

Б. Г. Грудка, канд. техн. наук, доцент

ЗРІДЖУВАЧ ВОДНЮ З НЕОНОВИМ КРІОГЕННИМ РЕФРИЖЕРАТОРОМ

Одеський національний технологічний університет, Одеса

Ключові слова: цикл високого тиску, діафрагмовий компресор, рідкий водень, рідкий неон, конверсія водню.

Вступ

Вже у поточному столітті очікується заміщення традиційних палив альтернативними енергоносіями через виснаження природних органічних ресурсів. Доступним та екологічним «паливом майбутнього» може стати водень – найпоширеніший елемент у Всесвіті. Однак поряд з незаперечними перевагами водень характеризується рядом несприятливих фізичних властивостей. Так, найлегший елемент періодичної системи, водень, відрізняється малою густиною, тому його зберігання та транспортування у газоподібній формі виявляється не ефективним. Незважаючи на дуже низьку температуру зрідження, одним із перспективних способів акумулювання водню є його зберігання у стані криогенної рідини [1, 4].

У другій половині ХХ століття розроблені рідинні водневі системи для реалізації космічних програм, ефективних технологій хімічної промисловості, металургії та експериментальної техніки. Нині світове споживання рідкого водню перевищило 10^5 т/рік. Поруч із великотоннажними зріджувачами водню, виявляються затребувані установки продуктивністю 15...20 $\text{дм}^3/\text{год}$ [2, 3]. Вони використовуються у вакуумній техніці, а також при випробуваннях заправної арматури та низькотемпературної ізоляції.

У маловитратних зріджувачах, як правило, застосовується дросельний цикл високого тиску ($P \approx 15$ МПа) з охолодженням робочого тіла нижче за температуру інверсії в азотних ваннах. У досконаліших установках реалізується розширення частини прямого потоку водню в детандері [2]. Перспективним вважатимуться водневі зріджувачі, отримані поєднанням водневого і гелієвого контурів [3–6]. При використанні комбінації двох робочих тіл виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, та знижується тиск потоку водню до $P = 5,5$ МПа.

Найближчим до водню газом за температурою фазового переходу є неон. Цей холодоагент затребуваний у лабораторних дослідженнях, а також у технологіях одержання легких інертних газів [5–10]. У неону і водню близькі температури кипіння, проте густина і прихована теплота пароутворення (на одиницю об'єму) у неону значно вища (табл. 1). Ці особливості неону дозволяють використовувати його в експериментальній техніці для імітації температурних умов, характерних для криогенних водневих систем [11–21].

Таблиця 1 – Фізичні властивості рідкого водню, неону та азоту при $P_{\text{н.у}} = 0,1013$ МПа

Параметр	Водень	Неон	Азот
Температура кипіння, К	20,4	27,1	77,4
Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	70,9	1207	806,1
Теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$ ($\text{кДж}/\text{дм}^3$)	448,7 (31,8)	85,8 (103,6)	199,2 (160,6)

Мета роботи – створення багатофункціонального комплексу з можливістю отримання рідких неону (Ne) та водню (H₂). Заміною гелієвого рефрижератора неоновим забезпечується відведення теплоти від потоку водню з меншими термодинамічними втратами при стабільній температурі холодоагенту киплячого (неону). У якості обладнання для забезпечення роботи термодинамічних циклів обрано досить апробовані мембранні компресори (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики мембранних компресорів

Тип	Продуктивність $V_K, \text{ м}^3/\text{год}$	Число ступенів	Тиск МПа, (абс)		Потужність $N_K, \text{ кВт}$
			P_1 (всмоктування)	P_2 (нагнітання)	
4,0 МК-20/200	20	2	0,12	22,0	11,4
1,6 МК-20/12,5	22	1	0,12	1,35	4,3

Визначення основних характеристик неонових рефрижератора

Розглянемо для порівняння показники неонових циклу.

Рефрижераторний режим. Схема циклу представлена на рис. 1.

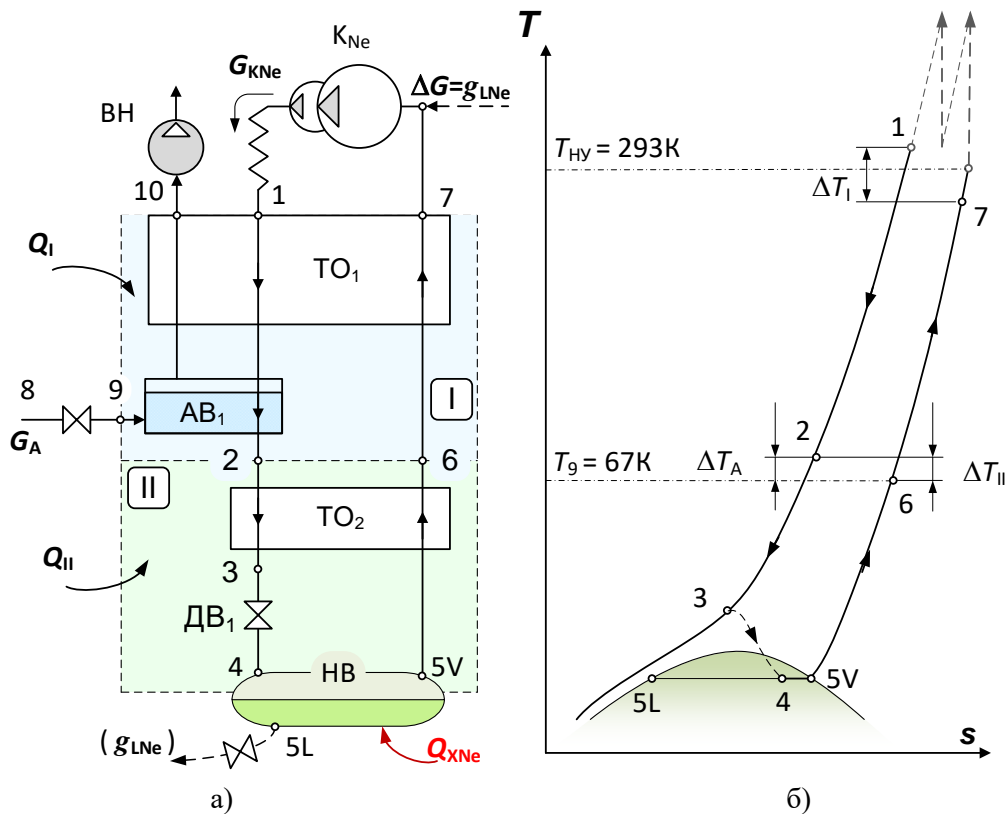


Рисунок 1 – Схема (а) та зображення в T,s -діаграмі (б) дросельного циклу із зовнішнім охолодженням: I – ступінь попереднього охолодження; II – дросельний ступінь; K_{Ne} – компресор; BH – вакуум-насос; TO_1 та TO_2 – теплообмінники; DV_1 – дросельний вентиль; NB – неонові ванни; AB_1 – азотна ванна [$T_9 = 67 \text{ K}$; $(T_2 - T_9) = 5 \text{ K}$]; G_{KNe} – витрата газу в компресорі; G_A – витрата зовнішнього холодоагенту (LN_2); Q_I та Q_{II} – теплоприпливи; Q_{XNe} – корисне навантаження (холодопродуктивність циклу); g_{LNe} – рідкий неон

З теплового балансу контуру II (див. рис. 1) випливає:

$$G_2 \cdot h_2 + Q_{II} + Q_{XNe} = G_6 \cdot h_6, \quad (1)$$

де Q_{XNe} – холодопродуктивність, кВт; Q_{II} – теплоприпливи з довкілля, кВт; $G_2 = G_6 = G_{KNe}$ – масова витрата робочого тіла у циклі (продуктивність компресора K_{Ne} , див. рис. 1), кг/с; h_2 і h_6 – ентальпії прямого та зворотного потоків на межі контуру II, кДж/кг.

Питома холодопродуктивність рефрижераторного циклу

$$q_{XNe} = h_6 - h_2 - q_{II}, \quad (2)$$

де $q_{II} = 0,4$ кДж/кг – теплоприпливи із довкілля в контур II.

З урахуванням значень, наведених у табл. 3,

$$q_{XNe} = 128,2 - 95,9 - 0,4 = 31,9 \text{ кДж/кг.}$$

Таблиця 3 – До розрахунку неоновому циклу високого тиску із зовнішнім охолодженням

№ точок	Температура, К	Тиск, МПа (абс)	Ентальпія, кДж/кг
Параметри неону (рис. 1)			
1	300	18,0	375,1
2	72	18,0	95,9
3	56,4 (51,2*)	18,0	64,8 (54,2*)
4	27,7	0,12	64,8 (54,2*)
5L	27,7	0,12	1,1
5V	27,7	0,12	86,2
6	67	0,12	128,2
7	280	0,12	348,1
Параметри азоту (до рис. 1)			
8	83,6	0,20	-109,0
9	67	0,02	-109,0
10	280	0,02	+290,6
Параметри водню (до рис. 3)			
11	300	1,0	3962,1
12	72	1,0	975,0
18	67	0,18	944,6
19	280	0,18	3673,0

* – для рефрижераторного режиму.

З теплового балансу верхнього ступеня контуру I визначається відносна витрата рідкого азоту:

$$g_A = \frac{G_A}{G_{KNe}} = \frac{h_1 - h_7 + h_6 - h_2 + q_I}{h_{10} - h_8}, \quad (3)$$

де $q_{II} = 0,4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи з навколишнього середовища.
Для прийнятих умов у режимі рефрижератора (див. табл. 3)

$$g_A = \frac{G_A}{G_{KNe}} = \frac{375,1 - 348,1 + 128,2 - 95,9 + 0,4}{290,6 - (-109)} = 0,149 \frac{\text{кг LN}_2}{\text{кг Ne}}$$

На основі отриманих результатів розрахуємо характеристики циклу в залежності від витрати робочого тіла G_{KNe} . У якості блока компримування прийняті два паралельно включених компресора 4,0МК-20/200 (див. табл. 2). З урахуванням нормальної густини неону $\rho_{Hy} = 0,838$ кг/м³ масова витрата робочого тіла, що циркулює

$$G_{KNe} = 2 \cdot V_{K0} \cdot \rho_{Hy} = 2 \cdot 20 \cdot 0,838 = 33,5 \text{ кг/год} = 0,00931 \text{ кг/с.}$$

Потужність неоновому рефрижераторного блоку на основі двох компресорів МК-20 і $T_5 = 27,7$ К складе

$$Q_{XNe} = q_{XNe} \cdot G_{KNe} = 31,9 \cdot 0,00931 = 0,297 \text{ кВт} = 297 \text{ Вт.}$$

Витрата азоту в неоновому контурі згідно з формулою (3)

$$G_A = q_A \cdot G_{KNe} = 0,149 \cdot 0,00931 = 0,00139 \text{ кг/с} = 5,0 \text{ кг/год.}$$

Зрідження неону. Коефіцієнт зрідження неоновому циклу за відсутності корисного навантаження ($Q_{XNe} = 0$)

$$x_{Ne} = \frac{h_6 - h_2 - q_{II}}{h_6 - h_{5L}} = \frac{31,9}{128,2 - 1,1} = 0,251, \quad (4)$$

де $q_{II} = 0,4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи до дросельного ступеня.
Продуктивність неоновому циклу в режимі зрідження

$$g_{LNe} = G_{KNe} \cdot x_{Ne} = 33,5 \cdot 0,251 = 8,41 \text{ кг/год};$$

$$v_{LNe} = g_{LNe} / \rho_{LNe} = 8,41 / 1,20 = 7,0 \text{ дм}^3/\text{год.}$$

Питома витрата рідкого азоту в режимі зрідження

$$*g_A = \frac{*G_A}{G_{KNe}} = \frac{h_1 - h_2 - (1-x) \cdot (h_7 - h_6) + q_1}{h_{10} - h_8}. \quad (3-a)$$

Для прийнятих умов (див. табл. 3)

$$*g_A = \frac{*G_A}{G_{KNe}} = \frac{375,1 - 95,9 - (1 - 0,251) \cdot (348,1 - 128,2) + 0,4}{290,6 - (-109)} = 0,29 \frac{\text{кг LN}_2}{\text{кг Ne}}$$

Витрата зовнішнього холодоагенту в режимі одержання рідкого неону

$$G_A^* = g_A^* \cdot G_{\text{кНе}} = 0,29 \cdot 0,00931 = 9,7 \text{ кг/год.}$$

Продуктивність водневого зріджувача

При комбінації неоновового та водневого циклів допускається зменшення ступеня стиснення у водневому контурі до мінімуму. Необхідно враховувати, що при тисках робочого тіла, характерних для одноступеневих компресорів (див. табл. 2), різниця ентальпій потоків ($h_{18}-h_{12}$) на теплому кінці теплообмінника TO_2 набуває від’ємного значення. Як впливає з табл. 4, за таких умов вкладу водневого контуру в холодопродуктивність комплексу не буде, і криогенне забезпечення здійснюватиметься неоновим рефрижератором.

Таблиця 4 – Потенціал холодопродуктивності $\Delta h = (h_{18}-h_{12})$ залежно від тиску стиснення водню ($T_{12} = 72 \text{ K}$; $T_{18} = 67 \text{ K}$; $P_{11} = 0,18 \text{ МПа}$)

Тиск прямого потоку P_{12} , МПа	1	3	6	10	15
Ентальпія прямого потоку h_{12} , кДж/кг	975,0	921,4	855,0	803,5	786,7
Ентальпія зворотного потоку h_{18} , кДж/кг	944,6				
$\Delta h = (h_{18} - h_{12})$	-30,4	23,2	89,6	141,1	157,9

Тиск прямого потоку водню впливає на температуру конденсації водню в неоновій ванні [процес (14V–14L), рис. 2]. Наприклад, при $P = 1 \text{ МПа}$ перепад температур між рівноважними воднем і неоном у ванні НВ становить $\delta_1 = T_{14} - T_{5\text{Ne}} = 3,7 \text{ K}$. За достатньої поверхні теплообміну після конденсації відбуватиметься процес переохолодження водню [(14L–15), рис. 2].

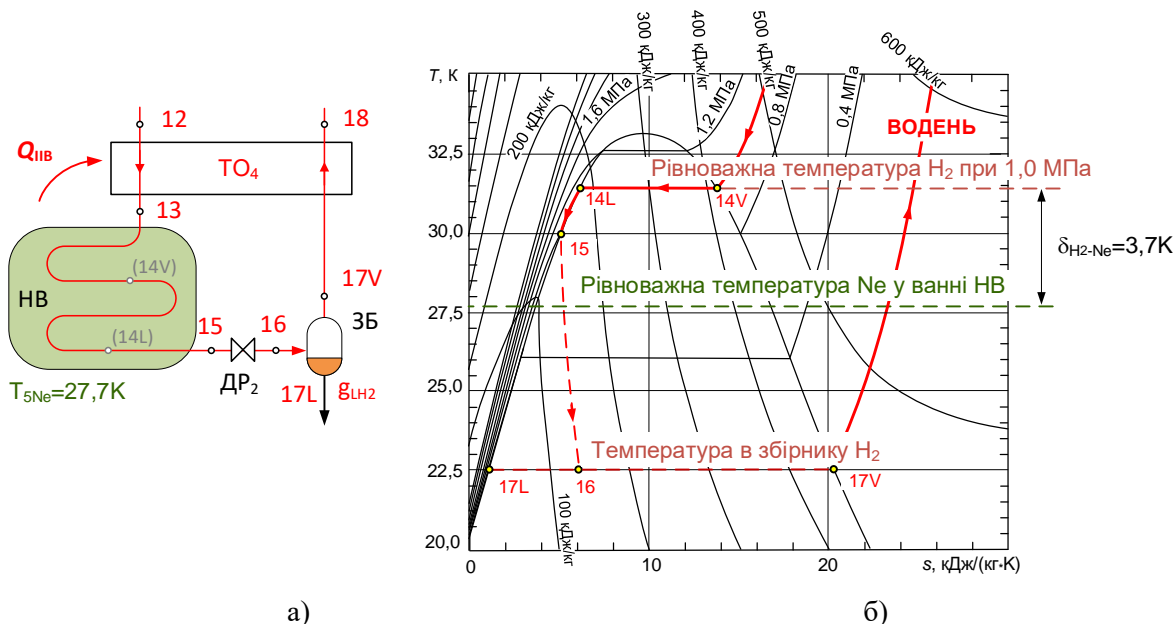


Рисунок 2 – Схема дросельного ступеня водневого циклу (а); T, s -діаграма процесу охолодження та конденсації водню в змійовику неоновій ванні НВ (б):

TO_4 – теплообмінник; ЗБ – збірник-сепаратор водню; ДР_2 – дросель водневого циклу; g_{LH_2} – продуктивність зріджувача по рідкому водню

На основі матеріального балансу збірника-сепаратора ЗБ частка зріджуваного водню становить (див. рис. 2, а)

$$x_{H_2} = \frac{g_{H_2}}{G_{KH_2}} = \frac{(h_{17V} - h_{16})}{(h_{17V} - h_{17L})}, \quad (5)$$

де G_{KH_2} – витрата циркулюючого потоку; g_{LH_2} – продуктивність зріджувача.

Частка рідкого водню, що відбирається зі збірника-сепаратора ЗБ, відповідає умовам, наведеним у табл. 5.

Таблиця 5 – Параметри водню в змішувачу неонові ванни НВ та збірнику-сепаратору ЗБ (див. рис. 2, 3)

Потік водню		h , кДж/кг	T , К	P , МПа
Рівноважний водень у змішувачу неонові ванни НВ (точки 14V – 14L)	пара	418,5	31,4	1,0
	рідина	176,4		
Переохолоджена рідина перед дроселем ДР ₂ (точка 15)		137,2	30,0	
Парорідинна суміш після дроселя ДР ₂ (точка 16)		137,2	22,5	0,18
Зворотний потік газоподібного водню (точка 17V)		458,2		
Рідкий продукт (точка 17L)		22,7		

Визначення продуктивності водневого зріджувача зводиться до обчислення витрати потоку циркулюючого водню, узгодженого з холодопродуктивністю неонових рефрижераторів Q_{XNe} . З балансу дросельного ступеню водневого контуру (див. рис. 2, а) випливає, що в режимі одержання ортоводню

$$G_{KH_2} \cdot h_{12} + G_{KH_2} \cdot q_{ПВ} = (G_{KH_2} - g_{LH_2}) \cdot h_{18} + g_{LH_2} \cdot h_{17L} + Q_{XNe}, \quad (6)$$

де G_{KH_2} – витрата циркулюючого водню; g_{LH_2} – витрата зрідженого водню; $q_{ПВ} = 4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи до дросельного ступеню зріджувача водню.

У розрахунку на 1 кг циркулюючого водню

$$h_{12} + q_{ПВ} = (1 - x_{H_2}) \cdot h_{18} + x_{H_2} \cdot h_{17L} + \frac{Q_{XNe}}{G_{KH_2}}. \quad (7)$$

Як встановлено розрахунком, для прийнятої конфігурації та ступеня компримування корисна холодопродуктивність неонових рефрижераторів становить $Q_{XNe} = 0,297$ кВт. Витрата циркулюючого водню G_{KH_2} , узгоджена з Q_{XNe} ,

$$G_{KH_2} = \frac{Q_x}{h_{12} + q_{ПВ} - h_{18} + x_{H_2} \cdot (h_{18} - h_{17L})}. \quad (8)$$

$$G_{KH_2} = \frac{0,297}{975,0 + 4 - 944,6 + 0,737 \cdot (944,6 - 22,7)} = 0,000416 \text{ кг/с;}$$

$$V_{KH_2} = G_{KH_2} / \rho_{Hy} = 0,000416 / 0,838 = 17,9 \text{ м}^3/\text{год.}$$

При коефіцієнті зрідження згідно з формулою (5) $x_{H_2} = 0,737$ витрата рідкого продукційного ортоводню становитиме $g_{LH_2} = 0,307$ г/с = 1,1 кг/год.

Об'ємна продуктивність установки

$$v_{LH_2} = g_{LH_2} / \rho_{ж} = 1,10 / 0,0683 = 16,2 \text{ дм}^3/\text{год.} \quad (9)$$

Питома витрата холодоагенту у водневому контурі (див. табл. 3)

$$g_{AH_2} = \frac{G_{AH_2}}{G_{KH_2}} = \frac{h_{11} - h_{12} - (1 - x_{H_2}) \cdot (h_{19} - h_{18}) + q_{IB}}{h_{10} - h_9} \quad (10)$$

З урахуванням $G_{KH_2} = 0,000417$ кг/с споживання рідкого азоту дорівнюватиме $G_{AH_2} = 0,00238$ кг/с = 8,6 кг/год.

Розраховані параметри H_2 -циклу характерні для отримання ортоводню. Як відомо [1], нормальний водень складається із двох модифікацій – ортоводню і параводню, співвідношення яких визначається температурою. При параметрах довкілля концентрація параводню становить приблизно 25 %. Після зрідження водню з таким складом мимоволі відбувається конверсія, внаслідок чого концентрація параводню досягає 97 %. Процес конверсії водню супроводжується виділенням теплоти. В результаті за добу одна п'ята частина криогенної рідини перейде до газової фази.

Для забезпечення тривалого зберігання зріджений водень необхідно перевести в стійку пара-модифікацію шляхом відведення теплоти конверсії в зріджувачі. Зазвичай такий процес проводять у два етапи (реактори R1 та R2, рис. 3). У реакторі R1 на азотному рівні відводиться теплота конверсії $q_{R1} = 195$ кДж/кг H_2 , при цьому концентрація параводню в потоці підвищується до 54 %. У реакторі R2 при $T_{R2} = 30$ К до киплячого неону відводиться теплота в кількості $q_{R2} = 300$ кДж/кг H_2 .

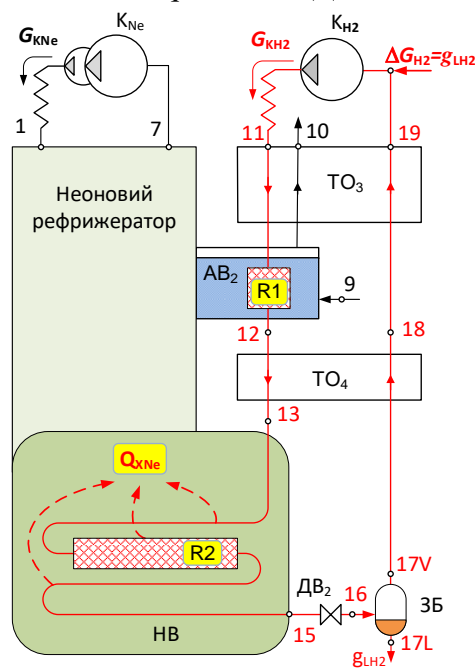


Рисунок 3 – Схема водневого блоку з реактором R2 у неоновій ванні Ne-циклу: 3Б – збірник-сепаратор водню; АВ₂ – азотна ванна [$T_9 = 67$ К; $(T_{12} - T_9) = 5$ К]; G_{KH_2} – витрата газу в компресорі

При заданій холодопродуктивності неоновому рефрижератору Q_{XNe} внаслідок додаткового теплового навантаження q_{R2} витрата водню G_{KH_2} , що циркулює, зменшується. При незмінному коефіцієнті зрідження $x_{\text{H}_2} = 0,737$ це призводить до зменшення продуктивності зріджувача v_{LH_2} з 16,2 до 12,3 $\text{дм}^3/\text{год}$ (табл. 6).

Таблиця 6 – Характеристики багатоцільової установки для отримання рідких кріопродуктів

Режим роботи	Витрата продукту, $\text{дм}^3/\text{год}$	Продуктивність компресорів, $\text{нм}^3/\text{год}$		Споживання рідкого азоту, $\text{кг}/\text{год}$
		Неоновий	Водневий	
Рідкий ортоводень	17,9	40	17,9	13,5
Рідкий параводень	13,6		13,6	11,9
Рідкий неон	7,0		-	9,7

Відповідно до проекту створено дослідний зразок комбінованої воднево-неонової системи (рис. 4).

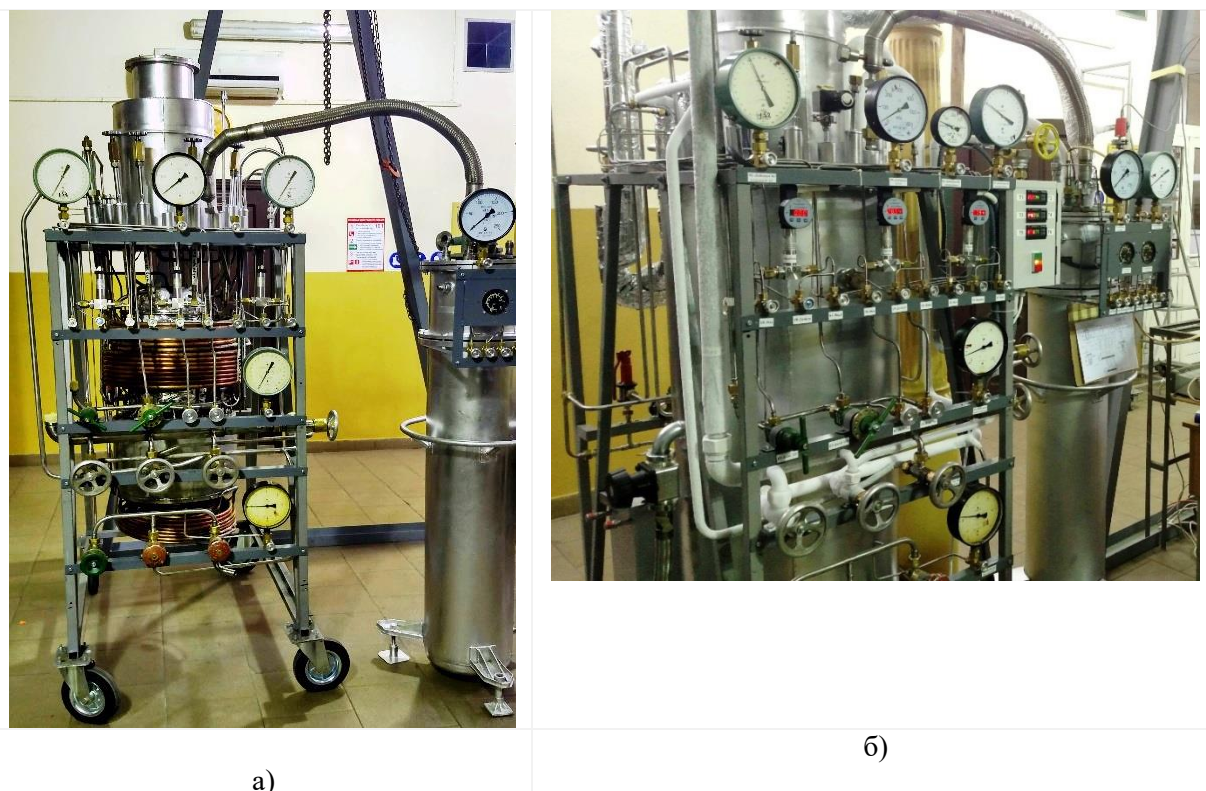


Рисунок 4 – Зріджувач водню та неоновий рефрижератор на стадії монтажу (а) та в процесі випробувань (б)

Установка призначена для лабораторних досліджень конструкційних властивостей матеріалів та низькотемпературної ізоляції в інтервалі температур 21...30 К.

Висновки

У наш час відчувається потреба у маловитратних зріджувачах водню. Найбільш простими є зріджувачі, що працюють за дросельним циклом високого тиску ($P \approx 15$ МПа). Через низьку температуру інверсії у водневому циклі застосовують рідкий азот.

Досліджено можливість використання водневих зріджувачів шляхом поєднання водневого та гелієвого контурів. У цьому випадку виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, а також зростає його економічність. При такій побудові установки, що має два робочі тіла, вдається знизити тиск водню до 5,5 МПа.

Подальше вдосконалення неонові установки дозволило на основі двох компресорів 4,0 МК-20/200 у рефрижераторному режимі досягти холодопродуктивності 297 Вт. При $P = 1$ МПа перепад температур між рівноважними воднем і неоном у ванні НВ становитиме 3,7 К.

У результаті можна стверджувати, що створено досить ефективну кріогенну багатопільову установку, що складається з водневого зріджувача і неонові рефрижератора та призначена для проведення досліджень в інтервалі температур 21...30 К.

Література

1. Naseem K., Qin F., Khalid F., Suo G., Zahra T., Chen Z., Javed Z. Essential parts of hydrogen economy: hydrogen production, storage, transportation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210. A. 115196.
2. Glowacki B. A., Nuttal W. J. Hydrogen as a fuel and as a coolant – from the superconductivity perspective. *Journal of Energy Science*. 2010. Vol. 1. P. 15–29.
3. Hirabayashi H., Makida Y., Nomura S., Shintomi T. Liquid hydrogen cooled superconducting magnet and energy storage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 766.
4. Kamiya K., Takahashi H., Numazawa T., Nozawa H., Yanagitani T. Hydrogen liquefaction by magnetic refrigeration. In: Miller S. D., Ross R. G. Jr (eds). *Proceedings of the Fourteenth Conference on Cryocoolers*. Boulder, CO, 2007. P. 637–644.
5. Vasilyev A., Bezymyannykh B., Ganzha V. et al. Cryogenic system for continuous ultrahigh hydrogen purification in circulation mode. *NHA Annual Hydrogen Conference*. Washington, DC, 2005. P. 1–15.
6. Alekseev I., Fedorchenko O., Kravtsov P., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Experimental results of hydrogen distillation at the low power cryogenic column for the production of deuterium depleted hydrogen. *Fusion Science and Technology*. 2008. Vol. 54, No. 2. P. 407–410.
7. Bondarenko V. L., Pylypenko B. O., Tyshko D. P. Refrigeration cycles in units for neon and its stable isotopes production. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*. 2018. No. 179. P. 315–316.
8. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Cooling systems at temperature level $T = 28$ –30 К. *Proceedings of the 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2018. ID: 2163.
9. Bondarenko V., Arkharov A., Poddubna M., Symonenko I. Production of stable neon isotope by method of low temperature rectification. *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration*. 2015. P. 225–231.

10. Bondarenko V. L., Symonenko Y. M., D'yachenko O. V. Neon throttle liquefiers in installations for producing light inert gases and neon isotopes. *The International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR'2008)*. 2008. P. 239–243.

11. Bondarenko V. L., Arkharov A. M., Golubev A. A., Kapralov P. V., Savinov M. Y., Symonenko Y. M., Purtov S. N., Rura V. N., Volynskii B. I. Pilot-commercial plant for high purity neon production. *Preprints of the XX International Congress of Refrigeration*. 1999. P. 1–5.

12. Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. Separation of neon into isotope components by the distillation method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cryogenics and Refrigeration Technologies*. 2018. P. 60–68.

13. Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *The XXIIInd National Conference with International Participation "New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment"*. 2018. Vol. 1. P. 88–89.

14. Yamanishi T., Kinoshita M. Preliminary experimental study for cryogenic distillation column with small inner diameter. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1984. Vol. 21. P. 853–861.

15. Schultz K. R. Use of the modular helium reactor for hydrogen production. *General Atomics Project 04962*. 2003. P. 1–9.

16. Yamada S. S., Hishinuma Y., Uede T., Schippl K., Yanagi N., Mito T., Sato M. Conceptual design of 1 GW class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 234. A. 032064.

17. Silk E. A. Introduction to spacecraft thermal design. *Cambridge University Press*, 2020. 355 p.

18. Zhou K., Chen L., Li S., Zhao K., Zhang Z., Chen S., Hou Y. Comparative analysis of energy losses in hydrogen and helium turbo-expanders for hydrogen liquefiers. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 227. A. 120322.

19. Xiong L., Yang K., Yang Z., Wei Z., Xu X., Zhu J., Lu C. Design and commissioning of a medium-scale hydrogen liquefaction plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1327. 012105.

20. Bondarenko V., Dalakov P., Symonenko I., Matveev E. The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Refrigeration Science and Technology Proceedings*. 2017. P. 243–248.

21. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Comparison of refrigeration cycles used for production of pure neon and its isotopic components. *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Refrigeration*. 2017. F. 19. P. 1–7.

Bibliography (transliterated)

1. Naseem K., Qin F., Khalid F., Suo G., Zahra T., Chen Z., Javed Z. Essential parts of hydrogen economy: hydrogen production, storage, transportation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210. A. 115196.

2. Glowacki B. A., Nuttal W. J. Hydrogen as a fuel and as a coolant – from the superconductivity perspective. *Journal of Energy Science*. 2010. Vol. 1. P. 15–29.

3. Hirabayashi H., Makida Y., Nomura S., Shintomi T. Liquid hydrogen cooled superconducting magnet and energy storage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 766.
4. Kamiya K., Takahashi H., Numazawa T., Nozawa H., Yanagitani T. Hydrogen liquefaction by magnetic refrigeration. In: Miller S. D., Ross R. G. Jr (eds). *Proceedings of the Fourteenth Conference on Cryocoolers*. Boulder, CO, 2007. P. 637–644.
5. Vasilyev A., Bezymyannykh B., Ganzha V. et al. Cryogenic system for continuous ultrahigh hydrogen purification in circulation mode. *NHA Annual Hydrogen Conference*. Washington, DC, 2005. P. 1–15.
6. Alekseev I., Fedorchenko O., Kravtsov P., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Experimental results of hydrogen distillation at the low power cryogenic column for the production of deuterium depleted hydrogen. *Fusion Science and Technology*. 2008. Vol. 54, No. 2. P. 407–410.
7. Bondarenko V. L., Pylypenko B. O., Tyshko D. P. Refrigeration cycles in units for neon and its stable isotopes production. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*. 2018. No. 179. P. 315–316.
8. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Cooling systems at temperature level $T = 28\text{--}30\text{ K}$. *Proceedings of the 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2018. ID: 2163.
9. Bondarenko V., Arkharov A., Poddubna M., Symonenko I. Production of stable neon isotope by method of low temperature rectification. *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration*. 2015. P. 225–231.
10. Bondarenko V. L., Symonenko Y. M., D'yachenko O. V. Neon throttle liquefiers in installations for producing light inert gases and neon isotopes. *The International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR'2008)*. 2008. P. 239–243.
11. Bondarenko V. L., Arkharov A. M., Golubev A. A., Kapralov P. V., Savinov M. Y., Symonenko Y. M., Purtov S. N., Rura V. N., Volynskii B. I. Pilot-commercial plant for high purity neon production. *Preprints of the XX International Congress of Refrigeration*. 1999. P. 1–5.
12. Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. Separation of neon into isotope components by the distillation method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cryogenics and Refrigeration Technologies*. 2018. P. 60–68.
13. Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *The XXII National Conference with International Participation "New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment"*. 2018. Vol. 1. P. 88–89.
14. Yamanishi T., Kinoshita M. Preliminary experimental study for cryogenic distillation column with small inner diameter. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1984. Vol. 21. P. 853–861.
15. Schultz K. R. Use of the modular helium reactor for hydrogen production. *General Atomics Project 04962*. 2003. P. 1–9.
16. Yamada S. S., Hishinuma Y., Uede T., Schippl K., Yanagi N., Mito T., Sato M. Conceptual design of 1 GW class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 234. A. 032064.
17. Silk E. A. Introduction to spacecraft thermal design. *Cambridge University Press*, 2020. 355 p.

18. Zhou K., Chen L., Li S., Zhao K., Zhang Z., Chen S., Hou Y. Comparative analysis of energy losses in hydrogen and helium turbo-expanders for hydrogen liquefiers. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 227. A. 120322.

19. Xiong L., Yang K., Yang Z., Wei Z., Xu X., Zhu J., Lu C. Design and commissioning of a medium-scale hydrogen liquefaction plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1327. 012105.

20. Bondarenko V., Dalakov P., Symonenko I., Matveev E. The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Refrigeration Science and Technology Proceedings*. 2017. P. 243–248.

21. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Comparison of refrigeration cycles used for production of pure neon and its isotopic components. *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Refrigeration*. 2017. F. 19. P. 1–7.

УДК 621.564.27

Б. Г. Грудка, канд. техн. наук, доцент

ЗРІДЖУВАЧ ВОДНЮ З НЕОНОВИМ КРІОГЕННИМ РЕФРИЖЕРАТОРОМ

Мета наукової роботи – створення комбінованої установки для проведення досліджень в інтервалі температур 21...30 К. У даному випадку визнано раціональним використовувати водень або неон, у яких за цих умов спостерігається фазова рівновага «пара-рідина». У маловитратних зріджувачах водню застосовується дросельний цикл високого тиску (15 МПа) з охолодженням робочого тіла нижче інверсійної температури в азотних ваннах. Перспективним можна вважати поєднання водневого та гелієвого контурів. За рахунок використання двох робочих тіл виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, підвищується економічність та знижується тиск потоку водню, стиснутого до 5,5 МПа. Надалі, об'єднання водневого та гелієвого контурів дозволило підвищити економічність та зменшити тиск прямого потоку водню до 1 МПа. В результаті цього в ступені компримування водню запропоновано застосовувати одноступеневі компресори. На відміну від воднево-гелієвих систем, відведення тепла від водню відбувається з меншими термодинамічними втратами при стабільній температурі киплячого кріоагенту (неону). Густина і прихована теплота пароутворення неону (на одиницю об'єму) істотно вище, ніж у водню, що зумовило його використання у якості робочого тіла у допоміжному рефрижераторному циклі з охолодженням прямого потоку у ванні з азотом, що кипить під вакуумом. Найбільш вагомими результатами є досягнення продуктивності комплексу в режимі зрідження водню, що становить 18 і 13 $\text{дм}^3/\text{год}$ з урахуванням орто- і параконверсії, відповідно. Установка також здатна зріджувати неон з витратою 7 $\text{дм}^3/\text{год}$. Досягнуті результати вказують на можливість застосування рідкого неону для імітації умов, близьких до водневого рівня температур. За рахунок цього попереднє тестування водневого обладнання проводиться за допомогою безпечного кріоагенту.

Ключові слова: цикл високого тиску, діафрагмовий компресор, рідкий водень, рідкий неон, конверсія водню.

В. Н. Hrudka

HYDROGEN LIQUEFIER WITH A NEON CRYOGENIC REFRIGERATOR

The aim of the research work is to create a combined unit for research in the temperature range of 21...30 K. It was considered rational to use hydrogen or neon, which under these conditions have a phase equilibrium "vapor-liquid". In low-consumption hydrogen liquefiers a high-pressure (15 MPa) throttle cycle with cooling of the working media below the inversion temperature in nitrogen baths is used. Combination of hydrogen and helium circuits can be considered promising. Due to use of two working medium, a part of equipment working on gaseous hydrogen is excluded, efficiency is increased and hydrogen flow pressure, compressed to 5,5 MPa, is reduced. Further, combining hydrogen and helium circuits allowed to increase economy and reduce pressure of direct hydrogen flow to 1 MPa. As a result, single-stage compressors were used in the hydrogen compression stage. In contrast to hydrogen-helium systems, heat removal from hydrogen occurs with less thermodynamic losses at a stable temperature of the boiling cryoagent (neon). The density and latent heat of vaporization of neon (per unit volume) is significantly higher than that of hydrogen, which led to its use as a working media in the auxiliary refrigeration cycle with direct flow cooling in a bath of nitrogen, boiling under vacuum. The most significant can be considered the achievement of the productivity of the complex in the hydrogen liquefaction mode, which is 18 and 13 dm³/h, taking into account the ortho- and paraconversion, respectively. The unit is also capable of liquefying neon at a flow rate of 7 dm³/h. The results achieved indicate that liquid neon can be used to simulate conditions close to the hydrogen temperature level. Due to this, pre-testing of hydrogen equipment is performed with a relatively safe cryoagent.

Keywords: high-pressure cycle, diaphragm compressor, liquid hydrogen, liquid neon, hydrogen conversion.

Отримано редколегією 26.01.2026

Грудка Богдан Геннадійович (Bohdan Hrudka), канд. техн. наук, доцент, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>.