

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК621.56:622.691.6:629.114

## Підвищення ефективності автомобільної газонаповнювальної компресорної станції шляхом застосування газогідратного акумулятора

М. В. Босий<sup>1</sup>, В. В. Клименко<sup>2</sup>, С. О. Магопець<sup>3</sup>, Н. Ю. Гарасьова<sup>4</sup>, А. О. Овчаренко<sup>5</sup><sup>1-5</sup> Центральнотраїнський національний технічний університет, пр. Університетський, 8, Кропивницький, 25006, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>bosiy@ukr.net; <sup>2</sup>klymvas@ukr.netORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3090-0427>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-6840-7307>

У статті розглядається проблема підвищення ефективності роботи автомобільної газонаповнювальної компресорної станції (АГНКС) в умовах наявності пікових навантажень внаслідок нерівномірного надходження на заправку автомобільного транспорту на протязі доби. Для підвищення ефективності використання обладнання АГНКС в умовах нерівномірної добової заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом (СПГ-CNG) запропоновано застосовувати газогідратний акумулятор (ГА). В ГА реалізуються процеси утворення газогідратів природного газу при низькому тиску, їх накопичення і зберігання та наступне плавлення з виділенням стиснутого природного газу при тиску 25 МПа, достатньому для повної заправки автомобільного транспорту. Процес утворення газогідрату відбувається з виділенням теплоти, а його розкладання з поглинанням теплоти. Відводити теплоту процесу гідратоутворення пропонується пропановою холодильною машиною (ХМ). Однак при температурі довкілля  $\leq 1$  °С процес утворення газогідратів в ГА можна здійснювати при тиску  $\leq 1,2$  МПа без застосування ХМ. При температурах  $\leq 0$  °С замість води в ГА необхідно застосовувати водні розчини, наприклад, етанолу чи метанолу. У статті надано схемно-технологічне рішення та описано принцип дії АГНКС з ГА, показано на діаграмі тиск-температура основні термодинамічні процеси, що в ній здійснюються. Запропоновано методу визначення питомих енерговитрат ( $l_{\text{нмт}}$ ) і ексергетичного ККД ( $\eta_{\text{ex}}$ ) ГА та на конкретному прикладі показано, що  $l_{\text{нмт}}$  газогідратного стиснення газу менші на 15% порівняно з компресорним стисненням, а  $\eta_{\text{ex}}$  більший на 12%. Застосування ГА, як альтернативного доповнення до компресорного стиснення природного газу в пікові періоди заправки автомобілів, дозволить підвищити ефективність використання обладнання АГНКС і зменшити енерговитрати на заправку автомобільного транспорту стисненим природним газом.

**Ключові слова:** Природний газ; СПГ-CNG; АГНКС; Компресор; Газогідрати; Газогідратний акумулятор; Термодинамічні процеси; Енерговитрати; Ексергетичний ККД

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978>

© The Author(s) 2021. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## 1. Вступ

Наразі стиснений природний газ – СПГ (compressed natural gas – CNG), основним компонентом якого є метан, займає провідне місце в якості аль-

тернативи нафтовим газомоторним паливам [1].

З метою ефективного використання природного газу (ПГ), як газомоторного палива (ГМП), застосовують автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС) для підвищення тис-

ку газу [1].

АГНКС здійснюють заправку автомобілів та інших транспортних засобів, двигуни яких конвертовані або виключно розраховані на роботу на стисненому (компримованому) природному газі і мають відповідну систему для його використання. Природний газ надходить на АГНКС по газопроводах під тиском 0,6-1,2 МПа, на станції тиск газу підвищується до 20-25 МПа (200-250 атм) і в такому стані закачується в балони транспортних засобів [2].

Переваги метану як ГМП: екологічність, більша безпечність, висока антидетонаційна властивість сприяють збільшенню кількості заправних станцій та метанових автомобілів [1].

Наразі мережа метанових автозаправок «Укр-автогаза» запускає програму компенсації витрат на придбання нового і б/у транспорту на метані (CNG) за рахунок надання фіксованих знижок на паливо – це для юридичних осіб, власників автопарків, перевізників, підприємств і компаній, які прагнуть оновити свій автопарк на більш сучасний, екологічний та економічний транспорт. Максимальний термін тривалості програми CNG Forward становить 10 років, протягом яких власник транспорту може повернути більше половини вартості нового автомобіля [2].

Питанням дослідження АГНКС для заправки автомобільної техніки стисненим природним газом присвячено роботи авторів [1-7].

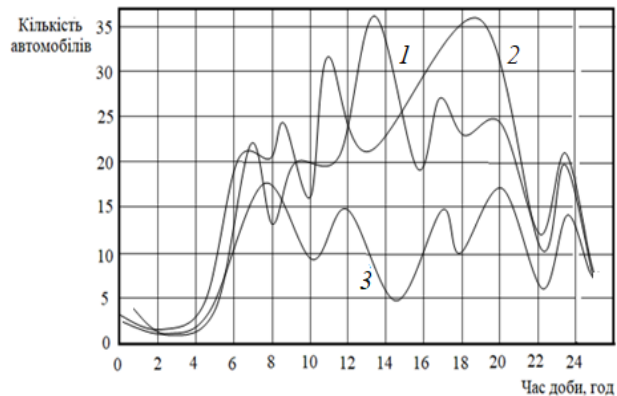
В роботі [3] проведені дослідження системи «АГНКС-пересувний автомобільний газовий заправник (ПАГЗ)». Зроблено висновок, що на відстані до 20 км від АГНКС доцільна заправка техніки безпосередньо на заправці, а на більших відстанях необхідно використовувати ПАГЗ.

Результати досліджень використання метанових «мікрозаправок» наведено в роботі [4]. Показано, що автопарк з десяти автомобілів «ГАЗель» з добовим пробігом 300 км може ефективно експлуатуватись з окупністю капітальних вкладень через ~ 2,1 року. Для потужних фермерських господарств, що використовують значну кількість транспортної техніки, економічно вигідно будівництво та використання власних АГНКС [5-7].

Перспективним напрямком для заправки автомобільного транспорту є використання біометану (БМ), який виробляють з відновлювальних джерел енергії в якості палива [8-10]. Використання очищеного до якості природного газу БМ за допомогою випробуваної технології фірми

BAUER застосовується для заправки автомобільної техніки [8, 9].

Відомо, що на АГНКС заправку автомобілів здійснюють нерівномірно на протязі доби: кількість заправок в денний період суттєво більша, ніж в нічний [1]. На рис. 1 наведено типовий графік надходження автомобілів на АГНКС протягом доби [1].



**Рисунок 1** – Надходження автомобілів на АГНКС протягом доби: 1 – робочий день, початок тижня; 2 – робочий день, середина тижня; 3 – вихідний день

Як видно з рис. 1, максимум надходження автомобілів на заправку припадає на денний період, а мінімум – в нічний період доби, а відношення максимальної кількості автомобілів в денний період до мінімальної в нічний становить ~7. Така нерівномірність обґрунтовує доцільність накопичення стисненого газу в нічний період доби для його використання в пікові періоди заправки автомобілів, але обладнання існуючих АГНКС не дозволяє це реалізувати.

Одним із варіантів підвищення ефективності використання обладнання АГНКС в умовах розглянутого вище нерівномірного навантаження може бути застосування газогідратного акумулятора (ГА) [11,12]. Принцип дії ГА полягає в утворенні газогідратів шляхом контакту газу низького тиску з водою або водним розчином в замкненому об'ємі при відповідній температурі, які накопичують та зберігають, а потім плавлять в цьому ж об'ємі при більш високій температурі з виділенням газу та води при високому тиску.

З аналізу доступних джерел інформації можна зробити висновок, що проблемі підвищення ефективності АГНКС в умовах нерівномірного навантаження автомобілів на заправку протягом доби недостатньо приділяється уваги.

Метою даної роботи є розробка схемно-технологічного рішення застосування ГА для підвищення ефективності використання АГНКС в умовах роботи нерівномірної добової заправки автомобільного транспорту та аналіз її енерговитрат.

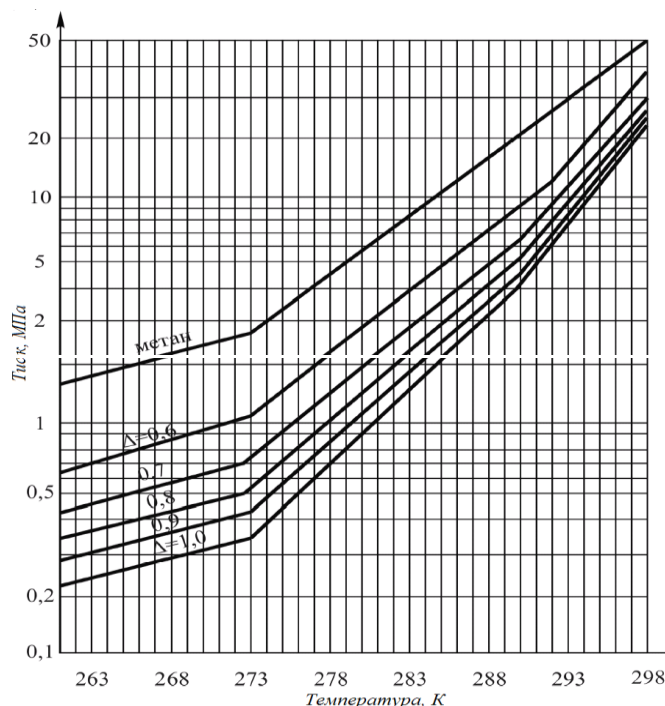
## 2. Застосування газогідратів в технологіях стиснення та зберігання газів

Газові гідрати – кристалічні з'єднання молекул води і газу, що створюються та існують при певних термодинамічних умовах [13-16].

Газогідрати можуть утворюватись і стабільно існувати в широкому інтервалі тисків і температур (для метану від  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $2 \cdot 10^3$  МПа при температурі від 70 до 350 К). Процес утворення газогідрату відбувається з виділенням теплоти, а його розкладання з поглинанням теплоти [13].

Для утворення гідрату необхідними умовами є забезпечення контакту газу і води та підтримання рівноважних термодинамічних параметрів: тиску і температури [13,15,16]. Молекули води і газу утримуються в газогідратному кристалі ван-дер-ваальсовими силами [13, 15]. Газгідрати легко розкладаються при зниженні тиску або підвищенні температури відносно їх рівноважних величин.

Рівноважні умови початку гідратоутворення природних газів різної відносної густини наведені на рис. 2 [13].



**Рисунок 2** – Рівноважні умови початку гідратоутворення природних газів різної густини

Застосування газогідратів для стиснення газів базується на тому, що гідратоутворювач у газогідратному стані займає суттєво менший об'єм, ніж у газоподібному.

Так, наприклад,  $1 \text{ м}^3$  гідрату метану при  $t = 0^\circ \text{C}$  і  $p = 26$  бар вміщує  $164 \text{ м}^3$  газу. При цьому на частку газу припадає  $0,2 \text{ м}^3$ , а на воду  $0,8 \text{ м}^3$  [13].

Питомий об'єм метану в гідраті відповідає тиску 1400 бар. Розкладання гідрату в замкнутому об'ємі супроводжується значним підвищенням тиску. Процес стиснення газів шляхом утворення та плавлення газогідратів при різних температурах (газогідратна термокомпресія – ГГТ) безмашинний, одноступеневий, при будь-яких ступенях стиснення близький до ізотермічного [13,16]. Тиск для метану, природного і супутнього нафтового газу та інших може бути визначений із рівняння стану при температурі плавлення газогідратів за питомим об'ємом.

У разі потреби утворені газогідрати можна зберігати при тиску не нижче рівноважного та температурі не вище рівноважної, що дозволяє їх застосовувати для акумулювання газів [17]. Відомо, що при наявності таких параметрів газогідрати існують у вигляді покладів і в природних середовищах, в основному в акваторії океанів і морів, наприклад, в Чорному морі [14], біля берегів Австралії [18], а вміст метану в їх покладах оцінюється різними авторами в кількості  $(1,5 \dots 2,1) \cdot 10^{16} \text{ м}^3$  [14].

Стиснення та зберігання газів із застосуванням газогідратної технології апробовано в Японії на пілотному заводі по виробництву газогідратних гранул продуктивністю п'ять тонн на добу, побудованого на території терміналу для прийому зрідженого газу в м. Янаї [19].

Перспективним є напрямок морського транспортування природного газу у вигляді газогідратів (NGH), в технологічний ланцюг якого входять процеси утворення та зберігання газових гідратів [20]. Розробкою та дослідженням цього напрямку активно займається відома японська компанія Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd [21].

## 3. Схемно-технологічне рішення та основні термодинамічні процеси в АГНКС-ГА

Схемно-технологічне рішення запропонованої АГНКС-ГА наведено на рис. 3 [11].

Принцип дії АГНКС-ГА розглянемо на прикладі при використанні природного газу наступно-

го складу:  $\text{CH}_4$  – 94,12%;  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 2,92%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,92%;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,42%;  $\text{C}_3\text{H}_{12}$  – 0,11%;  $\text{C}_6+$  – 0,14%;  $\text{CO}_2$  – 1,22%;  $\text{N}_2$  – 0,15% [22]. При роботі в нічний період природний газ, наприклад, з початковим тиском,  $p = 1,2$  МПа і температурою  $t = 18$  °С попередньо очищується, фільтрується від краплинної рідини і механічних домішок та поступає до першої ступені компресора, де стискається до  $p = 3,5$  МПа.

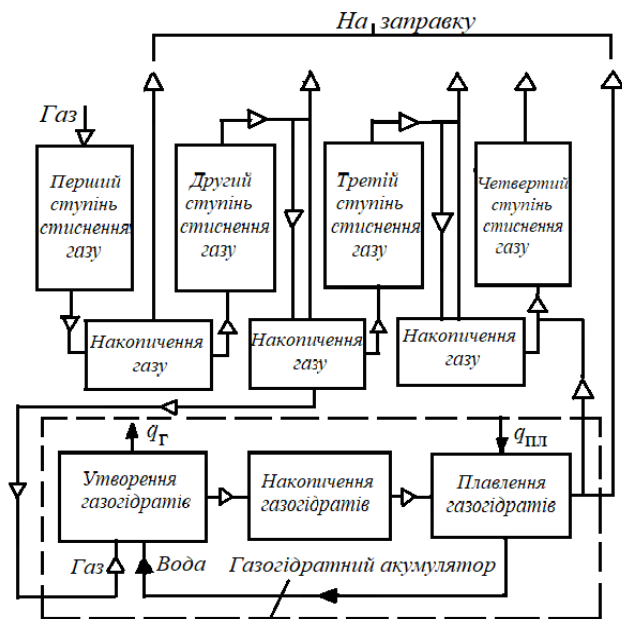


Рисунок 3 – Схемно-технологічне рішення АГНКС-ГА

Потім газ після охолодження і вологомасловідділення (допоміжне обладнання для їх здійснення на рис. 3 не показано) через буферний накопичувач подається або на заправку, або до другого ступеня і компримується до  $p = 7,5$  МПа. Газ при цьому тиску після охолодження і вологомасловідділення через буферний накопичувач подається або на заправку, або до третього ступеня. Надлишкову частину газу, що не використовується в цей період для заправки автотранспорту та не подається в третій ступень, направляють в ГА і приводять в контакт з водою при тиску  $p = 7,5$  МПа і температурі  $t = 15$  °С. При таких умовах в замкненому об'ємі ГА утворюються газогідрати, а теплота їх утворення  $q_{\Gamma}$  відводиться холодною машиною (ХМ) [23].

Утворені газогідрати накопичують та зберігають, а в денний період доби при збільшенні завантаження АГНКС, їх підігрівають та плавають шляхом підведення теплоти  $q_{\text{пл}}$  від охолодження газу після ступенів компресорного стиснення при температурі  $t = 22$  °С і тиску  $p = 25$  МПа. Вода пі-

сля плавлення газогідратів повторно використовуються для гідратоутворення в ГА, а отриманий газ направляють для додаткової повної заправки автомобільного транспорту. Таким чином, в замкненому об'ємі ГА циклічно здійснюються процеси утворення, накопичення та плавлення газогідратів.

В розглянутому прикладі необхідний тиск в режимі утворення газогідратів підтримують із застосуванням 1-го та 2-го ступенів компресорного стиснення. Але слід відмітити, що при тому ж початковому тиску газу  $p = 1,2$  МПа та температурі доквілля  $\leq 10$  °С теплоту гідратоутворення можна відводити безпосередньо в доквілля і відпадає потреба в компресорному стисненні та ХМ.

Основні термодинамічні процеси стиснення природного газу в АГНКС-ГА для заправки автомобільного транспорту зображено на  $p$ - $T$  діаграмі (рис. 4) [11].

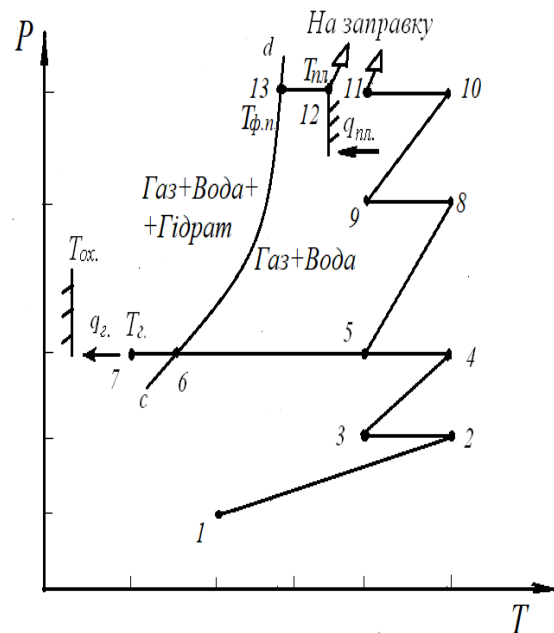


Рисунок 4 – Основні термодинамічні процеси в АГНКС-ГА

На рис. 4 зображено  $c$ - $d$  – лінія рівноваги трифазної системи «газ-вода-газогідрати»; т. 1 – початковий стан газу; т.т. 1-2 – стиснення газу в першому ступені; т.т. 2-3 – охолодження газу; т.т. 3-4 – стиснення газу в другому ступені; т.т. 4-5 – охолодження газу; т. 6 – стан рівноваги трифазної системи «газ-вода-газогідрати»; т. 7 – утворення газогідратів (додаткове накопичення газу у вигляді газогідратів); т.т. 7-6-13 – підвищення тиску та температури газогідратної суспензії при нагріванні до тиску та температури плавлення газогідратів; т.т. 5-8 – стискування газу в третьому

ступені; т.т. 8-9 – охолодження газу; т.т. 9-10 – стиснення газу в четвертому ступені до кінцевого тиску  $p = 25$  МПа; т.т. 10-11 – охолодження газу перед його направленням для кінцевої заправки автомобільного транспорту; т. 12 – плавлення газогідратів при тиску, відповідному тиску газу після четвертого ступеня стиснення  $p = 25$  МПа та направлення його на повну заправку автомобільного транспорту.

В наведеному вище прикладі розглядався процес утворення газогідратів при рівноважній температурі  $t_p = 10$  °С і тиску  $p = 7,5$  МПа, що дозволяє використовувати в ГА воду [11]. При мінусових значеннях рівноважної температури гідратоутворення необхідно застосовувати водний розчин, наприклад, метанолу чи етанолу, температура замерзання якого нижче 0°С. Це дозволить підтримувати необхідну рушійну силу процесу гідратоутворення: різницю рівноважної температури гідратоутворення і температуру водо-газогідратної суміші в ГА для забезпечення прийнятної швидкості утворення газогідратів [13, 24].

#### 4. Оцінка енергоефективності АГНКС-ГА

Енерговитрати в ступенях компресорного стиснення природного газу АГНКС-ГА для заправки автомобільного транспорту розраховуємо за відомими методиками [1, 25, 26]:

$$l_{\text{к.ст.}} = \sum_1^k l_{k_i}, \quad (1)$$

де  $l_{\text{к.ст.}}$  – питома робота компресорного стиснення природного газу;  $l_{k_i}$  – питомі енерговитрати в  $i$ -ому ступені компресорного стиснення, кДж/кг.

Питома робота в  $i$ -ому ступені компресора

$$l_{k_i} = \frac{k}{k-1} R_{\text{T}} T_1 \left[ \left( \frac{p_{2_i}}{p_{1_i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_k}, \quad (2)$$

де  $l_{k_i}$  – питома робота в  $i$ -ому ступені компресорного стиснення природного газу, кДж/кг;  $k=1,31$  – показник адіабати;  $R_{\text{T}}$  – газова стала природного газу, приймаємо 519,62 Дж/(кг·К), як для метану [1, 25];  $p_{1_i}$  – тиск початкового стану газу;  $p_{2_i}$  – тиск газу в  $i$ -ому ступені компримування газу;  $\eta_k = 0,85$  – ефективний ККД компресора [1, 23, 25].

Енерговитрати газогідратного стиснення при-

родного газу в ГА розраховуємо:

$$l_{\text{ггт}} = \sum_1^2 l_{k_i} + l_{\text{хм}}, \quad (3)$$

де  $\sum_1^2 l_{k_i}$  – питома робота компресорного стиснення природного газу до тиску гідратоутворення;  $l_{\text{хм}}$  – питома робота ХМ на 1 кг природного газу в складі газогідратів.

Питома робота компресора ХМ:

$$l_{\text{к.ар}} = \frac{k}{k-1} \mu_{\text{ар}} R_{\text{ар}} T_1 \left[ \left( \frac{p_{2_i}}{p_{1_i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_k}, \quad (4)$$

де  $k$  – показник адіабати холодильного агента;  $R_{\text{ар}}$  – газова стала холодильного агента, Дж/(кг·К);  $\mu_{\text{ар}}$  – молекулярна маса холодильного агента, кг/кмоль;  $p_2 = p_{\text{к}}$  – тиск конденсації холодильного агента, визначається температурою навколишнього середовища, МПа;  $p_1 = p_0$  – тиск кипіння холодильного агента, визначається температурою утворення газогідратів, МПа;  $T_1 = T_0 = T_{\text{T}} - 5$ °С – температура кипіння холодильного агента, К;  $T_{\text{T}}$  – температура гідратоутворення, К.

Кількість холодильного агента, яка необхідна для відводу теплоти гідратоутворення 1 кг природного газу

$$g_{\text{ар}} = \frac{\Delta H_{\text{T}}}{q_0}, \quad (5)$$

де  $\Delta H_{\text{T}}$  – питома теплота гідратоутворення природного газу, приймаємо, як для метану, кДж/кг(ар);  $q_0$  – питома холодопродуктивність холодильного агента, кДж/кг.

Питома робота ХМ на 1 кг природного газу

$$l_{\text{хм}} = g_{\text{ар}} \cdot l_{\text{к.ар}}. \quad (6)$$

Термодинамічну ефективність за питомими показниками ГА оцінюємо ексергетичним ККД [25, 26]

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{e_{\text{пр.г}}^{\text{ст}}}{e_{\text{к}}^{\text{к.ст}} + e_{\text{T}}^{\text{ак.ст}}}. \quad (7)$$

де  $e_k^{к.ст}$  – затрачена питома ексергія на компресорне стиснення при «зарядці» (процес утворення газогідратів) ГА, кДж/кг;  $e_{гт}^{ак.ст}$  – затрачена питома ексергія в ХМ для утворення газогідратів, кДж/кг;  $e_{пр.г}^{ст}$  – корисна питома ексергія стисненого природного газу в газогідратному стані, приймаємо, що вона дорівнює ексергії потоку стисненого природного газу після розплавлення газогідратів на виході із ГА, кДж/кг.

Питома ексергія потоку стисненого природного газу (корисна) на виході ГА розраховується за відомою формулою [25, 26]:

$$e_{пр.г}^{ст} = (h_i - h_{н.с}) - T_{н.с} (s_i - s_{н.с}), \quad (8)$$

де  $h_i$ ,  $s_i$  – відповідно ентальпія та ентропія стисненого природного газу, що виділяється при плавленні газогідратів кДж/кг і кДж/(кг·К);  $h_{н.с}$ ,  $s_{н.с}$  – відповідно ентальпія та ентропія природного газу за параметрами навколишнього середовища, кДж/кг і кДж/(кг·К);  $T_{н.с}$  – температура навколишнього середовища, К.

Розглянемо приклад визначення енергоефективності ГА при використанні природного газу складу і умов, наведених вище в розділі 3, для варіанта плавлення накопичених газогідратів при тиску 25 МПа. Параметри реперних точок термодинамічних процесів, зображених на рис. 4, наведені в табл. 1.

**Таблиця 1** – Параметри реперних точок термодинамічних процесів, зображених на рис. 4

Номер точки	Тиск $p$ , МПа	Температура $t$ , °С
1	1,2	18
2	3,5	130
3	3,5	22
4	7,5	130
5	7,5	22
6	7,5	17
7	7,5	15
8	15	130
9	15	22
10	25	130
11	25	22
12	25	22
13	25	22

Згідно вищезгаданому, застосування ГА пропонується, як певне альтернативне доповнення до компресорного стиснення природного газу в пікові періоди заправки автомобілів. Для умов даного прикладу при використанні ГА в нічний період (мінімальна кількість заправок автомобілів – рис. 1) буде здійснюватись компресорне стиснення газу в 1-ому і 2-ому ступені, утворення газогідратів з відводом теплоти процесу ХМ, їх зберігання та плавлення в піковий (денний) період з виділенням природного газу при високому тиску, необхідному для заправки автомобілів.

Тобто, при роботі АГНКС-ГА в пікові періоди буде використовуватись як проектне компресорне обладнання АГНКС (чотири ступені стиснення), так і ГА.

При розрахунку питомої роботи ХМ в якості холодильного агента було вибрано пропан [17, 23, 27]. Значення термодинамічних параметрів циклу ХМ: в нічний період доби:  $T_1 = T_0 = 278$  К; так як температура навколишнього середовища в нічний період менша, ніж в денний, тому  $T_2 = T_k = 283$  К;  $p_1 = p_0 = 0,55$  МПа,  $p_2 = p_k = 0,66$  МПа.

Кількість холодильного агента (пропану) на 1кг природного газу в складі газогідратів при  $\Delta H_f = 3785$  кДж/кг [13] та  $q_0 = 380$  кДж/кг [23,27] складає 10 кг<sub>пр</sub>/кг<sub>Г</sub>.

При розрахунках приймалося, що для плавлення газогідратів використовується теплота, яка відводиться водою при охолодженні газу після ступенів компресорного стиснення і тому в денний період  $l_{гтт} = 0$ .

Розрахунки питомих енерговитрат та ексергетичного ККД за формулами (1)-(8) виконувалися для варіантів забезпечення пікового навантаження при компресорному стисненні газу та при використанні газогідратної термокомпресії, а їх результати наведені в табл. 2.

**Таблиця 2** – Результати розрахунків питомих енерговитрат і ексергетичного ККД АГНКС при компресорному стисненні газу та при використанні газогідратної термокомпресії

Тип процесів стиснення газу	Питоми енерговитрати, кДж/кг та ексергетичний ККД	Розрахунок
Компресорне стиснення	$l_{к.ст.} = \sum_1^4 l_{к_i}$ $\eta_{ex}$	578 0,40

**Продовження таблиці 2**

Газогідратна термокомпресія:	$\sum_1^2 l_{\kappa_i}$	346
утворення→	$l_{\text{ХМ}}$	142
акумулювання→	$l_{\text{ГТТ}} = \sum_1^2 l_{\kappa_i} + l_{\text{ХМ}}$	488
плавлення газогідратів	$\eta_{\text{ex}}$	0,52

Аналіз отриманих результатів розрахунку показує, що питомі енерговитрати газогідратного стиснення газу в ГА складають 488 кДж/кг (є тільки при гідратоутворенні в нічний період) і менші на 15% порівняно з компресорним стисненням в денний період – 578 кДж/кг.

Ексергетичний ККД газогідратної термокомпресії газу вище компресорного стиснення: відповідні значення 52% і 40%.

Більш високу енергоефективність газогідратного стиснення газу в ГА можна пояснити тим, що утворення та акумулювання газогідратів здійснюються при більш низькій нічній температурі, що зменшує енерговитрати, як на стиснення газу до величини тиску, необхідного для утворення газогідратів, так і на роботу пароконпресійної ХМ для утворення газогідратів [17, 28].

ГА можна встановлювати як в діючих АГНКС так і в тих, що споруджуються.

Отже використання ГА дозволяє зменшити енерговитрати на стиснення газу та підвищити ефективність використання обладнання АГНКС в умовах роботи при нерівномірній добовій заправці автомобільного транспорту.

**5. Висновки**

Розглянуто проблему підвищення ефективності роботи АГНКС в умовах наявності пікових навантажень внаслідок нерівномірного надходження на заправку автомобільного транспорту на протязі доби. Показано, що одним із варіантів її вирішення може бути застосування газогідратного акумулятора, в якому здійснюються послідовно процеси утворення, накопичення (акумуляції) і плавлення газогідратів природного газу. Перші два процеси здійснюються в нічний період при зменшеному навантаженні на АГНКС, а плавлення проводять з виділенням природного газу при високому тиску 25 МПа, яким здійснюють додаткову заправку в денний період пікових навантажень.

Розглянуто схемно-технологічне рішення

АГНКС з газогідратним акумулятором та описані основні термодинамічні процеси, що в ній здійснюються.

Приведено методику оцінки енергоефективності застосування ГА в АГНКС. За результатами розрахунків, виконаних для конкретного прикладу умов роботи АГНКС-ГА, показано, що питомі енерговитрати газогідратного стиснення газу менші на 15% порівняно з компресорним стисненням, а ексергетичний ККД вищий на 12%.

В цілому застосування ГА дозволяє збільшити продуктивність АГНКС та підвищити енергоефективність її використання.

**Особистий внесок авторів CRediT**

**Босий М.В.:** концептуалізація, проведення дослідницького процесу, дизайн методології, формальний аналіз, візуалізація. **Клименко В.В.:** концептуалізація, менеджмент даних, розробка методології, створення моделей, верифікація результатів дослідження. **Магопєць С.О.:** еволюція загальних цілей та завдань, формальний аналіз. **Гарасьова Н.Ю.:** збір даних, застосування формальних методів для синтезу даних дослідження. **Овчаренко А.О.:** збір даних, формальний аналіз, візуалізація.

**Література**

1. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Костів В.В., Михалків В.Б. Автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС): монографія. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2014. – 320 с.
2. Автопарки хотят перевести на метан: на газе можно сэкономить полцены авто. URL:<https://economics.segodnya.ua/economics/business/avtoparki-hotyat-perevesti-na-metan-na-gaze-mozhno-sekonomit-polceny-avto-1481276.html> (дата звернення 15.01.21).
3. Гавриш В.І. Оцінка ефективності застосування автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій у сільськогосподарському виробництві // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2006. – Вип. № 4. – С. 66-71.
4. Сидоров Н. Метановые микрозаправки // АГЗК+АТ. – 2008. – №4 (40). – С. 35-37.
5. Карп І.М., Биков Г.О. Перспектива використання природного газу як моторного палива на автотранспорті України // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 1. – С. 3-8.
6. Матейчик В.П., Захарчук В.І., Козачук І.С.,

- Захарчук О.В.** Особливості використання природного газу як моторного палива для транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2008. – С. 127-130.
7. **Михалкін В.Б.** Підвищення енергоефективності та зниження собівартості заправки стисненим газом на АГНКС // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». – 2018. – Т. 3. – № 10(50). – С. 18-20.
8. URL: <https://www.bauer.kompressoren.de> (дата звернення 17.01.21).
9. **Гнедова Л.А., Гриценко К.А., Лапушкин Н.А., Перетряхина В.Б., Федотов И.В.** Газомоторные топлива на основе метана // Вести газовой науки. – 2015. – № 1(21). – С.86-97.
10. **Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б.** Перспективы производства и использования био-метана в Украине // Аналитическая записка БАУ. – 2014. – №11. – 44 с.
11. **Клименко В.В., Босий М.В.** Патент на корисну модель Україна, №134025 МПК F04B1/00, F25BJ1/00 Спосіб заправки автомобільного транспорту природним газом // u201812187; заявл. 10.12.2018; опубл. 25.04.2019, бюл. №8/2019.
12. **Klymenko V.V., Bosiy M.V., Yakymenko M.S. Martynenko V.V.** Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station // Proceedings of International research and practice conference "Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences". – December 27-28, 2017. – Radom: Izdavnictvo "Baltija Publishing". – P. 156-159.
13. **Макогон Ю.Ф.** Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974. – 208 с.
14. **Макогон Ю.Ф.** Газогидраты, история изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 2. – С. 5-21.
15. **Sloan E.D., Koh C.A.** Clathrate hydrates of natural gases // CRC Press, 2008. – 752 p.
16. **Макогон Ю.Ф.** Hydrates of Hydracarbon. – PennWell, Tulsa, USA, 1997. – 482 p.
17. **Клименко В.В.** Науково-технічні основи газогідратної технології (термодинаміка та кінетика процесів, схемні рішення): автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.06. – К., 2012. – 40 с.
18. **Koltun P., Klymenko V.** Methane hydrates – Australian perspective // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – Vol. 10, Is. 4. – P. 11-18. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.011>.
19. **Horiguchi K., Watanabe S., Moriya H., Nakai S.** Completion of natural gas hydrate overland transportation demo project // Proceedings of the 7 th International Conference on gas hydrates. – Edinburgh, Scotland, 2011.
20. **Gudmundsson J.S., Graff O.F.** Hydrate non-pipeline technology for transport of natural. URL: [http://www.igu.org/html/wgc2003/WGCpdf/files/10056\\_1046347297\\_14776\\_1.pdf](http://www.igu.org/html/wgc2003/WGCpdf/files/10056_1046347297_14776_1.pdf) (дата звернення 17.01.21).
21. **Nakai S.** Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain // Proceedings of the 25 th world gas conferences. – Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8. 2012. – P. 367-375.
22. **Клименко В.В., Босий М.В., Парафійник В.П., Прилипка С.О.** Газотурбінний привід з газогідратним дотискувачем паливного газу // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 4(150). – С. 37-40.
23. **Хмельнюк М.Г., Подмазко О.С., Подмазко І.О.** Холодильні установки та сфери їх використання: підручник. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 484 с.
24. **Vysniauskas A., Bichnoi P.R.** A Kinetic Study of Methane Hydrate Formation // 1Y Canadian Perma-irast Conference. – Calgary, 1981. – P. 299-304.
25. **Драганов Б.Х., Бессараб О.С., Долінський А.А., Лазаренко В.О., Міщенко А.В., Шеліманова О.В.** Теплотехніка: підручник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Київ: Фірма «ІНККОС», 2005. – 400 с.
26. **Бродянский В.М., Фратшер К., Михалек К.** Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
27. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721с.
28. **Клименко В.В., Корниенко В.Н., Скрипник А.В., Клименко В.В.** Энергоэффективность паро-компрессионных холодильных установок с конденсаторами воздушного охлаждения и аккумуляторами естественного холода // Холодильна техніка та технологія. – 2012. – № 5(139). – С. 21-24.

Отримана в редакції 25.01.2021, прийнята до друку 08.02.2021

## Improving the efficiency of an automobile gas filling compressor station using a gas hydrate accumulator

M. Bosiy<sup>1</sup>✉, V. Klymenko<sup>2</sup>✉, S. Magopec<sup>3</sup>, N. Harasova<sup>4</sup>, A. Ovcharenko<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Central Ukrainian National Technical University, Prospekt Universytetskyi, 8, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>bosiymv@ukr.net; <sup>2</sup>klymvas@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3090-0427>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-6840-7307>

*The problem of increase of work efficiency of automobile gas-filling compressor station (AGFCS) in the conditions of presence of peak loadings owing to uneven receipt on gas station of automobile transport during the day is considered in the article. To increase the efficiency of the AGFCS equipment in the conditions of uneven daily refueling of motor transport with compressed natural gas (CNG), it is proposed to use a gas hydrate accumulator (HA). HA implements the processes of formation of natural gas gas hydrates at low pressure, their accumulation and storage and subsequent melting with the release of compressed natural gas at a pressure of 25 MPa, sufficient for complete refueling of motor vehicles. The process of gas hydrate formation occurs with the release of heat, and its decomposition with heat absorption. It is proposed to remove the heat of the hydration formation process by a propane refrigeration machine (RM). However, at an ambient temperature of  $\leq 1$  °C, the process of formation of gas hydrates in HA can be carried out at a pressure of  $\leq 1,2$  MPa without the use of RM. At temperatures of  $\leq 0$  °C, aqueous solutions, such as ethanol or methanol, must be used instead of water in HA. The article provides a circuit-technological solution and describes the principle of operation of AGFCS with HA, the pressure-temperature diagram shows the main thermodynamic processes that take place in it. A method for determining the specific energy consumption ( $l_{spec}$ ) and exergetic efficiency ( $\eta_{ex}$ ) of HA is proposed and a specific example shows that  $l_{spec}$  gas hydrate compression demand is lower by 15% compared to compressor compression, and  $\eta_{ex}$  is higher by 12%. The use of HA, as an alternative to compressor compression of natural gas during peak periods of refueling, will increase the efficiency of AGFCS equipment and reduce energy consumption for refueling vehicles with compressed natural gas.*

**Keywords:** Natural gas; CNG; AGFCS; Compressor; Gas hydrates; Gas hydrate accumulator; Thermodynamic processes; Energy consumption; Exergetic efficiency.

### References

1. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Kostov, V.V., Mikhalkov, V.B. (2014) Automobile gas filling compressor stations (AGFCS): monograph. *Ivano-Frankivsk: Lileya-NV*, 320.
2. Fleets want to convert to methane: gas can save half the price of a car. Retrieved January 15, 2021, from <https://economics.segodnya.ua/economics/business/avtoparki-hotyat-perevesti-na-metan-na-gaze-mozhno-sekonomit-polceny-avto-1481276.html>.
3. Gavrish, V.I. (2006) Estimation of efficiency of application of automobile gas-filling compressor stations in agricultural production. *Bulletin of agrarian science of the Black Sea region*, 4, 66-71.
4. Sidorov, N. (2008) Methane micro refueling. *AGZK+AT*, 4 (40), 35-37.
5. Karp, I.M., Bykov, G.O. (2002) The prospect of using natural gas as a motor fuel in the motor transport of Ukraine. *Resource saving technologies*, 1, 3-8.
6. Mateychyk, V.P., Zakharchuk, V.I., Kozachuk, I.S., Zakharchuk, O.V. (2008) Features of the use of natural gas as motor fuel for vehicles. *Bulletin of the National Transport University. K.: NTU*, 127-130.
7. Mikhalkin, V.B. (2018) Improving energy efficiency and reducing the cost of refueling with compressed gas at CNG stations. *International Scientific Journal "Internauka"*. 3, 10 (50), 18-20.
8. Retrieved January 17, 2021, from <https://www.bauer.kompressoren.de>.
9. Gnedova, L.A., Gritsenko, K.A., Lapushkin, N.A., Peretryakhina, V.B., Fedotov, I.V. (2015) Gas-motor fuels based on methane. *Vesti gazovoi nauki*, 1 (21), 86-97.
10. Geletukha, G.G., Kucheruk, P.P., Matveev, Yu.B. (2014) Prospects for the production and use of biomethane in Ukraine. *Analytical note UAB*, 11, 44.
11. Klymenko, V.V., Bosiy, M.V. (2019) Patent for

- utility model Ukraine, No. 134025 IPC F04B1/00, F25BJ1 / 00 Method of refueling road transport by natural gas. U201812187; claimed 12/12/2018; publ. 25.04.2019, bul. No. 8/2019.
12. **Klymenko, V.V., Bosiy, M.V., Yakymenko, M.S., Martynenko, V.V.** (2017) Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station. Proceedings of International research and practice conference "Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences". *Radom: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 156-159.*
13. **Makogon, Y.F.** (1974) Hydrates of natural gases. *M.: Subsoil, 208.*
14. **Makogon, Y.F.** (2010) Gas-hydrates, history of study and development prospects. *Geology and minerals of the World ocean, 2, 5-21.*
15. **Sloan, E.D., Koh, C.A.** (2008) Clathrate hydrates of natural gases. *CRC Press, 752.*
16. **Makogon, Y.F.** (1997) Hydrates of Hydrocarbons. *PennWell, Tulsa, USA, 482.*
17. **Klymenko, V.V.** (2012) Scientific and technical bases of gas-hydrated technology (thermodynamics and kinetics of processes, circuit decisions). *The dissertation author's abstract of the doctor of technical sciences: 05.14.06. K, 40.*
18. **Koltun, P., Klymenko, V.** (2016) Methane hydrates – Australian perspective. *Mining of Mineral Deposits, 10, 4, 11-18.*
19. **Horiguchi, K., Watanabe, S., Moriya, H., Nakai, S.** (2011) Completion of natural gas hydrate overland transportation demo project. *Proceedings of the 7 th International Conference on gas hydrates, Edinburgh, Scotland.*
20. **Gudmundsson, J.S., Graff, O.F.** (2003) Hydrate non-pipeline technology for transport of natural gas. Retrieved January 17, 2021, from <http://www.igu.org/html/wgc2003/WGCpdffiles/10056-1046347297-14776-1.pdf>.
21. **Nakai, S.** (2012) Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. *Proceedings of the 25 th world gas conferences, Kuala Lumpur, Malaysia, 367-375.*
22. **Klymenko, V.V., Bosiy, M.V., Parafiynyk, V.P., Prilipko, S.O.** (2014) Gas turbine drive with gas-hydrated fuel gas distributor. *Refrigeration engineering and technology, 4(150), 37-40.*
23. **Khmelnjuk, M.G., Podmazko, O.S., Podmazko, I.O.** (2014) Refrigeration units and their areas of use: Textbook. *Kherson: Grin DS, 484.*
24. **Vysniauskas, A., Bichnoi, P.R.** (1981) A Kinetic Study of Methane Hydrate Formation. *1Y Canadian Permalrast Conference, Calgary, 299-304.*
25. **Draganov, B.H., Bessarab, O.S., Dolinsky, A.A., Lazarenko, V.O., Mishchenko, A.V., Shelimanova, O.V.** (2005) Heat engineering: Textbook, 2nd ed., rew. and ext. *Kyiv: INCOS Firm, 400.*
26. **Brodyansky, V.M., Fratscher, K., Mikhalek K.** (1988) Exergetic method and its applications. *M.: Energoatomizdat, 288.*
27. **Vargaftik, N.B.** (1972) Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. *M.: Nauka, 721.*
28. **Klymenko, V.V., Kornienko, V.N., Skripnik, A.V., Klimenko V.V.** (2012) Energy efficiency of steam-compression refrigeration units with air-cooled condensers and natural cold accumulators. *Refrigeration engineering and technology, 5 (139), 21-24.*

---

Received 25 January 2021

Approved 08 February 2021

Available in Internet 11 February 2021