

УДК 666.1.031.2; 621.438.9

ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОЇ МЕТАЛОГІДРИДНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СКЛОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

¹ Н. А. Чорна, канд. техн. наук
nataliyachernaya7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9161-0298

^{2,3} О. В. Кошельнік, канд. техн. наук
ORCID: 0000-0001-6521-4403

² О. В. Круглякова, канд. техн. наук
ORCID: 0000-0003-1113-826X

² О. В. Долобовська
ORCID: 0000-0001-8222-4136

¹ Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

² Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

³ Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4

Найбільш ефективним засобом використання енергетичного потенціалу вторинних енергоресурсів промислових підприємств сьогодні вважається застосування когенераційних утилізаційних систем. Це дає змогу отримати одночасно теплову та електричну енергію та значно зменшити теплові втрати. У роботі запропоновано для підприємства з виробництва листового скла використання додаткової утилізаційної системи для використання теплоти димових газів скловарних печей. Проаналізовано сучасний стан використання водню під час виробництва скламаси. Розроблено схему енерготехнологічного комплексу з водневою турбіною та металогідридною системою для комбінованого вироблення електричної та теплової енергії. Проведено розрахунково-теоретичне дослідження з метою визначення основних параметрів роботи водневої теплоутилізаційної системи в діапазоні температур димових газів від 523 до 673 К, а також ефективності її застосування. З використанням розробленої математичної моделі процесів тепломасообміну в гідридах металів отримані дані щодо режимних параметрів роботи термосорбційного компресора, що дозволили визначити конструктивні характеристики металогідридної системи в цілому. В результаті проведеного розрахункового дослідження отримані характеристики теплоносія в ключових точках водневого контуру, визначено потужність водневої турбоустановки. Електрична енергія, що виробляється у ній, може бути використана для електролізу водневої станції підприємства. Кисень, який утворюється під час процесу електролізу, додається до повітря горіння, що дасть змогу підвищити температуру горіння паливної суміші та збільшити продуктивність скловарної печі. Таким чином, комплекс запропонованих заходів з утилізації енергетичного потенціалу димових газів скловарних печей дасть змогу підвищити енергоефективність виробництва листового скла та конкурентоспроможність скловарних підприємств.

Ключові слова: скловарне виробництво, енерготехнологічний комплекс, водень, металогідридна система, тепломасообмінні процеси.

Вступ

Сьогодні найбільш поширеним способом використання теплового потенціалу димових газів є доповнення теплотехнологічних схем високотемпературних установок додатковими утилізаційними агрегатами. Це надає можливості отримати, крім нагрітого повітря, пари технологічних або енергетичних параметрів, холод в абсорбційних холодильних установках, електроенергію або механічну енергію [1, 2].

З точки зору більш повного застосування енергетичного потенціалу палива найбільш ефективним є використання когенераційних схем. Для замкнених циклів термодинамічна ефективність в значній мірі залежить від вибору робочого тіла. Досить перспективним для когенераційних установок в даному випадку є використання водневих турбін [3]. Легкі гази мають теплофізичні властивості, які можуть забезпечити мінімізацію маси та габаритів основних елементів технологічного обладнання, що входить до складу енергоустановок. Це відкриває перспективи створення вискоелефективних турбін, які мають ряд значних переваг в порівнянні з традиційними газо- або паротурбінними установками.

Наявність водневої станції та відповідної інфраструктури на скловарних заводах з виготовлення листового скла відкриває перспективу застосування водню як робочого тіла в утилізаційному контурі енерготехнологічного комплексу. На таких підприємствах використовується флоат-метод виробництва, де процес формування стрічки скла на розплаві металу відбувається в ванні, яка містить

© Н. А. Чорна, О. В. Кошельнік, О. В. Круглякова, О. В. Долобовська, 2019

шар розплавленого олова та захисну атмосферу, що складається з азоту та газу-відновлювача – водню. Типовий флоат-резервуар споживає в середньому 1200 – 1500 $\text{нм}^3/\text{год}$ азоту та 60 – 100 $\text{нм}^3/\text{год}$ водню високого ступеня чистоти [4]. Для отримання водню використовуються електролізери, де в процесі електролізу води виділяється водень і кисень. Після цього водень подається на очищення від кисню, яке здійснюється за допомогою паладієвого каталізатора в контактному апараті. Крім того, водень проходить глибоке осушення, а також очищення від інших домішок. Далі водень подається в газгольдер, а звідти – в ванну розплаву.

Постановка проблеми

Однією з проблем з використання водню в турбоустановках є досить значні витрати на його компримування [5]. Тому доцільним є застосування металогібридної технології для безпосереднього перетворення теплоти в енергію стислого водню за допомогою термосорбційного компресора (ТСК), принцип дії якого базується на властивості металогіридів (МГ) поглинати водень і виділяти його під підвищеним тиском за умов теплового впливу. Основною перевагою гібридного методу зберігання водню є його компактність. За однакових об'ємів у МГ знаходиться більше водню, ніж в тому ж об'ємі рідкого водню в криогенному резервуарі, завдяки вищій густині водню в твердій фазі порівняно з рідкою. Завдяки цьому гібридному акумулятору можна надати довільну форму, що полегшує його використання в енергетичних та технологічних установках. Залежно від типу гібридотвірного матеріалу та зовнішніх умов, сорбцію-десорбцію водню можна реалізувати у надзвичайно широких діапазонах робочих тисків та температур, а значні теплові ефекти реакції приводять до того, що сорбція супроводжується суттєвим тепловиділенням, а десорбція – охолодженням металогібридного матеріалу. Ці обставини лежать в основі застосувань МГ, пов'язаних з трансформуванням енергії і керуванням тепловими циклами та процесами.

Викладення основної частини дослідження

Загальну схему енерготехнологічного комплексу скловарної печі з системою зберігання водню та турбоустановкою наведено на рисунку.

Процес варіння скломаси здійснюється в рекуперативній скловарній печі (СП) з центральним рекуператором (ТО). В піч подається шихта та паливо (природний газ) з температурами $t_{\text{тм1}}$ та $t_{\text{пал}}$ відповідно. Склобій з температурою $t_{\text{тм1}}$ надходить в ектрофільтр-підігрівник (ФП), в якому за рахунок теплоти димових газів його температура підвищується до $t_{\text{тм2}}$. Також тут здійснюється очищення газів від пилу, який осідає в шарі склобою. Далі підігрітий склобій змішується з іншими матеріалами шихти та з температурою $t_{\text{тм3}}$ подається в скловарну піч. Підігріте в рекуператорі (ТО) повітря горіння подається у запальвальний пристрій печі з температурою $t_{\text{пов2}}$.

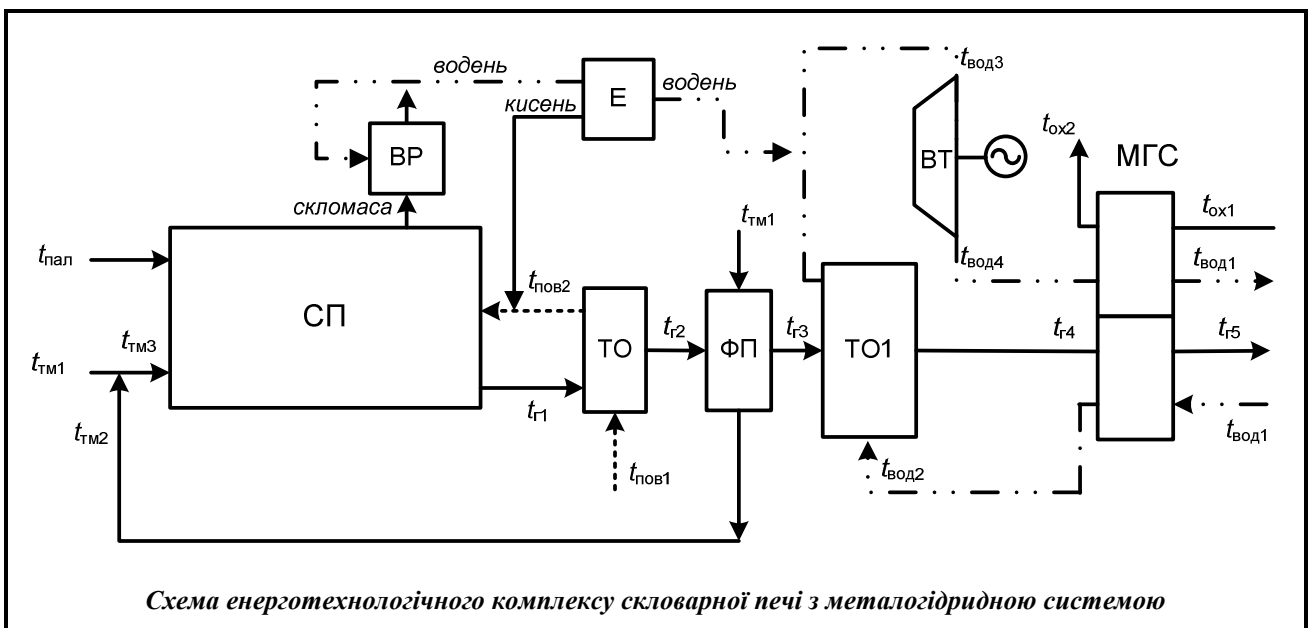


Схема енерготехнологічного комплексу скловарної печі з металогібридною системою

Вихідними потоками є склоаса та димові гази, які мають температуру t_{r1} . Гази передають частину тепла склобою та повітря горіння, направляються в теплообмінник (ТО1), де стиснений водень із металогібридної системи (МГС), до складу якої входять ТСК, нагрівається від температури $t_{\text{вод}2}$ до температури $t_{\text{вод}3}$. Також в даній системі здійснюється процес охолодження димових газів від температури t_{r4} до температури t_{r5} . Тут тиск водню збільшується до рівня $P_{\text{вод}4}$, а температура – до $t_{\text{вод}4}$. Таким чином, процес стиснення водню здійснюється в МГС, а процес розширення відбувається у водневій турбіні (ВТ), де тиск водню зменшується до $P_{\text{вод}3}$.

Для отримання водню, який використовується в ванні розплаву (ВР), застосовується воднева станція, до складу якої входять електролізери (Е). Водень також надходить до утилізаційної частини схеми, що складається з системи зберігання водню та водневої турбіни. Кисень після його відділення від водню додається до повітря горіння з метою підвищення температури горіння в скловарній печі.

Розрахунки виконано для скловарної печі з виробництва листового скла з витратою палива $750 \text{ м}^3/\text{год}$. Кількість димових газів складає $7433 \text{ м}^3/\text{год}$. Проаналізуємо роботу водневої енергоустановки в діапазоні температур димових газів T_{r3} від 523 до 673 К з кроком 50 К. В схемі використано водневу турбоустановку та металогібридну систему з гідридом $\text{LaNi}_5\text{H}_{6,7}$, теплота фазового переходу якого складає $q_s=15500 \text{ кДж/кг}$. Температура димових газів на виході після компресора МГС T_{r5} складає 393 К. За максимальної температури димових газів T_{r3} перепад температур між ними та воднем $\Delta T_1=T_{r3}-T_{\text{вод}3}=100 \text{ К}$, температура водню в точці 1 – $T_{\text{вод}3}=T_{r3}-\Delta T_1$. Величина перепаду температур $\Delta T_2=T_{r5}-T_{\text{вод}2}$ складає 20 К. Температура $T_{\text{вод}2}$ дорівнює температурі сорбції за відповідного тиску водню.

В таблиці наведено отримані результати розрахункового дослідження при зміні рівня температур димових газів на вході в МГС за умов їх постійної витрати.

Основні параметри роботи енергосилової установки з металогібридною системою

Параметр	Величина			
	1	2	3	4
Температура димових газів на вході в МГС T_{r3} , К	523	573	623	673
Температура водню $T_{\text{вод}2}$, К	273	273	273	273
Кількість теплоти, що передається водневому контуру $Q_{\text{вк}}$, кВт	434,1	604,5	776,8	951,8
Тиск водню $P_{\text{вод}2}$, МПа	2	2	2	2
Тиск водню $P_{\text{вод}1}$, МПа	0,78	0,48	0,29	0,2
Температура водню на вході в МГС $T_{\text{вод}4}$, К	323	311	297	293
Витрата робочого тіла в водневому контурі, кг/с	0,025	0,033	0,041	0,048
Потужність водневої турбоустановки $N_{\text{вт}}$, кВт	29,2	61,2	106,4	155,1

Подальші розрахунки проводилися для останнього варіанта схеми за $T_{r3}=673 \text{ К}$ та витрати робочого тіла $0,48 \text{ кг/с}$. Це пов'язано з тим, що потужність водневої турбіни в інших варіантах є меншою, що негативно відображається на ефективності застосування когенераційного обладнання.

В ІПМаш НАН України розроблена математична модель термосорбційної взаємодії водню з металогібридом, описувана рівняннями переносу тепла та маси у разі в'язкісного режиму фільтрації водню крізь дисперсний шар металогібриду. На відміну від раніше описаних, ця модель враховує:

- внесок конвективного переносу в загальний тепловий потік;
- рівноважні співвідношення, що описують зв'язок між тиском, температурою та концентрацією водню в металогібриді у всьому діапазоні концентрацій;
- хімічну кінетику сорбції (десорбції).

Такий підхід максимально відповідає реальним умовам експлуатації енергоперетворювальних металогібридних систем. На цей час модель реалізована чисельним методом у вигляді пакета програм на мові Java у середовищі Windows для РС-сумісних персональних комп'ютерів [6, 7].

Математична модель процесу тепломасообміну в МГ набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\text{мг}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\beta_{\text{сн}_2}}{c_p} J \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (1)$$

$$q_s \rho \frac{\partial \chi}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \beta c_{H_2} J \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (2)$$

$$\chi(\Theta) = 2 \ln \left(\frac{\Theta}{1 - \Theta} \right) + \frac{H_1(\Theta)}{RT}; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\xi R_{H_2}} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\Pi \rho}{T} \right) = \frac{J p}{r} + p \frac{\partial J}{\partial r} + J \frac{\partial p}{\partial r} - \rho \frac{\partial \chi}{\partial \tau}; \quad (4)$$

$$J = h \frac{\Pi^3}{\mu} \frac{p}{\xi R_{H_2} T} \frac{d_{cep}^2}{(1 - \Pi)^2} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (5)$$

$$\frac{d\chi}{d\tau} = A \cdot \frac{p(T, \chi)}{p_d(T, \chi) \cdot f_{шт.} \cdot \Delta \tau \cdot \Delta \mu'}; \quad (6)$$

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R_{H_2} T, \quad (7)$$

де $a_{мг}$ – коефіцієнт теплопровідності гідриду; β – поправковий коефіцієнт; c_{H_2} – коефіцієнт теплоємності водню; c – коефіцієнт теплоємності гідриду; ρ – густина гідриду; J – щільність потоку водню; q_s – тепловий ефект реакції термохімічної взаємодії гідриду з воднем; λ – коефіцієнт теплопровідності; Θ – ступінь заповнення міжвузлів металогідридної матриці атомами водню; $H_1(\Theta)$ – концентраційна залежність парціальної мольної ентальпії взаємодії між атомами водню; Π – пористість металогідриду; ξ – коефіцієнт стисливості газу; h – коефіцієнт фільтрації; d_{cep} – середній еквівалентний діаметр частинки гідриду; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; p_d – тиск десорбції; $f_{шт.}$ – питома площа; μ' – хімічний потенціал; $A = \Delta G_0 + RT \ln p$ – комплексна величина; ΔG_0 – зміна енергії Гіббса; v – об'єм; a , b – віріальні коефіцієнти.

Систему рівнянь (1)–(7) замикають початкові й граничні умови III роду.

Виконання теплотехнічних розрахунків металогідридних систем припускає заданими не тільки термосорбційні, але й теплофізичні характеристики застосованих матеріалів. Наявні дані про теплофізичні властивості металогідридів носять уривчастий характер і не враховують ряд факторів, істотних для процесів теплопереносу під час взаємодії металогідриду із воднем. Відсутність цих даних не дозволяє встановити залежності теплофізичних характеристик від стадії процесу у реальному діапазоні зміни режимних параметрів, що вносить істотну похибку в результати розрахунку конструкції металогідридних елементів.

Одним з найбільш ефективних шляхів ідентифікації теплофізичних характеристик є застосування інструментарію обернених задач теплопровідності, зокрема, для визначення коефіцієнтів ефективної теплопровідності металогідридів і його залежності від параметрів процесу взаємодії з воднем [8]. Математична модель тепломасообміну в металогідриді в нелінійній постановці обумовлена залежністю теплофізичних властивостей і структурних характеристик МГ від параметрів термосорбційного процесу. Таким чином, з урахуванням вищевикладеного, математична модель взаємодії водню з металогідридами є ефективним інструментом для отримання даних щодо режимних і конструктивних параметрів МГС у складі енерготехнологічного комплексу скловарного виробництва.

Враховуючи циклічність роботи генератора-сорбера, зрозуміло, що він не зможе підтримувати необхідний потік водню весь час [9]. Проведені розрахунки показали, що необхідно використовувати одразу чотири генератори під час роботи за несиметричним циклом. Розрахунковим шляхом з використанням методів математичного моделювання складних тепломасообмінних процесів в металогідридах отримані основні конструктивні характеристики системи зберігання водню, які наведені нижче.

Маса гідриду, кг	3136
Об'єм гідриду, м ³	0,95
Зовнішній діаметр корпусу, м	0,048
Внутрішній діаметр корпусу, м	0,032
Загальна довжина генераторів-сорберів, м	995
Довжина одного генератора, м	1,55
Загальна кількість генераторів, шт.	656
Кількість блоків ГС (по 4шт. в кожному), шт.	164

Електрична енергія, що утворюється у водневій енергоустановці, може бути використана в електролізері для отримання водню, який застосовується під час флоат-процесу виробництва листового скла як складової захисної атмосфери. Середня питома витрата енергії на виробництво 1 м³ водню в сучасних електролізерах складає 4,3 кВт·год [5]. Тоді за потужності водневої турбоустановки $N_T=155,1$ кВт кількість водню, що виробляється, складе 36,1 м³/год, кисню 18,05 м³/год.

В процесі електролізу на 1 м³ водню виділяється також 0,5 м³ кисню, який може бути застосований як окислювач для природного газу в скловарній печі. Подача чистого кисню дає можливість підвищити температуру горіння палива за рахунок зменшення подачі в зону горіння інертних газів (азоту), який входить до складу повітря горіння.

Таким чином, існує можливість зменшення витрати палива або збільшення видатності печі за незмінності його витрати. Якщо розглядати перший варіант, то виникає питання порушення технології плавки скломаси за рахунок зменшення кількості димових газів в просторі печі. Тому розглянемо можливість підвищення продуктивності печі по скломасі, залишаючи витрату палива незмінною. Для цього потрібно провести розрахунки температури горіння природного газу для випадків подачі атмосферного повітря та повітря, збагаченого киснем [10]. Кількість чистого кисню на 1 м³ природного газу складає 0,024 м³/м³. Температура горіння за умов використання атмосферного повітря становить $t_{r1}=2291$ °С, за додавання кисню $t_{r2}=2315$ °С. Приріст видатності печі по скломасі складає 209 т/рік (0,99%). Економія електричної енергії за рахунок використання водневої турбоустановки становить 1247164 кВт·год/рік.

Висновки

Для утилізації енергетичного потенціалу димових газів скловарної печі запропоновано використання енергоперетворювального комплексу з водневою турбіною та металогідридною системою. З використанням методів математичного моделювання проведено розрахунково-теоретичне дослідження з метою визначення основних параметрів роботи водневої теплоутилізаційної системи в діапазоні температур димових газів від 523 до 673 К. Для обраного варіанта схеми виконано розрахунок з метою визначення ефективності його застосування. За результатами розрахунків максимальна потужність водневої турбіни склала 155 кВт, економія електричної енергії – 1247 МВт·год/рік. Обрано схему МГС з чотирма генераторами-сорберами, що забезпечує безперервну подачу водню в кількості 0,048 кг/с. Загальна кількість генераторів сорберів при цьому складає 656 шт. за загальної маси гідриду 3160 кг. Використання кисню, який отримано в процесі електролізу, за додавання його до повітря горіння, дозволить збільшити продуктивність печі на 209 т/рік за рахунок підвищення температури горіння палива. Таким чином, застосування даної схеми утилізації потенціалу димових газів скловарних печей дозволить зменшити витрати на виробництво скломаси за одночасного збільшення її виробництва, що підвищить конкурентоспроможність скловарних підприємств в цілому.

Література

1. Соловей В. В., Чорна Н. А., Кошельнік О. В. Розробка науково-технічних принципів створення тепловикористовуючих металогідридних систем. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2011. № 7 (89). С. 67–73.
2. Кошельнік О. В., Чорна Н. А. Розробка та аналіз схем високоефективних водневих енергоперетворюючих установок. *Вісн. НТУ «ХПІ»*. Енергетичні та теплотехнічні процеси та обладнання. 2012. № 7. С. 170–174.
3. Мацевитий Ю. М., Русанов А. В., Соловей В. В., Кошельнік О. В. Розробка термогазодинамічних основ створення високоефективних водневих турбоустановок з термохімічним стиском робочого тіла. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях*. Київ: КІМ, 2015. С. 261–267.
4. Производство листового стекла флоат-способом: учеб. пособие (под. ред. В. И. Кондрашова). Саратов: Саратовстройстекло, 2005. 35 с.

5. Соловей В. В., Шмалько Ю. Ф., Лотоцкий М. В. Металлогидридные технологии. Проблемы и перспективы. *Проблемы машиностроения*. 1998. Т. 1. № 1. С. 115–132.
6. Чорна Н. А. Удосконалення математичної моделі тепломасообмінних процесів у водневих металогідридних системах. *Проблеми машинобудування*. 2013. Т. 16. № 3. С. 68–72.
7. Chorna N. A., Hanchyn V. V. Modeling Heat and Mass Exchange Processes in Metal-hydride Installations. *J. Mech. Eng.* 2018. Vol. 21. No. 4. P. 63–70. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.04.063>
8. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т. Т. 2. Приложения. Киев: Наук. думка, 2003. 392 с.
9. Ивановский А. И., Попович В. А., Соловей В. В., Макаров А. А. Исследование режимных характеристик металлогидридных термосорбционных компрессоров. *Вопр. атом. науки и техники*. Сер. Атомная водородная энергетика и технология. 1987. Вып. 3. С. 56–61.
10. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976. 248 с.

Надійшла до редакції 25.06.2019

Использование водородной металлогидридной системы для повышения энергоэффективности стеклоvarного производства

¹Н. А. Черная, ^{2,3}А. В. Кошельник, ²О. В. Круглякова, ²О. В. Долобовская

¹ Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Украина, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2

³ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 61022, Украина, г. Харьков, площадь Свободы, 4

Наиболее эффективным способом использования энергетического потенциалу вторичных энергоресурсов промышленных предприятий сегодня считается применение когенерационных утилизационных систем. Это дает возможность получить одновременно тепловую и электрическую энергию и значительно уменьшить тепловые потери. В работе предложено для предприятия по производству листового стекла использование дополнительной утилизационной системы для использования теплоты дымовых газов стеклоvarных печей. Проанализировано современное состояние использования водорода во время производства стекломассы. Разработана схема энерготехнологического комплекса с водородной турбиной и металлогидридной системой для комбинированного производства электрической и тепловой энергии. Проведено расчетно-теоретическое исследование с целью определения основных параметров работы водородной теплоутилизационной системы в диапазоне температур дымовых газов от 523 до 673 К, а также эффективности ее применения. С использованием разработанной математической модели процессов тепломассообмена в гидридах металлов получены данные относительно режимных параметров работы термосорбционного компрессора, позволившие определить конструктивные характеристики металлогидридной системы в целом. В результате проведенного расчетного исследования получены характеристики теплоносителя в ключевых точках водородного контура, определена мощность водородной турбоустановки. Электрическая энергия, вырабатываемая в ней, может быть использована для электролизера водородной станции предприятия. Кислород, образовавшийся во время процесса электролиза, добавляется к воздуху горения, что даст возможность повысить температуру горения топливной смеси и увеличить производительность стеклоvarной печи. Таким образом, комплекс предложенных мероприятий по утилизации энергетического потенциала дымовых газов стеклоvarных печей даст возможность повысить энергоэффективность производства листового стекла и конкурентоспособность стеклоvarных предприятий.

Ключевые слова: стеклоvarное производство, энерготехнологический комплекс, водород, металлогидридная система, тепломассообменные процессы.