

УДК 621.311.6

СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА  
НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИНИ-ЗАВОДАХ  
HYDROGEN PRODUCTION SYSTEMS AT METALLURGICAL MINI-PLANTS

Мартинчук А. Ю., магистр техн. наук,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
H. Martinchuk, Master of Sciences, Belarusian National Technical University,  
Minsk, Belarus

*Аннотация. Цель исследования – развитие методического обеспечения для оценки и сравнение эффективности технологий производства водорода и их использования на металлургических мини-заводах. Для утилизации тепловых отходов нагревательной печи предложено использовать регенеративно-утилизационную установку на базе нагревательной печи прокатного стана. Синтезированная схема энерготехнологической установки отличается применением в ней газотурбинной установки (ГТУ) с внешним подогревом рабочего тела и системы производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl. Результаты численного исследования показали возможность достижения коэффициента использования топлива  $\eta_{\text{ИТ}} = 64\%$ .*

*Annotation. The aim of the study is to develop methodological support for evaluating and comparing the efficiency of hydrogen production technologies and their use in metallurgical mini-plants. For the disposal of heat waste from the heating furnace, it is proposed to use a regenerative-utilization plant based on the heating furnace of a rolling mill. The synthesized scheme of the energy technological installation is characterized by the use of a gas turbine plant with external heating of the working medium and a hydrogen production system by means of a Cu-Cl hybrid thermochemical cycle. The results of the numerical study showed the possibility of achieving the fuel utilization factor  $\eta_{\text{ИТ}} = 64\%$ .*

Ключевые слова: энергия, водород, нагревательная печь, металлургия, эффективность, химическая регенерация

Key words: energy, hydrogen, heating furnace, metallurgy, efficiency, chemical regeneration

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня на Земле происходит значительный рост численности населения и дальнейшее ускорения экономического развития. Энергия является ключевым ресурсом в данном процессе, при этом ключевыми факторами, обеспечивающими экономическое развитие, являются ее доступность и обеспечение спроса на энергию [1].

Известен ряд подходов, реализация которых позволит снизить воздействие на окружающую среду энергетических процессов, такие как: улавливание и хранение углерода, химическое циклическое улавливание углерода, декарбо-

низация и др. [3]. Однако они не может быть рассмотрено в качестве долгосрочного решения для устойчивого развития общества в контексте энергетики [4]. Поэтому альтернативные, безуглеродные, виды топлива, такие как водород, рассматриваются как долгосрочные безуглеродные решения для обеспечения энергетической устойчивости и борьбы с изменением климата [5].

Как известно, лидирующие позиции среди энергоемких отраслей тяжелой промышленности занимает металлургическая промышленность [6].

Исходя из вышесказанного, целью моего исследования является решение важной задачи – изучение возможных схем применения термохимического метода получения водорода на базе термохимического цикла *Cu-Cl* в металлургии.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Водород рассматривается как альтернативный энергоноситель будущего из-за более высокой плотности энергии по массе, меньших экологических проблем при его сжигании и его обильного присутствия в различных формах во Вселенной, а также его конвертируемости в электричество или полезные химические вещества [7].

Водород может быть эффективно преобразован в электричество, и наоборот [8]. Он может быть получен из возобновляемых материалов, таких как биомасса и вода, и, что наиболее важно, он является экологически чистым во всех процессах, использующих топливо [9].

Методы производства водорода классифицируют либо по типу ресурса, из которого получают водород, либо по виду технологического источника энергии [10]. Источники энергии, содержащие водород, подразделяются на возобновляемые и производства невозобновляемые [11]. Предполагается, что основным подходом будут «зеленые» методы получения чистого водорода [12].

Термохимические циклы расщепления воды основаны на разложении воды посредством повторяющихся стадий химических реакций с использованием промежуточных реакций и веществ [13].

Термохимические циклы, требующие для реализации только тепловую энергию называются чистыми термохимическими циклами [15]. В случае, если для реализации термохимического цикла требуется тепловая и другая форма энергии, тогда термохимические циклы называются гибридными термохимическими циклами [16].

Наиболее разработанным является термохимический цикл на основе взаимодействия меди и хлора [17].

Термохимический цикл медь-хлор состоит из промежуточных реакций, в которых используются соединения меди и хлора для упрощения процессов разложения воды на водород и кислород [18]. Существует несколько различных циклов *Cu-Cl*, различающихся количеством промежуточных реакций [19].

На основании информации, полученной в результате предварительного обследования объекта моделирования, была сформирована его расчетная технологическая схема (рис. 1) [20].

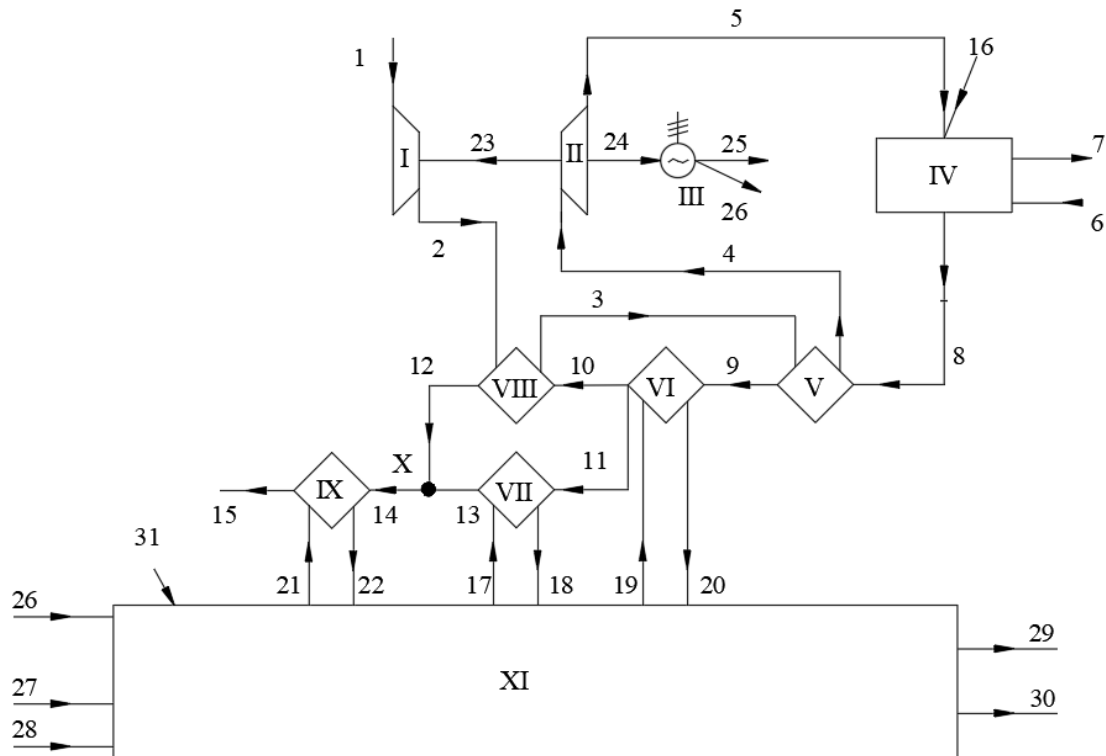


Рисунок 1 – Расчетная схема теплотехнической системы:

I – компрессор; II – турбина; III – электрогенератор; IV – печь; V – теплообменный аппарат второй ступени нагрева воздуха; VI – теплообменный аппарат нагрева  $\text{CuO}\text{CuCl}_2$  для цикла  $\text{CuCl}$ ; VII – теплообменный аппарат перегрева пара для цикла  $\text{CuCl}$ ; VIII – теплообменный аппарат первой ступени нагрева воздуха; IX – теплообменный аппарат генерации пара для цикла  $\text{CuCl}$ ; X – точка смешения; XI – термохимический цикл медь-хлор;

1 – воздух, подаваемый в систему; 2 – воздух, покидающая в компрессор; 3 – воздух из первой ступени нагрева во вторую; 4 – воздух из второй ступени охлаждения, входящий в турбину; 5 – воздух на горение в нагревательную печь; 6 – материал, подаваемый в печь; 7 – материал после обработки из печи; 8 – дымовые газы из нагревательной печи; 9 – дымовые газы из второй ступени нагрева воздуха; 10 – дымовые газы из теплообменного аппарата нагрева  $\text{CuO}\text{CuCl}_2$  на первую ступень нагрева воздуха; 11 – дымовые газы из теплообменного аппарата нагрева  $\text{CuO}\text{CuCl}_2$  на теплообменный аппарат перегрева пара; 12 – дымовые газы из первой ступени нагрева воздуха; 13 – дымовые газы из теплообменного аппарата перегрева пара; 14 – дымовые газы из точки смешения; 15 – дымовые газы из теплообменного аппарата генерации пара; 16 – топливо (природный газ), поступающий в методическую печь; 17 – водяной пар на теплообменный аппарат перегрева пара; 18 – водяной пар из теплообменного аппарата перегрева пара; 19 –  $\text{CuO}\text{CuCl}_2$  в теплообменный аппарат; 20 –  $\text{CuO}\text{CuCl}_2$  в термохимический цикл  $\text{Cu-Cl}$ ; 21 – вода в теплообменный аппарат генерации пара; 22 – водяной пар в термохимический цикл  $\text{Cu-Cl}$ ; 23 – механическая энергия вращения вала турбины, входящая в компрессор; 24 – механическая энергия вращения вала турбины, входящая в электрический генератор; 25 – электрическая энергия, выработанная электрическим генератором на цикл  $\text{CuCl}$ ; 26 – электрическая энергия, выработанная электрическим генератором в сеть; 27 – тепловая энергия на реактор гидролиза; 28 – тепловая энергия на реактор производства кислорода; 29 – производимый термохимическим циклом водород; 30 – производимый термохимическим циклом кислород; 31 – вода в термохимический цикл  $\text{Cu-Cl}$  для производства водорода

Так как по исходной информации имеется методическая печь прокатного стана, были рассмотрены схемы утилизации теплоты уходящих дымовых газов [21]. В данном случае обычно применяется следующая технология: утилизация дымовых газов обеспечивается лишь для нагрева воздуха, поступающего на горение.

В работе в качестве основы теплотехнической системы была выбрана утилизационная схемы, в которой обеспечивается более глубокая утилизация теплоты дымовых газов, помимо этого предусматривается нагрев воздуха, поступающего на горение, а также схемой предусматривается производство водорода [27]. Главная технологическая особенность выбранной для исследования теплотехнической системы – технология производства водорода посредством гибридного термохимического цикла *Cu-Cl* [22].

Основные характеристики исследуемой принципиальной схемы представлены табл. 1 [23].

Определен состав продуктов горения при сжигании природного газа с составом продуктов горения при сжигании смеси природного газа с водородом [24].

Сравнительный анализ процентного состава продуктов горения для случая горения природного газа и случая горения смеси природного с водородом представлен в табл. 2.

Положительным результатом при смешении водорода с природным газом является уменьшение выбросов углекислоты в окружающую среду.

Таблица 1 – Итоговые характеристики эффективности энерготехнологической установки

| Наименование   | Значение | Размерность       |
|--|----------|-------------------|
| Расход топлива (природного газа)                             | 1,5      | м <sup>3</sup> /с |
| Тепловая мощность нагревательной печи по потоку топлива      | 53,2     | МВт               |
| Мощность выработки электроэнергии                            | 3,4      | МВт               |
| Мощность потребление электроэнергии на производство водорода | 1,4      | МВт               |
| Производительность по водороду                               | 2,8      | т/сутки           |
| Тепловая мощность потока производимого водорода              | 3,8      | МВт               |
| Электрический КПД утилизационной выработки электроэнергии    | 6,4      | %                 |
| Относительная мощность потока производимого водорода         | 8,9      | %                 |
| Коэффициент использования топлива                            | 62,8     | %                 |

Таблица 2 – Сравнительный анализ процентного состава продуктов горения

| Наименование   | Случай 1 – сжигание природного газа | Случай 2 – сжигание смеси природного газа и водорода | Изменение содержания продуктов горения, % |
|--|-------------------------------------|--|---|
| Процент содержания углекислого газа в составе продуктов горения, % | 9,5                                 | 8,9  | 6,5                                       |
| Процент содержания воды в составе продуктов горения, %             | 18,9                                | 19,9   | 4,9                                       |
| Процент содержания азота в составе продуктов горения, %            | 71,3                                | 70,9   | 0,5                                       |

Был проведен анализ влияния смешения водорода, производимого энерго-технологической установкой на степень черноты дымовых газов [26]. Для случая сжигания природного газа и смеси природного газа с водородом соответственно:  $\varepsilon_{\Gamma} = 0,36$ ,  $\varepsilon_{\Gamma}^{\text{CM}} = 0,37$ . Смешение водорода с природным газом приводит к интенсификации процесса лучистого теплообмена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано также состояние развития класса исследуемой теплотехнологической системы, на основании чего разработана регенеративно-утилизационная установка на базе нагревательной печи прокатного стана с применением технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла *Cu-Cl*.

Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать следующие выводы: в рамках промышленного производства и энергетики удачным решением в части производства водорода могут стать гибридные методы, одним из которых является термохимический метод на базе цикла *Cu-Cl*. Предложенная регенеративно-утилизационная схема позволяет достигать значения  $\eta_{\text{ИТ}} = 64\%$ , а также осуществлять химическую регенерацию тепловых отходов печи до 10 % в виде водорода от исходной мощности топлива, подаваемого в печь. По результатам численного исследования на основании разработанной математической модели получена зависимость эффективности предложенной регенеративно-утилизационной схемы от температуры дымовых газов после методической печи:  $\eta_{\text{ИТ}} = 0,72 - 0,10 \cdot 10^{-3} \cdot t_8$ . Использование водорода, получаемого в системах термохимической регенерации теплоты дымовых газов на базе нагревательной печи прокатного стана, в качестве топлива в смеси с природным газом является перспективным, так как позволяет снизить потребление природного газа нагревательной печью и выбросы углекислого газа в окружающую среду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Key world energy statistics. International Energy Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/events/key-world-energy-statistics-2018> – Дата доступа: 10.03.2022.
2. World energy outlook. International Energy Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2015>– Дата доступа: 10.03.2022.
3. Nicoletti G. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels/ G. Nicoletti, N. Arcuri, R. Bruno // *Energy Convers Manag.* – 2015. – V.89. – P.13.
4. Muradov N. From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy / N. Muradov, T. Veziroglu // *Int J Hydrogen Energy.* – 2005. – V. 30. – P. 37.
5. Pagliaro M. Solar Hydrogen: Fuel of the Future / N. Muradov, A. Konstandopoulos A // *Royal Society of Chemistry.* – 2012. – V. 32. – P. 305–315.
6. Staffell I. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system / I. Staffell, D. Scamman, A. Velazquez // *Energy Environ Sci.* – 2018. – V. 12. – P. 91.
7. Abdalla A. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review / A. Abdalla, S. Hossain, O. Nisfindy // *Energy Convers Manag.* – 2018. – V. 165. – P. 27.
8. Dincer I. Sustainable hydrogen production options and role of IAHE / I. Dincer, C. Zamfirescu// *Int J Hydrog Energy.* – 2012. – V. 37. – P. 86.
9. US department of energy (DOE), hydrogen energy strategy plan [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020> – Дата доступа: 17.03.2022.
10. Parkinson B. Levelized cost of CO2 mitigation from hydrogen production routes/ B. Parkinson, P. Balcombe, A. Hawkes // *Energy Environ Sci.* – 2019. – V. 12. – P. 19.
11. Davis U. The Development of Lifecycle Data for Hydrogen Fuel Production and Delivery/ U. Davis// *Institute of Transportation Studies.* – 2019. – 30.
12. Landman A. Photoelectrochemical water splitting in separate oxygen and hydrogen cells / A. Landman, H. Dotan, M. Wullenkord // *Nat Mater.* – 2017. – V. 16. – P. 51.
13. Competitiveness of Electrolytic Hydrogen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10> – Дата доступа: 17.03.2022.
14. Muradov N. On the right track / N. Muradov // *Nature Energy.* – 2019. – V. 4. – P. 69.
15. Arregi A. Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: a review/ A. Arregi, M. Amutio, G. Lopez // *Energy Convers Manag.* – 2018. – V. 165. – P. 696–719.
16. T-Raissi A. Water Splitting: Thermochemical. In: *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry/ A. T-Raissi // John Wiley & Sons, Ltd.* – 2012. – V. 9. – P. 680–682.
17. Naterer G. Hydrogen Production from Nuclear Energy / G. Naterer, I.Dincer, C. Zamfirescu // *London: Springer-Verlag* – 2013. – V. 2. – P. 47.

18. Roeb, M. Hydrogen production| Thermochemical Cycles. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources/ M. Roeb, C. Sattler // Elsevier. – 2009. – V. 384 . – P. 93.

19. Funk J. Thermochemical hydrogen production: past and present / J. Funk // Int J Hydrog Energy. – 2001. – V.26. – P. 90.

20. Седнин В. А. Анализ эффективности регенеративно-утилизационной схемы с воздушной газотурбинной установкой на базе нагревательной печи прокатного стана / В. А. Седнин, Е. О. Иванчиков, В. А. Калий // Энергоэффективность. – Сентябрь 2021. – С. 25–29.

21. Хрусталева Б. М. Техническая термодинамика. В 2 частях. Часть 2 / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : БНТУ, 2004. – 560 с.

22. Law V. Aspen modelling of the three reaction version of the copper-chlorine thermochemical cycle for Hydrogen production from water/ V. Law, J. Prindle, A. Lupulescu // New Orleans. – 2008. – V. 5. – P. 33.

23. The International Association for the Properties of Water and Steam [Электронный ресурс] / The International Association for the Properties of Water and Steam | Main IAPWS Thermodynamic Property Formulations. – Режим доступа: <http://iapws.org> – Дата доступа: 01.05.2022.

24. Несенчук А. П. Промышленные теплотехнологии. Машиностроительное и металлургическое производство / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Н. Л. Мандель // Минск: Высшая школа, 1995. – 412 с.

25. Данилов Н. И. Основы энергосбережения: учебник / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков; под ред. Н. И. Данилова // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.

26. Румянцев В. Д. Теплотехника: учебное пособие / В. Д. Румянцев, В. М. Ольшанский; под ред. В. И. Губинского // Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.

27. Коваль В. А. Энергетические возможности газотурбинных установок с воздушной утилизацией тела / В. А. Коваль, Ю. М. Ануров, А. И. Васильев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – С. 15–19.