

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

УДК 621.91

В.Д. БІЛОДІД, канд. техн. наук, **Г.О. КУЦ**, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ГОРЮЧИХ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ І ВОДНЮ, А ТАКОЖ ВИТРАТИ НА ЇХ ПІДГОТОВКУ ДО ПРЯМОГО СПАЛЮВАННЯ

Визначено прогнозний потенціал окремих видів горючих промислових газів, які належать до горючих вторинних енергоресурсів. Зроблено оцінки щодо витрат енергії на їх підготовку для спалювання в котлоагрегатах. Проведено аналіз технологій виробництва водню з оцінкою витрат енергії на його виробництво. Зроблено прогноз можливих обсягів їх використання на найближчу перспективу.

Ключові слова: горючі вторинні енергоресурси, доменний газ, конвертерний газ, феросплавний газ, водень

У роботі [1] авторами цієї статті були розглянуті питання щодо визначення енергетичного потенціалу окремих видів альтернативного палива та оцінки прямих енерговитрат на їх видобуток чи виробництво, а також на підготовку для прямого спалювання в котлоагрегатах. Розглядалися такі види альтернативного палива, як торф, відходи лісозаготівель, відходи рослинної сільськогосподарської біомаси, шахтний метан.

Важливим також є з'ясування потенціалу та енергетичних витрат на підготовку для спалювання таких енергоресурсів, як горючі промислові гази, які кваліфікуються як горючі вторинні енергетичні ресурси (ГВЕР), а також водню. Незважаючи на наявний значний потенціал ГВЕР у промисловості України, їх використання залишається відносно малим. Однією з проблем є саме визначення ресурсного потенціалу, а також енергоємності процесів підготовки окремих видів ГВЕР для прямого спалювання в котлоагрегатах. Недостатньо обґрунтованим є питання використання водню як палива. Саме висвітлення цих проблем і є метою даної роботи.

Реально у практиці ГВЕР можуть стати додатковим джерелом палива для промислової та міської комунальної теплоенергетики за

рахунок зменшення втрат, рівень яких на сьогодні залишається ще високим. У табл. 1 наведено дані виходу, використання та втрат різних видів ГВЕР у 2005 та 2009 роках, згідно з якими у 2009 р. загальний обсяг виходу ГВЕР складав 9317,3 тис. т у.п., з якого використано на власних підприємствах – 7848,7 тис. т у.п. (84,2 % від загального обсягу виходу), відпущено на сторону – 210,3 (2,3 %); втрачено – 1258,3 (13,5 %). За окремими видами ГВЕР втрати склали: доменний газ – 450,5 тис. т у.п. (7,58 % від загального обсягу виходу доменного газу); конвертерний газ – 397,7 (98,39 %); феросплавний газ – 153,1 (66,42 %); відходи лісозаготівлі та деревообробки – 28,5 (22,82 %); чорний луг використовується в повному обсязі і втрат не має.

Слід відзначити, що у 2009 р. порівняно з 2005 р. зменшились обсяги виходу і використання ГВЕР відповідно на 19,3 і 20,4 %, а втрати відносно обсягів виходу ГВЕР для порівнюваних років збільшилися на 0,8 %. Зменшення обсягів виходу ГВЕР у 2009 р. пов'язане з економічною кризою в країні та виробництвом чорної металургії – джерел ГВЕР.

До переліку ГВЕР, наданих у табл. 1, окремо не включено такі промислові гази, як ретурні, танкові, обгази, продувні гази, скидний водень та інші. Обліком державної статзвітності [2] зазначені види ГВЕР включено до статті "інші види", обсяг їх виходу складає, за нашими розрахунка-

© В.Д. БІЛОДІД, Г.О. КУЦ, 2011

ми, близько 1,0 млн т у.п./рік. Обсяги виходу даних видів ГВЕР було враховано до прогнозів рівнів їх використання на перспективу.

Підвищення рівня використання ГВЕР пов'язане тільки з розв'язанням організаційних питань і не потребує додаткових науково-дослідних розробок. Повне використання таких ГВЕР, як конвертерний, феросплавний, ретурний та продувний газу для багатьох розвинутих країн (Японія, США, Німеччина та інші) практично давно вирішено.

З урахуванням структурних змін у чорній металургії та інших галузях було проведено оцінку можливого підвищення рівня використання ГВЕР на перспективу до 2015 року, згідно з якою використання таких ГВЕР, як

доменний газ, можна підвищити до 97...98 %, конвертерний – до 40 %, феросплавний – до 70 %, горючі газу нафтопереробних та хімічних підприємств – до 70 %, скидного водню – до 45 %. У табл. 2 наведено обсяги виходу та можливого використання ГВЕР у 2012 та 2015 рр. з урахуванням зазначених рівнів. Теплоенергетика за рахунок структурних змін у провідних галузях країни та підвищення рівня використання ГВЕР може додатково одержати палива в межах 1,0...1,1 млн т у.п./рік.

При підготовці газових горючих вторинних енергоресурсів до спалювання проводиться їх очистка в сухих і мокрих уловлювачах пилу та електрофільтрах. Згідно з [4], прямі енергозатрати на процеси очистки знаходяться у

Таблиця 1

Види ГВЕР	Роки	Вихід, використання та втрати ГВЕР, тис. т у.п.			
		річний вихід	фактичне використання на підприємствах	відпущено на сторону	втрати
Доменний газ	2005	7133,1	6459,6	188,1	485,4
	2009	5937,6	5444,7	42,4	450,5
Конвертерний газ	2005	554,2	22,6	-	531,6
	2009	404,2	6,5	-	397,7
Феросплавний газ	2005	336,2	97,6	-	238,6
	2009	230,5	77,4	-	153,1
Чорний луг	2005	11,3	11,3	-	-
	2009	0,4	0,4	-	-
Відходи лісозаготівлі та деревообробки	2005	66,6	26,0	30,8	9,8
	2009	124,9	57,2	39,2	28,5
Інші види	2005	3017,4	2308,4	561,5	147,5
	2009	2619,7	2262,5	128,7	228,5
Всього	2005	11118,8	8925,5	780,4	1412,9
	2009	9317,3	7848,7	210,3	1258,3

Таблиця 2

Види ГВЕР	2012 р.			2015 р.		
	Вихід, тис. т у.п.	Використання, тис. т у.п.	Рівень використання, %	Вихід, тис. т у.п.	Використання, тис. т у.п.	Рівень використання, %
Доменний газ	8310	8020	96,5	8720	8460	97
Конвертерний газ	385	195	50	680	544	80
Феросплавний газ	460	320	70	400	400	80
Ретурні, танкові, продувні та інші газу	820	400	48	950	665	70
Всього	10065	8953	89	10960	10119	92,3

межах 1,4...1,6 (кВт·год)/(тис. м³), у перерахунку на тону умовного палива ці затрати для окремих видів ГВЕР наведені в табл. 3.

Для порівняння енерговитрати на видобуток традиційних видів палива за даними [1, 3] складають: природний газ – 11,6 кг у.п./т у.п., кам'яне вугілля – 58,2, буре вугілля – 105,7, нафта сира (видобуток) – 34,9, нафта сира (переробка) – 39,4, коксовий газ – 76,5.

З урахуванням показників виходу і використання ГВЕР визначено обсяги можливого потенціалу окремих видів ГВЕР та прямі витрати енергії на їх підготовку для спалювання в котлоагрегатах за двома варіантами – оптимістичним та ймовірним (табл. 4), згідно з якими він складає відповідно 1160,0 та 960,0 тис. т у.п., а прямі витрати енергоресурсів – 2,86 та 2,42 тис. т у.п.

Водень (пророкується деякими вченими світу як паливо майбутнього) за своїми теплотехнічними характеристиками має переваги над іншими вуглеводними видами палива, а саме [5]:

масова нижча теплота згорання у 2,8...3,0 рази перевищує цей показник інших видів палива нафтопереробки і природного газу (нижча теплота згорання водню 119970,76 кДж/кг (28660 ккал/кг) або 10402,21 кДж/м³ (2485 ккал/м³);

жаропродуктивність молекулярного водню 2235 °С, що на 200 °С вище жаропродуктивності метану;

при згоранні 1 м³ водню при теоретично необхідній кількості повітря утворюється 2,88 м³ продуктів згорання, а при конденсації водяної

пари цей об'єм знижується до 1,88 м³ (для порівняння цей показник для природного газу вищий у 4 рази);

висока реакційна здатність;
екологічно чисте паливо.

Перераховані переваги водню дозволяють значно підвищити ефективність енергоустановок, знизити питомі витрати палива на виробництво теплоти та викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Більшість наукових праць з водневої енергетики розглядає саме цей аспект, тобто переваги водню як енергоносія. При цьому не вирішено питання: "А де брати водень для водневої енергетики?"

Публікацій з питань генерування водню із застосуванням технологій та сировини на основі природних ресурсів (а не органічних видів палива, які саме і вичерпуються) мало, а останнім часом зовсім немає.

На сьогодні у світовій практиці водень використовується лише як технологічний газ для виробництва синтетичного аміаку, метанолу й інших видів спиртів, гідрогенізації важких нафтопродуктів і смоли для одержання моторного палива, в авіації та енергетиці у якості холодоносія, для різних потреб в інших галузях. Як паливо водень не застосовується [6–8].

Це пов'язано з тим, що в природі вільного водню не існує, а його штучне отримання потребує значних енергетичних витрат, які перевищують енергетичну спроможність водню. Розроблено досить велику кількість технологій виробництва водню, перелік яких надано в табл. 5,

Таблиця 3

Види ГВЕР	Одиниця виміру	Прямі витрати електроенергії, кВт·год	Сумарні затрати енергоресурсів, кг у.п./кг	Нижча теплота згорання (середня) ккал/(кг·м ³)	Прямі питомі витрати енергоресурсів, кг у.п./т у.п.
Доменний газ	тис. м ³	1,5	0,54	1000	3,77
Конвертерний газ	тис. м ³	1,5	0,54	2080	1,2
Феросплавний газ	тис. м ³	1,5	0,54	2305	1,64

Таблиця 4

Види ГВЕР	Енергетичний потенціал, тис. т у.п.		Обсяг прямих витрат енергоресурсів на підготовку палива до спалювання, тис. т у.п.	
	оптимістичний варіант	ймовірний варіант	оптимістичний варіант	ймовірний варіант
Доменний газ	550,0	450,0	2,0	1,7
Конвертерний газ	300,0	250,0	0,36	0,3
Феросплавний газ	310,0	260,0	0,5	0,42
Всього	1160,0	960,0	2,86	2,42

Таблиця 5

Види технології	Вихідні види сировини	Джерела енергії	Витрати електричної енергії (% від сумарних витрат)	Сумарні витрати енергетичних ресурсів		Енергетичний ККД процесу, %	
				т.у.п. на 1 т газоподібного водню	т.у.п. на 1 т у.п. газоподібного водню	досягнутий	можливий
1	2	3	4	5	6	7	8
Технології існуючі							
Парокиснева газифікація:							
бурого вугілля в киплячому шарі при:	Буре вугілля, пара, кисень	Буре вугілля					
- нормального тиску			12	13,5	3,0	30,3	35
- тиску 2 МПа			15	11,9	2,9	34,2	40
шилоподібного вугілля при:							
- нормального тиску	Всі види вугілля, пара, кисень	Всі види вугілля	12	13,5	3,3	30,3	35
- тиску 2 МПа			15	12,0	2,9	34,5	40
рідкого палива під тиском	Всі види вугілля, пара	Всі види вугілля	12	11,5	2,8	36,0	42
мазуту при:							
- нормального тиску	Мазут, пара, кисень	Мазут	15	12,7	3,1	32,4	40
- тиску 2 МПа			12	10,9	2,7	38,0	45
природного газу в киплячому шарі каталізатора під тиском 2 МПа	Природний газ, пара, кисень	Природний газ	11	9,6	2,4	42,0	45
Металопарова конверсія твердого палива (під тиском) в енерготехнологічній схемі з газовою турбіною	Всі види вугілля	Всі види вугілля	-	10,3	2,5	40,0	65
Парова конверсія природного газу:							
у трубчастих печах при:							
- нормального тиску	Природний газ	Природний газ	10	9,3	2,3	44,0	50
- тиску 2 МПа			10	6,5	1,6	62,0	65
у киплячому шарі каталізатора з циркулюючим теплоносієм під тиском 2 МПа			10	6,6	1,6	61,0	65

Продовження табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8							
Термічне розкладання метану в апаратах періодичної дії при нормальному тиску	Природний газ	Природний газ	15	7,4	1,8	55	60							
								Електроліз води при використанні електроенергії ТЕС на вугіллі:	Вугілля	- за сучасною технологією ¹	20,5	5,1	19,5	22
										- за поліпшеною технологією ²	14,8	3,6	28,0	-
										електроенергії АЕС:				
- за сучасною технологією ³	100	19,5	4,8	21,0	-									
- за поліпшеною технологією ⁴	100	11,5	2,8	36,0	-									
Технології майбутнього														
Парова конверсія природного газу в трубах частих печач під тиском (з використанням теплоти атомного реактора)	Природний газ	Атомна теплота	10	6,7	1,6	-	60							
Газифікація бурого вугілля під тиском (з використанням теплоти атомного реактора)	Буре вугілля	Атомна теплота	15	10	2,7	-	40							
Термохімічне розкладання води за технологією ВТГР ⁵	Вода	Атомна теплота	15	9,8	2,4	-	42							
Термохімічне розкладання води ⁶	Вода	Сонячна енергія	15	12,3	3,0	-	33							
Термоелектрохімічний цикл на основі атомної енергії (гібридний процес)	Вода	Атомна теплота	50	10	2,7	-	40							
Плазмохімічний цикл на основі атомної енергії	Вода	Атомна теплота	50	10	2,7	-	40							
Електроліз води ⁷	Вода	Сонячна енергія	100	37,4	9,1	-	11							
Електроліз води ⁸	Вода	Сонячна енергія	100	18,0	4,5	-	21							
Електроліз води ⁹	Вода	Сонячна енергія	100	18,9	4,6	-	21							
Комбінований фототермоелектрохімічний процес розкладання води	Вода	Сонячна енергія	-	11,7	2,9	-	30							

Продовження табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
Фотокаталітичне розкладання води	Вода	Сонячна енергія	-	13,65	3,3	-	30
Електрохімічний фотоліз	Вода	Сонячна енергія	-	14,65	3,6	-	28
Фототермічне розкладання води при високих температурах	Вода	Сонячна енергія	-	13,65	3,3	-	30
Термоманітне розкладання води	Вода	Уран	-	10,25	2,5	-	40
Радіоліз води ¹⁰	Вода	Уран	-	60,8	16,7	-	6
Використання випромінювань термоядерного реактора	Вода	Дейтерій-тритій	-	11,7	2,9	-	35
Біоконверсія ¹¹	Вода	Сонячна енергія	-	24,0	5,9	-	15

¹ ККД одержання електроенергії 32,5 %, ККД електролізу 60 %, загальний ККД системи 0,195.

² Електроенергія від ТЕС, що працює на вугіллі; ККД одержання електроенергії 35 %, ККД електролізу 80 %, загальний ККД 0,28.

³ ККД одержання електроенергії 35 %, ККД електролізу 60 %, загальний ККД системи 0,21.

⁴ Електроенергія від АЕС; ККД одержання електроенергії 45 %, ККД електролізу 80 %, загальний ККД системи 0,36.

⁵ ККД теплового циклу одержання теплоносія 60 %, ККД термодімічного циклу 70 %, загальний ККД системи 0,42.

⁶ Тепло від парового циклу з колектором-концентратором сонячної енергії; ККД колектора-концентратора 70 %, ККД парового циклу, сполученого з термодімічним, 47 %, загальний ККД системи 0,329.

⁷ Електроенергія від сонячної батареї; ККД сонячної батареї 15 %, ККД електролізу 75 %, загальний ККД системи 0,11.

⁸ Електроенергія від теплової сонячної електростанції в парогазовому циклі; ККД електролізу 75...80 %, на вході в турбіну 825 К, на виході 300 К,

⁹ Електроенергія від парового циклу з колектором-концентратором сонячної енергії; ККД колектора-концентратора 70 %, ККД парового циклу 41,2 %, ККД електролізу 75 %, загальний ККД системи 0,214.

¹⁰ Розрахунок тільки на використання теплоты атомного реактора.

¹¹ Максимально досяжний ККД фотосинтезу, тобто перетворення сонячної енергії в потенційну хімічну енергію досягає 30 %. Інші 70 % у кінцевому рахунку перетворюються в теплоту. Але лише половина енергії сонячного випромінювання являє собою фотосинтетично активну радіацію. Тому варто думати, що максимально можливе використання сонячної енергії при фотосинтезі складає не більше 15 %. Слід зазначити, що ККД процесів фотосинтезу оцінено значно меншим (2 %). І тому, очевидно, процеси отримання енергії фотосинтетичними методами потребують більш детального вивчення та обґрунтування [5].

де показано сумарні витрати енергоресурсів при застосуванні зазначених технологій. Згідно з цими даними сумарні витрати енергоресурсів на одержання 1 т газоподібного водню знаходяться в межах 7,4...20,5 т у.п., або приведенного до т у.п. газоподібного водню відповідно 1,6...5,1. Енергетичне використання водню як палива при його отриманні з використанням існуючих технологій принципово не вигідне, оскільки завжди енерговитрати на отримання більші від результату при спалюванні. Досить переконливо це було показано у роботі [9].

Разом з тим існують думки про можливе застосування водню як проміжного енергоносія (аналог електроенергії) для транспорту і різних спеціальних потреб. Таке застосування може суттєво поліпшити екологію великих міст, а також забезпечити отримання енергоносія, який генеруватиметься з інших джерел, наприклад від АЕС чи з якогось з відновлюваних джерел (сонячна, геотермальна, гідравлічна, вітрова енергія тощо). Однак економіка такого перетворення ще не є достатньо обгрунтованою. Водневе паливо для транспорту (у сукупності з затратами енергії на зберігання, транспортування і використання водню) не витримує конкуренції з традиційним моторним паливом – бензином, дизельним паливом чи природним газом.

За останні роки в багатьох країнах розробляються нові технології виробництва водню, зокрема, за рахунок використання теплової енергії високих параметрів атомних електростанцій. Прогнозується, що з розвитком атомної енергетики з'явиться можливість створення крупних атомно-водневих комплексів, на яких можна буде організувати у великих масштабах отримання водню для використання його як палива в автомобільних та авіаційних двигунах, а також в теплоенергетичних установках.

Вперше в Україні концепцію водневої енергетики було розроблено ще у 70-х роках ХХ століття, в якій розглядалась заміна вуглеводних видів палива воднем, одержаним шляхом термохімічних процесів води. При цьому основним енергетичним джерелом мали стати атомні електростанції з ядерними реакторами на швидких нейтронах, які можуть забезпечити технології термохімічного виробництва водню теплоносієм з температурою в межах 670...920 °С. Однак поки що перспектива проектування і будівництва подібних промислових об'єктів

атомно-водневої енергетики у світі не розглядається.

У 2009 році з використанням в основному технології теплової каталітичної конверсії природного газу в країні було вироблено 30,0 млн м³ водню при таких питомих енергетичних витратах: затрати теплоти склали 6300 МДж/(тис. м³), або 1505,2 Мкал/(тис. м³); затрати електроенергії – 2388,9 кВт·год/(тис. м³). При перерахунку в умовне паливо сумарні питомі енерговитрати склали 3126,6 кг у.п./т у.п. газоподібного водню.

Крім виробництва водню у вигляді газу в промисловості використовуються технології одержання водню у вигляді гідридів при сорбції з металами або органічними сполуками [10–13] та рідкого водню, які також досить енергозатратні. Нижче наведено основні показники процесів отримання рідкого водню:

Продуктивність, т/год	1	2	5	10	80	100
Вміст водню в рідкому продукті, %	48,5	95,0	48,5	95,0	48,5	95,0
Витрати енергії на одержання рідкого водню:						
- електроенергія, кВт·год/кг	25,0	28,0	12,5	18,0	9,15	11,7
- теплота, МДж/кг	90,0	100,0	45,0	64,5	32,9	42,0

Згідно з цими даними сумарні витрати енергії на виробництво 1 т рідкого водню з вмістом 95 % H₂ залежно від продуктивності компресорних установок знаходяться у межах 11,5...27,6 т у.п./т у.п. водню [5].

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу оцінено енергетичний потенціал та прямі витрати енергоресурсів на підготовку спалювання в енергетичних установках окремих видів ГВЕР. Загальний енергетичний потенціал ГВЕР за оптимальним варіантом складає 1160 тис. т у.п., за ймовірним – 960, а на його реалізацію знадобиться за варіантами 2,86 тис. т у.п. та 2,42 відповідно. Прямі витрати енергоресурсів на отримання та приготування до спалювання окремих видів ГВЕР, приведені до 1 т умовного палива складають:

доменний газ – 3,77 кг у.п.; конвертерний газ – 1,2; феросплавний газ – 1,64. Для порівняння, прямі витрати на видобуток і транспорт природного газу складають 11,5 кг у.п.

Водень за своїми теплотехнічними характеристиками має переваги над іншими вуглеводними видами палива, а саме: високу масову теплоту згорання та реакційну здатність. Виробництво водню незалежно від його агрегатного стану за існуючими технологіями потребує значних прямих витрат енергоресурсів, які оцінюються у межах 1,6...5,1 т у.п./т у.п. водню. Це головний фактор, що унеможлиблює одержання водню як енергетичного палива.

1. Білодід В.Д., Куц Г.О. Енергетичний потенціал окремих видів альтернативного палива та оцінка енерговитрат на їх підготовку для прямого спалювання в котлоагрегатах // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 1 (24). – С. 32–39.
2. *Звіт про результати* використання палива, теплоенергії та електроенергії за 2009 р. (форма № 11-МТП) / Державний комітет статистики України.
3. Куц Г.О., Літинська Л.О. Аналіз стану утилізації теплових та горючих вторинних енергоресурсів та їх використання у комунальній теплоенергетиці промислових вузлів // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – № 14. – С. 69–76.
4. Шульц Л.А. Элементы безотходной технологии в металлургии. – М.: Металлургия, 1991. – 146 с.
5. *Водород: свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочник* / Под ред. Д.Ю. Гамбурга. – М.: Химия. – 1989. – 627 с.
6. Козин А.Ф., Волков С.В. Водородная энергетика и экология – К.: Наук. думка. – 2002. – 273 с.
7. Рябцев Г. Водородная энергетика. Утопия или реальность? // Термінал. – 2007. – № 19 (345). – С. 6–12.
8. Ильенко Б. Уходит ли поезд водородной энергетики и не только об этом // Термінал. – 2007. – № 40 (366). – С. 42–43.
9. Асланян Г.С., Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 66–73.
10. *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and REDNeeds* / National Research Council and National of Engineering. – Washington, DC, USA. – National Academics Press. – 2004. – 204 p.
11. Прохоров И.Ю., Акимов Г.Я. От топливных ячеек к водородным элементам: твердые электролиты и нанозлектроды // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2010. – № 3 (73). – С. 66–75.
12. Прохоров И.Ю., Акимов Г.Я. Фотоэнергетика и водородная энергетика: возможности и достижения // Наука та інновації. – 2009. – № 6. – С. 11–24.
13. Денис Р.В., Завалій І.Ю., Березовець В.В., Рябов О.Б. Розроблення нових гідридоутворюючих матеріалів на основі магнію, титану та РЗМ для ефективного зберігання та транспортування водню // Фундаментальні проблеми водневої енергетики: Тез. доп. – К.: НАН України, 2008. – С. 67.

Надійшла до редколегії: 07.04.2011