

Ориентировочно объём поплавок можно определить исходя из силы тяжести поплавок и минимальной плотности пульпы. Определим объём V из формулы (2), подставим $P=m \cdot g$ и $\gamma_n = n \cdot 10^3$ кг/м³ тогда

$$V = \frac{P}{\gamma_n g} = \frac{mg}{\gamma_n g} = \frac{m}{\gamma_n} 10^{-3} \text{ м}^3, \text{ где } P, m - \text{соответственно сила тяжести и мас-}$$

са поплавок, V – объём части поплавок, погруженного в жидкость.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом внедрение предлагаемого поплавкового датчика создает возможность определения содержания магнитных фракций в твердой фазе пульпы и её плотности в технологических потоках, что позволяет повысить предстательность и точность контроля и для дальнейшего использования при разработке систем автоматического управления процессами обогащения железных руд.

Список литературы.

1. Хан Г.А. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. -М.: Недра, 1979. –253с.

2. Буйковый микропроцессорный плотномер ТМ–1. «Союзцветавтоматика», Россия. (www/scma.ru/products).

УДК 665. 612:622.691.2

Л.О. ПЕДЧЕНКО, ст. викладач,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВИРОБНИЦТВО І ЗБЕРІГАННЯ ГАЗОВИХ ГІДРАТІВ

Запропоновано спосіб і основні елементи технології виробництва гідратних блоків гідратоутворюючого газу великих розмірів. Запропоновано зберігання газу в газогідратній формі здійснювати в наземних газоопорних оболонкових спорудах. Як об'єкти зберігання пропонуються газогідратні блоки із внутрішнім джерелом енергії, законсервовані шаром льоду. Обґрунтовано конструктивні особливості даних споруд. Установлено термодинамічні параметри процесу зберігання газогідрату.

Предложено способ и основные элементы технологии производства гидратных блоков гидратообразующего газа больших размеров. Предложено хранение газа в газогидратной форме осуществлять в наземных газоопорных оболочковых сооружениях. В качестве объектов хранения предложены газогидратные блоки с внутренним источником энергии, законсервированные слоем льда. Обоснованы конструктивные особенности данных сооружений. Определены термодинамические параметры процесса хранения газогидрата.

A method and basic elements of technology of production of large sizes of ice hydrate blocks with gas formative the hydrate is offered in work. The authors propose to implement the storage of gas in the hydrate form in the terrestrial Inflatable structures. As an object storing they propose the gas hydrate blocks with internal the energy source which were preserved with the ice. The design features are substantiated for these constructions. Thermodynamic parameters are defined for the process of storage of the gas hydrate.

Проблема та її зв'язок за науковим та практичним. Скорочення запасів вуглеводневих паливних корисних копалин, віддаленість переважної більшості їх родовищ від ринків збуту, сезонні коливання обсягів споживання енергоресурсів та ряд геополітичних чинників сьогодення актуалізують пошук нових джерел енергії, нових технологій її передачі й акумулювання, нових технічних рішень переміщення і накопичення природних енергетичних ресурсів. Усе це повною мірою стосується вуглеводневих газів і перш за все природного. При цьому його споживання у світі постійно зростає.

Перспективним напрямом розв'язання перелічених проблем є впровадження технологій, заснованих на здатності молекул води і газу за певних термобаричних умов утворювати газові гідрати.

В 1 м³ гідрату міститься 160 м³ газу. У його складі значні об'єми газу можуть тривалий час зберігатися при атмосферному тискові та незначній від'ємній температурі [1]. Виходячи із цього, значний потенціал широкого промислового впровадження має технологія транспортування і зберігання природного газу у складі газових гідратів.

На сьогодні така газогідратна технологія розглядається як серйозна альтернатива традиційним технологіям, оскільки є найбільш безпечною та має низку суттєвих переваг. Однак нині вона знаходиться на стадії вдосконалення і розроблення елементів технологічного ланцюга.

Аналіз досліджень та публікацій. На особливу увагу заслуговують проекти транспорту природного газу у вигляді гранул та газогідратної суспензії, розроблені в Японії та Норвегії [2]. Лабораторні експерименти показали, що для зберігання концентрованої газогідратної суміші необхідно підтримувати тиск у межах 1 МПа при температурі 275 К. Такі умови подібні до умов, створюваних на морських суднах для перевезення зріджених нафтових газів (LPG). Але вони тільки підвищують собівартість транспортування газу.

Відомі також проекти транспортування газогідрату у вигляді газогідратних гранул. Принципові переваги сухого гранульованого газогідрату в тому, що його можна зберігати за незначних від'ємних температур та атмосферному тиску без значних втрат газу. Застосування саме таких технологій знижує вартість морських перевезень газу.

Однак гранульований газогідрат, який на сьогодні розглядається як

основна форма його транспортування, має ряд недоліків. Перш за все це змерзання гранул у суцільну і досить міцну структуру. Таку газогідратну масу важко видалити із судна без її часткової дисоціації в результаті механічної дії при розпушуванні [1]. Крім того, заповнення об'єму транспортного засобу гранульованим гідратом становить лише 78% [3].

Найефективнішим варіантом заповнення транспортного засобу (майже 100%) можна вважати монолітні блоки великих розмірів, проте технології їх промислового виробництва поки не існує [4].

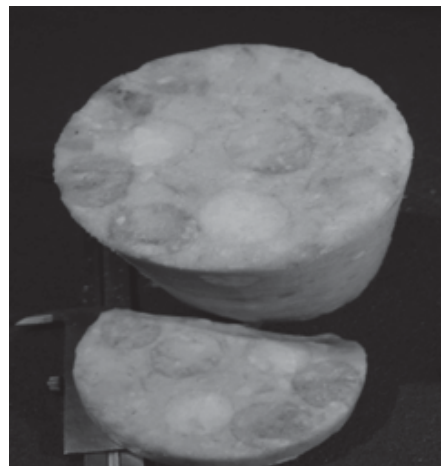
Постановка завдання Мета цієї роботи – розробка і аналіз технічних рішень з технології виробництва і зберігання природного газу в газогідратній формі.

Викладення матеріалу та результати. У роботі [5] запропоновано спосіб виробництва газогідратних блоків, законсервованих шаром льоду та охолоджених до температури, яка дозволяє здійснювати їх транспортування і зберігання без додаткового охолодження (із внутрішнім джерелом енергії) (рис. 1). Даний спосіб передбачає:

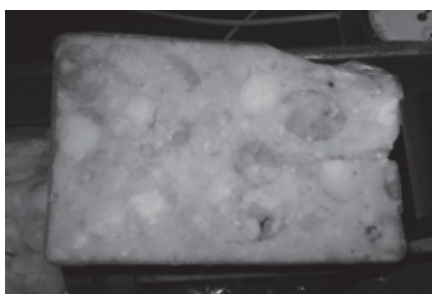
- підготовку газу і води;
- утворення газогідрату;
- сепарацію водогазогідратної суміші;
- переведення залишку води шляхом її зв'язування у газогідрат;
- охолодження газогідратної маси до необхідного рівня;
- формування із частини газогідрату (52% мас.) гранул (діаметром гранул 20 – 30 мм, мінімальної пористості) та подрібнення іншої (48% мас.);
- формування із суміші подрібненого і гранульованого газогідрату шляхом поступового стикування у блоків циліндричної чи призматичної (шестикутні призми) форми масою до 1500 кг та середньою пористістю 0,058 (частина подрібненого гідрату між гранулами після формування має пористість близько 0,12);
- примусову консервацію блоків шаром льоду переважно за рахунок акумульованого в них холоду шляхом дворазового розпилення на поверхню води з проміжним охолодженням азотом або повітрям (наприклад, з температурою 243 К).



а



б



в

Рис. 1 – Газогідратний блок, вироблений у лабораторії згідно з технологією, викладеною у патенті [5]: а – в процесі встановлення параметрів його стабільності; б – поперечний розріз; в – поздовжній розріз

Згідно результатів досліджень, для швидкого утворення якісної льодяної кірки і запобігання дисоціації газогідрату початкова температура блоків повинна бути не вищою ніж 269 К. При першій подачі ($1,16 \text{ л/м}^2$) вода проникає на глибину до 20 мм і після заморожування цементує поверхневий шар гідрату, утворюючи льодогідратну кірку. При повторному ($1,74 \text{ л/м}^2$) – остаточне закриття пор та заморожування на поверхні газогідрату захисного шару льоду товщиною 2 мм.

Утворені згідно запропонованого у роботі [5] способу газогідратні блоки придатні до тривалого зберігання і транспортування за атмосферного тиску та незначної від'ємної температури. На його основі розроблено проект дослідно-промислової установки виробництва гідрату вуглеводневих газів у формі блоків потужністю по газу 20 тис. $\text{м}^3/\text{добу}$ (рис. 2).

Згідно розрахунку сумарне навантаження на теплообмінники 5, 9, 17, 20, 30, 36 становить 720,286 кВт. За добу на технологічні потреби установки у літній період буде використано 2400 м^3 газу. Що становить 12% від її добової потужності. За температури повітря нижче 273 К у теплообмінниках 5 і 9 відбувається відведення основної кількості тепла гідратоутворення даного процесу (568,6 кВт, що становить близько 79 % теплової енергії, яку необхідно відвести). При цьому тепло, що відводиться є низькопотенційним. Тому, в холодну пору року навантаження на теплообмінники 5 і 9, а відповідно і на холодильну установку 21 можна повністю компенсувати за рахунок відведення тепла в

апаратах повітряного охолодження 4 і 8. Енергія при цьому витрачається тільки на привід вентиляторів і прокачування потоків. При температурі повітря нижче 273 К навантаження на холодильну установку становитиме $720,3 - 568,6 = 151,7$ (кВт). Витрати газу на привід холодильного агрегату становитимуть $14,5$ (м³/год). Із урахуванням 220 м³/добу газу, що витрачається на виробництво електроенергії за низьких температур, установка споживає 568 м³/добу газу, що становить 2,8% від її добової потужності.

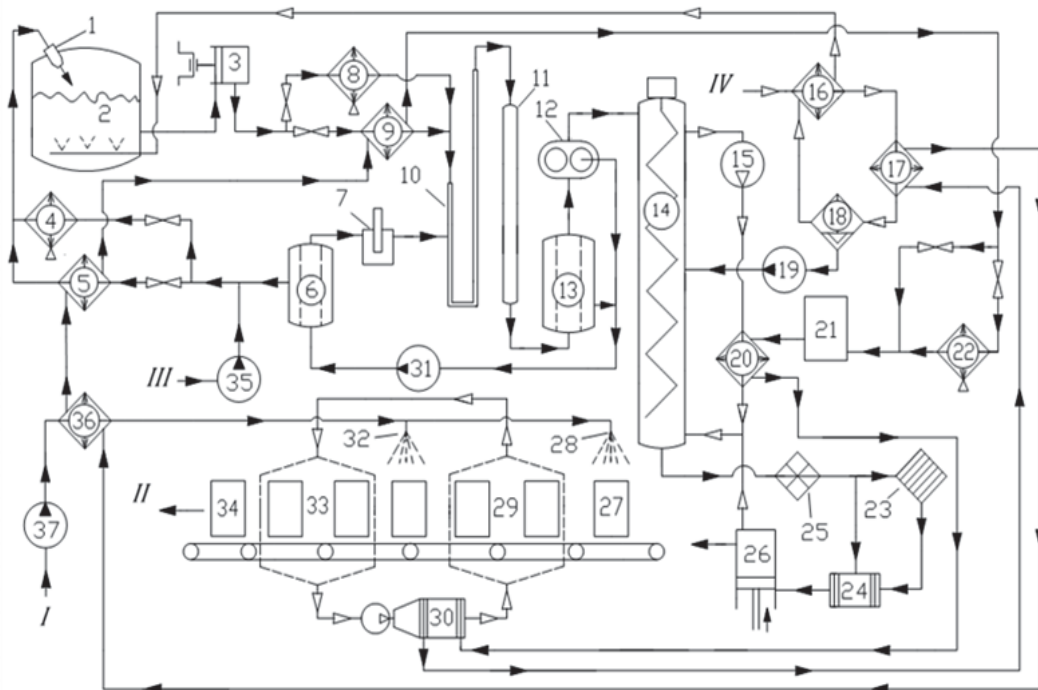


Рис. 2. Принципова схема установки із виробництва гідрату вуглеводневого газу у вигляді блоків потужністю 139 т/добу (20 тис. м³/добу газу): 1 – струминний апарат; 2 – реактор гідратоутворення; 3, 7, 19, 31, 35, 37 – насоси; 4, 8, 22, 30 – апарати повітряного охолодження; 5, 9, 16, 17, 20, 36 – теплообмінники; 6, 13, 18 – сепаратори; 10 – змійовик; 11 – уповільнювач; 12 – прес віджиму води; 14 – пристрій осушки газогідрату; 15 – компресор; 21 – холодильна установка; 23 – гранулятор; 24 – змішувач; 25 – подрібнювач; 26 – прес для формування газогідратних блоків; 27 – газогідратний блок; 28, 32 – форсунка; 29, 33 – зона обдуву блоків; 34 – газогідратний блок; потоки: I – III вода; II – цільовий продукт; IV – сировинний газ

Таким чином, на виробництво газогідрату, який не потребує його додаткового охолодження в процесі транспортування і зберігання, витрачається не більше 12% енергії у перерахунку на газ у літній період та 2,8% у зимовий. У той же час, наприклад, процес зрідження природного газу за LNG-технологією потребує витрати до 25 % енергії, що міститься у зріджуваному газі [6, 7].

Враховуючи рівень розвитку будівельних технологій зберігання вироблених газогідратних блоків пропонується здійснювати у наземних

газоопірних спорудах вкритих м'якою оболонкою (рис. 3) Такі гідратосховища являють собою замкнуті конструкції, що «лежать» на газовій подушці, тиск якої перевищує атмосферний лише для подолання зусилля формоутворення (вигину) і компенсації власної ваги оболонки (в області так званого лапласового надмірного тиску – 0,01–1,0 МПа) [8 – 12].

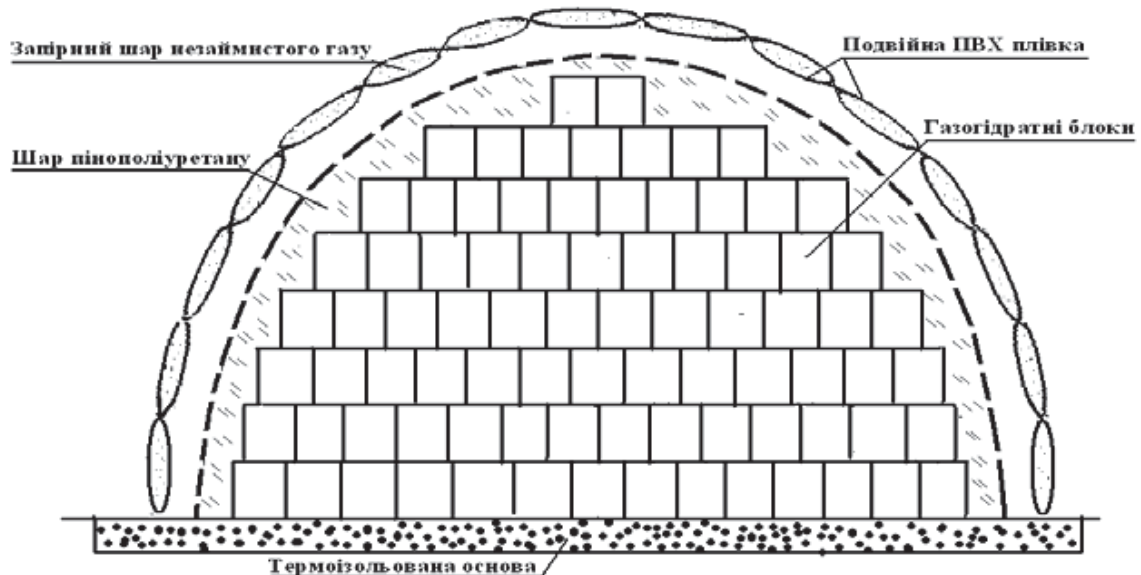


Рис. 3. Схема наземних гідратосховища

Основний елемент газоопірних споруд – м'яка оболонка. Однак, її теплотехнічні показники невисокі. Отже вона не в змозі забезпечити достатній рівень термічного опору. Тому дані споруди доцільно вкривати дво- і тришаровим покриттям.

Крім того, величину надлишкового, щодо навколишнього середовища, тиску в пневматичних дво- і тришарових конструкціях можна поступово змінювати від шару до шару, розподіливши розрахунковий надлишковий тиск між шарами. Це дозволяє збільшити несучу здатність і стабільність форми конструкції без збільшення міцності конструкційного матеріалу, зберігаючи одночасно підвищену герметичність. При цьому внутрішня оболонка підтримується різницею тиску між приміщенням і міжоболонковим простором.

У роботі [11] вказано, що загальний коефіцієнт теплопровідності їх двошарових укріттів складав 2,8 – 3,4 Вт/(м²·К), а при використанні внутрішньої відбиваючої обшивки міг бути знижений до 1,7 Вт/(м²·К). Аналогічні результати можна було отримати при використанні підвіски легкої оболонки, яка утворює замкнений (ізольований) повітряний прошарок. Оскільки другий купол не є опорним, для нього можна використати дуже легкі матеріали. Ще кращі ізолюючі властивості досягаються при розміщенні під оболонкою, для ефективного відбиття теплового випромінювання, додаткової підкладки (плівки) із дзеркальним покриттям.

Завдяки повітряному прошарку зменшується загальний коефіцієнт

теплопровідності і тим самим зменшуються втрати тепла.

Виходячи з особливостей зберігання газу в газогідратній формі для газоопірних гідратосховищ пропонується використати двошарове покриття із запірним шаром незаймистого газу чи газової суміші. Також, для обмеження надходження до сховища енергії від ґрунту необхідно передбачити термоізоляцію його основи.

Крім того, інформацію про склад незаймистої газової суміші, закачаної між шарами покриття, розділеного на окремі ізольовані сектори, пропонується використати для контролю їх цілісності. Характер зміни складу газу буде свідчити про порушення герметичності зовнішньої чи внутрішньої оболонки відповідно.

У газоопірних спорудах, які пропонується використати в якості гідратосховищ необхідно підтримувати температурний режим, який дозволяє газогідрату знаходитись в стабільному стані за тиску близькому до атмосферного. Необхідний температурний режим сховища для холодного і теплого періодів року пропонується забезпечити за рахунок акумульованого в газогідратних блоках холоду і системи додаткового охолодження.

При проектуванні гідратосховищ у вигляді газоопірних споруд необхідно враховувати теплотехнічні особливості захисних конструкцій, які визначають їх теплозахисні характеристики, оцінку тепловтрат споруд в холодний період року і теплонадходження від сонячної радіації в теплий період року.

Як приклад розглянемо зберігання 5,2 млн м³ н.у. природного газу у формі гідрату – блоків великого розміру (2870 т газогідрату), на прикладі наземного сховища газоопірного типу. Діаметр півсферичного купола при цьому складе 50 м.

Методику розрахунку теплозахисних характеристик оболонки газоопірних споруд (опору теплопередачі R_0 , м²·К/Вт; повітропроникності I_0 , кг/м²·ч; теплової інерції D) наведено в роботах [11 – 13].

Процес теплопередачі в гідратосховищі типу газоопірної оболонки представлено на рис. 4.

Розглядали два варіанти зберігання в сховищі газогідрату: газогідратних блоків без льодяної кірки та блоків законсервованих шаром льоду.

Для розрахунків брали середню температуру січня і липня для лісостепової зони: (січень – 265 К, липень – 293 К) [14, 15].

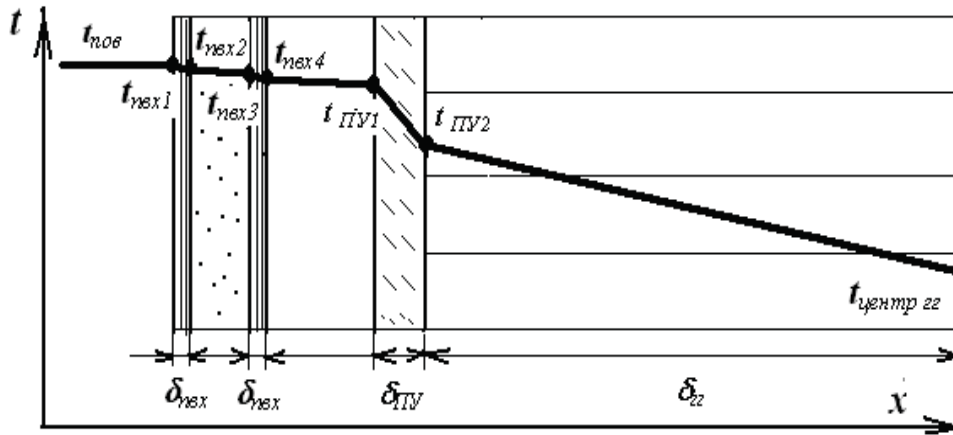


Рис. 4. Процес теплопередачі в гідратосховищі типу газоопорної оболонки: $\delta_{пвх}$, $\delta_{ПУ}$ і $\delta_{гг}$ – товщина шарів ПВХ, пінополіуретану і газогідрату; $t_{пвх1}$ і $t_{пвх2}$ – температури на зовнішній і внутрішній поверхні зовнішнього шару покриття; $t_{пвх3}$ і $t_{пвх4}$ – температура на зовнішній і внутрішній поверхні внутрішнього шару покриття; $t_{ПУ1}$ і $t_{ПУ2}$ – температура на зовнішній і внутрішній поверхні шару пінополіуретану; $t_{центр\ гг}$ – температура в центрі газогідратної маси; $t_{пов}$ – температура повітря

Приведений термічний опір покриття гідратосховища ($R_{покр}$) складає 0,34 і 0,28 ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт відповідно для зими і літа. Тоді взимку в гідратосховище надходить тепла

$$q_{зим} = \frac{1}{R_{покр}} (t_{зов} - t_{вн}) = \frac{1}{0,34} (-8 - (-15)) = 20,58 \text{ (Вт/м}^2\text{)}, \quad (1)$$

де $t_{зов}$ і $t_{вн}$ – температура повітря відповідно ззовні і під покриттям сховища, К.

Загалом тепловий потік у сховище через покриття у зимовий період складає $Q_{зовн.зим.} = 80,77$ кВт.

Добову амплітуду коливань теплового потоку A_q визначали за формулою

$$A_q = \frac{1}{R_{занір.літ.}} \cdot (0,5 \cdot A_{тн} + \rho_{ног}(J_{max} - J_{cp}) / \alpha_n), \quad (2)$$

де $A_{тн}$ – максимальна амплітуда добових коливань температури повітря у найтепліший місяць року, $^{\circ}\text{C}$; J_{max} , J_{cp} – максимальне і середньодобове значення суми сонячної радіації, МДж/м^2 [15, 16].

Отже, кількість тепла, що надходить в гідратосховище влітку, становить

$$q_{літ.} = \frac{1}{R_{занір.літ.}} \cdot (((t_n + \rho_{ног} \cdot J_{cp} / \alpha_n) - t_{в}) + \beta \cdot (0,5 A_{тн} + \rho_{ног}(J_{max} - J_{cp}) / \alpha_n)), \quad (3)$$

$$q_{літ} = 104,19 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Тепловий потік через усю поверхню сховища складає $Q_{зовн.літ.} = 408,95$ кВт.

Таким чином, в гідратосховище навіть через двошарове покриття влітку і зимою надходить значний тепловий потік. Тому, для зниження

витрат на зберігання, газогідрат, після його укладки в сховище, пропонується вкривати шаром пінополіуретану товщиною 0,5 – 0,7 м. Даний матеріал має низьку теплопровідність і відмінні теплоізоляційні властивості. Його застосування дозволить підвищити термічний опір огороження сховища до 16,6 – 17,0 ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт, а отже суттєво знизити надходження тепла до газогідратної маси.

Результати розрахунків термодинамічних параметрів зберігання газу в газогідратній формі в наземних газоопорних спорудах показано в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок параметрів зберігання газу в газогідратній формі в наземних газоопорних сховищах

№ з/п	Термодинамічні параметри	Місяці року	
		Січень	Липень
1	Термічні опори, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт:		
	– теплоперехід, R_{α}	0,23	0,09
	– шару ПВХ покриття $R_{\text{ПХВ}}$	0,025	0,025
	– запірною шару, $R_{\text{запір}}$	0,22	0,18
	– покриття без шару поліуретану, $R_{\text{покр}}$	0,34	0,28
	– покриття з шаром поліуретану, $R_{\text{ПУ}}$	17,0	16,6
2.	Тепловий потік, Вт/м ² :		
	– до газогідрату без шару поліуретану, q	20,58	104,19
	– до газогідрату вкритого поліуретаном, $q_{\text{ПУ}}$	0,64	2,4
3.	Тепловий потік до газогідрату через оболонку, кВт:		
	– без шару поліуретану, $Q_{\text{зовн}}$	80,77	408,95
	– покритого поліуретаном), $Q_{\text{зовн ПУ}}$	2,53	9,36
4.	Потік енергії від землі через шар ізоляції, $Q_{\text{зем}}$, кВт	9,0	9,0
5.	Енерговитрати на охолодження $Q_{\text{хол}}$, кВт	6,6	15,3

На рис. 5 подано залежність кількості тепла, яке надходить в сховище, від температури зберігання газогідрату і температури повітря ззовні.

Згідно результатів експерименту по дисоціації примусово законсервованих газогідратних блоків, межею їх стабільного стану є температура плавлення льодяної кірки. Однак, для гарантованого запобігання дисоціації газогідрату їх зберігання пропонується здійснювати при температурі 270 К.

На рис. 6 наведено залежність кількості енергії яка надходить в сховище через покриття $Q_{\text{зовн}}$ та від землі $Q_{\text{зем}}$ і яку необхідно відвести за рахунок додаткового охолодження від температури зберігання газогідрату.

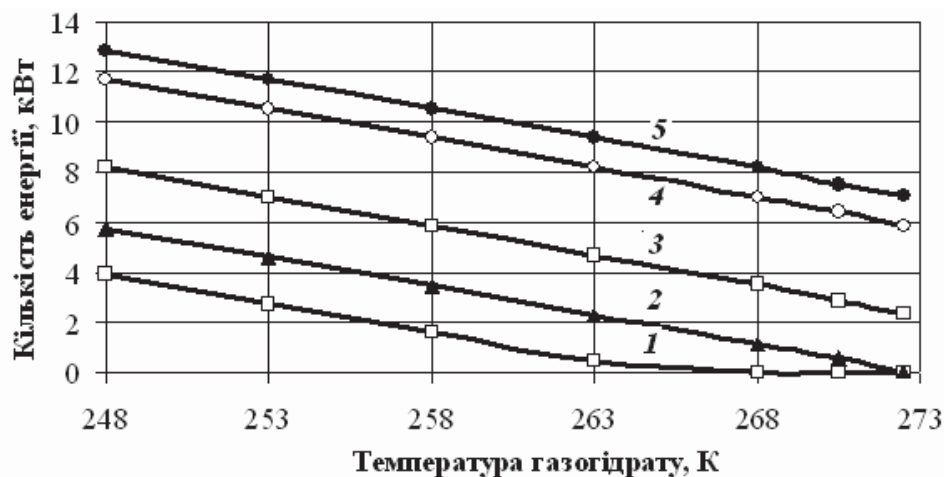


Рис. 5. Залежність кількості тепла, яке надходить у сховище, від температури зберігання газогідратних блоків і температури повітря (температура повітря: 1 – 265 К; 2 – 272,9 К; 3 – 283 К; 4 – 293 К; 5 – 298 К)

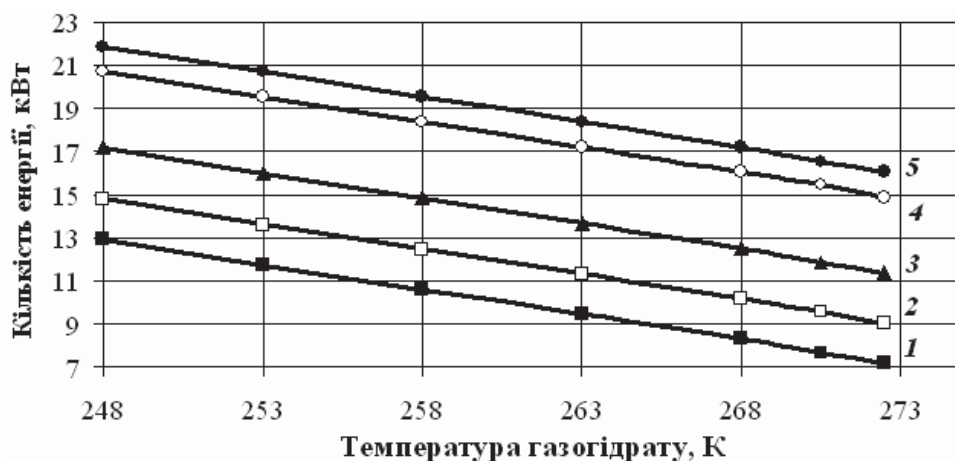


Рис. 6. Залежність кількості тепла, яке необхідно відвести, від температури зберігання газогідрату і температури повітря (температура повітря: 1 – 265 К; 2 – 272,9 К; 3 – 283 К; 4 – 293 К; 5 – 298 К)

Отже, згідно рис. 6 зберігання газогідратних блоків без примусової консервації при температурі 258 К потребує додаткового охолодження навіть узимку. Влітку воно досягає 18,36 кВт. Зберігання гідратних блоків законсервованих льодяною кіркою при 270 К дозволить знизити витрати до 15,56 кВт, тобто на 15,3%.

Оскільки, згідно запропонованої технології, газогідратні блоки виконують також функцію акумуляторів холоду, а їх початкова температура $t_{\text{поч}}$ становить 248 К, тому до моменту досягнення критичної температури на поверхні гідрату (270 К для законсервованих блоків і 258 К для блоків без льодяної кірки) гідратосховище додаткового охолодження не потребує.

У літній період ($t_{\text{нов}} \geq 293$ К) за умови встановлення стаціонарного теплового потоку, температура стінки зовнішнього шару пінополіуретану становитиме $t_{\text{ПУ1}} = 292,05$ К, а внутрішнього, а отже і поверхні газогідрату – $t_{\text{ПУ2=нов.гг}} = 274,8$ К. Це вказує на те, що для підтримання температури

газогідратної маси на рівні 258 К чи 270К необхідно застосовувати додаткове охолодження. Влітку коефіцієнти теплопередачі складуться: двошарового покриття гідратосховища – 40, шару поліуретану 0,045, газогідратної маси 0,38.

Розрахунки показали, що теплова інерція двошарового покриття гідратосховища є безінерційним ($D_{cm} < 1,5$), а поліуретан і газогідрат – мають велику інерцію ($D_{ПУ}, D_{ГГ} > 7$). Тому шар повітря між покриттям сховища і пінополіуретаном нагрівається значно швидше за шар поліуретану газогідратну масу. За 12 – 14 хв температура даного шару повітря зростає від 293 К до 292,05 К влітку і знижується від 265 К до 264,4 К взимку, а температура шару пінополіуретану і гідратної маси залишається практично незмінною.

На рис. 7 показано зміну у сховищі температури поверхні газогідратної маси без додаткового охолодження з часом для різних температур повітря над шаром пінополіуретану.

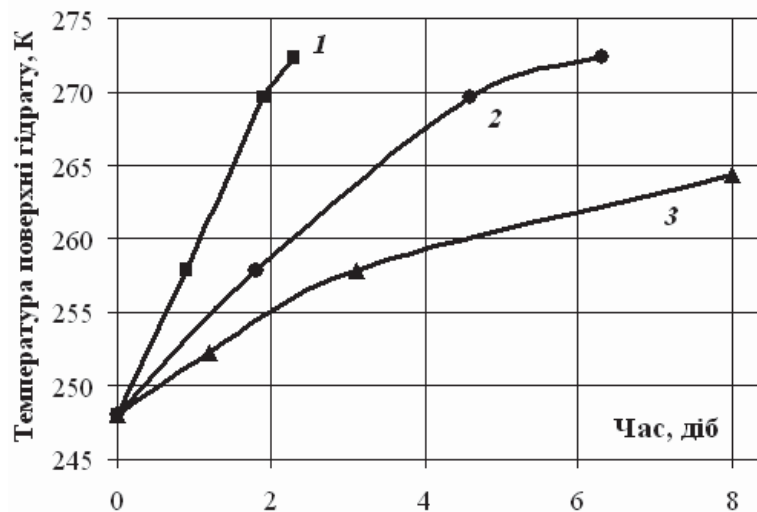


Рис. 7. Зміна температури поверхні газогідратної маси без додаткового охолодження з часом для різних температур повітря над шаром пінополіуретану у сховищі (температура повітря: 1 – 292,4 К; 2 – 272,9 К; 3 – 264,6 К)

У випадку нагрівання зовнішньої поверхні шару пінополіуретану влітку до $t_{ПУ1} = 289,6$ К, температура поверхневого шару газогідрату складе $t_{ПУ2=нов.гг.} = 269,6 \approx 270$ К. Причому процес нагрівання, завдяки шару пінополіуретану, триватиме майже 45 годин. Тобто протягом цього часу влітку газогідрат в сховищі може знаходитися без додаткового охолодження і його поверхня не буде дисоціювати.

У зимовий період за температури навколишнього середовища $t_{нов.} = 265$ К температура шару повітря між покриттям і поліуретаном майже вирівнюється із зовнішньою за 12 – 15 хвилин. Через 28 годин температура поверхні пінополіуретану вирівнюється із температурою повітря, а поверхня газогідрату нагріється до 252,2 К. Через 168 годин в результаті подальшого нагрівання обох шарів температура поверхні

газогідратної маси вирівнюється з температурою шару повітря над пінополіуретаном і становитиме 264 К. Отже, газогідратні блоки, законсервовані льодяною кіркою, за таких умов знаходяться в стабільному стані і не потребують додаткового охолодження (рис. 8).

У роботі [17] витрати на транспортування газогідрату обґрунтовано на рівні 4,9 % від кількості транспортованого газу.

Вони у нашому випадку склали майже 23,6% від величини загальних витрат. В таб. 2 наведено порівняння витрат на зберігання в наземних сховищах типу газоопорної оболонки охолоджених газогідратних блоків без примусової консервації та законсервованих шаром льоду залежно від пори року.

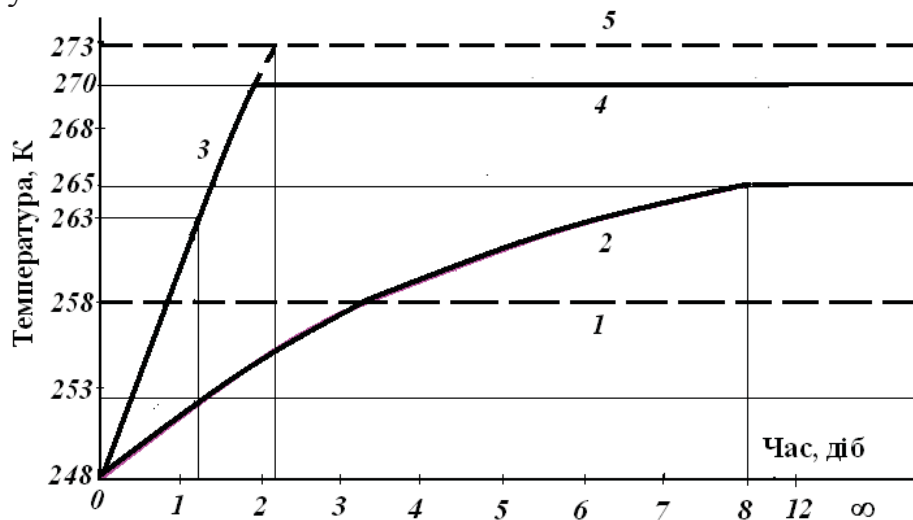


Рис. 8. Порівняння динаміки зміни температури поверхні газогідрату, законсервованого шаром льоду, та без консервації залежно від пори року: 1 – межа стабільності гідрату без консервації; 2 – зима (без додаткового охолодження); 3 – літо (без додаткового охолодження); 4 – літо (при додатковому охолодженні); 5 – межа стабільності гідрату, законсервованого шаром льоду

При зберіганні 5,2 млн м³ н.у. газу у формі гідратних блоків витрати на охолодження гідратосховища без їх примусової консервації у перерахунку на газ складуть 11,6 тис. м³ на рік, а законсервованих льодяною кіркою – 8,91 тис. м³. Отже економія енергоресурсу на зберігання газогідратних блоків за рахунок їх примусової консервації складе 10,22 % і 12,96 % відповідно в зимовий і літній періоди.

Витрати на зберігання газу у формі газогідратних блоків із внутрішнім джерелом енергії в пропонованих гідратосховищах складе менше 1% від загальних витрат технологічного ланцюга.

Виробництво гідрату природного газу потребує в середньому 533 кДж/кг енергії, яку необхідно відвести від реакційної зони. Для отримання газу із газогідрату зворотний процес (плавлення гідрату) потребує витратити такої ж кількості енергії, як і на його утворення. При цьому, собівартість виробництва холоду є досить високою. Однак різниця

температур між процесами утворення і дисоціації газогідрату в технологічному циклі може складати лише 5 – 20 К.

Таблиця 2

Порівняння витрат на зберігання в наземних сховищах типу газоопорної оболонки охолоджених газогідратних блоків (5,2 млн м³ н.у. газу) без примусової консервації та законсервованих шаром льоду залежно від пори року

Температура зберігання, К	Надходження енергії до сховища, МДж/доба	Дні зберігання	Витрата енергії на охолодження сховища		Витрата технологічного газу на зберігання 5,2 млн. м ³ газу у складі гідрату		Економія енергії за рахунок примусової консервації	
			МДж/доба	МДж	тис. м ³	%	тис. м ³	%
Літо								
270	1285,6	180	1071,4	192845	6,43	0,12	1,50	13,0
258	1586,3	180	1321,9	237946	7,93	0,15	-	-
Зима								
270	620,4	180	413,6	74442	2,48	0,05	1,19	10,2
258	916,7	180	611,1	110005	3,67	0,07	-	-
За рік								
270		360	1485	267287	8,91	0,17	2,69	23,2
258		360	1933	347951	11,6	0,22		

Крім того їх абсолютні значення близькі, або входять у межі річних коливань температури навколишнього середовища більшості регіонів видобування і споживання газу. Тому, з метою підвищення ефективності і конкурентоздатності технології транспортування природного газу у газогідратній формі, пропонується максимально (а при можливості повністю) рознести в часі процеси його виробництва і споживання. При цьому його виробництво, з метою ефективної утилізації тепла гідратоутворення пропонується здійснювати у холодну пору року (чи доби) при температурі повітря нижче 278 – 280 К, а його дисоціацію – навпаки у теплу (при температурі повітря вище 280 К (263 К)).

Принцип рознесення операцій утворення і плавлення газогідрату в часі і просторі передбачає транспортування і накопичення виробленого в холодну пору року газогідрату та його тривале зберігання до моменту плавлення в теплу. Дана ідея легко реалізовується за умови виробництва газогідрату у формі газогідратних блоків із внутрішнім джерелом енергії законсервованих льодяною кіркою, а його зберігання в наземних газоопірних гідратосховищах за нерівноважних умов.

При необхідності подальшого транспортування газу трубопроводом процес дисоціації здійснюється в замкнутому об'ємі при тискові 5,5 – 7,5 МПа та відповідній температурі (згідно рівноважних кривої для гідрату даного складу в межах $T = 288 - 290$ К).

Розміщенні гідратосховищ безпосередньо біля об'єктів споживання газу дозволяє процес дисоціації здійснювати при тискові газорозподільчих

мереж (0,2 – 0,5 МПа), а отже згідно рівноважних параметрів при значно нижчій температурі (275 – 277 К). Розрахунок витрат у процесі дисоціації наведено в таб. 3.

Таблиця 3

Порівняння витрат енергії на дисоціацію 2870 т (вмісту гідратосховища) примусово законсервованих газогідратних блоків та блоків без льодяної кірки залежно від пори року

Початкова температура газогідрату, К	Наявність льодяної кірки на блоках	Ефективна сонячна радіація МДж/м ² за добу, ($T_{пов} \geq 285K$)	Витрата енергії на дисоціацію 2870 т гідрату (вмісту сховища) за рахунок енергії				Економія газу за рахунок примусової консервації гідрату, тис.м ³ /рік	Економія газу за рахунок енергії сонця, тис.м ³ /рік	Всього економія газу, тис.м ³ /рік
			сонця		газу				
			перерах. на газ, тис. м ³	%	тис.м ³	%			
258	-	21,7 літо	594,26	100	0	0	-	594,26	594,26
270	+		561,10	100	0	0	33,16	561,10	594,26
258	-	3,0 весна-осінь	82,52	13,9	511,74	86,1	-	82,52	82,52
270	+		82,52	14,7	478,6	85,3	33,16	82,52	115,68
258	-	зима	0	0	595,62	100	-	-	-
270	+		0	0	561,10	100	33,16	-	33,16

Отже, при дисоціації гідратних блоків за рахунок енергії сонця можна економити до 594,26 тис. м³ природного газу на рік. Однак при дисоціації гідратних блоків без льодяної кірки на поверхні буде витрачатись на 33,16 тис. м³ газу більше (табл. 4). Основні витрати на процес регазифікації можуть здійснюватися переважно за рахунок енергії сонця і за рік для 5,208 млн. м³ становитимуть 2,69 %.

Запропоновані вище схемні рішення об'єднано у технологічний ланцюг транспортування, зберігання і використання природного газу за газогідратною технологією.

Він передбачає: підготовку газу; виробництво гідрату в холодну пору року у вигляді охолоджених блоків великого розміру, законсервованих льодяною кіркою; їх транспортування без додаткового охолодження; зберігання в наземних газоопірних гідратосховищах за атмосферного тиску та максимальної температури 270 К; споживання у теплу пору року газу, структурованої води, холоду, енергії стисненого газу.

Таблиця 4

Енерговитрати технологічного ланцюга виробництва, транспортування (морем) і зберігання газогідратних блоків (5,208 млн. м³ газу)

№ з/п	Складові технології	Витрати на складові технології		Економія енергії у перерахунку на газ за рахунок			
		%	у перерахунку на газ тис. м ³	примусової консервації		альтернат. джерел енергії	
				тис. м ³	%	тис. м ³	%
1	Виробництво	4,33	225,54	-	-	399,5	36,9
2	Транспортування	4,90	255,24	-	-	-	-
3	Зберігання	0,06	3,15	2,69	0,25	4,26	0,4
4	Дисоціація	2,69	140,38	33,16	3,06	561,1	51,8
	Σ	10,62	553,43	35,85	3,31	964,86	89,1

Таким чином, формування газогідрату у блоки великого розміру із внутрішнім джерелом енергії дозволяє їх зберігання здійснювати за атмосферного тиску із мінімальними витратами енергії, а примусова консервація блоків льодяною кіркою – на 12–14 К підвищити максимальну температуру зберігання. Крім того, використання природного холоду і енергії сонця на утворення і дисоціацію газогідрату та газоопірних оболонкових конструкцій із додатковою термоізоляцією в якості гідратосховищ дозволяє максимально (до конкурентного рівня) скоротити капітальні і енерговитрати на технологічний ланцюг транспортування природного газу в газогідратній формі.

Висновки та напрямок подальших досліджень

1. Для підвищення ефективності і конкурентоздатності газогідратної технології транспортування природного газу запропоновано спосіб виробництва газогідрату у формі блоків із внутрішнім джерелом енергії законсервованих льодяною кіркою.

2. На виробництво газогідратних блоків, що не потребують додаткового охолодження в процесі транспортування і зберігання витрачається, у перерахунку на газ, не більше 12% енергії у літній період та 2,8% у зимовий.

3. Зберігати газогідрат запропоновано у наземних газоопірних спорудах вкритих двошаровою м'якою оболонкою із запірним шаром незаймистого газу при нанесенні на його поверхню шару пінополіуретану товщиною 0,5 – 0,7 м.

3. Примусова консервація гідратних блоків льодяною кіркою дозволяє скоротити витрати енергії при зберіганні на 10,22% і 12,96 % відповідно в зимовий і літній періоди.

4. Примусова консервація блоків льодяною кіркою дозволяє на 12 –

14 К підвищити максимальну температуру зберігання (до 270 К).

5. З метою підвищення ефективності запропонованої технології запропоновано виробництво газогідрату запропоновано здійснювати у холодну пору року (добу) (температура повітря нижче 278–280 К), а його дисоціацію – у теплу (температура повітря вище 280 К) за рахунок енергії сонця.

Список літератури

1. Dawe R.A. Hydrate Technology for Transporting Natural Gas / R.A.Dawe, M.S. Thomas, M. Kromah // Engineering Journal of the University of Qatar. –2003. –Vol. 16. –P. 11–18.

2. Gas Hydrate Storage Process for Natural Gas / [R.E. Rodgers, Y. Zbong, R. Arunkumar, J.A. Etheridge, L.E. Pearson, J.Mc. Cown, K. Hogancamp] // GasTIPS. –2005. –№12. –P. 34–39.

3. Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets / H. Kanda //23rd World Gas Conference. – Amsterdam, 2006.

4. Современное состояние газогидратных технологий: обз. инф. / В.С. Якушев, Ю.А. Герасимов, В.Г. Квон, В.А. Истомин. – М. : ООО «ИРЦ Газпром», 2008. –88 с.

5. Патент України на винахід № 101882, МПК 6 C10L 3/10. Спосіб виробництва гідратів попутного нафтового газу з метою їх транспортування і зберігання / Л.О. Педченко, М.М. Педченко; заявник і власник патенту Педченко М.М. – № а 201111344; заяв. 26. 09.2011; опубл. 13.05.2013; Бюл. № 9.

6. Matteo Marongiu-Porcu The Economics of Compressed Natural Gas Sea Transport / Matteo Marongiu-Porcu, Xiuli Wang, Michael J. Economides // Russian Oil & Gas Technical Conference and Exhibition held in Moscow, Russia, 28–30 October, 2008.

7. Economides M.J. Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG) / M.J.Economides, Kai Sun, Subero G.U.// Journal SPE Production & Operations, Vol.21(2), 2006, pp. 318-324. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-92047-PA>.

8. Ермолов В. В. Воздухоопорные здания и сооружения / В.В. Ермолов. – М.:Стройиздат, 1980. –304 с.

9. Орса Ю. Н. Особенности архитектуры пневматических воздухоопорных сооружений. Пневматические строительные конструкции / Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983. –С. 383–435.

10. Шихирин В.Н. Эластичные механизмы и конструкции. Монография / В.Н. Шихирин, В.Ф. Ионова, О.В. Шальнев, В.И. Котляренко.– Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. –286 с.

11. Бубнер Э. Материалы и конструктивные формы пневматических сооружений и их применение в ФРГ. Пневматические строительные

- конструкции / Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983 –С. 83–112.
12. Федоров А.Б. Теплозащитные характеристики ограждающих конструкций каркасно-тентовых и надувных сооружений /А.Б. Федоров, А.И. Тютюнников // Мир строительства и недвижимости. –№ 4. –2004. –С. 30–31.
13. Алейников А.Е. Методики расчета теплотерь и теплопоступлений через ограждающие конструкции каркасно-тентовых и надувных сооружений /А.Е. Алейников, А.Б. Федоров, А.И. Тютюнников // СтройПРОФИЛЬ. – № 8(38). –2004. –С. 58–61.
14. СНИП 41–01–2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» / Госстрой России. –М.: Стройиздат, 2004. –60 с.
15. Будівельна кліматологія. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Національний стандарт України. ДСТУ – НБВ.1.1-27:2010. –Київ, Мінрегіонбуд України. –2011.
16. СНИП II–А.6–72. «Строительная климатология и геофизика». –М., Стройиздат, –1973.
17. Methane Hydrate Pellet Transport Using the Self-Preservation Effect: A Techno-Economic Analysis / [Gregor Rehder, Robert Eck, Markus Elfgen, Andrzej Falenty, Rainer Hamann, Nina Kähler, Werner F. Kuhs, Hans Osterkamp, Christoph Windmeier] // Energies. – 2012. – №5. – P. 2499 – 2523.

УДК 622.73

БУКИН С.Л. к.т.н., докторант кафедры обогащения полезных ископаемых, СЕРГЕЕВ П.В. д.т.н., профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, БУКИНА А.С. магистр кафедры обогащения полезных ископаемых, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ГАРМОНИЧЕСКИМ И БИГАРМОНИЧЕСКИМ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ

В статье изложены результаты лабораторных исследований процесса измельчения в гармоническом и бигармоническом поле колебаний рабочего органа. Установлены преимущества использования бигармонического режима работы вибрационной мельницы.

У статті викладено результати лабораторних досліджень процесу подрібнення в гармонійному і бігармонійному полі коливань робочого органу. Встановлено переваги використання бігармонійного режиму роботи вібраційного млина.

This paper describes the results of laboratory studies of the grinding process in the harmonic and biharmonic field fluctuations of the working body. Installed the advantages of using biharmonic mode vibration mill.