

# Processes in the porous medium of the gas hydrate deposit

Ella Maksymova<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

\*Corresponding author: [maksymova.e.o@nmu.one](mailto:maksymova.e.o@nmu.one)

**Abstract.** It is proposed to use classical hydrodynamic and thermodynamic laws with elements of molecular physics to describe the processes occurring in the pore space of deep - water gas hydrate deposits. The uniqueness of a new hydrocarbon resource is shown, the development of which requires consideration of several research methods used in various scientific fields. The hydrate of natural gas distributed in the bowels of the planet Earth, the stability of which depends not only on the geological conditions of its distribution, but also on the processes and phenomena studied by such sciences as hydro- and thermodynamics, structural and regional geology, lithology, physical chemistry and thermal physics. In this regard, the author uses a set of methods used in the earth sciences. The described processes allow to form a physical and mathematical model of the gas hydrate field, which in the future will allow to regulate the parameters during their development.

**Keywords:** *gas hydrate, natural gas, additional energy resource, hydrodynamic processes, World Ocean*

# Процеси в поровому середовищі газогідратного покладу

Елла Максимова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

\*Відповідальний автор: [maksymova.e.o@nmu.one](mailto:maksymova.e.o@nmu.one)

**Анотація.** Запропоновано використовувати класичні гідродинамічні та термодинамічні закони з елементами молекулярної фізики для опису процесів, що відбуваються в поровому просторі глибоководних родовищ газогідратів. Показано унікальність нового вуглеводневого ресурсу, розробка якого вимагає розглядання в сукупності низки методів дослідження, що використовуються в різних наукових областях. Розглянуто гідрат природного газу, поширений в надрах планети Земля, стабільність якого залежить не тільки від геологічних умов його поширення, але і від процесів і явищ, що вивчаються такими науками, як гідро- і термодинаміка, структурна та регіональна геологія, літологія, фізична хімія та теплова фізика. У зв'язку з цим в роботі використано методи, що застосовуються в науках про Землю. Описані процеси дозволяють сформулювати фізико-математичну модель газогідратного родовища, що в майбутньому дозволить регулювати параметри при їх розробці.

**Ключові слова:** *газогідрат, природний газ, додатковий енергетичний ресурс, гідродинамічні процеси, Світовий океан*

## 1. Вступ

Ринок вуглеводнів відіграє вирішальну роль в економіці, визначає основні принципи світової політики, а наявність енергоносіїв дає поштовх регіональному розвитку держав і сфер світових бізнес-інтересів. Ступінь використання енергоресурсів є одним з основних показників рівня розвитку цивілізації в цілому і окремих держав зокрема. Динаміка світового виробництва енергоресурсів вивчається і оцінюється багатьма провідними сучасними вченими і науковими спільнотами. Висновки вчених свідчать про структурний зсув складу виробленого палива на користь нафти і природного газу. Частка нафти в світовому енергетичному балансі періодично досягає максимальних показників, але іноді, - максимальне виробництво припадає на природний газ. Поряд з таким швидким споживанням природного газу,

людством зараз все більше піднімається тема альтернативних або додаткових джерел енергії [1]. Це пов'язано з виснаженням традиційних запасів вуглеводнів, а існуючі методи їх видобутку не дозволяють розвивати некондиційні родовища. В таких умовах вочевидь, що перехід на альтернативні види палива і на нові види вуглеводнів стає важливим і актуальним. Одним з таких джерел природних ресурсів паливної, енергетичної та хімічної сировини є гідрати вуглеводневих газів [2].

Труднощі з видобутком метану з газогідратів пов'язані з тим, що вони залягають на великих глибинах [3]. Для отримання метану необхідно перетворити газгидрат в газ, тобто знищити його і вибрати газову складову на поверхню [4]. На сьогодні необхідно досягти розуміння управління процесами вивільнення метану з газогідратів. Справа в тому, що при неправильній розробці газогідратних покладів, може відбуватися мимовільне виділення метану з сусідніх зон, що містять газ [5]. Але, також гіпотетично існує загроза такого вивільнення в результаті глобального потепління і підвищення температури Океанів. Тоді газогідрати, що лежать на дні, можуть почати неконтрольно розкладатися навіть без втручання людини, так як при зміщенні фазової рівноваги з підвищенням температури середовища відбудеться ланцюгова реакція вивільнення газу. У цій ситуації актуальність володіння різними технологіями виробництва очевидна.

У дослідженнях американських, японських і європейських вчених в області фізики низьких температур, молекулярної фізики, термодинаміки і супрамолекулярної хімії особливе місце займають газогідрати різних газів. Такий інтерес пов'язаний з широким розповсюдженням газогідратів не тільки на планеті Земля, але і на планетах Сонячної системи. Газогідрати також широко поширені в космосі [6]. Вода і різні гази є постійними компонентами в космічному просторі, а будь-які природні гази утворюють там гідрати при певних умовах. В аспекті цих міркувань була визначена головна мета - описати процеси, що відбуваються в надрах дна Світового океану в зонах гідратних відкладень. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити ряд завдань, одна з яких розглядається в даній роботі, а саме дослідити фізико-математичні моделі формування і розкладання газогідратів в природних умовах, описати їх з точки зору класичних законів гідродинаміки.

## 2. Методика

Зростання наукової активності в цій, кілька десятиліть тому майже академічної галузі природознавства, пояснюється рядом факторів різноманітного характеру [7]. На думку автора роботи, будь-яке відкриття нового виду енергетичного ресурсу, а тим більше намір його розробки, вимагає всебічної оцінки впливу його видобутку на приземні шари геосфери, особливо у зв'язку з його можливим впливом на процеси, що призводять до глобальної зміни клімату. Різні технології газогідратного виробництва, які сьогодні розробляються в світі, повинні враховувати загрозу неконтрольованого вивільнення газу в разі порушення температуро-тиску фазової рівноваги.

Для розробки додаткового нового енергетичного ресурсу необхідно розуміти процеси, що відбуваються в надрах Землі всередині газогідратних покладів як в умовах їх формування, так і при їх розробці [8]. Розуміючи особливості їх генезису, розробивши алгоритм відкриття і видобутку з урахуванням геологічної і морфологічної структури кожного конкретного родовища [9], з'ясовується можливість виробити комплексний підхід і технологічні схеми, засновані на розумінні природних процесів в глибоких геологічних структурах з такою технологією видобутку газу з газогідратного поля, яка надасть максимально м'який вплив на навколишнє середовище. Беручи до уваги масштабні світові дослідження в цій області [10], необхідно дослідити природу взаємодії всіх процесів в розглянутих системах,

детально вивчити фазові переходи газогідратних систем різного складу в кожній конкретній області і врахувати їх при розробці схем видобутку ресурсів.

Для опису процесів були розроблені моделі існуючих родовищ газогідратів [11]. У той же час автор пропонує визначення терміну газогідратні відкладення. Родовища газогідратів необхідно розуміти як геологічне утворення, тобто певний обсяг породи, пористий простір якої заповнено речовиною різних структур, що мають вигляд від пухкого снігу до твердого льоду, який для них є вмисною породою. Як і у випадку з традиційними мінералами. Газогідрати також зустрічаються як чистий лід. При цьому вмисні породи просто відсутні [12].

Газогідратне родовище в природному явищі - це простір, що складається з тіла пласта, що складається з двох фаз - твердої фази - скелета вмисної породи, і газогідрату у вигляді льоду, що заповнює простір порового середовища. Під час розкладання газогідрату в системі з'являється газова фаза вільного газу і вивільненої води. Таким чином, для вивчення процесів, що виникають при розвитку, в роботі розглядається рух рідкого і газового компонента через пористий простір вмисних порід. В дослідженнях автор приймає за основу літологічний склад і властивості порід-господарів, які в свою чергу генетично [11] засновані на особливостях геологічної будови продуктивних верств.

### 3. Результати та обговорення

Потік рідин і газів через пористі середовища був проаналізований в ряді робіт М. Маскета, Л. С. Лейбензона, П. Ю. Полубаринової-Кочини, А. Е. Шейдегера, Р. Коллінза та інших.

Для опису процесів, що відбуваються в родовищі газогідратів при його відкритті і розвитку, автор бере за основу процеси, які досить добре вивчені і описані в літературі для порід нафтових і газових резервуарів (Ханін А.А.). Однак, беручи до уваги генетичні особливості порід, що містять газогідрати, при описі цих процесів автор пропонує корекційний фактор «генезису газогідрату» [13].

Вивчення і опис всіх процесів, що відбуваються в газогідратному утворенні, передбачає обов'язкове теоретичне обґрунтування взаємозв'язку між пористістю, проникністю і насиченням порового простору газогідратом, яке й пропонується розглянути далі.

Проникність пористого середовища по відношенню до рідин і газів розглядається в роботі в класичному вираженні основного закону гідрогеології - як здатність цього середовища пропускати рідини або гази через себе при наявності падіння тиску. Проникність є властивістю пористого середовища і мірою його провідності для рідин і газів. Стабільна швидкість потоку і її напрямок пов'язані з різними фізичними властивостями рухомої рідини (щільність, в'язкість, стисливість, еластичність і т.д.), а також зі специфікою геометрії простору пор (розмір перетину і форма порових каналів, їх розподіл в просторі), що зумовлює ємність пористого середовища.

Питання потоку рідин і газів через пористі середовища викладені в монографіях Г. Н. Каменських (1933), Л. С. Лейбензона (1947), С. Ю. Полубаринова-Кочина (1952), Мушкет (Мускат, 1937, 1949), Манегольд (Манегольд, 1955), Карман (Карман, 1956), Шейдегер (Шейдегер, 1957) та ін. Процес руху води в пласті буде здійснюватися за основним законом гідрогеології - законом Дарсі.

$$Q = -Fk \frac{\Delta P}{l},$$

де  $F$  – область поперечного перерізу, перпендикулярна напрямку потоку;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, званий коефіцієнтом Дарсі, який залежить від проникності

утворення;  $\Delta P$  – падіння тиску, що викликає фільтрацію на шляху, довжиною  $l$ . Знак мінус у виразі для  $Q$  показує, що потік має напрямок, протилежний підвищенню тиску. Дарсі проводив свої дослідження тільки з водою, в'язкість якої дорівнює одиниці. Для того, щоб формула Дарсі використовувалася для інших рідин, в гідрогеологічних розрахунках використовується корекція, застосування якої також вірно при описі процесів, що відбуваються при розкладанні газогідратів. Мова йде про те, що коефіцієнт  $k$  в залежний від проникності пласта обернено пропорційний в'язкості  $\mu$  і пропорційний щільності  $\rho$ :

$$k \approx \frac{\rho}{\mu}.$$

Таким чином, Дарсі була дана нова константа:

$$k' \approx \frac{\mu}{\rho} k.$$

А для зручності розрахунків Дарсі ввів наступну константу:

$$k \approx \frac{k'}{g'},$$

де  $g$  – прискорення гравітації;  $k$  – проникність або пропускна здатність резервуара.

Також для оцінки проникності порід в гідрогеології широко використовується лінійний закон Дарсі, згідно з яким швидкість фільтрації рідини в пористому середовищі пропорційна градієнту тиску і обернено пропорційна динамічній в'язкості рідини. При описі процесу фільтрації при дисоціації газогідрату в пористому середовищі газогідратного родовища пропонується взяти за основу цей лінійний класичний закон і використовувати наступний вираз, який застосовується до нестисливої рідини, щільність якої не залежить від тиску:

$$v \approx \frac{Q}{F} = k \frac{1}{\mu} \frac{\Delta P}{L},$$

де  $v$  – лінійна швидкість фільтрації;  $Q$  – об'ємна витрата рідини за одиницю часу;  $F$  – площа поперечного перерізу елемента пласта;  $k$  – проникність;  $\mu$  – в'язкість рідини;  $\Delta P$  – падіння тиску;  $L$  – довжина пористої частки пласта, про який йде мова.

При цьому у нас є можливість визначити проникність, яка є константою, що характеризує пористе середовище. У запропонованому методі можна в описі майбутнього процесу потоку рідини в пористому середовищі під час дисоціації газогідратного шару прогнозувати індекс в'язкості вивільненої води, в результаті чого отримувати розрахункову проникність:

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta P F}.$$

Таким чином, запропонований підхід математичного опису процесу фільтрації вивільненої води при дисоціації газогідрату на основі лінійного закону Дарсі має

наукову новизну, оскільки на сьогоднішній день такий підхід не висвітлювався у науковій літературі по газогідратним покладам.

В аспекті розгляду цих процесів необхідно приділити особливу увагу мінливості проникності при русі рідин і газів вздовж пласта.

Зміна проникності пояснюється прослизанням газу. При високому середньому тиску середня довжина вільного шляху молекул значно знижується. Коли діаметр капіляра співмірний з довжиною середнього вільного шляху молекули газу, що є функцією розміру молекули і кінетичної енергії газу, відбувається прослизання газу. Цей процес називається ефектом Клінкенберга і залежить від властивостей газу, який був використаний в емпіричних дослідженнях для визначення проникності порід. При високому тиску проникність, яка виміряна з газу, наблизиться до проникності, виміряної з рідини. За словами Л. Клінклінберга, якщо породи не містять набряклого компонента, то проникність в газі практично збігається з проникністю в рідкій фазі. Виходячи з цього, автор приймає цей стан в моделі відкладень газогідратів, що складаються з переломлених магматичних порід або пісковиків.

В окремих випадках, а саме в залежності від особливих горногеологічних умов залягання газогідратного покладу, слід мати на увазі, що, рівняння Дарсі застосовується тільки в певних межах швидкості фільтрації. Відхилення від закону Дарсі спостерігається, коли швидкість потоку у вузьких фільтруючих каналах настільки велика, що сила інерції буде збільшуватися разом з силою внутрішнього тертя. У гідродинаміці відношення сили інерції до сили внутрішнього тертя вимірюється числом Рейнольдса (Re):

$$\text{Re} = \frac{\frac{\rho q^2}{l}}{\frac{\rho g l}{l^2}} = \frac{\rho g l}{\mu},$$

де  $\rho$  – щільність;  $q$  – лінійна швидкість;  $\mu$  – в'язкість;  $l$  – довжина.

Число Рейнольдса є критерієм переходу потоку з ламінарного режиму на турбулентний (Шейдеггер, 1960; Требін, 1959; Ромм, 1963, 1966 та ін.).

У випадку ідеально гладкого циліндра турбулентна область починається при  $\text{Re} = 1000$ . Ламінарна течія в пористому середовищі зберігається при  $\text{Re} < 1$ . За Фенчер і Льюїс застосування закону Дарсі для різних пісків і слабо ущільнених пісковиків можливе при  $\text{Re} = 1 \div 10$ . При величині Re вище зазначеної межі спостерігається більш високий опір течії. Критичне число Рейнольдса характеризується значенням

$$\text{Re}' = \frac{\rho g d}{\mu} \leq 1,$$

де  $d$  – середній діаметр зерна.

За словами Г. Ф. Требіна (1959), який вивчав фільтрацію газу через різні пористі середовища, порушення лінійного закону фільтрації Дарсі відбувається при значенні  $\text{Re} = 0,2 \div 0,3$ .

При описі процесів фільтрації газу автор пропонує враховувати вищевказані граничні умови в кожному конкретному випадку, тобто по відношенню до кожного виду газогідратних родовищ [].

При русі вздовж водостійких шарів, гази поведуться інакше, ніж рідини. Гази ковзають по стінках перегородок, в той час як рідка фаза, взаємодіючи з ними в граничному шарі, щільно прилипає до водоупору, даже злегка диффундуючи в її зовнішній шар.

Таким чином, очевидно, що під час дисоціації газогідрату газова фаза буде ковзати по капілярах з більшою швидкістю, ніж вивільнена вода. При розробці природних

родовищ газогідратів I і II типів [], ця закономірність сприяє більш оптимальному видобутку газу з родовища.

Розсувна корекція грає роль, якщо радіус капіляра дорівнює середній вільній довжині шляху молекули газу або має однаковий порядок. Потік газу в породі з тонкою системою порових каналів розраховується за формулою

$$q_1 = \frac{kP_{cp}\Delta p}{\mu p_1} + c\sqrt{\frac{T\Delta p}{Mp_1l}},$$

де  $q_1$  – обсяг газу, що проходить за одиницю часу (сек/хв/добу);  $k$  – проникність;  $\mu$  – в'язкість;  $\Delta p$  – падіння тиску по краях лінії фільтрації ( $p_2 - p_1$ );  $P_{cp}$  – середній тиск ( $\Delta p / 2$ );  $l$  – довжина шляху фільтрації газової фази від точки розкладання до стінки свердловини, з граничним станом тиску  $p_1$ ;  $c$  – константа ковзання для порід, що вміщують газогідрат;  $T$  – температура покладу;  $M$  – молекулярна маса видобутого газу.

П. Карман (1956) наводить дані про те, що для різних пористих середовищ проникність і ковзні константи є постійними значеннями, які не залежать від властивостей проточного газу. Якщо діаметр пір менше  $10^{-3}$  см, рух газу не підкоряється закону Дарсі, а процес відбувається ковзанням, згідно з теорією Кнудсена. На основі вимірювань П. Карман розрахував значення розсувних коефіцієнтів для потоку Кнудсена в пористих середовищах, коли через систему тонких пір газу проходить більше, ніж рідини.

Таким чином, якщо є відхилення від умов, які відповідають закону Дарсі, а саме во вміщуючих породах газогідратного родовища з розміром пор менше  $10^{-3}$  см, газ перейде до виробничої свердловини, а вивільнена вода залишиться практично вся в породах-господарях.

Слід підкреслити, що процес просування як газової, так і рідкої фази відбувається в кожен момент часу з локальною швидкістю, що змінюється від точки до точки через мікрооднорідність простору порового середовища і звивистості порових каналів. Цей процес просування газових або рідких фаз обумовлений нерівностями, шорсткістю, звивистістю і різноспрямованістю порових каналів, які притаманні осадовим породам донних відкладень, генезис яких ліг в основу відповідної генетичної класифікації автора []. Процес потоку рідин і газів через пористі середовища описується формулою, що складається з лінійних і квадратичних членів з урахуванням впливу в'язкості і сил інерції. Ця формула фільтрації найчастіше використовується в розрахунках газової динаміки при складанні проектів з розробки газових родовищ. У лабораторних дослідженнях проникності гірських порід його використовують відносно рідко, але для опису процесу в даному випадку цілком прийнятна:

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{\mu v}{k_\mu} + \frac{\rho v^2}{k_\rho},$$

де  $\Delta p / \Delta l$  – градієнт тиску;  $v$  – швидкість фільтрації;  $\mu$  – в'язкість рідини або газу;  $\rho$  – щільність рідини або газу;  $k_\mu$ ,  $k_\rho$  – постійні коефіцієнти, що характеризують пропускну здатність порід-господарів, в залежності від його структурних особливостей внаслідок їх генезису.

Зв'язок між витратою рідини  $Q$  і градієнтом тиску  $\Delta p$  був встановлений як

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = aQ + bQ^2,$$

де  $a$  і  $b$  – в'язкість і інерційні коефіцієнти опору пористого середовища відповідно.

#### 4. Висновки

Встановлені та описані процеси, що відбуваються у поровому просторі газогідратного покладу. На основі виявлених генетичних закономірностей природних родовищ газових гідратів, виконано теоретичне обґрунтування взаємозв'язку пористості, проникності та насиченості газогідратом різних типів порід, що вміщують. На основі речовинного складу порід, що вміщують, і особливостей глибинно-тектонічних структур, запропоновано аналітичне рішення процесів ковання звільненого газу по пласту до експлуатаційної свердловини.

Описуючи таким чином процеси, що відбуваються в поровому просторі глибоких відкладень Світового океану, стає можливим класифікувати різні види родовищ та прийняти відповідні схеми їх розкриття. Автор переконаний, що це стане необхідною реальністю в майбутньому, а такий підхід буде затребуваний майбутніми розробниками покладів

#### Література

1. Makogon, Y.F. (2010). Natural Gas Hydrates – A Promising Source of Energy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2(1), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.12.004>
2. Shnyukov, E.F., Kobolev, V.P. (2017). Gazogidraty Chernogo morya - potencial'nyy istochnik energii (analiticheskij obzor). *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, (3), 5-23. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/145174>
3. Makogon, Yu.F. (2010). Gazogidraty. Istoriya izucheniya i perspektivy osvoeniya. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, (2), 5-21.
4. Kvenvolden, K.A. (2003). Natural Gas Hydrates: Background and History of Discovery. In *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments, Coastal Systems and Continental Margins*; Max, M.D., Ed.; Kluwer: Dordrecht, The Netherlands, 9-16.
5. Makogon, Y.F. (1997). *Hydrates of Hydrocarbons*. Penn Well, Tulsa, USA, 516 p.
6. Kvenvolden, K.A. (1988). Methane Hydrate – A Major Re-servoir of Carbon in the Shallow Geosphere? *Chemical Geology*, 71(1-3), 41-51. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90104-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0)
7. Shnyukov, E.F., Ziborov, A.P. (2004). Mineral'nye bogatstva Chernogo morya. *Nauchn. izd. NAN Ukrainy*, 95-96.
8. Dyadin, Yu.A., Gushchin, A.L. (1998). Gazovye gidraty. *Sorosovskij obrozovatel'nyj zhurnal*, (3), 55-64.
9. Maksymova, E., & Kostriyska, S. (2018). Geological and structural prerequisites of gas-bearing capacity and gas hydrate formation in the World Ocean (in terms of the Black Sea). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(2), 294-304. <https://doi.org/10.15421/111853>
10. Saik, P., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Sai, K., & Merzlikin, A. (2018). Innovative Approach to the Integrated Use of Energy Resources of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 221–231. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.221>
11. Maksimova, E.O. (2016). Osobennosti mestorozhdenij gazovykh gidratov pri ih razrabotke v razlichnykh gorno-geologicheskikh usloviyah. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraïni "Kiïvs'kij politekhnichnij institut". Seriya «Girnictvo»*, (30), 67-75. <http://mining.kpi.ua/article/view/68013>
12. Kobolev, V., & Verpakhovskaya, A. (2014). Skopleniya gazo-vykh gidratov v paleodel'te dnepra kak ob'ekt seysmicheskikh issledovaniy. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Mirovogo Okeana*, 1(35), 81-93
13. Maksymova, E. (2018). Selecting the Method of Gas Hydrate Deposits Development in Terms of the Regularities of Their Formation. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 103-108. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.103>