

АНАЛІЗ ЕНЕРГОВИТРАТ СТИСКУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В АВТОМОБІЛЬНІЙ ГАЗОНАПОВНЮВАЛЬНІЙ КОМПРЕСОРНІЙ СТАНЦІЇ З ГАЗОГІДРАТНИМ АКУМУЛЯТОРОМ

Босий Микола Вікторович

викладач

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

ORCID: 0000-0002-3090-0427

bosiyvm@ukr.net

Нині зміни, які відбуваються в агропромисловому комплексі України потребують розробки та створення нових технологій заправки сільськогосподарських машин, автомобілів та вдосконалення наявних технологій заправки цього транспорту стиснутим природним газом. До відновлюваних газів належать горючі гази, які отримані з відновлюваних джерел енергії, серед них біометан (CH_4) – аналог природного газу, доведений до його якості. Перевага біометану перед природним газом в тому, що це відновлюваний ресурс. Його отримують з біомаси шляхом анаеробного зброджування і далі збагачують до вмісту 95–98 % метану. Натепер актуальним питанням є використання новітніх газогідратних технологій заправки сільськогосподарської техніки та автомобілів з використанням природного газу та біометану на автомобільних газонаповнювальних компресорних станціях (АГНКС).

Підвищення ефективності компресорної установки для АГНКС при неоднаковому споживанні природного газу на заправку в денний і нічний періоди доби можливо шляхом застосування газогідратного акумулятора (ГА).

У роботі надано схемно–технологічне рішення та описано принцип дії ГА для АГНКС. Приведено методику визначення енерговитрат при газогідратній термокомпресії природного газу для АГНКС–ГА. Проаналізовано енерговитрати газогідратного і компресорного стискування природного газу для АГНКС–ГА при змінній початкової температури газу та витраті природного газу від 850 до 1600 м³/год. Розраховані енерговитрати в ГА при газогідратному стискуванні менші, ніж при компресорному стискуванні природного газу на 10–15 %.

Розроблено методику визначення енерговитрат в ГА, для АГНКС–ГА коли утворення газогідратів здійснюється в одному об'ємі а плавлення їх в іншому об'ємі та виконано порівняльний аналіз газогідратного і компресорного стискування природного газу. З'ясовано, що потужність енерговитрат в ГА менше, ніж компресорне стискування природного газу, внаслідок рознесення в часі процесів утворення і плавлення газогідратів. Виконано також аналіз енерговитрат на стискування природного газу, важливих для практики значень змін його початкових параметрів: тиску від 1,2 МПа, температури від +18 °С. З'ясовано, що застосування ГА в АГНКС дозволяє не тільки зробити більш рівномірним добове навантаження на обладнання АГНКС, а також підвищити ефективність і зменшити її енергоспоживання. Показано, що енерговитрати газогідратного стискування газу в ГА можуть бути меншими, ніж при компресорному стискуванні тільки при певному значенні початкових температур, тисків та витрат природного газу.

Ключові слова: природний газ, біометан, автомобільний транспорт, АГНКС, тиск, температура, газогідратний акумулятор, енерговитрати.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.1.1>

Вступ. Натепер стиснений природний газ – СПГ (compressed natural gas – CNG), основним компонентом якого є метан, займає провідне місце в якості альтернативи нафтовим газомоторним паливам (Hrudz et al., 2014).

З метою ефективного використання природного газу (ПГ), як газомоторного палива (ГМП), для потужних фермерських господарств, що використовують значну кількість транспортної техніки, економічно вигідно будівництво та використання власних автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) для заправки сільськогосподарської техніки та автомобілів стиснути газом (Havrysh, 2006; Mykhalkin, 2018).

Нині перспективний напрямок – це переобладнання сільськогосподарської техніки на використання природного газу як ГМП (Zakharchuk, 2014).

Переваги природного газу метану як ГМП: екологічність, більша безпечність, висока антидетонаційна властивість сприяють збільшенню кількості заправних станцій та метанових автомобілів (Hrudz et al., 2014; Matyuchuk et al., 2008).

У роботі (Havrysh, 2006) 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.

Нині мережа метанових автозаправок «Укравтогаза» запускає програму компенсації витрат на придбання нового і б/у CNG 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 строк тривалості програми CNG Forward становить 10 років (Tymofeiev, 2020).

Перспективним напрямком для заправки автомобільного транспорту є використання біометану, який виробляють з відновлюваних джерел енергії в якості палива. Використання біометану як моторного палива дає можливість сільськогосподарським виробникам

отримати власне паливо для сільськогосподарського транспорту (Geletukha et al., 2014).

З аналізу літературних джерел видно, що натепер актуальним питанням є застосування найновітніх технологій та процесів заправки сільськогосподарської техніки та автомобілів з використанням природного газу та біометану.

Тому нині актуальним є розробка схемно-технологічного рішення застосування газогідратного акумулятора (ГА) для підвищення ефективності використання АГНКС в умовах роботи нерівномірної добової заправки сільськогосподарських машин і автомобільного транспорту та аналіз енерговитрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині для заправки автомобілів та інших транспортних засобів сільськогосподарських машин в агропромисловому комплексі використовують, в основному, 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 балонів транспортних засобів (Hrudz et al., 2014). Автомобільний транспорт на заправку в АГНКС поступає суттєво нерівномірно на протязі доби: відношення максимальної кількості автомобілів в денний період до мінімальної в нічний становить ~ 7 (Hrudz et al., 2014). Традиційні схемно-технологічні рішення АГНКС 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 знижує ефективність його використання (Hrudz et al., 2014).

Підвищення ефективності компресорної установки для АГНКС при неоднаковому споживанні газу на заправку в денний і нічний періоди доби можливо шляхом застосування ГА. Для акумуляування і стискування природного газу можна використовувати газогідратну термокомпресію (Bosyi et al., 2021; Klymenko et al., 2021; Bosyi et al., 2014; Klymenko et al., 2017).

В роботі (Bosyi et al., 2021) запропоновано здійснювати заправку автомобільного транспорту природним газом із застосуванням газогідратної технології для процесів стискування та акумуляування газу, що дозволяє підвищити ефективність використання АГНКС при неоднаковому споживанні стиснутого природного газу в денний і нічний періоди доби.

Альтернативою компресорному обладнанню для підвищення тиску природного газу та заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом може стати ГА, виконаний у вигляді реактора утворення і плавлення газогідратів (Bosyi et al., 2021).

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

Нині компресорна установка для АГНКС, яка застосовується для заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом (Hrudz et al., 2014) включає чотири ступені компресорного стискування, міжступеневі

охолоджувачі газу, вологомасловіддільники, впускний, з'єднувальний та заправні трубопроводи, триходові вентиля, встановлені на лінії впуску і нагнітання кожної ступені компресорного стискування і з'єднаних з входом і виходом ступенів компресорного стискування та входом блоку осушки, вихід якого з'єднаний з балонами, що заправляються газом.

Також відомо застосування газогідратного пристрою для здійснення процесів стискування та акумуляування газу (Klymenko et al., 2014; Bosyi et al., 2021). В цьому пристрої 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.

В роботі (Klymenko et al., 2021) запропоновано здійснювати утворення газогідратів в одному об'ємі та транспортування їх шнековим сепаратором в інший об'єм, при цьому здійснюють сепарацію газогідратів від води і плавлення їх з одержанням газу високого тиску.

Енерговитрати в компресорній установці можна визначити за методиками, приведеними як в літературі з технічної термодинаміки, так і в спеціальній літературі з розрахунку компресорів (Kholomenyuk, 2013).

Розрахунки енерговитрат при здійсненні основних процесів газогідратної термокомпресії утворення і плавлення гідратів найбільш повно проведені для умов роботи газогідратного дотискувача паливного газу для газотурбінного приводу (Klymenko et al., 2014).

Конкурентність газогідратного і компресорного стискування природного газу для АГНКС можна визначити на основі порівняльного аналізу енергозатрат при їх здійсненні.

Постановка завдання. Метою даної статті є розробка методики для визначення енерговитрат в ГА для АГНКС та виконання порівняльного аналізу газогідратного і компресорного стискування природного газу.

Матеріали і методи дослідження. Газові гідрати (або клатрати) – кристалічні сполуки, що утворюються при певних термобаричних умовах з води і газу. Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить «м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках виробництва. Газогідрати існують також в природних умовах, а за сучасними прогностичними оцінками більшість покладів вуглеводневих газів знаходиться саме в газогідратному стані (Pivnyak et al., 2015; Pedchenko, 2014; Sloan & Koch, 2008).

На рис. 1 наведено схемно-технологічне рішення компресорної установки для АГНКС-ГА (Bosyi et al., 2021; Klymenko et al., 2021).

Запропоновано що ГА виконаний у вигляді реактора утворення та реактора плавителя газогідратів, в якому здійснюється газогідратна термокомпресія природного газу. Технологія використання газогідратного акумулятора в АГНКС містить такі основні процеси: утворення газогідратів природного газу, їх накопичення, зберігання і плавлення з виділенням природного газу при високому

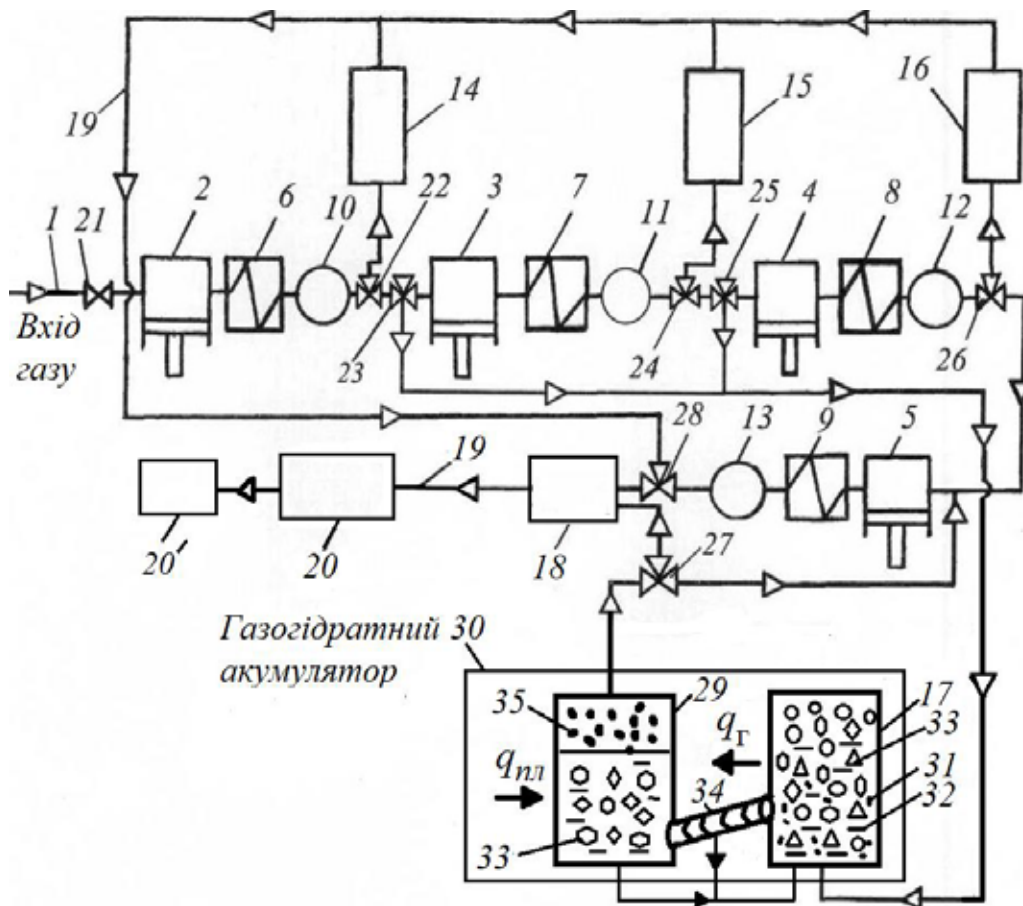


Рис. 1. Схемно-технологічне рішення компресорної установки для АГНС-ГА

1 – впускний трубопровід; 2, 3, 4, 5 – перша, друга, третя, четверта ступені компресорного стискування; 6, 7, 8, 9 – охолоджувачі; 10, 11, 12, 13 – вологомасло-віддільники; 14, 15, 16, 20' – ємності для накопичення газу (акумулятори); 17 – реактор утворення газогідратів; 18 – блок осушки; 19 – заправні трубопроводи; 20 – газові балони для заправки стиснутим газом; 21 – вентиль; 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 – триходові вентиля; 29 – реактор плавитель газогідратів; 30 – газогідратний акумулятор; 31 – надлишкова частина газу; 32 – вода; 33 – газогідрати; 34 – шнековий сепаратор; 35 – газ високого тиску

тиску $p = 25$ МПа, достатньому для повної заправки газових балонів автомобільного транспорту (Klymenko & Bosyi, 2019; Klymenko et al., 2019; Bosyi et al., 2021; Klymenko et al., 2021).

Роботу компресорної установки з ГА приведемо на наступному прикладі.

При зменшеному завантаженні АГНС, природний газ, наступного складу: CH_4 – 94,12 %; C_2H_6 – 2,92 %; C_3H_8 – 0,92 %; C_4H_{10} – 0,42 %; C_3H_{12} – 0,11 %; CO_2 – 1,22 %; N_2 – 0,15 %; C_{6+} – 0,14 %, з початковим тиском $p = 1,2$ МПа і температурою $t = 18$ °С через впускний трубопровід 1 і вентиль 21 подається в першу ступінь 2 і компримується до тиску $p = 3,5$ МПа. Стиснутий газ через охолоджувач 6, вологомасловіддільник 10, триходовий вентиль 22 подається або на заправку балонів 20' стиснутим газом через акумулятор газу АСГ1 14, заправочний трубопровід 19, триходовий вентиль 28 і блок осушки 18, або через триходовий вентиль 23 в другу ступінь 3, в якій газ компримується до тиску $p = 7,5$ МПа. Газ при цьому тиску через охолоджувач 7 і вологомасловіддільник 11, триходовий вентиль 24 акумулятор газу

АСГ2 15, заправочний трубопровід 19, триходовий вентиль 28 блок осушки 18 подається або на заправку балонів 20' стиснутим газом, або через триходовий вентиль 25 в третю ступінь 4, в якій газ стискується до тиску $p = 15$ МПа. Стиснутий газ через охолоджувач 8, вологомасловіддільник 12, триходовий вентиль 26 подається або на заправку балонів 20' стиснутим газом через акумулятор газу АСГ3 16, заправочний трубопровід 19, триходовий вентиль 28 і блок осушки 18, або через триходовий вентиль 26 в четверту ступінь 5, в якій газ компримується до тиску $p = 25$ МПа. Надлишкова частина газу 31, що не використовується в цей період для заправки балонів 20' стиснутим газом та не подається в другу 3 і третю ступінь 4 через триходові вентиля 23 і 25, надходить в реактор утворення газогідратів 17, де при контакті з водою 32 утворюються газогідрати 33 при тиску $p = 7,5$ МПа і температурі $t = 16$ °С, а теплота гідратуутворення q_r відводиться холодильною машиною (ХМ), яка на схемі (рис. 1) не показана.

Утворені газогідрати 33 накопичують та зберігають, а при збільшенні завантаження АГНС, газогідрати 33

подають за допомогою шнекового сепаратора 34 з реактора утворення газогідратів 17 до реактора плавителя газогідратів 29, в якому здійснюється підігрівання і плавлення газогідратів 33 шляхом підведення теплоти $q_{\text{пл}}$ від охолодження газу після ступенів компресорного стиснення при температурі $t = 20$ °С і тиску $p = 15$ МПа з виділенням газу і води. Виділена вода 32 перекачується в реактор утворення газогідратів 17 на повторне гідратуутворення, а отриманий газ високого тиску 35 по трубопроводу через триходовий вентиль 27, блок осушки 18 і заправочний трубопровід 19 направляють через акумулятор газу АСГ4 20 на часткове наповнення балонів 20' стиснутим газом, або по трубопроводу через триходовий вентиль 27 на копримування в четверту ступінь 5 до тиску $p = 25$ МПа, вихід з якої через охолоджувач 9, вологомасловіддільник 13, триходовий вентиль 28, блок осушки 18 і заправочний трубопровід 19 з'єднаний з балонами 20' для заправки стиснутим природним газом.

Потрібно відмітити, що плавити газогідрати 33 в плавителі 29 можливо і при тиску $p = 25$ МПа, але при плавленні газогідратів необхідно буде підтримувати більш високу температуру $t = 22$ °С. В цьому випадку робота АГНКС буде забезпечуватись компресорами першої і другої ступеней стискування та плавителем газогідратів 29. Вода після плавлення газогідратів повторно використовується для гідратуутворення в реакторі утворення газогідратів 17, а отриманий газ 35 в залежності від умов роботи направляють в акумулятор газу АСГ4 20, а потім на заправку газових балонів 20' до кінцевого тиску $p = 25$ МПа, достатнього для повної заправки автомобільного транспорту.

Конфігурація термодинамічних циклів холодильного агента в ГА відповідає одноступінчатому зворотньому циклу, загальний вигляд якого на T - S діаграмі наведено на рис. 2.

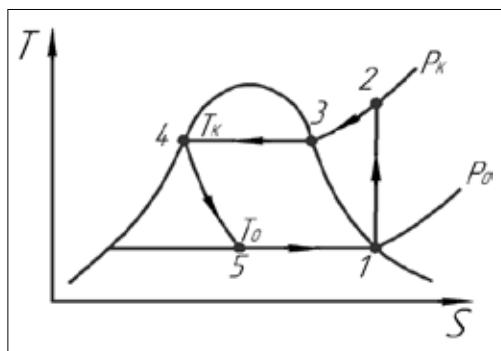


Рис. 2. Термодинамічні цикли холодильного агента, що здійснюються в ГА: 1–2 – стискування; 2–3–4 – охолодження і конденсація; 4–5 – дроселювання; 5–1– кипіння

Вибір величин $T_0(P_0)$ для термодинамічного циклу холодильного агента в ГА визначається рівноважними температурами і тисками для початкових параметрів природного газу, а $T_k(P_k)$ – температурою і тиском плавлення газогідратів, що забезпечують отримання стиснутого природного газу.

Вибір величини $T_0(P_0)$ для ГА в режимі утворення газогідратів визначається рівноважними температурами і тисками для початкових параметрів природного газу, а $T_k(P_k)$ – температурою навколишнього середовища. В режимі плавлення газогідратів $T_0(P_0)$ визначається температурою навколишнього середовища, а $T_k(P_k)$ – температурою і тиском плавлення, що забезпечують отримання стиснутого природного газу.

Енерговитрати газогідратного і компресорного стискування природного газу визначалися для умов наведеного вище прикладу роботи АГНКС-ГА.

Методика визначення енерговитрат в ГА для АГНКС наступна. Основні енерговитрати в ГА складаються з витрат на роботу компресора у зворотньому циклі та витрат на роботу пропанового компресора у холодильному циклі при утворенні гідратів.

Питома робота компресора (числові значення приведені для випадку застосування в якості холодильного агента пропану):

$$l_k = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_k}, \quad (1)$$

де $\kappa = 1,13$ – показник адіабаты для пропану;

$R_{(C_3H_8)} = 188,95$ Дж/кг – газова стала пропану;

$\mu_{(C_3H_8)} = 44$ кг/кмоль – молекулярна маса пропану;

$T_1 = T_0$, К – температура кипіння пропану;

$P_1 = P_0$, МПа – тиск кипіння пропану;

$P_2 = P_k$, МПа – тиск конденсації пари пропану;

$\eta_k = 0,85$ – ефективний ККД компресора.

Потужність компресора:

$$N_k = l_k \cdot G_{\text{ар}(C_3H_8)}, \quad (2)$$

де l_k – питома робота компресора, кВт;

$G_{\text{ар}(C_3H_8)}$ – витрата робочого холодоагента пропану, кг/с.

Витрата робочого агента (пропану):

$$G_{\text{ар}(C_3H_8)} = \frac{Q_r}{\Delta h_{(C_3H_8)}}, \quad (3)$$

де Q_r – кількість теплоти, яка відводиться в процесі гідратуутворення, кДж/с;

G_r – витрати гідратуутворюючого агента (природного газу), кг/с;

ΔH_r – теплота гідратуутворення природного газу, кДж/кг_(ар);

$\Delta h_{(C_3H_8)} = h_1 - h_5$, кДж/кг – різниця ентальпій холодильного агента пропану в точках 1 і 5.

Витрата (масова) природного газу – гідратуутворюючого агента

$$G_m = V_m \cdot \rho_m, \quad (4)$$

де V_m і ρ_m – об'ємна витрата і густина природного газу.

Аналіз енерговитрат на газогідратне та компресорне стискування природного газу проводився для АГНКС-ГА.

Вихідні дані для розрахунків:

– склад природного газу: CH_4 – 94,12 %; C_2H_6 – 2,92 %; C_3H_8 – 0,92 %; C_4H_{10} – 0,42 %; C_5H_{12} – 0,11 %; C_6+ – 0,14 %; CO_2 – 1,22 %; N_2 – 0,15 %;

– тиск природного газу на вході в газогідратний пристрій (ГА) P_m – 7,5 МПа;

– холодильний агент – пропан (C_3H_8);

– ефективний ККД пропанового компресора і компресора для стискування природного газу – 0,85;

– питома теплота гідратуутворення метану – 3785 кДж/кг CH_4 (Klyumenko et al., 2014);

– питома теплоємність гідрату метану – 2,5 кДж/кг·К (Klyumenko et al., 2014).

Енерговитрати в ГА визначалися за вищевикладеною методикою, а компресора для стискування природного газу – в 1-й, 2-й, 3-й і 4-й ступені компримування за відомою методикою, в наступних межах параметрів:

– початковий тиск природного газу P_{1m} – 1,2 МПа;

– початкова температура природного газу T_{1m} – 291 К.

Термін роботи ГА в режимі утворення газогідратів – 1 ÷ 10 год.

Результати. На рис. 3–5 наведено результати розрахунків потужності енерговитрат компресорного і газогідратного стискування природного газу для АГНКС–ГА.

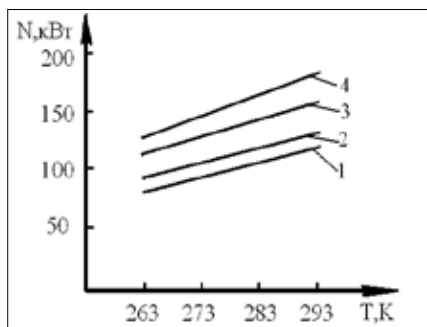


Рис. 3. Залежність потужності компресорного стискування в 1-й, 2-й, 3-й і 4-й ступені компримування від початкової температури природного газу (при витраті природного газу: 1 – 850 м³/год; 2 – 1000 м³/год; 3 – 1300 м³/год; 4 – 1600 м³/год)

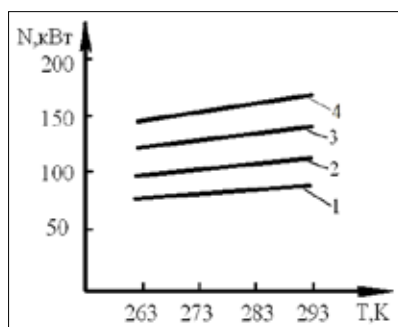


Рис. 4. Залежність потужності компресорного стискування в 1-й, 2-й ступені компримування і потужності пропанового компресора ГА в процесі гідратуутворення від початкової температури природного газу (при витраті природного газу: 1 – 850 м³/год; 2 – 1000 м³/год; 3 – 1300 м³/год; 4 – 1600 м³/год)

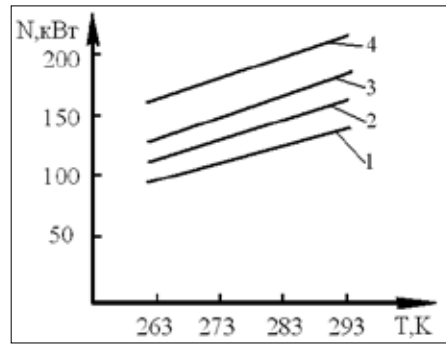


Рис. 5. Залежність потужності компресорного стискування в 1-й, 2-й ступені компримування, потужності пропанового компресора ГА і 4-й ступені компримування від початкової температури природного газу (при витраті природного газу: 1 – 850 м³/год; 2 – 1000 м³/год; 3 – 1300 м³/год; 4 – 1600 м³/год)

Обговорення. З рис. 3, 5 видно, що для компресорного стискування найбільше на енерговитрати впливає величина початкового тиску P_{1m} , початкової температури T_{1m} та витрати природного газу. Тому потужність енерговитрат компресорного стискування більша, ніж газогідратного стискування.

Зміни початкової температури T_{1m} та витрати природного газу позначаються в меншій мірі на енерговитратах в газогідратному пристрої (ГА) (рис. 4), а в більшій – на енерговитратах компресорного стискування (рис. 5).

Вплив T_{1m} на енерговитрати ГА проявляється через температуру конденсації $T_k(P_k)$ холодильного агента (приймалося, що вона дорівнює $T_{1m} + 5$ °С, підвищення якої призводить до збільшення енерговитрат в холодильному циклі і, відповідно, в ГА (рис. 5).

Чим більші витрати природного газу, тим більші енерговитрати компресорного стискування в порівнянні з енерговитратами газогідратного стискування (рис. 3–5).

Енерговитрати в ГА визначаються потребою в утворенні газогідратів для забезпечення стиснутим природним газом АГНКС–ГА. Для розглянутих значень початкового тиску природного газу 1,2 МПа і стиснутого природного газу $P_{2m} = 25$ МПа при початкових температурах і витратах природного газу енерговитрати в ГА при газогідратному стискуванні менші, ніж при компресорному стискуванні природного газу. Споживана потужність в ГА, який продукує стиснутий природний газ тільки на заправку автомобільного транспорту, менша, ніж в компресорному стискуванні (рис. 4).

Аналіз отриманих результатів розрахунку показує, що енерговитрати газогідратного стиснення газу (є тільки при гідратуутворенні в нічний період) менші на 10-15 % порівняно з компресорним стисненням в денний період.

Висновки

1. Розроблено методику визначення енерговитрат в ГА, для АГНКС–ГА та виконано порівняльний аналіз газогідратного і компресорного стискування природного газу.

2. Виконано аналіз енерговитрат на стискування природного газу, важливих для практики значень змін

його початкових параметрів: тиску від 1,2 МПа, температури від +18 °С. Потужність енерговитрат в ГА менша, ніж компресорне стискування природного газу, внаслідок рознесення в часі процесів утворення і плавлення газогідратів.

3. З'ясовано, що застосування ГА в АГНКС дозволяє не тільки зробити більш рівномірним добуве наванта-

ження на обладнання АГНКС, а також підвищити ефективність і зменшити її енергоспоживання.

4. Показано, що енерговитрати газогідратного стискування газу в ГА можуть бути меншими, ніж при компресорному стискуванні тільки при певному значенні початкових температур, тисків та витрати природного газу.

Бібліографічні посилання:

1. Bosyi M. V., Klymenko V. V., Mahopets S. O., Harasieva N. Yu. & Ovcharenko A. O. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti avtomobilnoi hazonapovniivalnoi kompresornoj stantsii shliakhom vykorystannia hazohidratnoho akumuliatora [Improving the efficiency of the automobile gas-filling compressor station by using a gas-hydrate battery]. *Refrigeration equipment and technologies*. No. 57 (1). P. 45–54. (in Ukrainian). ULR: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978>.

2. Havrysh V. I. (2006). Otsinka efektyvnosti zastosuvannia avtomobilnykh hazonapovniivalnykh kompresornykh stantsii u silskohospodarskomu vyrobnytstvi [Estimation of efficiency of application of automobile gas-filling compressor stations in agricultural production]. *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Coast*. Vol. No. 4. P. 66–71. (in Ukrainian).

3. Heletukha H. H., Kucheruk P. P. & Matveev Yu. B. (2014). Perspektivyvy proyzvodstva y uspolzovanyia byometana v Ukrainy [Prospects for the production and use of biomethane in Ukraine]. *UAB analytical note*. № 11. 44 p. (in Ukrainian).

4. Hrudz V. Ia., Hrudz Ya. V., Kostiv V. V. & Mykhalkiv V. B. (2014). Avtomobilni hazonapovniivalni kompresorni stantsii (AHNKS): monohrafiia [Automobile gas filling compressor stations (AGNKS)]. Ivano-Frankivsk : Lileya-NV. 320 p. (in Ukrainian).

5. ULR: <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2014.28049>.

6. ULR: <https://economics.segodnya.ua/ua/economics/business/avtoparki-hotyat-perevesti-na-metan-na-gaze-mozhno-sekonomit-polceny-avto-1481276.html>. (in Ukrainian).

7. Kholomeniuk M. V. (2013). Kompresorni ustanovy. navch. posobnyk [Compressor installations]. D : National Mining University. 51 p. (in Ukrainian).

8. Klymenko V. V. & Bosyi M. V. (2019). Patent na korysnu model Ukrainy № 134025 MPK F04V1/00, F25VJ1/00 Sposib zapravky avtomobilnoho transportu pryrodnyh hazom [Method of refueling motor transport with natural gas]. u201812187; declared 12/10/2018; publ. 25.04.2019. bldg. No. 8 (in Ukrainian).

9. Klymenko V. V., Bosyi M. V., Aulin V. V., Filimonikhina I. I., Lysenko S. V. & Hrynkiv A. V. (2021). Enerhoefektyvnist zapravky avtomobilnoho transportu stysnutym pryrodnyh hazom pry vykorystanni hazohidratnoho akumuliatora [Energy efficiency of gas station refueling with compressed natural gas when using a gas hydrate battery]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences*. No. 4(35). P. 198–207. (in Ukrainian). ULR: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).198-207](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).198-207).

10. Klymenko V. V., Bosyi M. V., Parafiinyk V. P. & Prylypko S. O. (2014). Hazoturbinni pryvid z hazohidratnym dotyskuvachem palyvnoho hazu [Gas turbine drive with gas-hydrated fuel gas distributor]. *Refrigeration Engineering and Technology*. No. 4 (150). P. 37–40. (in Ukrainian).

11. Klymenko V. V., Bosyi M. V., Smirnov A. V. & Prylypko S. O. (2014). Analiz enerhospozhyvannia v hazohidratnomu dotyskuvachi palyvnoho hazu dlia hazoturbinnoho pryvodu [Analysis of energy conservation in gas-hydrate pre-firing gas for gas-turbine drive]. *Scientific Journal of Geology. Mining. Oil and gas on the right. Energy*. No. 1(3). P. 241–251. (in Ukrainian).

12. Klymenko V. V., Bosyi M. V., Yakymenko M. S. & Martynenko V. V. (2017). Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station. 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: Izdavnictvo “Baltija Publishing”. P. 156–159. [in Poland].

13. Klymenko V. V., Bosyi M. V., Yakymenko M. S. & Martynenko V. V. (2019). Patent na model corisna. Ukraina № 134041 MPK F04V41/00 Kompresorna ustanovka dlia avtomobilnykh hazozapravnykh stantsii [Compressor unit for automobile gas filling stations]. u201812267; publ 25.04.2019. bul. No. 8 (in Ukrainian).

14. Mateichyk V. P., Zakharchuk V. I., Kozachuk I. S. & Zakharchuk O. V. (2008). Osoblyvosti vykorystannia pryrodnoho hazu yak motornoho palyva dlia transportnykh zasobiv [Features of the use of natural gas as a motor fuel for vehicles]. *Bulletin of the National Transport university*. K. : NTU. P. 127–130 [in Ukrainian].

15. Mykhalkin V. B. (2018). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti ta znyzhennia sobivartosti zapravky stysnym hazom na AHNKS [Improving energy efficiency and reducing the cost of refueling with compressed gas at CNG stations]. *International scientific journal «Interscience»*. Vol. 3. No. 10 (50). P. 18–20. (in Ukrainian).

16. Pedchenko M. M. (2014). Hidratoutvorennia vuhlevodnevykh haziv. monohrafiia: [Hydration of hydrocarbon gases]. Poltava: PoltNTU. 182 p. (in Ukrainian).

17. Pivniak H. H., Kryzhanivskiy Yu. I., Onyshchenko V. O., Bondarenko V. I. & Vytiaz O. Y. (2015). Hazohidryty. Hidratoutvorennia ta osnovy rozrobky ha-zovykh hidrativ: monohrafiia. [Gas hydrates. Hydrate formation and basics of gas hydrate development]. Dnepropetrovsk : Lithographer. 219 p. (in Ukrainian).

18. Sloan E. D. & Koch C. A. (2008). Clathrate hydrates of natural gases. CRC Press. 752 p. [in USA].

19. Tymofiev I. (2020). Avtoparky khochut perevesty na metan: na hazi mozha zaoshchadyty pivtsyny avto [Fleets want to convert to methane: gas can save half the price of a car]. October 8.

20. Zakharchuk O. V. (2014). Obgruntuvannia ekonomichnoi efektyvnosti pereobladnannia kolisnoho traktora dlia roboty na pryrodnomu hazi. Naukovi zapysky [Substantiation of economic efficiency of wheel reequipment tractor for work on natural gas]. *Interuniversity collection in the field of “Engineering Mechanics”*. Issue 46. P. 190–194. (in Ukrainian).

Bosyi M. V., Lecturer, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of energy consumption of natural gas compression in a car gas filling compressor station with a gas hydrate battery

Currently, the changes taking place in the agro-industrial complex of Ukraine require the development and creation of new technologies for refueling agricultural machinery, cars and improving existing technologies for refueling this vehicle with compressed natural gas. Renewable gases include combustible gases derived from renewable energy sources, including biomethane (CH_4) – an analogue of natural gas, brought to its quality. The advantage of biomethane over natural gas is that it is a renewable resource. It is obtained from biomass by anaerobic digestion and further enriched to 95–98 % methane. At present, the topical issue is the use of the latest gas hydrate technologies for refueling agricultural machinery and cars using natural gas and biomethane at automotive gas-filling compressor stations (CNG filling stations).

Improving the efficiency of the compressor unit for CNG stations with unequal consumption of natural gas for refueling during the day and night is possible by using a gas hydrate battery (HA).

The paper provides a circuit-technological solution and describes the principle of operation of HA for CNG stations. The method of determining energy consumption in gas hydrate thermocompression of natural gas for CNG–HA is given. The energy consumption of gas hydrate and compressor compression of natural gas for CNG–HA at the change of the initial gas temperature and natural gas consumption from 850 to 1600 m³/h is analyzed. The calculated energy consumption in HA in gas hydrate compression is lower than in compressor compression of natural gas by 10–15 %.

A method for determining energy consumption in HA for CNG–HA when the formation of gas hydrates is carried out in one volume and their melting in another volume and a comparative analysis of gas hydrate and compressor compression of natural gas. It was found that the power consumption in HA is less than the compressor compression of natural gas, due to the divergence in time of the formation and melting of gas hydrates. The analysis of energy consumption for compression of natural gas, important for the practice of values of changes in its initial parameters: pressure from 1.2 MPa, temperature from +18 °C. It was found that the use of HA in CNG stations allows not only to make a more uniform daily load on CNG equipment, but also to increase efficiency and reduce its energy consumption. It is shown that the energy consumption of gas hydrate gas compression in HA can be lower than in compressor compression only at a certain value of initial temperatures, pressures and natural gas consumption.

Key words: natural gas, biomethane, automobile transport, CNG filling stations, pressure, temperature, gas hydrate accumulator, gas hydrates, energy consumption.