

УДК621.56:621.438: 66.065.5

**В.В. Клименко<sup>1</sup>, М.В. Босий<sup>1</sup>, В.П. Парафійник<sup>2</sup>, С.О. Прилипко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Кіровоградський національний технічний університет, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006

<sup>2</sup> ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе», вул. Горького, 58, м. Суми, 40004

## ГАЗОТУРБІННИЙ ПРИВІД З ГАЗОГІДРАТНИМ ДОТИСКУВАЧЕМ ПАЛИВНОГО ГАЗУ

*Розглянуто на основі газогідратної технології спосіб забезпечення працездатності газотурбінного приводу (ГТП) при наявності паливного газу, тиск якого нижче технологічно допустимого в камері згорання паливного газу ГТП. Надано схемне рішення газогідратного дотискувача паливного газу (ГДПГ) та описано принцип дії газотурбінного приводу з ГДПГ. Приведено цикл роботи ГДПГ і для конкретного складу паливного газу, його початкового тиску та тиску в камері згорання газотурбінного приводу визначено термодинамічні параметри реперних точок циклу.*

**Ключові слова:** Газогідрати – Природний газ – Утворення газогідратів – Плавлення – Теплоота гідратоутворення – Газотурбінний привід – Термотрансформатор

**В.В. Клименко<sup>1</sup>, Н.В. Босий<sup>1</sup>, В.П. Парафійник<sup>2</sup>, С.О. Прилипко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Кіровоградський національний технічний університет, пр. Університетський, 8, г. Кіровоград, 25006

<sup>2</sup> ПАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. Н.В. Фрунзе», ул. Горького, 58, г. Сумы, 40004

## ГАЗОТУРБІННИЙ ПРИВОД С ГАЗОГІДРАТНИМ ДОЖИМНИМ УСТРОЙСТВОМ ТОПЛИВНОГО ГАЗА

*Рассмотрен на основе газогидратной технологии способ обеспечения работоспособности газотурбинного привода (ГТП) при наличии топливного газа, давление которого ниже технологически допустимого в камере сгорания топливного газа газотурбинного привода. Предоставлено схемное решение газогидратного дожимного устройства топливного газа (ГДПГ) и описан принцип действия газотурбинного привода с ГДПГ. Приведен цикл работы ГДПГ и для конкретного состава топливного газа, его начального давления и давления в камере сгорания газотурбинного привода определены термодинамические параметры реперных точек цикла.*

**Ключевые слова:** Газогидраты – Природный газ – Образование газогидратов – Плавление – Теплоота гидратообразования – Газотурбінний привід – Термотрансформатор

### I. ВСТУП

Газотурбінний привід (ГТП) застосовують в різних сферах промисловості та енергетики, зокрема, в нафтовій та газовій галузях в складі газоперекручувальних агрегатів транспортування газу, в енергетиці – в складі установок парогазових і газотурбінних електростанцій [1]. В якості палива в ГТП використовують природний чи супутний нафтовий газ різного складу.

Для роботи найбільш розповсюджених ГТП виробництва України та Росії тиск паливного газу на вході в камеру згорання повинен складати 2,4 МПа, що не дозволяє їх експлуатацію при наявності паливного газу з меншим тиском. Тому у випадках, коли тиск газу нижчий 2,4 МПа, подача паливного газу в газотурбінний привід здійснюється за допомогою дотискного компресора [1]. Але компресорне обладнання високовартісне, вимагає додаткових витрат на підготовку паливного газу, складне в обслуговуванні при експлуатації.

Альтернативою компресорному обладнанню для підвищення тиску паливного газу може стати дотискувач, який працює на основі газогідратної термокомпресії [2 - 4].

### II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Газові гідрати являють собою льодоподібні кристалічні сполуки клатратного типу з молекул води і газу та ряду органічних речовин, які утворюються при певних термодинамічних умовах [2]. Умови початку гідратоутворення природних газів різної відносної густини приведено на рисунку 1.

Газогідратна термокомпресія (ГТТ) газів ґрунтується на тому, що гідратоутворювач у газогідратному стані займає суттєво менший об'єм, ніж у газоподібному. Так, наприклад, 1 м<sup>3</sup> гідрату метану вміщує 162,6 м<sup>3</sup> метану [2]. Процес стискування шляхом ГТТ безмашиний, одноступеневий, при будь-яких ступенях стискування близький до ізотермічного. Тиск для метану, природного та

супутнього нафтового газу та інших може бути визначений із рівняння стану при температурі плавлення газогідратів за питомим об'ємом. Наприклад, утворивши гідрат етану при 5,2 бар і 0°C та розклавши в замкнутому об'ємі при 95°C, отримаємо тиск 4000 бар [2].

На рисунку 2 надано схемне рішення газотурбінного приводу з газогідратним дотискувачем паливного газу (ГДПГ). Дотискувач, в якому здійснюється газогідратна термокомпресія паливного газу містить (рисунок 2): 6 – реактор утворення газогідратів; 7 – випарник; 8 – теплообмінник; 9 – розпилювач води; 10 – компресор термотрансформатора; 11 – конденсатор; 12 – газогідратний плавитель; 13 – насос; 14 – сепаратор; 15, 16, 17 – регулюючі вентилі; 18 – газогідратний дотискувач (позначений пунктирною лінією); 19 – газогідрати; 20 – газогідратна суспензія; I – потік газу в газопроводі; II – подача повітря; III – вихід продуктів згорання газу; IV – конденсат. Примітка: на схемному рішенні не показано додаткові компресор і конденсатор термотрансформатора.

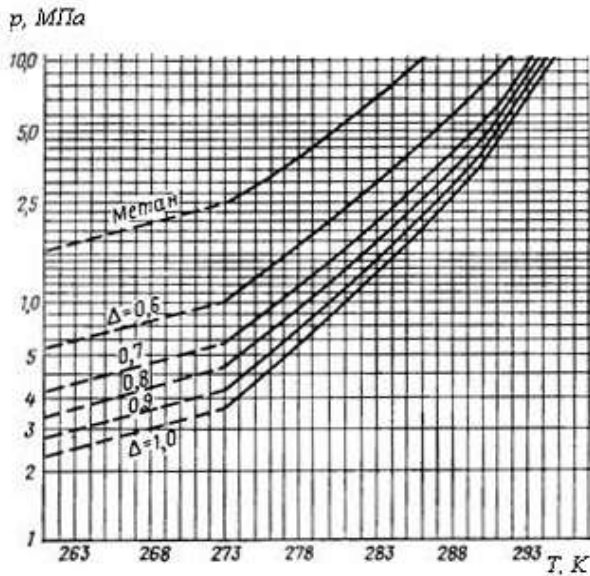


Рисунок 1 - Умови початку гідратоутворення природних газів різної густини [2].

сатор; 12 – газогідратний плавитель; 13 – насос газогідратної суспензії; 14 – сепаратор, 15, 16, 17 – регулюючі вентилі.

Основні процеси, які реалізуються в ГДПГ, зображено на діаграмі P-T (рисунок 3), а в таблиці 1 приведено значення термодинамічних параметрів реперних точок процесів, визначених наближеними розрахунками для природного газу наступного складу: CH<sub>4</sub>-94,12%; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> -2,92%; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - 0,92%; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0,42%; C<sub>3</sub>H<sub>12</sub> – 0,11%; C<sub>6+</sub> - 0,14%; CO<sub>2</sub> – 1,22%; N<sub>2</sub> – 0,15%.

Таблиця 1 – Термодинамічні параметри реперних точок процесів в газогідратному дотискувачі

Номер точки	1	2	3	4	5	6
Тиск p, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6	2,6	2,6
Температура, t, °C	25	5	8	-10	10	15

Слід відмітити, що рівноважна температура гідратоутворення природного газу вказаного вище складу при тиску p = 0,6 МПа становить t<sub>p</sub> = - 7°C, при якій вода буде знаходитись у вигляді льоду. Відомо, що кінетика гідратоутворення в системі « газ + лід» характеризується дуже малими значеннями швидкості процесу [2]. Тому в розглянутому випадку доцільно використовувати не воду, а водний розчин, наприклад метанолу чи етанолу, з температурою замерзання - 12°C. Це дозволить підтримувати рушійну силу процесу гідратоутворення Δt = t<sub>3</sub> - t<sub>4</sub> = 3°C, що забезпечить прийнятну швидкість утворення газогідратів [2, 5, 6].

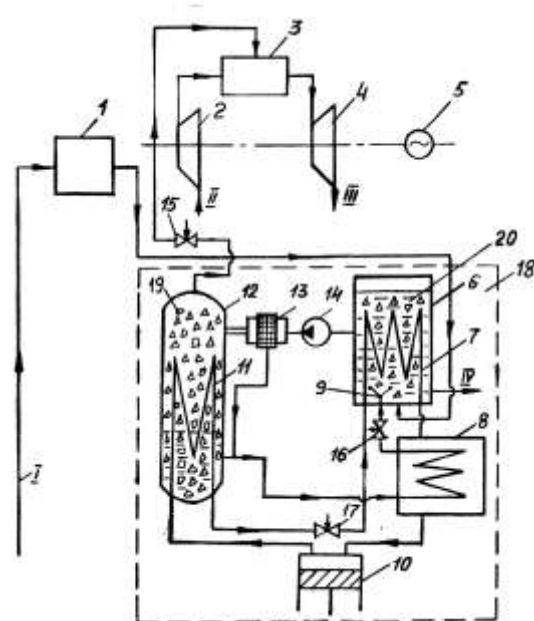
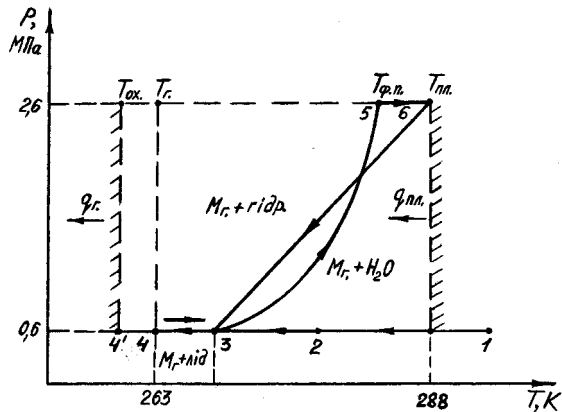


Рисунок 2 – Схемне рішення газотурбінного приводу з газогідратним дотискувачем паливного газу: 1 – апарат повітряного охолодження; 2 – компресор стиснення повітря; 3 – камера згорання палива; 4 – газова турбіна; 5 – електрогенератор; 6 – реактор утворення газогідратів; 7 – випарник; 8 – теплообмінник; 9 – розпилювач води; 10 – компресор термотрансформатора; 11 – конденсатор; 12 – газогідратний плавитель; 13 – насос; 14 – сепаратор; 15, 16, 17 – регулюючі вентилі; 18 – газогідратний дотискувач (позначений пунктирною лінією); 19 – газогідрати; 20 – газогідратна суспензія; I – потік газу в газопроводі; II – подача повітря; III – вихід продуктів згорання газу; IV – конденсат. Примітка: на схемному рішенні не показано додаткові компресор і конденсатор термотрансформатора.

ГТГ з газогідратним дотискувачем паливного газу працює наступним чином. Потік газу I з тиском p = 0,6 МПа при температурі t = 25°C через апарат повітряного охолодження 1 поступає до реактора газогідратів 6, де при контакті з охолодженим водним розчином утворюються газогідрати при тиску p = 0,6 МПа і температурі t = -10°C. Теплота гідратоутворення сприймається холодильним агентом, який кипить у випарнику термотрансформатора.

рансформатора 7, розміщеному в реакторі 6. Вуглеводневий конденсат, що утворюється негідратоутворюючими компонентами паливного газу при його охолодженні, виводиться з реактора 6 (поток IV на рисунку 3).



**Рисунок 3** – Основні процеси в газогідратному дотискувачі: Т.1 – стан газу на вході в дотискувач; 1-2-3-4 – охолодження газу в реакторі; Т.3- стан трифазної рівноваги в реакторі 6; 3-4 – охолодження води в реакторі 6; Т.4- утворення газогідратів в реакторі 6; 4-5- підвищення тиску газогідратної суспензії від  $P_4$  до  $P_5$ ; 5-6 – процес нагрівання суспензії в плавителі 12; Т. 6 – плавлення газогідратів з виділенням газу і води; 6-3 - охолодження води в теплообміннику 8 та пониження тиску в регулюючому вентилі 16 до тиску  $P_4$ ; (3-5) – лінія трифазної рівноваги «газ-водний розчин- газогідрат»; умовні позначення:  $M_г$  – гідратоутворюючий агент (паливний газ); гідр-газогідрат;  $T_{ок}$  – температура кипіння холодильного агенту у випарнику 11;  $T_г$ ,  $T_{пл}$  – температура процесів утворення та плавлення газогідратів;  $T_{ф.п.}$  – рівноважна температура в системі «газ-водний розчин- газогідрат»;  $q_г$ ,  $q_{пл}$  – теплота гідратоутворення та плавлення газогідратів.

Водогідратна суспензія подається насосом 13 в сепаратор 14, де гідрати відділяються від водного розчину і поступають в газогідратний плавитель 12. При підводі теплоти від конденсатора термотрансформатора 11, розміщеному в плавителі 12, газогідрати плавляться при тиску  $p = 2,6$  МПа і температурі  $t = 15^0\text{C}$  з утворенням газу та води. Газ при тиску  $p = 2,6$  МПа і температурі  $t = 15^0\text{C}$  подається в камеру згорання ГТП.

Водний розчин після сепарації і з плавителя газогідратів 12 охолоджується в теплообміннику 8 до температури  $t = 3 - 2^0\text{C}$  і надходить в реактор 6 через регулюючий вентиль 16 і розпливач 9.

Попередні розрахунки показують, що енерговитрати при газогідратній компресії в газогідратному дотискувачі паливного газу ГТП на

основі двигуна Д- 336 ( потужність 6,3 МВт, витрати паливного газу  $2500\text{ м}^3$ ) досить значні і для умов роботи за циклом, параметри реперних точок якого наведені в табл.1, складають 350...370 КВт при використанні термотрансформатора на основі пароконденсійної холодильної машини. Капітальні витрати на ГДПГ також будуть досить значними, оскільки величина поверхні теплообміну реактора утворення газогідратів і газогідратного плавителя, як першого так і другого, буде 180 ... 200  $\text{м}^2$ . При цьому вартість холодильного обладнання буде зрівняна з вартістю дотискного компресора, в якому процес стискування паливного газу здійснювався б в розглянутих межах тисків: 0,6... 2,6 МПа.

Дещо підвищити енергетичну привабливість ГДПГ можна шляхом застосування термотрансформатора на основі тепловикористовуючої абсорбційної або пароежекторної холодильної машини. Але це призведе до збільшення металоємності дотискувача.

Тому доцільніше використати ГДПГ як пристрій, що забезпечував би тільки пуск газотурбінного приводу при наявності паливного газу, тиск якого нижче технологічно допустимого, а подальша подача паливного газу здійснювалась би дотискним компресором.

Для двигуна типу Д- 336 пусковий період складає приблизно 20 хв. На цей час роботи потрібно  $830\text{ м}^3$  газу, який буде міститися в 5-и  $\text{м}^3$  газогідратів. При концентрації гідратів у суспензії 40%, об'єм накопичувача гідратів складатиме  $12,5\text{ м}^3$ . Використання ГДПГ в запропонованому варіанті дозволить суттєво спростити наведене на рис.1 схемне рішення, так як робота утворювача і плавителя гідратів буде рознесена в часі, а це дозволить процеси утворення і плавлення гідратів здійснювати в одному апараті та значно зменшити величину енерговитрат на роботу термотрансформатора, який працюватиме в режимі холодильної машини з суттєво меншим тепловим навантаженням. Наприклад, якщо утворення газогідратів в передпусковий період здійснювати на протязі 6-и годин, то для холодильної машини буде потрібна потужність 22, 5 КВт.

Отже, застосування ГДПГ, як пристрою для пуску газотурбінного приводу, має певну перспективу і надає підстави для подальшого вивчення цього напрямку забезпечення працездатності ГТП при наявності паливного газу, тиск якого нижче технологічно допустимого.

### III. ВИСНОВКИ

Розглянуто можливість застосування газогідратного дотискувача для забезпечення працездатності газотурбінного приводу при наявності паливного газу, тиск якого нижче, ніж потрібний в камері згорання.

Описано схемне рішення газогідратного дотискувача паливного газу, приведено цикл його роботи і для конкретного складу паливного газу, його

го початкового тиску та тиску в камері згорання газотурбінного приводу визначено термодинамічні параметри реперних точок циклу.

Обґрунтовано доцільність використання ГДПГ в якості пристрою тільки для пуску газотурбінного приводу при наявності паливного газу, тиск якого нижче технологічно допустимого. Для умов пуску ГТП на основі двигуна Д-336 приведено значення потужності холодильної машини, необхідної кількості газогідратів та об'єма накопичувача водогазгидратної суспензії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Костюк А. Г. Шерстюк А. И. Газотурбинные установки. – М.: Высшая школа, 1979. – 254с.
2. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. –

М.: Недра, 1974. – 208 с.

3. Клименко В.В. Научно-технические основы газогидратной технологии (термодинамика та кінетика процесів, схемні рішення): автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.06. – К., 2012 – 40 с.
4. Онищенко В.О. Застосування газогидратних технологій в нафтогазовій промисловості / В. О. Онищенко, В. В. Клименко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 4(41). – С. 5-8.
5. Vysniauskas A., Bichnoi P.R. A Kinetic Study of Methane Hydrate Formation // IV Canadian Permalrast Conference. Calgary. – 1981. – p. 299-304.
6. Englezos P, Kalogerakis N, Dholabhai P. D. and Bisnhoi P. R. /Kinetics of Formations of Methane and Ethane Gas Hydrates. // Chem. Eng. Sci.- 1987, 42. - p. 2647 - 2651.

V.V. Klymenko<sup>1</sup>, M.V. Bosiy<sup>1</sup>, V.P. Parafiynyk<sup>2</sup>, S.O. Prylypko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kirovograd National Technical University, Avenue Universite , 8, Kirovograd, 25006

<sup>2</sup> JSC «Sumy Machine Building Research and Production Association named after M.V. Frunze», Gorky str., 58, Sumy, 40004

## GAS TURBINE DRIVE WITH A FUEL GAS GASHYDRATE BOOSTER DEVICE

*The way of ensuring of gas turbine drive (GTD) efficiency with fuel gas presence, pressure of which is lower than technologically permissible in the fuel gas gasturbine drive combustion chamber on the basis of gas hydrate technology has been considered. The schematic of fuel gas gashydrate booster device (FGGBD) is given and gas turbine drive with FGGBD operation principle is reported. The FGGBD operating cycle is also shown for the specific composition of fuel gas, its initial pressure and pressure in the combustion chamber of a gas turbine drive. The thermodynamic parameters of the cycle reference points are determined.*

**Keywords:** Gas hydrates – Natural gas – Formation of gas hydrates – Melting – Hydrates formation heat – Gas turbine drive – Thermotransformer

## REFERENCES

1. Kostyc A. G. Sherstyk A. I. Gasotyrbinnue ystanovku. – М.: Vushay shkola, 1979. – 254s.
2. Makohon Y. F. Hidratu prirodnuh gasov. – М.: Nedra, 1974. – 208s.
3. Klymenko V.V. Naukovo-tehnichni osnovy gazgidratnoi tehnologii (termodinamika ta kinetika procesiv, shemni rishennya): avtoref. dis. doct. tehn. nauk: 05.14.06. – К., 2012. – 40 s.
4. Onyhchenko V. O. Zastosuvannya gazo-gidratnih

tehnologiy in naftogazoviy promislivosti / V. O. Onyshchenko, V.V. Klymenko // Rozvidka quod naphtha rozrobka vapors. – 2011. – №4(11). – S. 5-8.

5. Vysniauskas A., Bichnoi P.R. A Kinetic Study of Methane Hydrate Formation // IV Canadian Permalrast Conference. Calgary. – 1981. – p. 299-304.
6. Englezos P, Kalogerakis N, Dholabhai P. D. and Bisnhoi P. R. /Kinetics of Formations of Methane and Ethane Gas Hydrates. //Chem. Eng. Sci. – 1987,42. – p. 2647-2651.

Отримана в редакції 12.06.2014, прийнята до друку 18.06.2014

