

УДК 669.162.2, 66.042.88

Ганжа А.М., Кошельник О.В., Павлова В.Г., Хавін Є.В., Заєць О.М.

**РОЗРОБКА ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ
ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА**

Вступ. Доменний процес являє собою сукупність механічних, фізичних фізико-хімічних явищ, що протікають у працюючій доменній печі. Шихтові матеріали, які завантажують у доменну піч (кокс, залізовмісні компоненти та флюс) в результаті протікання складних фізико-хімічних процесів перетворюються в чавун, шлаки й доменний газ. Кінцевим продуктом для доменної печі є чавун, проміжним продуктом – доменний газ, що поступає далі в систему підігріву доменного дуття [1].

Температура газів після печей доменного виробництва складає 200–300 °С, що не дозволяє нагріти повітря (холодне дуття), яке подається в піч, до високої температури. Але при цьому низькокалорійний доменний газ може бути використаний в якості палива в автономних теплообмінних апаратах для підігріву дуття. Тому в системі повітропостачання застосовуються регенеративні повітрянагрівачі (ПН) різної конструкції [2]. У сучасних доменних цехах одну піч обслуговують три-чотири повітрянагрівачі.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Рівень нагріву гарячого дуття, який сьогодні складає 1150–1250 °С, визначає питому витрату коксу й продуктивність печей. Основними факторами, що впливають на величину економії коксу при нагрівання дуття, є: абсолютний рівень температури й вологості дуття, концентрація кисню в ньому, вихідне значення витрати коксу, а також витрата залізородної шихти (кг/т чавуну). Так, підвищення температури дуття на кожні 10 °С при його температурі більше 1000 °С дає економію коксу 0,22–0,3 % [3].

Температура димових газів, що відходять, після ПН становить 250–400 °С. При цьому питома теплота димових газів повітрянагрівачів складає близько 300 МДж/тонну чавуну [3]. Це свідчить про значний невикористаний потенціал вторинних енергоресурсів доменного виробництва. Для використання теплоти такого низького температурного потенціалу можливо введення додаткового ступеня утилізації теплоти, де застосовуються теплообмінні апарати, які показали свою ефективність при такому рівні температур. Це дасть можливість здійснити підігрів компонентів горіння для регенеративного повітрянагрівача – доменного газу та повітря – до температури 150–180 °С, що в свою чергу дозволить підвищити температуру гарячого дуття до 1300–1350 °С. Крім того, одним із варіантів використання теплоти димових газів ПН є застосування утилізаційних енергоперетворювальних комплексів, що дозволять отримувати крім теплової, електричну енергію, а в разі необхідності й холод.

Викладення основного матеріалу дослідження. Найбільш ефективним з точки зору більш повного застосування енергетичного потенціалу органічного палива є використання утилізаційних схем з когенерацією або тригенерацією, тобто з одночасним виробленням теплової, електричної енергії та холоду. Висока термодинамічна ефективність водню є передумовою розгляду його в якості робочого тіла для теплоутилізаційних енергоперетворювальних комплексів. Технічні можливості теплоенергетичних

установок з термосорбційними компресорами (ТСК), спосіб роботи яких базується на властивості оборотних металогідридів поглинати водень низького тиску і виділяти його при нагріванні під підвищеним тиском, відкривають принципово новий шлях створення енергетичних установок, що зможуть забезпечити отримання різних видів енергії за рахунок споживання теплоти низького температурного потенціалу [4, 5].

З огляду на рівень температур (150–300 °С), при яких відбувається процес десорбції в ТСК, з'являється можливість використання в таких схемах теплових вторинних енергоресурсів високотемпературних теплотехнологічних комплексів доменного виробництва, де значна кількість теплоти втрачається з димовими газами, що йдуть. Розглянемо схему й цикл роботи утилізаційної установки для вироблення гарячого дуття та електроенергії, що використовує як робоче тіло водень (рис. 1).

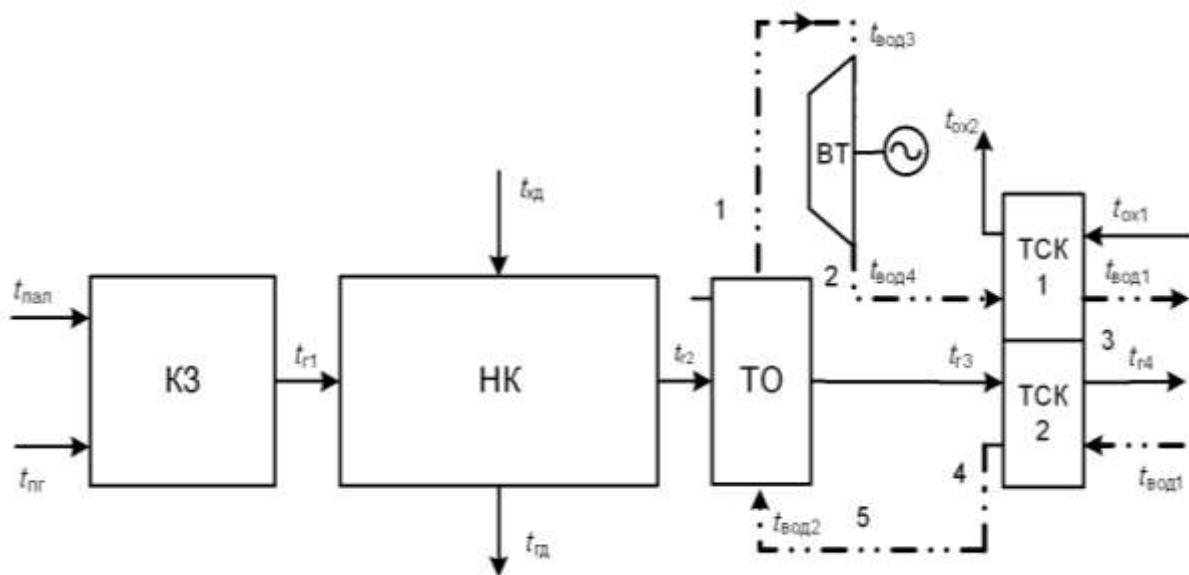


Рисунок 1 – Схема енерготехнологічного комплексу для виробництва гарячого дуття та електроенергії в доменному виробництві

Низькопотенційна теплота димових газів після доменного повітрянагрівача з камерою згоряння КЗ і насадковою камерою НК, передається в теплообмінному апараті ТО стислому водню та «гарячій» стороні термосорбційного компресора ТСК2. Процес нагрівання водню відбувається в теплообміннику ТО до температурного рівня $t_{вод3}$, а в водневій турбіні ВТ здійснюється розширення його до тиску P_2 . Після цього водень низького тиску подається на «холодну» сторону компресора ТСК1, де здійснюється процес сорбції водню металогідридом. Даний процес супроводжується виділенням певної кількості теплоти, яку необхідно відводити. Процес же стиснення водню до тиску P_1 здійснюється на «гарячій» стороні термосорбційного компресора.

Розглянемо роботу водневої енергоустановки в діапазоні температур димових газів після повітрянагрівача $T_{г2}$ від 523 до 723 К з кроком 50 К. Температура газів на виході після ТСК складає $T_{г4} = 393$ К. Кількість теплоти, що відбирається від димових газів та передається силовому контуру

$$Q_r = G_r C_r (T_{г2} - T_{г4}). \quad (1)$$

Розглянемо роботу системи з термосорбційним компресором, в якому в якості гідриду використовується $\text{LaNi}_5\text{H}_{6,7}$. Теплота сорбції-десорбції гідриду – $q_s = 15500$ кДж/кг [6]. Тиск водню на виході з ТСК складає $P_5 = 2$ МПа. Температура робочого тіла в точках 4 і 5 в області «ізотермічного плато» $T_4 = T_5$, тиск – $P_4 = P_5$. При максимальній температурі газів $T_{г2}$ приймемо перепад температур між газами і воднем $\Delta T_1 = T_{г2} - T_{\text{вод}3} = 100$ К, тобто температура водню в точці 1 складає $T_1 = T_{г2} - \Delta T_1$. Величина перепаду температур $\Delta T_2 = T_{г4} - T_{\text{вод}2}$ дорівнює 22 К.

Для визначення кількості робочого тіла в водневому контурі скористаємося формулою

$$G_{\text{H}_2} = \frac{Q_{\text{г}}}{q_s + C_{p_{\text{H}_2}}(T_1 - T_5)}. \quad (2)$$

Потужність водневої турбіни знаходиться як

$$N_{\text{т}} = G_{\text{H}_2} C_{p_{\text{H}_2}} T_1 \left(1 - \frac{1}{(P_5 / P_3)^{(k-1)/k}} \right), \quad (3)$$

де $k = 1,41$ – показник адіабати для водню; $\pi_{\text{тск}} = P_5 / P_3$ – ступінь підвищення тиску в термосорбційному компресорі.

Для теплотехнологічного комплексу з отриманням гарячого дуття та електроенергії формула для коефіцієнту досконалості системи може бути представлена у вигляді

$$\eta_{\text{дс}} = \left[W_1 t_{г2} - W_2 t_{г4} - \bar{W}_{\text{д}} T_0 \ln(T_{\text{гд}} / T_0) + \bar{W}'_{\text{д}} \ln(T_{\text{хд}} / T_0) - \Delta E_0 + \right. \\ \left. + W_{\text{H}_2} t_{\text{вод}1} + \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{тск}}^{(k-1)/k}} \right) \eta_{0i} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{ел}} + W_{\text{H}_2} t_{\text{вод}3} - W_{\text{H}_2} t_{\text{вод}2} \right] / Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \quad (4)$$

де $W_1, W_2, \bar{W}_{\text{д}}, \bar{W}'_{\text{д}}, W_{\text{H}_2}$ – водяні еквіваленти продуктів згоряння, дуття (середні) та водню; ΔE_0 – приріст ексергії системи; $\eta_{0i} = 0,82$ – відносний внутрішній ККД турбіни; $\eta_{\text{м}} = 0,985$ – механічний ККД турбіни; $\eta_{\text{ел}} = 0,97$ – ККД електрогенератора; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – теплота згоряння газоподібного палива.

В табл. 1 наведено результати розрахунків основних характеристик роботи водневого теплоутилізаційного комплексу при температурі димових газів на вході в ТСК від 523 до 723 К при постійній їх витраті.

Штучний холод на промислових підприємствах виробляється в основному в компресійних холодильних машинах. Холод можливо отримати також в пароежекторних та абсорбційних холодильних машинах, що використовують низькопотенційну теплоту димових газів або водяної пари. Сьогодні на металургійних підприємствах працюють пароежекторні холодильні машини [1]. На деяких підприємствах встановлені бромистолітєві машини, що використовують для отримання холоду теплоту газів після нагрівальних печей листопрокатного стану.

Як альтернативу розглянемо можливість отримання холоду за допомогою абсорбційної установки з термосорбційним компресором на водні. Основним функціональним елементом конструкції холодильної установки є термосорбційний металогідридний компресор (рис. 2).

Таблиця 1 – Характеристики водневого контуру енергосилової установки для вироблення гарячого дуття та електроенергії

| | | | | | |
|--|--------|--------|---------|---------|--------|
| Температура димових газів на вході в ТСК T_{r2} , К | 523 | 573 | 623 | 673 | 723 |
| Теплота, що передається водневому контуру Q_r , кВт | 7224,4 | 10003 | 12781,6 | 15560,2 | 18339 |
| Витрата робочого тіла в водневому контурі G_{H_2} , кг/с | 0,453 | 0,589 | 0,723 | 0,845 | 0,959 |
| Потужність водневої турбіни N_T , кВт | 301,7 | 1254,3 | 2183,4 | 3404,7 | 4554,4 |

В ньому в результаті теплової взаємодії металогідриду з димовими газами, що відходять, здійснюється перетворення теплоти Q_r в енергію стисненого водню при температурі десорбції $t_{дес}$ (процес 4-5-6). Для отримання більш низького температурного потенціалу холодоагенту, необхідно забезпечити охолодження стисненого водню (процес 6-1). Це можливо здійснити за допомогою повітря, води або регенеративним способом з підігрівом водню на ділянці 3-3'.

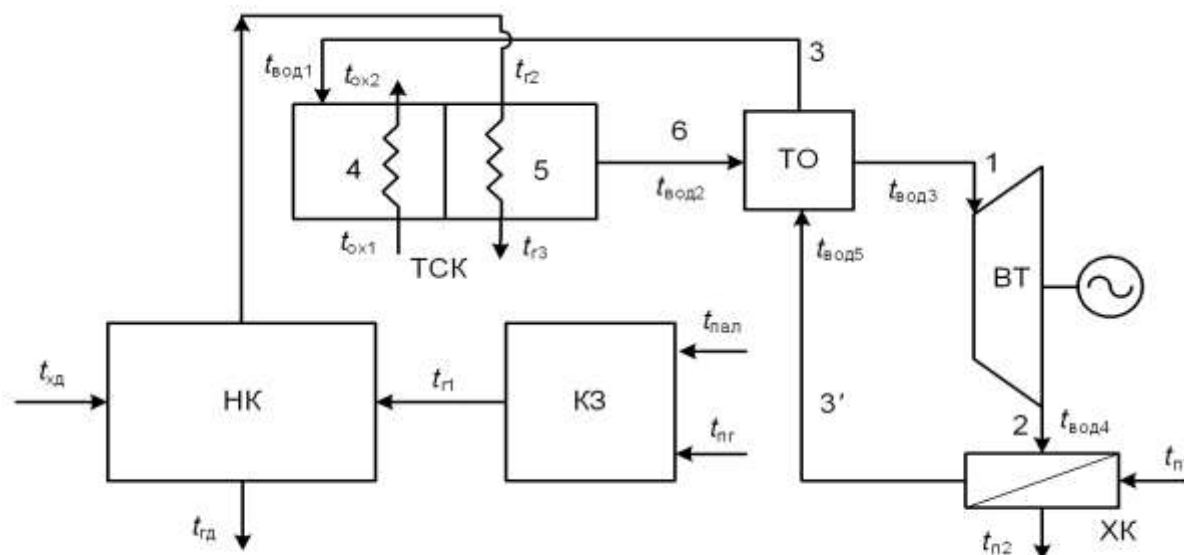


Рисунок 2 – Схема теплоутилізаційного комплексу з термосорбційним компресором для отримання теплової, електричної енергії та холоду

В даній установці раціональним є отримувати холод за рахунок адиабатного розширення (процес 1-2) від температурного рівня $t_{вод3} < t_{дес}$ до рівня $t_{вод4} = t_{нс}$. В результаті можливо отримувати як механічну енергію, так і холод. В холодильній камері ХК

підтримується температура $t_{\text{вод5}}$ за рахунок передачі теплоти водню на ділянці 2-3'. Після регенерації водень з температурою $t_{\text{вод1}}$ подається в відповідну ступінь ТСК, де здійснюється його сорбція (процес 3-4). Тут необхідною умовою здійснення процесу є відведення теплоти середовищу, що охолоджує, з температурою $t_{\text{ох1}} < t_{\text{сорб}}$. В другому ступені компресору при підведенні теплоти відбувається ізобарний нагрів гідриду (процес 4-5), а потім десорбція водню (процес 5-6), тобто цикл замикається. Кількість теплоти, що відбирається від димових газів та передається силовому контуру, розраховується за формулою (2). Кількість робочого тіла в водневому контурі:

$$G_{\text{H}_2} = Q_r / q_s \cdot \quad (5)$$

Кількість теплоти, що регенерується:

$$Q_{\text{рег}} = G_{\text{H}_2} C_{p\text{H}_2} (T_6 - T_1) \cdot \quad (6)$$

Холодовидатність розраховується за формулою

$$Q_x = G_{\text{H}_2} C_{p\text{H}_2} (T_1 - T_2) \cdot \quad (7)$$

Потужність водневої турбіни знаходиться за формулою (3). Для схеми силової водневої енергоустановки для вироблення теплової, електричної енергії та холоду формула для коефіцієнту досконалості системи має наступний вигляд:

$$\eta_{\text{дс}} = \left[W_1 t_{r2} - W_2 t_{r3} - \bar{W}_d T_0 \ln(T_{\text{гд}} / T_0) + \bar{W}'_d \ln(T_{\text{хд}} / T_0) - \Delta E_0 + W_{\text{H}_2} t_{\text{вод1}} + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{тск}}^{(k-1)/k}} \right) \eta_{0i} \eta_M \eta_{\text{ел}} + W_{\text{H}_2} t_{\text{вод3}} - \right. \\ \left. - W_{\text{H}_2} t_{\text{вод2}} - \bar{W}_{\text{H}_2} T_0 \ln(T_{\text{вод5}} / T_0) + \bar{W}'_{\text{H}_2} T_0 \ln(T_{\text{вод4}} / T_0) \right] / Q_{\text{H}}^p \quad (8)$$

Розрахунки параметрів схеми виконано для наступних умов – тиск на вході в ТСК $P_3 = 0,2$ МПа, тиск водню після ТСК $P_5 = 2$ МПа, температура димових газів після ТСК $T_{r3} = 393$ К. В табл. 2 наведено основні параметри роботи комбінованої водневої установки для виробництва гарячого дуття, електроенергії та холоду

Отриманий холод може бути використаний в холодильниках систем охолодження доменних печей, основним призначенням яких є охолодження окремих елементів печі, підтримка оптимального температурного профілю печі та створення такого температурного режиму, при якому на холодильниках утворюється гарнісаж, що захищає конструкції печі від впливу продуктів плавки.

Для оцінки ефективності роботи складних теплотехнологічних комплексів промислових підприємств доцільно використовувати коефіцієнт досконалості системи $\eta_{\text{дс}}$, який включає в себе енергію, що підводиться, та придатну для технічного використання $E_{\text{підв}}$ та витрачену енергію $E'_{\text{від}}$ з урахуванням усіх зовнішніх втрат ексергії в кожному окремому елементі системи. Цей коефіцієнт розраховується за

формулою $\eta_{dc} = 1 - E'_{від} / E_{підв}$.

Таблиця 2 – Характеристики водневого контуру енергосилової установки для вироблення теплової, електричної енергії та холоду

| | | | | | |
|---|--------|--------|---------|---------|--------|
| Температура газів на вході в ТСК $T_{Г2}$, К | 523 | 573 | 623 | 673 | 723 |
| Теплота, що передається водневому контуру $Q_{Г}$, кВт | 7224,4 | 10003 | 12781,6 | 15560,2 | 18339 |
| Витрата водню G_{H_2} , кг/с | 0,466 | 0,645 | 0,825 | 1,001 | 1,183 |
| Теплота, що регенерується $Q_{рег}$, кВт | 486,5 | 673,3 | 861,2 | 1044,9 | 1234,9 |
| Потужність водневої турбіни N_T , кВт | 967,4 | 1338,9 | 1712,6 | 2077,9 | 2455,8 |
| Холодовидатність Q_x , кВт | 479,7 | 663,9 | 849,2 | 1030,3 | 1217,7 |

В табл. 3 наведено порівняльні характеристики роботи доменного повітрянагрівача для трьох варіантів – без додаткової утилізації тепла (варіант 1), з виробленням електроенергії (варіант 2) та виробленням електроенергії і холоду (варіант 3) на базі термосорбційного компресору та водневої турбоустановки.

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнту досконалості системи η_{dc} від температури димових газів після доменного повітрянагрівача

| | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Температура димових газів $t_{Г2}$, °С | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Варіант 1 | 0,5116 | 0,4895 | 0,4668 | 0,4438 |
| Варіант 2 | 0,5168 | 0,5029 | 0,4905 | 0,4793 |
| Варіант 3 | 0,5257 | 0,5091 | 0,4920 | 0,4746 |

Аналізуючи дані табл. 3, можливо відзначити, що в установках з ТСК та водневою турбіною коефіцієнт досконалості системи у всьому діапазоні температур димових газів більше, ніж для установок без утилізації теплоти. Для температур $t_t \leq 350$ °С найбільшу ефективність мають установки з виробленням електроенергії та холоду на базі ТСК, а для більш високого рівня температур – з виробленням електроенергії.

Висновки. Таким чином, проведений аналіз роботи водневих енергоперетворювальних комплексів в теплотехнологічних схемах доменного виробництва показав доцільність застосування схем, ключовими елементами яких є термосорбційний металогідридний компресор та воднева турбоустановка. Однак слід зазначити, що при розгляданні питань застосування теплоутилізаційних комплексів на базі ТСК та водневих турбін на діючих промислових підприємствах, необхідно додатково проводити ком-

плексний аналіз отриманих результатів. Покращення показників енергетичних установок, в тому числі теплоутилізаційних, можливо тільки при аналізі складної сукупності пов'язаних між собою факторів. Існуючий функціональний зв'язок економічних, експлуатаційних і конструктивних характеристик дозволяє отримати їх оптимальні значення, що потребує проведення комплексу додаткових досліджень.

Позначки: T – температура; E – ексергія; Q – теплота; W – водяні еквіваленти; C – масова теплоємність; G – масова витрата; P – тиск; дес – десорбція; сорб – сорбція; вод – водень; г – гази; хд – холодне дуття; гд – гаряче дуття; пал – паливо; пг – повітря горіння; ох – охолоджуюча рідина; нс – навколишнє середовище.

Література

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Грес Л.П. Энергосбережение при нагреве доменного дутья / Л.П. Грес. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 209 с.
3. Большаков В.И. Состояние и перспективы развития черной металлургии Украины на основе энергосберегающих технологий / В.И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 2–5.
4. Развитие водородгидридной техники и технологии / В.В. Соловей, В.М. Кошельник, Ю.Ф. Шмалько, А.В. Кошельник // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 1. – С. 31–37.
5. Проблемы применения водорода в энергетике / Ю.Н. Шалимов [и др.] // ISJAEE. – 2005. – № 7. – С. 21–28.
6. Антонова М.М. Свойства гидридов металлов / М.М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 127 с.

Bibliography (transliterated)

1. Tovarovskiy I.G. Domennaya plavka. Evolyutsiya, hod protsessov, problemy i perspektivy / I.G. Tovarovskiy. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2003. – 596 p.
2. Gres L.P. Energoberezhenie pri nagreve domennogo dutya / L.P.Gres. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2004. – 209 p.
3. Bolshakov V.I. Sostoyanie i perspektivy razvitiya chernoy metallurgii Ukrainyi na osnove energosbere-gayuschih tehnologiy/ V.I. Bolshakov // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyishlennost. – 2006. – № 2. – P. 2–5.
4. Razvitie vodorodgidridnoy tehniky i tehnologii / V.V. Solovey, V.M. Koshelnik, Yu.F. Shmalko, A.V. Koshelnik // Ekotehnologii i resursoberezhenie. – 2006. – № 1. – P. 31–37.
5. Problemy primeneniya vodoroda v energetike / Yu.N. Shalimov [i dr.] // ISJAEE. – 2005. – № 7. – P. 21–28.
6. Antonova M.M. Svoystva gidridov metallov / M.M. Antonova. – Kiev: Naukova dumka, 1975. – 127 p.

УДК 66.042.88, 666.1.031.2

Ганжа А.Н., Кошельник А.В., Павлова В.Г., Хавин Е.В, Заец Е.М.

**РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ
ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Для дальнейшего повышения эффективности использования топлива в технологических схемах доменного производства предложено применение металлургических систем утилизации низкопотенциальных тепловых выбросов регенеративных теплообменных аппаратов доменных печей. Разработана схемы теплоутилизационных энерготехнологических комплексов для производства тепловой, электрической энергии и холода за счет теплоты дымовых газов доменного производства. С применением методов исследований, основанных на использовании эксергетических функций, проведен анализ работы предложенных водородных энергопреобразующих комплексов. Получены основные характеристики водородного контура энергосиловых установок в диапазоне температур дымовых газов от 523 до 723 К.

Ganzha A.M., Koshelnik O.V., Pavlova V.G., Khavin E.V., Zayets O.M.

**THE DEVELOPMENT OF THE PROMISING SYSTEMS OF THE BLAST
FURNACE PROCESS RECOVERED ENERGY RESOURCES UTILIZATION**

The application of the metal hydride systems of the low potential waste heat recovery of the blast furnaces regenerative heat exchangers for the further increase of the efficiency of fuel use in the blast furnace technological processes is suggested. The models of the waste heat recovery power and technological plants for the production of thermal and electric power and refrigeration at the cost of flow gases waste heat are developed. The analysis of the suggested hydrogen energy conversion plants using the research methods based on the exergy functions is carried out. The main characteristics of the power plants hydrogen circuit in the range of flue gas temperatures 523–723 K are determined.