

УДК 621.56:622.691.6:629.114 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).198-207](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).198-207)

**В.В. Клименко**, проф. д-р. техн. наук., **М.В. Босий**, викл., **В.В. Аулін**, проф. д-р. техн. наук, **І.І. Філімоніхіна**, доц. к.ф.-мат наук, **С. В.Лисенко**, доц, канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*klytmvas@ukr.net; bosiytv@ukr.net*

## Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора

В роботі запропоновано схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим природним газом в АГНКС з газогідратним акумулятором (АГНКС-ГА) та описано принцип її дії на конкретному прикладі. Показано, що в АГНКС-ГА з 4-ма ступенями компримування і акумуляторами стиснутого газу АСГ газ з ГА до АСГ рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{АСГ}/p_{ГА}$  більше критичного. Для характеристики енергоефективності заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА запропоновано використовувати коефіцієнт корисної дії заправки (ККД)  $\eta_{запр}^{га}$ . За результатами розрахунків показано, що енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА вище на 6%, ніж в традиційній АГНКС для тих же умов: відповідні значення коефіцієнтів корисної дії заправки  $\eta_{запр}^{га} = 0,47$  і  $\eta_{запр} = 0,41$ . Обгрунтовано можливість використання АГНКС-ГА для заправки пересувних автомобільних газових заправок (ПАГЗ) без застосування додаткового компресорного обладнання.

**природний газ, автомобільний транспорт, АГНКС, газогідрати, тиск, температура, газогідратний акумулятор, енергоефективність, ККД заправки**

**Постановка проблеми.** Використання природного газу, основним компонентом якого є метан, в якості газомоторного палива для автомобільного транспорту є важливою альтернативою традиційним нафтовим газомоторним паливам [1].

Для заправки автомобілів або інших транспортних засобів, двигуни яких розраховані на роботу на стисненому (компримованому) природному газі, використовують, в основному, автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС). До АГНКС природний газ надходить по газопроводах під тиском 0,6-1,2 МПа, стискується до 25 МПа і через газорозподільну систему в такому стані направляється на заправку газових балонів транспортних засобів [1,2]. З метою підвищення ефективності в сучасних АГНКС для стиснення газу застосовують переважно 4-х ступеневі компресорні установки, що дозволяє більш оптимально здійснювати заправку балонів, початковий тиск газу в яких 0,2-0,4 МПа, шляхом часткового заповнення балонів після кожної ступені стискування [1]. При цьому після кожної ступені стискування газ спочатку направляється в акумулятори стиснутого газу (АСГ), а вже з них здійснюється подача газу на заправку балонів. Це стабілізує роботу компресорів, знижує частоту їх включення при спрощеній автоматизації АГНКС, але необхідно відмітити високу вартість АСГ, яка складає ~ 50% вартості всього обладнання АГНКС [1].

© В.В. Клименко, М.В. Босий, В.В. Аулін, І.І. Філімоніхіна, С. В.Лисенко, А.В. Гриньків, 2021

Відомо, що на заправку в АГНКС автомобілі поступають суттєво нерівномірно на протязі доби: відношення максимальної кількості автомобілів в денний період до мінімальної в нічний становить  $\sim 7$  [1]. Але традиційні схемно-конструктивні рішення із застосуванням АСГ не дають можливості зменшити нерівномірність споживання стиснутого природного газу при заправці автомобілів в денний і нічний періоди доби, що призводить до оснащення АГНКС обладнанням завищеної продуктивності та понижує ефективність його використання [1].

В роботі [2] запропоновано здійснювати заправку автомобільного транспорту природним газом із застосуванням газогідратної технології для процесів стискування та акумулювання газу, що дозволяє підвищити ефективність використання АГНКС при неоднаковому споживанні стиснутого природного газу в денний і нічний періоди доби.

Для реалізації цієї технології використовується газогідратний акумулятор, в якому газ низького тиску контактує з водою або водним розчином в замкненому об'ємі при відповідній температурі з утворенням газогідратів, які зберігають та плавлять в цьому ж об'ємі з виділенням газу та води при більш високій температурі та відповідно більш високому тиску, ніж вони були утворені [3-6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [1] проведено дослідження термогазодинамічних процесів в традиційних АГНКС та розглянуті основні технологічні процеси.

Математична модель розрахунку необхідного числа і продуктивності заправних колонок на АГНКС з АСГ, розроблена з використанням теорії масового обслуговування, приведена в роботі [7]. Даний підхід також можна буде використовувати для розрахунку необхідного числа компресорів, акумуляторів, систем осушки і підготовки природного газу для заправки балонів автомобільного транспорту.

В роботі [8] запропонована нова схема комутації газорозподільних ліній на АГНКС, алгоритм управління компресорним обладнанням і розглянуто умови роботи динамічного секційного акумулятора газу з регулюванням по об'єму.

Математична модель робочого процесу лінії нагнітання з використанням багатоступеневих поршневих компресорів, фізико-математична модель руху газу на лінії високого тиску та математична модель заправки в балони автомобільного транспорту стиснутого газу приведені у роботі [9].

В згаданих вище роботах розглядаються різні варіанти заправки автомобільного транспорту стиснутим газом в АГНКС з традиційними АСГ.

Авторами [2] описано схемне рішення АГНКС з газогідратним акумулятором (ГА), визначено термодинамічні параметри реперних точок процесів циклу для конкретного складу природного газу, розраховано питомі енерговитрати в денний і нічний періоди роботи.

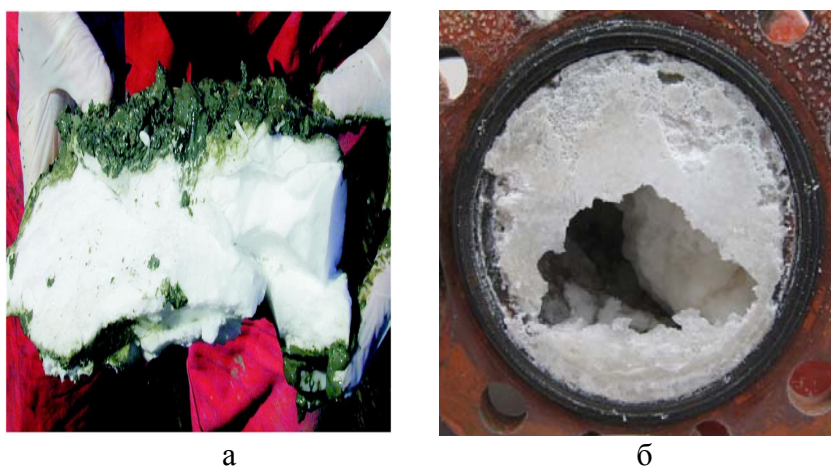
За результатами досліджень визначено, що застосування ГА в АГНКС дозволяє не тільки зробити більш рівномірним добове навантаження на обладнання АГНКС, а і зменшити добове енергоспоживання.

Але в роботі не розглянуто схемно-конструктивні рішення газогідратного акумулятора, не проаналізовано особливості термодинамічних процесів роботи ГА в режимах зарядки і розрядки та не визначено енергоефективність саме заправки в балони стиснутого газу при використанні ГА.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є розробка схемно-конструктивного рішення заправки стиснутим природним газом в АГНКС з газогідратним акумулятором ГА (АГНКС-ГА) та аналіз її енергоефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Газові гідрати – це супрамолекулярні кристалічні сполуки включення клатратного типу, у яких “включені” у льодоподібну структуру води молекули неполярних або малополярних речовин утримуються ван-дер-ваальсовими силами. Такі сполуки здатні утворювати більшість газів, розмір молекул яких знаходиться в межах 3,8...9,2 Å, та їх суміші, і деякі органічні рідини. Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить «м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках, зокрема для виробництва та акумулювання холоду, стиснення газів, розділення газових сумішей, опріснення солоних вод тощо [10-12]. Слід відмітити, що газогідрати існують також в природних умовах, а за сучасними прогнозними оцінками більшість покладів вуглеводневих газів знаходиться саме в газогідратному стані [10-12, 14].

Зовнішній вигляд газогідратів техногенного та природного походження показано на рис.1.



а – природні газогідрати; б – техногенні газогідрати

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд газових гідратів

*Джерело: на підставі [10-12]*

Технологія використання газогідратного акумулятора в АГНКС містить такі основні процеси: утворення газогідратів природного газу, їх накопичення та зберігання і плавлення з виділенням природного газу при високому тиску  $p = 25$  МПа, достатньому для повної заправки газових балонів автомобільного транспорту [2,13].

Дані, необхідні для розрахунку кінетики процесів утворення газогідратів природного газу можна знайти в роботах [15-18]. В них описано моделі механізмів зародження і росту газогідратів, напівемпіричні вирази для розрахунку швидкості утворення газогідратів.

Особливості механізму та кінетики розкладання газогідратів природного газу досліджено в роботах [15,16,19]. Визначено, що теплота розкладання гідрату метану ( $\text{CH}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) на газ і воду складає 54,2 кДж/моль, наведено напівемпіричні вирази для розрахунку швидкості плавлення газогідратів.

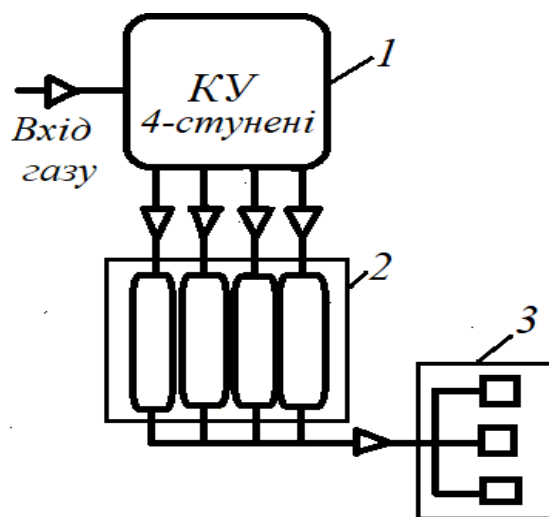
Газогідратну технологію стиснення та зберігання газів, отриманих при регазифікації зрідженого природного газу, апробовано в Японії на дослідному заводі по виробництву газогідратних гранул продуктивністю п'ять тонн на добу [20].

Аналіз роботи традиційних АГНКС з 4-ма ступенями стискування показує, що заправка газових балонів автомобілів починається з подачі газу з акумуляторів стиснутого газу (АСГ) при непрацюючих компресорах [1]. При пониженні тиску в

АСГ до значення технологічно нормованого, включаються в роботу компресори відповідної ступені стискування. Компресор останньої 4-ої ступені включається при пониженні тиску в АСГ-4 з 25 МПа до тиску остаточної заправки 21-22 МПа.

Використання загального акумулятора призводить до непродуктивної витрати 50% затраченої енергії на стискування, чому й застосовують дві, а частіше чотири ступені заправки автомобільного транспорту [1,9]. При цьому тиск в акумуляторних ємностях підтримується на меншому рівні, порівняно з робочим тиском в балонах автомобільного транспорту.

Схемне рішення заправки на традиційній АГНКС показано на рис. 2.



1 – компресорна установка (КУ) – чотири ступені; 2 – акумулятори стиснутого газу (АСГ) – чотири ємності (АСГ1-АСГ4); 3 – газобалонна установка автомобіля (ГБУ)

Рисунок 2 – Схема рішення заправки на традиційній АГНКС

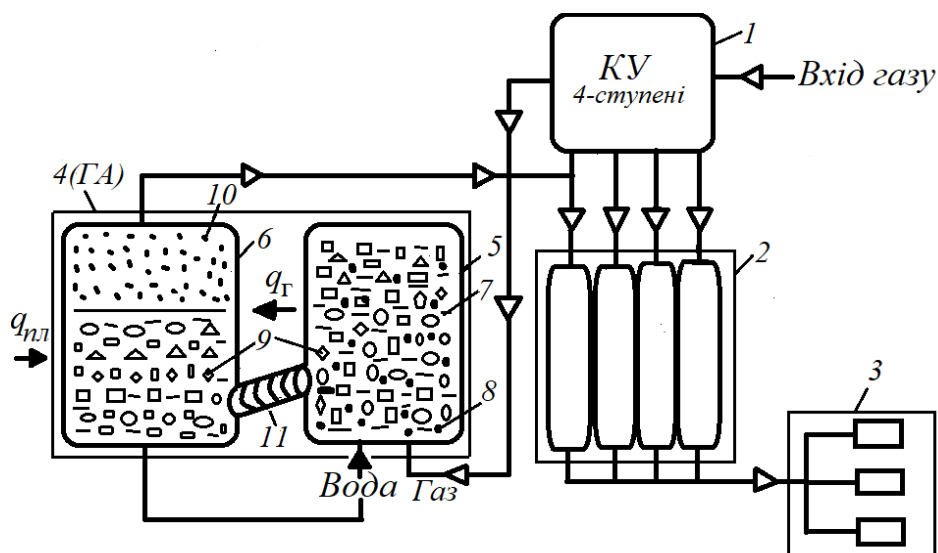
*Джерело: розроблено авторами на підставі [1, 9].*

За такою схемою реалізується ступенева заправка з використанням 4-х АСГ. Заправка здійснюється поступово із акумулятора більшої ємності з меншим тиском, а потім з акумулятора меншої ємності і більшим тиском.

Але, як було згадано вище, таке схемно-конструктивне рішення заправки на традиційній АГНКС, не дає можливості зменшити нерівномірність споживання стиснутого природного газу при заправці автомобілів в денний і нічний періоди доби, що призводить до використання обладнання завищеної продуктивності та знижує енергоефективність заправки.

Авторами в роботі [2] показано, що для вирішення цієї проблеми доцільно в АГНКС використовувати газогідратний акумулятор, який надає можливість в піковий денний період підвищити кількість заправок автомобілів на обладнанні АГНКС, розрахованому на середньодобову кількість заправок.

Нами пропонується схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС з ГА (АГНКС-ГА), яке приведено на рис. 3.



1 – компресорна установка (КУ) – чотири ступені стискування; 2 – акумулятори стиснутого газу (АСГ1-АСГ4) чотири ємності; 3 – газобалонна установка автомобіля (ГБУ); 4 – газогідратний акумулятор (ГА); 5 – кристалізатор утворення газогідратів; 6 – плавитель газогідратів; 7 – вода; 8 – газ; 9 – газогідрати; 10 – газ високого тиску; 11 – гвинтовий шнек (екструдер)

Рисунок 3 – Схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС - ГА  
Джерело: розроблено авторами

Роботу ГА при заправці стиснутим газом в АГНКС - ГА розглянемо на наступному прикладі. В нічний період, при меншому завантаженні АГНКС, природний газ з початковим тиском  $p = 1,2$  МПа і температурою  $t = 18$  °С спочатку подається в першу ступінь і компримується до тиску  $p = 3,5$  МПа, охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-1 для заправки балонів стиснутим газом або в другу ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 7,5$  МПа. Газ при цьому тиску охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-2 для заправки балонів стиснутим газом або в третю ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 15$  МПа. Стиснутий газ при цьому тиску охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-3 для заправки балонів стиснутим газом або в четверту ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 25$  МПа. Надлишкова частина газу, що не використовується в цей період для заправки балонів стиснутим газом надходить в кристалізатор 5, де при контакті з водою утворюються газогідрати при тиску  $p = 7,5$  МПа і температурі  $t = 16$  °С, а теплота гідратуутворення  $q_{\Gamma}$  відводиться холодильною машиною (ХМ), яку на схемі не показано. Утворені газогідрати 9 накопичують та зберігають в кристалізаторі 5, або в окремій ємності, яка на рис. 3 не показана.

В піковий період, при збільшенні завантаження АГНКС, накопичені газогідрати 9 подають за допомогою гвинтового шнекового (екструдера) 11 до плавителя газогідратів 6, в якому здійснюється підігрівання і плавлення газогідратів при температурі  $t = 22$  °С і тиску  $p = 25$  МПа з виділенням газу 8 і води 7, шляхом підведення теплоти  $q_{\text{пл}}$  від охолодження газу після ступенів компресорного стиснення. Виділена вода подається в кристалізатор на повторне гідратуутворення, а отриманий газ при тиску  $p = 25$  МПа направляють в акумулятор газу АСГ 4, з якого здійснюється остаточне наповнення газових балонів стиснутим природним газом.

Потрібно відмітити, що плавити газогідрати 9 в плавителі 6 можливо і при тиску  $p = 30-35$  МПа та отримувати стиснутий газ при цьому тиску, але при плавленні газогідратів необхідно буде підтримувати більш високу температуру  $t = 26-28$  °С. Такий

режим роботи АГНКС-ГА дозволить без застосування додаткового компресорного обладнання заправляти пересувні автомобільні газові заправники (ПАГЗ), в яких оптимальні значення максимального тиску знаходяться в межах 32-35 МПа [1]. В роботах [21,22] показано, що ПАГЗ доцільно використовувати для заправки техніки, яка знаходиться на відстанні більше 20 км від АГНКС.

Проведений аналіз показав, що в процесі подачі газу з ГА в АСГ він рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{АСГ}/p_{ГА}$  більше критичного, значення якого в першому наближенні можна прийняти  $\beta_{кр} = 0,546$  [23].

Виконані для наведених вище умов розрахунки за відомими термодинамічними рівняннями для потоку газу в докритичному режимі руху, без врахування втрат [23], показали, що швидкість руху по з'єднувальному трубопроводу діаметром  $d = 15$  мм має значення  $w = 793$  м/с. Це забезпечить питому подачу газу з ГА в АСГ на рівні  $m = 0,178$  кг/с.

В роботі [1] коефіцієнт корисної дії заправки балонів через ємність-аккумулятор газу  $\eta_{запр}$  визначають як відношення мінімальної роботи  $L_{min}$  на стиск газу для заповнення балонів за наявності холодильника, що підтримує постійною температуру газу, до затраченої роботи  $L_{затр}$ . Після нескладних математичних перетворень автори отримали для розрахунків  $\eta_{запр}$  наступний вираз:

$$\eta_{запр} = \frac{\frac{k}{2k-1} \left( \frac{p_p}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left( \frac{p_e}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{\frac{p_p}{p_{вс}} - 1}{\frac{p_e}{p_{вс}}}, \quad (1)$$

де  $p_{вс}$  і  $p_p$  – відповідно тиск всмоктування компресора і робочий тиск в балонах, МПа;

$p_e$  – тиск в ємності-аккумуляторі, МПа;

$k$  – показник адіабати для природного газу.

Але у випадку застосування ГА при визначенні  $L_{затр}$  потрібно враховувати затрати енергії в холодильній машині, яка забезпечує необхідні умови для утворення та накопичення газогідратів, що не дозволяє використовувати вираз (1) для розрахунку коефіцієнта корисної дії заправки балонів АГНКС-ГА. Тому нами для розрахунків  $\eta_{запр}^{га}$  – коефіцієнта корисної дії заправки балонів через ємність-аккумулятор газу із застосуванням ГА, пропонується такий вираз:

$$\eta_{запр}^{га} = \frac{e_{пр.г.}^{ст}}{I_k^{к.ст} + I_{ГТ}^{ст}}, \quad (2)$$

де  $e_{пр.г.}^{ст}$  – питома ексергія стиснутого газу в балоні при середніх значеннях робочих термодинамічних параметрів, кДж/кг;

$I_k^{к.ст} = I_{к1}^{к.ст} + I_{к2}^{к.ст}$  – питома робота на компримування газу в 1-й і 2-й ступенях компресорного стискування, кДж/кг;

$I_{ГТ}^{ст} = I_{ХМ}$  – питома робота газогідратного стискування природного газу, що дорівнює питомій роботі холодильної машини  $I_{ХМ}$ , кДж/кг.

Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора визначалася для умов наведеного вище прикладу роботи АГНКС-ГА за величиною коефіцієнта  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$ . Для порівняння при цих же умовах визначалася і енергоефективність заправки в традиційній АГНКС за величиною коефіцієнта  $\eta_{\text{запр}}$ .

Величини, що необхідні для розрахунку  $\eta_{\text{запр}}$  за формулою (1) і  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$  за формулою (2), визначалися згідно методикам, наведеним в роботах [1, 2, 23].

За результатами виконаних розрахунків було визначено, що  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}} = 0,47$ , а  $\eta_{\text{запр}} = 0,41$ , тобто енергоефективність заправки автомобільного транспорту в АГНКС-ГА на 6% вища, ніж в традиційній АГНКС.

Отже використання ГА дозволяє не тільки підвищити ефективність використання обладнання АГНКС в умовах роботи при нерівномірній добовій заправці автомобільного транспорту, а і підвищити енергоефективність заправки автомобільного транспорту.

#### **Висновки.**

1. Запропоновано схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС з газогідратним акумулятором та на конкретному прикладі розглянуто принцип її дії.

2. Визначено, що в процесі подачі газу з ГА в акумулятор стисненого газу АСГ він рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{\text{АСГ}}/p_{\text{ГА}}$  більше критичного, значення якого в першому наближенні можна прийняти  $\beta_{\text{кр}} = 0,546$ . Виконані для умов розглянутого прикладу розрахунки показали, що швидкість руху по з'єднувальному трубопроводу діаметром  $d = 15$  мм має значення  $w = 793$  м/с і це забезпечить питому подачу газу з ГА в АСГ на рівні  $m = 0,178$  кг/с.

3. Запропоновано вираз для розрахунку  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$  – коефіцієнта корисної дії заправки балонів через ємність-акумулятор стиснутого газу із застосуванням ГА.

4. За результатами розрахунків показано, що енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА вище на 6%, ніж в традиційній АГНКС для тих же умов: відповідні значення коефіцієнтів корисної дії заправки  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}} = 0,47$  і  $\eta_{\text{запр}} = 0,41$ .

5. Показано, що в АГНКС-ГА можна розкладати газогідрати в плавителі при температурі 26-28 °С та отримувати стиснутий газ при тиску  $p = 30-35$  МПа. Такий режим роботи АГНКС-ГА дозволить без застосування додаткового компресорного обладнання заправляти пересувні автомобільні газові заправники (ПАГЗ), в яких оптимальні значення максимального тиску знаходяться в межах 32-35 МПа.

#### **Список літератури**

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. Підвищення ефективності автомобільної газонаповнювальної компресорної станції шляхом застосування газогідратного акумулятора. / М.В. Босий та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2021. №57(1). С. 45-54. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978> (дата звернення: 02.04.2021)
3. Клименко В.В., Босий М.В., Парафійник В.П., Прилипко С.О. Газотурбінний привід з газогідратним дотискувачем паливного газу. *Холодильна техніка та технологія*. 2014. № 4(150). С. 37-40.

4. Клименко В.В. Науково-технічні основи газогідратної технології (термодинаміка та кінетика процесів, схемні рішення): автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2012. 40 с.
5. Онищенко В.О., Клименко В.В. Застосування газогідратних технологій в нафтогазовій промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4(41). С. 5-8.
6. Klymenko V.V., Bosiy M.V., Yakymenko M.S., Martynenko V.V. Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station . *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference. Conference proceedings, December 27-28, 2017. Radom: Izdevnieciba "Baltija Publishing"*. P. 156-159.
7. Евстифеев А.А. Математическая модель процесса заправки транспортных средств КПГ на АГНКС. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2014. № 1 (37). С. 24-31.
8. Евстифеев А.А., Никорук И.Ф., Математическое моделирование режимов работы и производственных процессов АГНКС . *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. № 3 (63). С. 25-38.
9. Евстифеев А.А. Математическое моделирование производственных процессов АГНКС . *Транспорт на альтернативном топливе*. 2017. № 6 (60). С. 43-52.
10. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов, Москва: Недра, 1974. 208 с.
11. Макогон Ю.Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения . *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5-21.
12. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases . CRC Press, 2008. 752 p.
13. Клименко В.В., Босий М.В. Патент на корисну модель Україна, №134025 МПК F04B1/00, F25B1/00 Спосіб заправки автомобільного транспорту природним газом // u201812187; заявл. 10.12.2018; опубл. 25.04.2019, бюл. №8/2019.
14. Koltun P., Klymenko V. Methane hydrates – Australian perspective / *Mining of Mineral Deposits*, 2016 Volume 10, Issue 4, P.11-18. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.011> (Last accessed:
15. Бондаренко В.І., Витязь О.Ю., Зоценко М.Л. Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів; монографія. Дніпропетровськ. Літограф, 2015. 219с.
16. Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях, М: Недра, 1992. 236 с.
17. Vysniaukas A.A. P. R. Bichnoi. Kinetic study of methane hydrate formation. *Chem. Eng. Sci*, 1983. Vol.38. P.1061-1072.
18. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane end ethane gas hydrates. *Chem. Eng. Sci*, 1987. Vol.42. P.2647-2658.
19. Семенов М.Е., Калачова Л.П., Шиц Е.Ю., Рожин И.И. Разложение природного газа в присутствии метанола . *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. №18. С.153-157.
20. 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*.
21. Гавриш В.І. Оцінка ефективності застосування автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій у сільськогосподарському виробництві . *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2006. Вип. № 4. С. 66-71.
22. Сидоров Н. Метановые микрозаправки . *АГЗК+АТ*. 2008. №4 (40). С. 35-37.
23. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинаміка, М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 496 с.

## References

1. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Kostov, V.V. & Mikhalkov, V.B. (2014) Automobile gas filling compressor stations (AGNKS): monograph. Ivano-Frankivsk: Lileya-NV, 320 [in Ukrainian].
2. Bosiy M.V., Klymenko V.V. Magopets S.O., Garaseva N.Yu., Ovcharenko A.O. (2021) Improving the efficiency of the automobile gas-filling compressor station by using a gas-hydrate battery. *Refrigeration Engineering and Technology*, № 57 (1) .45-54 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978>
3. Klymenko V.V., Bosiy M.V., Parafinyuk V.P., Prilipko S.O. (2014) Gas turbine drive with gas-hydrated fuel gas distributor // *Refrigeration equipment and technology*, № 4(150). 37-40 [in Ukrainian].
4. 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 [in Ukrainian].
5. Onychenko V.O., Klymenko V.V. (2011) The application of gas-hydrate technologies in the oil and gas-industry // *Exploration and development of oil and gas deposits*, № 4(11). 5-8 [in Ukrainian].
6. Klymenko V.V. Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station / Klymenko V.V., Bosiy M.V., Yakymenko M.S. Martynenko V.V. (2017) // *International research and practice conference "Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of*



- technical sciences”: Conference proceedings, December 27-28, Radom: Izdavniceiba “Baltija Publishing”.156-159 [in Poland].
7. Evstifeev A.A. (2014) Mathematical model of the process of refueling CNG vehicles at CNG stations // *Transport on alternative fuels*, № 1 (37). 24-31 [in Russian].
  8. Evstifeev A.A., Nikoruk I.F. (2018) Mathematical modeling of operating modes and production processes of CNG stations // *Transport on alternative fuels*, № 3 (63). 25-38 [in Russian].
  9. Evstifeev A.A. (2017) Mathematical modeling of CNG production processes // *Transport on alternative fuels*, № 6 (60). 43-52 [in Russian].
  10. Makogon Yu.F. (1974) *Hydrates of natural gases*, M: Subsoil, 208 [in Russian].
  11. Makogon Yu.F. (2010) Gas hydrates, history of study and prospects of development // *Geology and minerals of the World ocean*, № 2. 5-21[in Russian].
  12. Sloan E.D., Koch C.A. (2008) *Clathrate hydrates of natural gases* // CRC Press, 752 p [in USA].
  13. Klymenko V.V., Bosiy M.V. (2019) Patent for utility model Ukraine, №134025 IPC F04B1 / 00, F25BJ1 / 00 Method of refueling motor transport with natural gas // u201812187; declared 12/10/2018; publ. 25.04.2019, bldg. №8 / 2019 [in Ukrainian].
  14. Koltun P., Klymenko V. (2016) Methane hydrates – Australian perspective / *Mining of Mineral Deposits*, Volume 10, Issue 4,11– 18. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.011>
  15. Bondarenko V.I., Vityaz O.Y., Zotsenko M.L. *Gashydrates*. (2015) Hydrate formation and basics of gas hydrates development; monograph, Dnepropetrovsk. Lithograph. 219 [in Ukrainian].
  16. Istomin V.A., Yakushev B.C. (1992) *Gas hydrates in natural conditions*. M: Nedra. 236 [in Russian].
  17. Vysniauskas A.A. (1983) Kinetic study of methane hydrate formation / A. Vysniauskas, P. R. Bichnoi // *Chem. Eng. Sci*, V.38. 1061-1072 [in Canada].
  18. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. (1987) Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates./ P. Englezos, N. Kalogerakis, P.D. Dholabhai, P.R. Bishnoi // *Chem. Eng. Sci*. V.42. 2647-2658 [in Canada].
  19. Semenov M.E., Kalachova L.P., Shits E.Yu., Rozhin I.I. (2010) Decomposition of natural gas in the presence of methanol // *Chemistry in the interests of sustainable development*, №18.153-157 [in Russian].
  20. Horiguchi K., Watanabe S., Moriya H., Nakai S. (2011) Completion of natural gas hydrate overland transportation demo project // *Proceedings of the 7th International Conference on gas hydrates*. – Edinburgh, Scotland [in English].
  21. 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*, Vip. № 4. 66-71[in Ukrainian].
  22. Sidorov N. (2008) Methane refueling // *AGZK + AT*, №4 (40). 35-37 [in Ukrainian].
  23. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. (2016) *Technical thermodynamics*, M.: MEI Publishing House, 496 [in Russian].

**Vasyl Klymenko**, Prof., DSc., **Mykola Bosiy**, Sen. Lect., **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Irina Filimonikhina** Assos. Prof., PhD of Phys.& Math. Sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **The energy efficiency of refueling automobile transport with compressed natural gas when using a gas hydrate accumulator**

The article briefly describes the processes carried out during the operation of the gas hydrate accumulator (GHA) at the automobile gas-filling compressor station (AGCS): formation of natural gas hydrates, their accumulation and storage, and melting with the release of natural gas at high-pressure  $p = 25\text{MPa}$ , sufficient for full refueling gas cylinders. The circuit-constructive solution of filling with compressed natural gas in AGCS-GHA is offered, and the principle of its work is described in a good example. It is shown that during AGCS-GHA operation with four compression stages and ACG compressed gas accumulators, the gas from GHA to ASG moves in the connecting pipeline at adiabatic conditions at subcritical speed, i.e., below the speed of sound, because the pressure ratio  $p_{\text{ASG}} / p_{\text{GHA}}$  coefficient is more critical. Calculations performed for these conditions by thermodynamic equations of gas flow in the subcritical mode of motion, without losses, showed that the velocity in a pipe with a diameter of  $d = 15\text{ mm}$  has a value of  $w = 793\text{ m/s}$ . This will ensure a specific gas supply from GHA to ASG at the level of  $m = 0.178\text{ kg/s}$ .

It is proposed to use the coefficient efficiency of refueling to characterize the energy efficiency of refueling vehicles with compressed natural gas in AGCS-GHA. According to the results of calculations, it is evident that the energy efficiency of refueling vehicles with compressed natural gas in AGCS-GHA is 6%

higher than in traditional AGCS at the same conditions: the corresponding values of coefficient refueling efficiency  $\eta_{\text{GHA}} = 0.47$  and  $\eta_{\text{AGCS}} = 0.41$ .

The article also illustrates that in the process of melting gas hydrates in GHA at a temperature of  $t = 26$ - $28$  °C, one can get compressed natural gas at a pressure of  $p = 30$ - $35$  MPa, which will use AGCS-GHA without additional compressor equipment for refueling mobile gas stations (PAGZ), in which the optimal values of the maximum pressure are in the range of 32-35 MPa.

*Одержано (Received) 06.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*