и морских месторождений газогидратов. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. № 14 (3). С. 22–36. URL: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.022>.