

Ю. П. Денисов<sup>1</sup>  
В. В. Клименко<sup>2</sup>

## ГАЗОГІДРАТНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ І ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ

<sup>1</sup>Одеська національна академія харчових технологій;  
<sup>2</sup>Кіровоградський національний технічний університет

Запропоновано термодинамічний цикл і принципову схему газогідратної установки, що використовує різницю температур глибинної (холодної) і поверхневої (теплої) морської води для вироблення електроенергії і опріснення морської води. Включення в схему установки сонячного колектора дозволяє здійснювати додаткове нагрівання робочого тіла (природного газу) перед його розширенням і збільшує кількість виробленої електроенергії. Надано методики визначення енергетичних показників і термодинамічної ефективності газогідратної установки, показником якої вибрано ексергетичний ККД ( $\eta_{\text{екс}}$ ), та наведено приклад їх розрахунків для умов Чорного моря.

**Ключові слова:** природний газ, газогідрати, холодна (глибинна) і тепла (поверхнева) морська вода, сонячний колектор, кристалізатор, плавитель, термодинамічний цикл, ексергія, ексергетичний ККД.

### Вступ

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) допомагають урізноманітнити постачання енергоресурсів і в довгостроковій перспективі можуть замінити енергетичні ресурси з вичерпних копалин. Однак низькі густини енергетичних потоків в відомих ВДЕ вимагають досить великих капіталовкладень з їх застосуванням. Це визначає необхідність пошуку нових ВДЕ та технологій їх використання, які були б ефективнішими і потребували б менших капіталовкладень.

Нещодавно українські та німецькі вчені підтвердили наявність в українській економічній зоні Чорного моря покладів газогідратів [1], ресурси яких можна оцінити приблизно в 7...8 трлн. куб. м. [2]. Ці природні газогідрати можна віднести до відновлювальних паливних джерел, оскільки їх донні відкладення утворюються постійно [2]. Для розробки газогідратних покладів з метою отримання метану відомі технологічні рішення, частина яких апробована *in-situ* [3]. Попередній аналіз показує, що природний газ, добутий під час розробки субаквальних покладів, зокрема в Чорному морі, можна застосувати в якості робочого тіла газогідратної установки з вироблення електроенергії і опріснення морської води. Для здійснення термодинамічного циклу такої установки нижнім джерелом теплоти може бути холодна морська вода, верхнім — тепла поверхнева вода, а підвищити ефективність циклу можна використовуючи енергію сонячного випромінювання (ЕСВ) для перегріву газу перед розширенням в турбіні.

### Постановка проблеми

Компенсація дисбалансу генерованої потужності шляхом використання відновлюваних джерел енергії є однією з ключових проблем сучасної енергетики.

Відомі пропозиції щодо використання холодної глибинної і теплої поверхневої морської (океанської) води для вироблення електроенергії в різних прямих циклах (часто при цьому використовують англійську аббревіатуру ОТЕС) [3], одержання електроенергії в теплосиловому вакуумному циклі Ренкіна для конденсації прісної води з вологого морського повітря і паралельного виробництва білкової маси [4], для виробництва холоду і опріснення морської води в газогідратному циклі [5, 6].

Для акваторії Чорного моря, де в деяких місцях холодна вода з температурою 6...8 °С знаходиться на відносно невеликих глибинах в межах 40...60 м, перспективним є її використання в газогідратному циклі для вироблення електроенергії та опріснення морської води. Синергетичне поєднання вироблення електроенергії та опріснення морської води, можливість застосування в якості робочого тіла природного газу з субаквальних покладів Чорного моря, висока щільність теплових потоків у разі здійснення процесів утворення та плавлення гідратів [7] в газогідратній установці дозволяють прогнозувати її вищу ефективність порівняно з іншими, що використовуються для тих самих цілей.

## Рішення проблеми

Авторами пропонується термодинамічний цикл газогідратної установки для комбінованого вироблення електроенергії та опріснення морської води, в якому холодна глибинна вода є нижнім джерелом теплоти, тепла поверхнева вода — верхнім, а для додаткового нагріву робочого тіла перед розширенням використовується ЕСВ (рис. 1). Цикл на рис. 1 показано для умов Чорного моря:  $T_{х.в.} = 281$  К,  $T_0 = 294$  К, концентрація солей у морській воді  $X = 1,7$  %, коефіцієнт вилучення  $\tau = 50$  % і застосування робочого тіла зі складом:  $CH_4$  — 95 %,  $C_2H_6$  — 3 %,  $C_3H_8$  — 2 %, близьким до складу природного газу, отриманого з родовища субаквальних газогідратів в Чорному морі. Основною відмінністю циклу є те, що робоче тіло, наприклад, природний газ, переводять при низькому тиску в газогідратний стан (в газогідратах газ сильно стиснутий: в  $1$  м<sup>3</sup> газогідратів знаходиться  $\sim 160$  м<sup>3</sup> газу [8]) з відводом теплоти гідратоутворення холодною водою, а плавлять газогідрати з виділенням газу при високому тиску з підводом теплоти поверхневою водою і підігрівають виділений газ шляхом використання ЕСВ.

Схема (принципова) газогідратної установки, в якій здійснюється описаний вище цикл, показана на рис. 2.

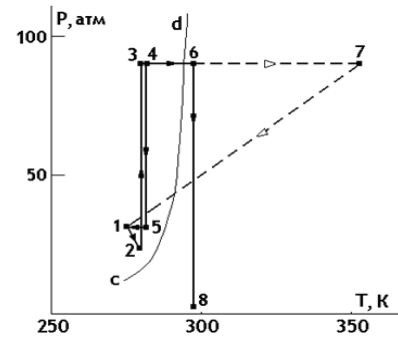


Рис. 1. Термодинамічний цикл газогідратної установки:  
 с—d — рівноважна лінія гідратоутворення для системи: природний газ-морська вода [8]; 1—2 — процес утворення газогідратів в трубчатому кристалізаторі; 2—3 — стиснення газогідратної суспензії на вході в фільтрувальну камеру; 3—4 — фільтрація розсолу в дренажну камеру; 4—5 — розширення розсолу в гідравлічній турбіні; 5—1 — охолодження розсолу на вході в кристалізатор; 4—6 — нагрівання і плавлення газогідратної суспензії в плавильнику теплою поверхневою морською водою; 6—7 — перегрів газу в газоперегрівачі з використанням ЕСВ; 7—1 — розширення газу в турбіні; 6—8 — розширення опрісненої води в гідравлічній турбіні

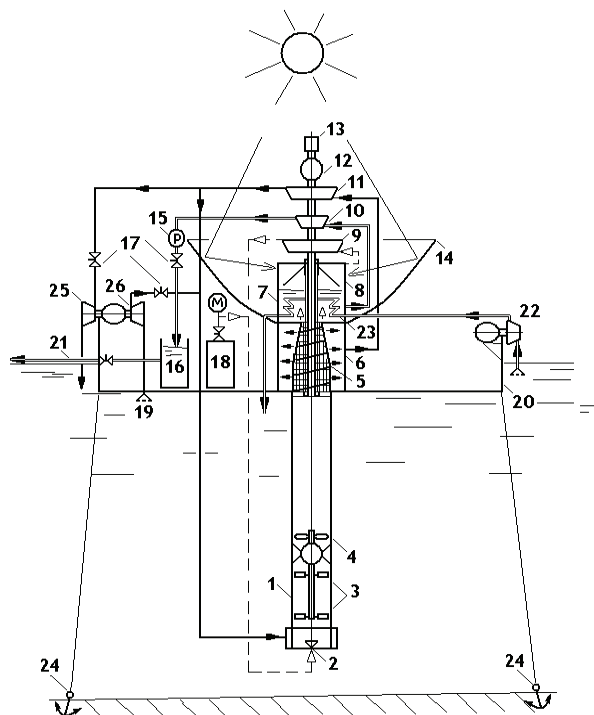


Рис. 2. Принципова схема газогідратної установки:

1 — трубчастий кристалізатор; 2 — патрубок для введення газу; 3 турбінна мішалка; 4 — насос; 5 — фільтрувальна камера зі шнеком; 6 — дренажна камера; 7 — плавильник; 8 — газоперегрівач; 9 — газова турбіна; 10 — гідравлічна турбіна для опрісненої води; 11 — гідравлічна турбіна для розсолу; 12 — електрогенератор; 13 — стартер; 14 — сонячний колектор; 15 — витратомір; 16 — накопичувач опрісненої води; 17 — регулюючі вентилі; 18 — ресивер з природним газом; 19 — забірник морської води з фільтром; 20 — платформа; 21 — лінія виведення опрісненої води; 22 — насос забору теплої води; 23 — теплообмінник плавильника; 24 — якоря; 25 — турбіна розсолу; 26 — турбонасосний агрегат

Установка має замкнутий контур циркуляції газу і води з надлишковим тиском, рівним  $P_{кр} = 3$  МПа у кристалізаторі і  $P_{шн} = 9$  МПа у фільтрувальній камері зі шнеком. Для підживлення установки водою використовується насос 19, а для підживлення установки газом використовується ресивер 18 з природним газом. Попередньо заповнюють установку водою і газом, забезпечуючи надлишок води, контролюючи тиск за допомогою манометра М. Запуск установки починають включенням стартового двигуна 13 для розкрутки вала установки, а також електронасоса 4 з мішалками 3.

Газогідрати утворюються у кристалізаторі 1 при тиску  $P = 3$  МПа і температурі  $T = 283$  К, що супроводжується зниженням тиску по долу кристалізатору (процес 1—2, рис. 1) Газогідратна суспензія із кристалізатору за допомогою напірного насоса 4, що забезпечує підвищення тиску газогідратної суспензії до 9 МПа (процес 2—3) подається по трубі над кристалізатором у фільтруючу камеру 5, забезпечену шнеком, для сепарації газогідратів від води і виведення спресованих газогідратів у плавитель 7 (процес 3—4). У плавителі газогідрати плавляться (процес 4—6) в результаті нагрівання від теплообмінника 23, через який циркулює тепла поверхнева вода з температурою  $T_0 = 298$  К за допомогою насоса 22.

Продукти плавлення газогідратів: прісна вода та газ поділяються відбійним козирком (на схемі не позначений), над яким розміщено газоперегрівач 8. В газоперегрівачі газ перед подачею в газову турбіну 9 перегрівається (процес 6—7) за допомогою сонячного колектора 14. У цій турбіні при розширенні газу виробляється механічна енергія, що витрачається для приводу електрогенератора 12 (процес 7—1).

Одночасно опріснена вода виводиться із плавильника в бак 16 через турбіну прісної води 10 з виробництвом додаткової механічної енергії для приводу електрогенератора 12 (процес 6—8), витратомір Р і регулювальний вентиль 17, а частина розсолу з витратою, що дорівнює витраті прісної води, скидається в море через турбіну розсолу 25 турбонасосного агрегату 26. При цьому більша частина розсолу з дренажної камери 6 рециркулює в кристалізатор 1 через турбіну розсолу 11 з виробництвом додаткової механічної енергії для приводу електрогенератора 12 (процес 4—5).

Основною відмінністю схеми установки від схемних рішень, поданих в роботах [5, 6, 9], є наявність в її складі сонячного колектора 14 для перегріву газу, отриманого при плавленні газогідратів, перед його розширенням в турбіні 9.

### Методика розрахунку енергетичних показників газогідратної установки

#### 1. Корисна робота газогідратної установки $L_{КОР}$ (кДж)

$$L_{КОР} = L_{ТР} + L_{ТГ}^P + L_{ТГ}^{PP} - L_{НЦ} - L_H^C, \quad (1)$$

де  $L_{ТР}$ ,  $L_{ТГ}^P$ ,  $L_{ТГ}^{PP}$ ,  $L_{НЦ}$ ,  $L_H^C$  — відповідно, робота газової турбіни, гідравлічної турбіни рециркулюючого розсолу, гідравлічної турбіни опрісненої води, насоса циркуляції поверхневої (теплої) води, насоса газогідратної суспензії.

#### 2. Робота газової турбіни $L_{ТГ}$ на 1 кг природного газу (робочого тіла) [10]

$$L_{ТГ} = c_p \cdot T_7 \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right] \eta_{ТГ}, \quad (2)$$

де  $c_p$  — теплоємність газу;  $T_7$  і  $P_7$  — відповідно температура і тиск газу на вході в турбіну;  $P_1$  — тиск на виході із газової турбіни;  $k$  — коефіцієнт адіабати;  $\eta_{ТГ}$  — ККД газової турбіни.

#### Або робота газової турбіни $L_{ТГ}$ на 1 кг прісної води

$$L_{ТГ} = c_p \cdot T_7 \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right] \eta_{ТГ} \frac{\mu_G}{n \cdot \mu_B}, \quad (3)$$

де  $\frac{\mu_{\Gamma}}{n \cdot \mu_B}$  — відношення мас газу і води у газогідраті.

3. Робота турбіни гідравлічної для рециркулюючого розсолу  $L_{\Gamma\Gamma}^P$  на 1 кг прісної води

$$L_{\Gamma\Gamma}^P = V_P (P_4 - P_5) \eta_{\Gamma\Gamma}^P, \quad (4)$$

де  $V_P$  — об'ємна кількість розсолу на вході в турбіну гідравлічну на 1 кг прісної води;  $P_4$  і  $P_5$  — тиск розсолу на вході в турбіну і виході з неї, відповідно;  $\eta_{\Gamma\Gamma}^P$  — ККД турбіни.

4. Робота турбіни гідравлічної для прісної води  $L_{\Gamma\Gamma}^{\text{ПР}}$  для 1 кг прісної води

$$L_{\Gamma\Gamma}^{\text{ПР}} = V_{\text{ПР}} (P_6 - P_8) \cdot \eta_{\Gamma\Gamma}^{\text{ПР}}, \quad (5)$$

де  $V_{\text{ПР}}$  — об'ємна кількість прісної води на вході в турбіну гідравлічну для прісної води на 1 кг прісної води;  $P_6$  и  $P_8$  — тиск прісної води на вході в турбіну і виході з неї, відповідно;  $\eta_{\Gamma\Gamma}^{\text{ПР}}$  — ККД цієї турбіни.

5. Робота насоса поверхневої (теплої) морської води для циркуляції через теплообмінник плавателя на 1 кг прісної води

$$L_{\text{НЦ}} = \frac{V_{\text{НЦ}}}{\eta_{\text{НЦ}}} \Delta P, \quad (6)$$

де  $V_{\text{НЦ}} = \frac{G_{\text{Т.В.}}}{\rho_{\text{М.В.}}}$  — об'ємна кількість поверхневої (теплої) морської води на 1 кг прісної води, а

$G_{\text{Т.В.}} = G_{\text{Х.В.}} = \frac{H_{\Gamma}}{c \cdot \Delta T}$ ,  $\eta_{\text{НЦ}}$  і  $\Delta P$  — ККД і напір насоса.

6. Робота насоса газогідратної суспензії  $L_{\text{Н}}^{\text{С}}$  на 1 кг прісної води

$$L_{\text{Н}}^{\text{С}} = \frac{V_{\text{Н}}^{\text{С}}}{\eta_{\text{Н}}^{\text{С}}} (P_4 - P_3), \quad (7)$$

де  $V_{\text{Н}}^{\text{С}}$  — об'ємна кількість газогідратної суспензії на вході в насос газогідратної суспензії на 1 кг прісної води;  $P_3$  і  $P_4$  — тиск газогідратної суспензії на вході в насос газогідратної суспензії і виході з нього;  $\eta_{\text{Н}}^{\text{С}}$  — ККД насоса газогідратної суспензії.

7. Частка води в газогідраті  $g_B$  [8]

$$g_B = \frac{n \cdot \mu_B}{\mu_{\Gamma}}, \quad (8)$$

де  $n$  — число молекул води, що припадають на 1 молекулу природного газу в газогідраті;  $\mu_B$  — молекулярна маса води;  $\mu_{\Gamma}$  — молекулярна маса природного газу.

8. Маса газогідрату природного газу  $M_{\Gamma}$ , що припадає на 1 кг прісної води

$$M_{\Gamma} = 1 + \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_B}. \quad (9)$$

9. Масова кількість прісної води, що утворюється під час розкладання газогідрату масою  $M_{\text{ПР}}$

$$M_{\text{ПР}} = \frac{n \cdot \mu_B}{\mu_{\Gamma}}, \quad (10)$$

10. Масова кількість газогідратної суспензії, що припадає на 1 кг прісної води

$$M_{\text{С}} = \frac{1 + \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_B}}{S_{\text{С}}}, \quad (11)$$

де  $S_C$  — частка газогідратів в газогідратній суспензії.

Робота турбонасосного агрегату 26 (рис. 2) подачі морської води в кристалізатор компенсується роботою турбіни скидного розсолу 25, і тому у виразі (1) їх не враховуємо.

Основною відмінністю схеми установки від схемних рішень, поданих в роботах [5, 6, 9], є наявність в її складі сонячного колектора 14 для перегріву газу, отриманого при плавленні газогідратів, перед його розширенням в турбіні 9.

### Термодинамічна ефективність газогідратної установки

11. Визначимо термодинамічну ефективність цієї установки через ексергетичний ККД як відношення ексергії, що відводиться (корисної) до ексергії, що підводиться (затраченої)

$$\eta_{\text{ЕКС}} = \frac{W_{\text{min}} + e_{\text{ЕЛ}}}{e_{\text{Х.В.}} \cdot G_{\text{Х.В.}} + e_{\Gamma} \frac{g_{\Gamma}}{g_{\text{В}}}}, \quad (12)$$

де  $W_{\text{min}}$  — мінімальна робота опріснення морської води, кДж/кг прісної води;  $e_{\text{ЕЛ}} = L_{\text{ел}}$  — кількість електроенергії, виробленої установкою у розрахунку на 1 кг прісної води;  $e_{\text{Х.В.}}$  — ексергія 1 кг холодної морської води з температурою  $T_{\text{Х.В.}}$ ;  $G_{\text{Х.В.}}$  — кількість холодної морської води для охолодження трубчастого кристалізатора у розрахунку на 1 кг прісної води;  $e_{\Gamma}$  — ексергія 1 кг газу, перегрітого до  $T_7$ ;  $\frac{g_{\Gamma}}{g_{\text{В}}}$  — відношення мас газу і опрісненої води у газогідраті.

*Примітка:* у нижченаведених пунктах 12—27 приклад чисельних розрахунків наведено відповідно до циклу газогідратної установки для вироблення електроенергії та опріснення морської води, зображеного на рис. 1 для умов Чорного моря.

12. Кількість електроенергії, виробленої установкою з розрахунку на 1 кг прісної води

$$L_{\text{ЕЛ}} = L_{\text{ТП}} \cdot \eta_E + L_{\text{ТГ}}^{\text{P}} \cdot \eta_E + L_{\text{ТГ}}^{\text{ПР}} \cdot \eta_E - L_{\text{НЦ}} - L_{\text{Н}}^{\text{C}}; \quad (13)$$

де  $\eta_E$  — ККД електрогенератора.

13. Мінімальна робота опріснення морської води Чорного моря, коли коефіцієнт вилучення

$\tau = 50\%$ , згідно з роботою [6] становить  $W_{\text{min}} = 2,175$  кДж/(кг·H<sub>2</sub>O).

14. Ексергія 1 кг холодної морської води становить [6]

$$e_{\text{Х.В.}} = c \left[ (T_{\text{Х.В.}} - T_0) - T_0 \ln \frac{T_{\text{Х.В.}}}{T_0} \right]. \quad (14)$$

Тоді, для Чорного моря, якщо  $T_{\text{Х.В.}} = 281$  К,  $T_0 = 294$  К,  $c = 4,19$  кДж/(кг·К), ексергія 1 кг холодної морської води складе  $e_{\text{Х.В.}} = 1,195$  кДж/(кг х.в.).

15. Кількість холодної води для охолодження трубчастого кристалізатора у розрахунку на 1 кг прісної води становить

$$G_{\text{Х.В.}} = \frac{H_{\Gamma}}{c \cdot \Delta T}, \quad (15)$$

де  $H_{\Gamma} = 600,8$  кДж/кг — теплота гідратоутворення для системи: природний газ + морська вода в розрахунку на 1 кг прісної води (беремо, як для метану [8]);  $\Delta T$  = підвищення температури морської води при охолодженні трубчастого кристалізатора, беремо  $\Delta T = 2$  К [5, 6].

В результаті розрахунку  $G_{\text{Х.В.}} = 71,7$  кг/кг прісної води.

16. Ексергія газу перегрітого до  $T_7 = 80$  °С

$$e_{\Gamma} = c_p \left[ (T_7 - T_0) - T_0 \ln \frac{T_7}{T_0} \right], \quad (16)$$

з урахуванням  $c_p = 2,8$  кДж/(кг·К),  $T_7 = 353$  К  $e_{\Gamma} = 73,3$  кДж/(кг газу).

17. Відношення мас газу і води у газогідраті складає

$$\frac{g_{\Gamma}}{g_{\text{В}}} = \frac{\mu_{\Gamma}}{n \cdot \mu_{\text{В}}} = 0,15, \quad (16)$$

де  $\mu_{\text{В}} = 18$ ;  $\mu_{\Gamma} = 16$ ;  $n = 5,75$  — для газогідратів природного газу (беремо як для метану) [8].

18. Маса газогідрату природного газу  $M_{\Gamma}$ , що припадає на 1 кг прісної води

$$M_{\Gamma} = 1 + \frac{\mu_{\Gamma}}{n \cdot \mu_{\text{В}}} = 1,15 \text{ кг газогідратів/кг прісної води.}$$

19. Масова кількість газогідратної суспензії, що припадає на 1 кг прісної води

$$M_{\text{С}} = \frac{1 + \frac{n \cdot \mu_{\text{В}}}{\mu_{\Gamma}}}{S_{\text{С}}} = 1,15 / 0,4 = 2,88 \text{ кг суспензії/кг прісної води.}$$

20. Масова кількість розсолу, що відділяється за допомогою шнеку у фільтрувальній камері, яка припадає на 1 кг прісної води

$$M_{\text{Р}} = M_{\text{С}} - M_{\Gamma} / 0,6 = 2,88 - 1,15 / 0,6 = 0,96 \text{ кг розсолу/кг прісної води,}$$

де 0,6 — частка газогідратів у газогідратному поршні, що надходить у камеру плавлення плавителя зі шнеку.

21. Згідно з термодинамічним циклом газогідратної установки (рис. 1) та формулою (3) робота газової турбіни  $L_{\text{ТГ}}$  для 1 кг прісної води

$$L_{\text{ТГ}} = c_p \cdot T_7 \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right] \cdot \eta_{\text{ТГ}} \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_{\text{В}}} = 2,8 \cdot 353 \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{90}{30} \right)^{\frac{1,31-1}{1,31}}} \right] \cdot 0,9 \cdot 0,15 = 30,7 \text{ кДж/кг прісної води.}$$

22. Робота турбіни гідравлічної для прісної води  $L_{\text{ТГ}}^{\text{ПР}}$

$$L_{\text{ТГ}}^{\text{ПР}} = V_{\text{ПР}} (P_6 - P_8) \cdot \eta_{\text{ТГ}}^{\text{ПР}} = 1 \cdot 10^{-3} (90 - 1) \cdot 10^5 \cdot 0,9 / 10^3 = 8,01 \text{ кДж/кг прісної води,}$$

де  $V_{\text{ПР}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

23. Робота насоса газогідратної суспензії  $L_{\text{Н}}^{\text{С}}$

$$L_{\text{Н}}^{\text{С}} = \frac{V_{\text{Н}}^{\text{С}}}{\eta_{\text{Н}}^{\text{С}}} (P_4 - P_3) = 2,88 \cdot 10^{-3} (90 - 30) \cdot 10^5 / (0,9 \cdot 10^3) = 15,55 \text{ кДж/кг прісної води,}$$

де  $V_{\text{Н}}^{\text{С}} = M_{\text{С}} / \rho_{\text{С}} = 2,88 / 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta_{\text{Н}}^{\text{С}} = 0,9$ .

24. Робота турбіни гідравлічної для рециркулюючого розсолу

$$L_{\text{ТГ}}^{\text{Р}} = V_{\text{Р}} (P_4 - P_5) \cdot \eta_{\text{ТГ}}^{\text{Р}} = 0,96 \cdot 10^{-3} (90 - 30) \cdot 10^5 \cdot 0,9 / 10^3 = 5,18 \text{ кДж/кг прісної води,}$$

де  $V_{\text{Р}} = M_{\text{Р}} / \rho_{\text{Р}} = 0,96 / 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta_{\text{ТГ}}^{\text{Р}} = 0,9$ .

25. Робота насоса поверхневої (теплої) морської води для циркуляції через теплообмінник плавителя на 1 кг прісної води

$$L_{\text{НЦ}} = \frac{V_{\text{НЦ}}}{\eta_{\text{НЦ}}} \Delta P = 71,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^5 / (0,9 \cdot 10^3) = 8 \text{ кДж/кг прісної води,}$$

де  $V_{\text{НЦ}} = \frac{G_{\text{Т.В.}}}{\rho_{\text{М.В.}}}$  — об'ємна кількість поверхневої морської води на 1 кг прісної води, а

$G_{\text{Т.В.}} = G_{\text{Х.В.}} = \frac{H_{\Gamma}}{c \cdot \Delta T}$ ,  $G_{\text{Х.В.}} = 71,7 \text{ кг/кг прісної води}$ ;  $\eta_{\text{НЦ}} = 0,9$ ;  $\Delta P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

26. Кількість електроенергії, виробленої установкою з розрахунку на 1 кг прісної води

$$e_{\text{ЕЛ}} = L_{\text{ЕЛ}} = L_{\text{ТП}} \cdot \eta_{\text{Е}} + L_{\text{ТГ}}^{\text{П}} \cdot \eta_{\text{Е}} + L_{\text{ТГ}}^{\text{ІП}} \cdot \eta_{\text{Е}} - L_{\text{НЦ}} - L_{\text{Н}}^{\text{С}} =$$

$$= 30,7 \cdot 0,97 + 5,18 \cdot 0,97 + 8,01 \cdot 0,97 - 8 - 15,55 = 9,34 \text{ кДж /кг прісної води.}$$

27. Ексергетичний ККД циклу газогідратної установки для вироблення електроенергії та опріснення морської води, зображеного на рис. 1, відповідно до умов Чорного моря

$$\eta_{\text{ЕКС}} = \frac{W_{\text{min}} + e_{\text{ЕЛ}}}{e_{\text{Х.В.}} \cdot G_{\text{Х.В.}} + e_{\text{Г}} \frac{g_{\text{Г}}}{g_{\text{В}}}} = \frac{2,175 + 9,34}{1,195 \cdot 71,7 + 73,3 \cdot 0,15} = 0,12.$$

### Висновки

Обґрунтовано доцільність використання потенціалу різниці температур глибинної (холодної) і поверхневої (теплої) морської води в газогідратній установці для вироблення електроенергії і опріснення морської води та запропоновано термодинамічний цикл і схемне рішення такої установки. Надано методики визначення енергетичних показників і термодинамічної ефективності газогідратної установки, показником якої вибрано ексергетичний ККД ( $\eta_{\text{ЕКС}}$ ) та наведено приклад їх розрахунків для умов Чорного моря. Отримане для цих умов досить високе значення  $\eta_{\text{ЕКС}} = 0,12$  можна пояснити додатковим використанням сонячного колектору для перегріву газу, отриманого при плавленні газогідратів перед його розширенням в турбіні.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Німецькі та українські вчені знайшли в українській економічній зоні Чорного моря поклади газогідратів [Електронний ресурс] // Географіка. Географічний портал. — Режим доступу : [http://geografica.net.ua/news/ukrajina\\_nimecki\\_ta\\_ukrajinski\\_vcheni\\_znajshli\\_v\\_ukrajinskij\\_ekonomichnij\\_zoni\\_chornogo\\_morja\\_pokladi\\_gazogidrativ/2010-06-01-159](http://geografica.net.ua/news/ukrajina_nimecki_ta_ukrajinski_vcheni_znajshli_v_ukrajinskij_ekonomichnij_zoni_chornogo_morja_pokladi_gazogidrativ/2010-06-01-159).
2. Ocean thermal energy conversion [Електронний ресурс] / Wikipedia/ The Free Encyclopedia. — Режим доступу : [https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean\\_thermal\\_energy\\_conversion](https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion). — Назва з екрана.
3. Коболев В. П. Термодинамические условия гидратообразования в Черном море / В. П. Коболев // Научный журнал Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика. — 2014. — № 1 (3). — С. 126—141.
3. Макогон Ю. Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения / Ю. Ф. Макогон // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2010. — № 2 (20). — С. 5—21.
4. Gerard R. D. Deep ocean water as a recourse for combined mariculture, power and fresh water production / R. D. Gerard, O. A. Roels // MTS Journal. — 1970. — Vol. 4, № 5, September—October.
5. Клименко В. В. Об использовании природной разности температур морской воды для получения пресной воды и холода / В. В. Клименко // Холодильная техника и технология. — 1974. — Вып. 19. — С. 75—79.
6. Смирнов Л. Ф. Использование глубинной морской воды для получения пресной воды и холода / Л. Ф. Смирнов, В. В. Клименко // Холодильная техника. — 1975. — № 2. — С. 34—37.
7. Клименко В. В. Конвективный теплообмен в кристаллизаторах и плавителях газогидратных технологических установок / В. В. Клименко // Холодильная техника і технологія. — 2013. — № 1 (141). — С. 35—39. [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/htit\\_2013\\_1\\_7.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/htit_2013_1_7.pdf).
8. Makogon Yu. F. Hydrates of Hydrocarbons / Y. F. Makogon. — Penn Well Books : Tulsa, 1997. — 504 p.
9. Денисов Ю. П. Экологически безопасная электростанция, использующая природную разность температур по глубине моря / Ю. П. Денисов, Л. Ф. Смирнов // Екологічні проблеми Чорного моря : Міжнародна науково-практична конференція : матеріали. — Одеса : ІНВАЦ. — 2011. — С. 144—147.
10. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф., Павлов, П. Г Романков, А. А. Носков. — Л. : Химия, 1981. — 560 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.01.2016

**Денисов Юрій Павлович** — канд. техн. наук, провідний науковий співробітник кафедри термодинаміки та відновлювальної енергетики.

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса;

**Клименко Василь Васильович** — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, e-mail: [klymvas@ukr.net](mailto:klymvas@ukr.net).

Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград

Yu. P. Denysov<sup>1</sup>  
V. V. Klymenko<sup>2</sup>

## Gas-Hydrate Installation for Generation of Electrical Energy and Seawater Desalination

<sup>1</sup>Odessa National Academy of Food Technologies;

<sup>2</sup>Kirovograd National Technical University

*There has been suggested thermodynamic cycle and schematic diagram of gas-hydrate installation utilizing the temperature difference of deep (cold) and surface (warm) seawater to generate electricity and seawater desalination. The inclusion in the scheme of installation of the solar collector allows additional heating of the working fluid (natural gas) before expansion and increases the amount of electricity generated. There have been provided methods for determining energy performance and thermodynamic efficiency of gas hydrate installation indicator selected exergy efficiency ( $\eta_{ex}$ ) and an example of calculations for the conditions of the Black sea.*

**Keywords:** natural gas, gas hydrates, cold (deep) and warm (surface) seawater, solar collector, crystallizer, melter, thermodynamic cycle, exergy, exergy efficiency.

*Denysov Yuriy P.* — Cand. Sc. (Eng.), Leading Researcher of the Chair of Thermodynamics and Renewable Energy;

*Klymenko Vasyl V.* — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrotechnical Systems and Energy Management, e-mail: klymvas@ukr.net

Ю. П. Денисов<sup>1</sup>  
В. В. Клименко<sup>2</sup>

## Газогидратная установка для выработки электроэнергии и опреснения морской воды

<sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий;

<sup>2</sup>Кировоградский национальный технический университет

*Предложен термодинамический цикл и принципиальная схема газогидратной установки, использующей разницу температур глубокой (холодной) и поверхностной (теплой) морской воды для выработки электроэнергии и опреснения морской воды. Включение в схему установки солнечного коллектора позволяет осуществлять дополнительный нагрев рабочего тела (природного газа) перед его расширением и увеличивает количество выработанной электроэнергии. Предоставлены методики определения энергетических показателей и термодинамической эффективности газогидратной установки, показателем которой выбран эксергетический КПД ( $\eta_{екс}$ ), и приведен пример их расчетов для условий Черного моря.*

**Ключевые слова:** природный газ, газогидраты, холодная (глубинная) и теплая (поверхностная) морская вода, солнечный коллектор, кристаллизатор, плавитель, термодинамический цикл, эксергия, эксергетический КПД.

*Денисов Юрий Павлович* — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики;

*Клименко Василий Васильевич* — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, e-mail: klymvas@ukr.net