

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142>

УДК 620.97

Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства водорода

В. А. Седнин¹⁾, Е. О. Иванчиков¹⁾, В. А. Калий¹⁾, А. Ю. Мартинчук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Цель исследования – оценка эффективности энерготехнологической установки на базе методической печи прокатного стана с опцией производства водорода. Представлен краткий анализ технологий производства водорода и рассмотрены перспективы их применения в металлургии. Установлено, что для предприятий, имеющих потенциал тепловых отходов, для производства водорода целесообразно применять термохимические технологии. Показаны основные аспекты и особенности термохимических методов производства водорода с позиций выбора количества этапов реализации химических реакций и определения термодинамических условий их проведения. Исследованы условия реализации термохимического цикла медь – хлор Cu–Cl, определен рациональный вариант его реализации с учетом использования тепловых отходов (вторичных энергетических ресурсов) нагревательных печей прокатного стана. Применение эволюционного метода позволило на базе ранее разработанной и исследованной технологической схемы (энерготехнологическая установка в составе нагревательной печи прокатного стана, утилизационной газовой турбины с внешним подводом теплоты с сохранением регенеративной составляющей подогрева воздуха-окислителя) синтезировать схему энерготехнологической установки с включением в нее технологического блока, реализующего гибридный термохимический цикл медь – хлор Cu–Cl для разделения воды на водород и кислород с использованием тепловых вторичных энергоресурсов и выработанной утилизационной газовой турбинной установкой электроэнергетики. Разработана математическая модель макроуровня. Проведенные тестовые численные эксперименты показали высокую энергетическую перспективность разработанной энерготехнологической установки, коэффициент использования топлива которой находится в диапазоне 75–90 %. Коэффициент химической регенерации энергии топлива для тестового режима составил 11,3 %. В результате численного исследования доказана перспективность разработок в части развития технологий производства водорода с применением термохимических циклов и использования высокотемпературных тепловых вторичных ресурсов.

Ключевые слова: топливо, металлургия, экология, зеленая энергетика, источники энергии, тепловые отходы, регенерация, утилизация, энергоэффективность, термохимический цикл Cu–Cl, математическая модель, материальный баланс, энергетический баланс, газотурбинная установка, энерготехнологическая установка

Для цитирования: Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства водорода / В. А. Седнин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 2. С. 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142>

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Energy-and-Technology Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace with the Option of Hydrogen Production

V. A. Sednin¹⁾, E. O. Ivanchikov¹⁾, V. A. Kaliy¹⁾, A. Y. Martinchuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aim of the study was to evaluate the efficiency of an energy-and-technology unit based on a continuous furnace of a rolling mill with an option for hydrogen production. A brief analysis of hydrogen production technologies and the prospects of their application in metallurgy are presented. It has been determined that as for enterprises with the potential of thermal waste, the use of thermochemical technologies is promising for the production of hydrogen. The main aspects and features of thermochemical methods of hydrogen production are shown from the standpoint of choosing the number of stages of chemical reactions implementation and determining the thermodynamic conditions for their conduct. The conditions for the implementation of the copper-chlorine Cu–Cl thermochemical cycle were investigated, and a rational variant of its implementation has been determined, taking into account the use of thermal waste (secondary energy resources) of the heating furnaces of the rolling mill. The application of the evolutionary method made it possible, on the basis of the technological scheme (which had been previously developed and investigated, and consisted of an energy-and-technological installation as a part of a rolling mill of a heating furnace and a utilization gas turbine with external heat supply that maintains the regenerative component of heating the air oxidizer), to synthesize a scheme of an energy-and-technological installation with the inclusion of a technological unit implementing a hybrid thermochemical copper-chlorine Cu–Cl cycle for separating water into hydrogen and oxygen using thermal secondary energy resources and electricity generated by a utilization gas turbine installation. Mathematical model of the macro level has been developed. The conducted numerical test experiments have shown the high energy prospects of the developed energy-and-technology installation, the fuel utilization rate of which is in the range of 75–90 %. The coefficient of chemical regeneration of fuel energy for the test mode was 11.3 %. As a result of numerical research, the prospects of developments under consideration in terms of the development of hydrogen production technologies with the use of thermochemical cycles and the high-temperature thermal secondary resources have been proved.

Keywords: fuel, metallurgy, ecology, green energy, energy sources, thermal waste, regeneration, utilization, energy efficiency, thermochemical cycle Cu–Cl, mathematical model, material balance, energy balance, gas turbine installation, energy-and-technology installation

For citation: Sednin V. A., Ivanchikov E. O., Kaliy V. A., Martinchuk A. Y. (2022) Energy-and-Technology Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace with the Option of Hydrogen Production. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (2), 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142> (in Russian)

Введение

Одно из стратегических перспективных направлений развития мировой экономики в ближайшие десятилетия – применение в энергетике и промышленности водорода [1–3]. Его открыли в 1766 г., и уже через несколько лет была осуществлена первая попытка полета на шаре, наполненном водородом [4]. В XIX–XX вв. открыт процесс электролиза, разработаны топливные элементы, водород начали использовать в качестве топлива в космической и автомобильной отраслях [5]. Наибольший расцвет водородной энергетики, главным преимуществом которой считается высокая экологичность, планируется к середине XXI в.

Особый интерес представляет использование водорода в металлургической отрасли. По оценкам международных экологических организаций, 7–9 % выбросов парниковых газов в атмосферу, связанных с хозяйственной деятельностью человека, приходится на металлургическую промышленность. В этой связи в ряде стран проводятся исследования и пилотные работы по замещению ископаемого топлива на водород. Так, в Японии принято решение о производстве синтетического метана за счет утилизации CO₂ газовых выбросов металлургических предприятий [6]. В Швеции запущен проект HYBRIT, цель которого – максимально снизить потребление ископаемого топлива для производства железа путем замены коксующего угля на водород, вырабатываемый установками зеленой энергетики [7]. При этом фирмой Ovako планируется с начала 2022 г. производить углеродно-нейтральную сталь за счет замены органического топлива на водород [2]. И хотя сегодня себестоимость стали, получаемой сжиганием ископаемых топлив, примерно на 20 % ниже, чем при использовании водорода, в перспективе при совершенствовании и удешевлении производства водорода данный разрыв будет уменьшаться, а значит, использование современных технологий позволит существенно снизить влияние металлургической отрасли на окружающую среду.

Следует также учитывать, что одна из наиболее важных задач для металлургической промышленности – повышение энергетической эффективности, в том числе путем максимальной регенерации и утилизации энергетических отходов. В настоящее время в нагревательных печах в основном используется регенерация тепловых отходов путем нагрева компонентов горения с дальнейшей их утилизацией для получения тепловой или электрической энергии. В свете развития тренда водородной энергетики появляются новые возможности в рамках использования технологий химической регенерации теплоты продуктов сгорания. Таким образом, актуальной проблемой является разработка энерготехнологических установок с применением технологий производства водорода на базе использования тепловых отходов металлургических агрегатов, что позволяет одновременно решать энергетические, экологические и экономические задачи.

Выбор технологии производства водорода с использованием потенциала вторичных энергоресурсов

Методы производства водорода классифицируются по типу материала, из которого получают водород (рис. 1а), и по типу источника энергии (рис. 1б).

Большая часть мирового производства водорода обеспечивается паровым риформингом метана (SMR), который, наряду с газификацией угля, используется чаще всего ввиду более низкой стоимости (менее 2 дол. США/кг H₂). Другой распространенный процесс – это расщепление воды. Он может осуществляться с помощью различных технологий, простейшей из которых является электролиз. Но стоимость его реализации может превышать 12 дол. США/кг H₂ [4]. Энергетическую и эксергетическую эффек-

тивность наиболее используемых технологий производства водорода (паровой риформинг метана, газификация угля, газификация биомассы, термохимический цикл Cu–Cl, электролиз с использованием электроэнергии, производимой за счет ветрогенерации и энергии солнца, PEWS) иллюстрирует рис. 2.

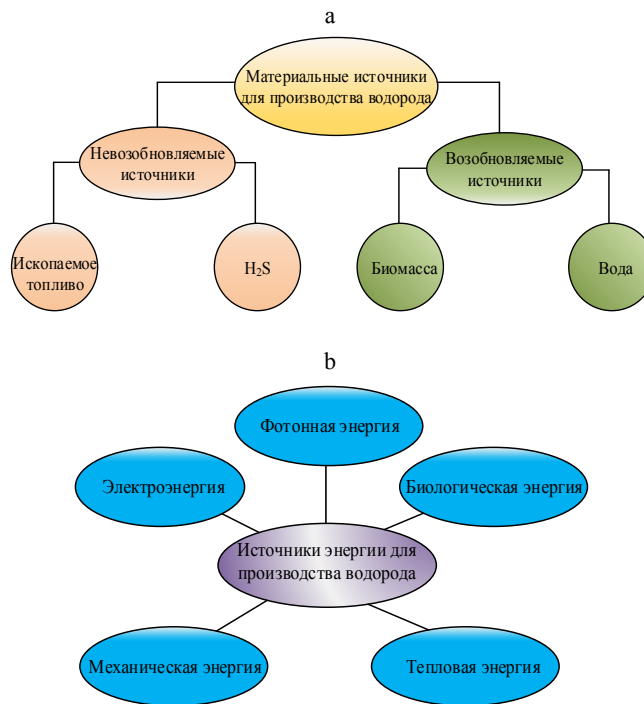


Рис. 1. Способы получения водорода: а – сырьевая база; б – источники энергии [8]
 Fig. 1. Methods of hydrogen production: a – raw material base; b – energy sources [8]

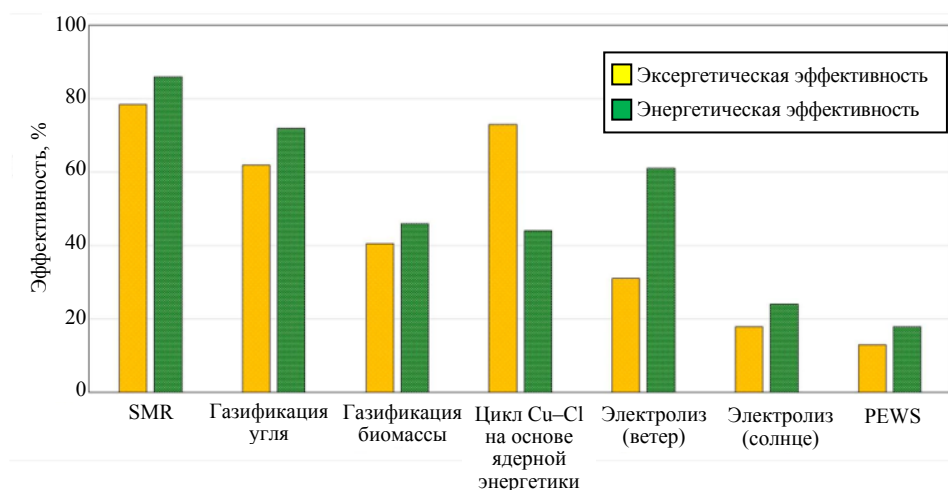


Рис. 2. Энергетическая и эксергетическая эффективность методов производства водорода [7]
 Fig. 2. Energy and exergetic efficiency of hydrogen production methods [7]

Интерес вызывают термохимические циклы расщепления воды, основанные на ее разложении посредством повторяющихся серий химических реакций с получением промежуточных веществ, которые преобразовываются в ходе этих реакций. В конечном результате получают водород и кислород. Единственной подводимой внешней средой является вода, химические реагенты работают в цикле. Термохимические циклы расщепления воды протекают с использованием внешнего подвода энергии и преобразованием энергии химических реакций. Они могут управляться подводом либо только тепловой энергии, либо тепловой и другой формы энергии, например электрической. На практике выгоднее использовать гибридные циклы, в которых вода, тепловая энергия от атомных, солнечных станций или промышленных вторичных энергоресурсов (ВЭР) и электрическая (фотонная) энергия являются входными потоками, а водород и кислород – выходными [6, 8].

Теоретически воду можно разложить на компоненты (H_2 и O_2) всего за один этап, но в этом случае процессы преобразования протекают при высоких рабочих температурах. Снижение температуры возможно путем замены одностадийной реакции на многостадийную, поэтому технологии, основанные на термохимических циклах, разрабатываются как каскадный набор реакций, в которых вода расщепляется в два-пять этапов с использованием тепловой энергии при температурах значительно ниже $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Однако их реализация требует создания каскада реакторов. Таким образом, трехступенчатые процессы могут заменяться двухступенчатыми, тем самым снижается требование к температурному потенциалу энергоносителя, обслуживающего процесс химического преобразования. Соответственно четырехступенчатые процессы заменяются на трехступенчатые и т. д.

В отчете Аргоннской национальной лаборатории (ANL) [9], касающемся оценки альтернативных термохимических циклов для производства водорода, они названы приоритетными по таким показателям, как химическая устойчивость, термодинамическая осуществимость, тепловая эффективность и конкурентоспособность по затратам. Одним из наиболее эффективных можно считать цикл $Cu-Cl$, зарекомендовавший себя как самый перспективный с точки зрения промышленного внедрения. Компанией Atomic Energy of Canada Limited (AECL) и Технологическим институтом Университета Онтарио (Ontario Tech) в партнерстве с ANL осуществляется проект по созданию системы производства водорода с использованием теплоты от АЭС с применением термохимического цикла $Cu-Cl$ в качестве основного при разложении воды [10–13].

Данный термохимический цикл состоит из промежуточных реакций, в которых используются соединения меди и хлора для облегчения разложения воды на водород и кислород. Выделяют трех-, четырех- и пятиступенчатые циклы $Cu-Cl$, различающиеся количеством промежуточных реакций. Пятиступенчатый цикл состоит из хлорирования меди (получение водорода), диспропорционирования (электролитического), сушки, гидро-

лиза и разложения (стадия получения кислорода). Эти промежуточные стадии реакции взаимодействуют согласно схеме, представленной на рис. 3. В [12] исследованы все типы циклов Cu–Cl (трех-, четырех- и пятиступенчатые), каждый из которых рассматривался в двух вариантах компоновки. Реакции, которые проходят в различных вариантах применения цикла Cu–Cl, сведены в табл. 1.

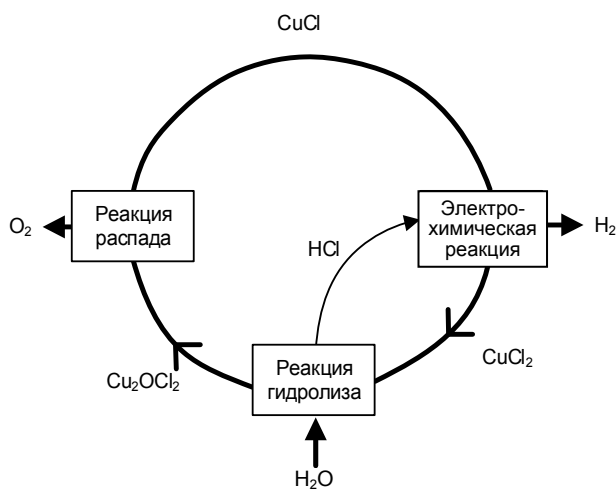


Рис. 3. Принципиальная схема пятиступенчатого цикла медь – хлор
 Fig. 3. Schematic diagram of a five-stage copper-chlorine cycle

Ранее отмечалось, что увеличение шагов в цикле приводит в целом к снижению температурного уровня, а их сокращение – к уменьшению объема оборудования, упрощению системы, однако при этом повышается температурный уровень, усложняется оборудование, возникают побочные продукты и снижается эффективность процесса в целом. Стендовые эксперименты цикла Cu–Cl показали его возможное применение в ближайшем будущем в промышленном масштабе. Наиболее эффективным считается модернизированный четырехступенчатый цикл, разработанный в Институте Онтарио (Clean Energy Research Laboratory (CERL) at the UOIT) [14].

Таблица 1

Реакции в различных процессах CuCl
 Reactions in various CuCl processes

Пятиступенчатый цикл (вариант 1)	Четырехступенчатый цикл (вариант 1)	Трехступенчатый цикл (вариант 1)
$S1: 2CuCl_{2(aq)} + H_2O_{(g)} \rightarrow 2CuCl_{(l)} + 2HCl_{(g)} + 0,5O_{2(g)}$	$S1: 2CuCl_{2(aq)} + H_2O_{(g)} \rightarrow Cu_2OCl_{2(s)} + 2HCl_{(g)}$	$S1: 2CuCl_{2(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CuO \cdot CuCl_{2(s)} + 2HCl_{(g)}$
	$S2: Cu_2OCl_{2(s)} \rightarrow 2CuCl_{(l)} + 0,5O_{2(g)}$	$S4: CuCl_{2(aq)} \rightarrow CuCl_{2(s)}$
		$S2: Cu_2OCl_{2(s)} \rightarrow 2CuCl_{(l)} + 0,5O_{2(g)}$

Окончание табл. 1
 End of Tab. 1

Пятиступенчатый цикл (вариант 1)	Четырехступенчатый цикл (вариант 1)	Трехступенчатый цикл (вариант 1)
$S2: 4CuCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + 2Cu_{(s)}$	$S3: 4CuCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + 2Cu_{(s)}$	$S3: 4CuCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + 2Cu_{(s)}$
$S3: 2Cu_{(s)} + 2HCl_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + H_{2(g)}$	$S4: 2Cu_{(s)} + 2HCl_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + H_{2(g)}$	$S5: 2Cu_{(s)} + 2HCl_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + H_{2(g)}$
Трехступенчатый цикл (вариант 2)	Четырехступенчатый цикл (вариант 2)	Пятиступенчатый цикл (вариант 2)
$S2: 2CuCl_{2(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow Cu_2OCl_{2(s)} + 2HCl_{(g)}$	$S1: 2CuCl_{2(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow Cu_2OCl_{2(s)} + 2HCl_{(g)}$	$S1: 2CuCl_{2(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow CuO \cdot CuCl_{2(s)} + 2HCl_{(g)}$
$S3: Cu_2OCl_{2(s)} \rightarrow$ $\rightarrow 0,5O_{2(g)} + 2CuCl_{(s)}$	$S2: Cu_2OCl_{2(s)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + 0,5O_{2(g)}$	$S2: Cu_2OCl_{2(s)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + 0,5O_{2(g)}$
$S1: 2CuCl_{(aq)} + 2HCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + H_{2(g)}$	$S3: CuCl_{2(aq)} \rightarrow CuCl_{2(s)}$	$S4: CuCl_{2(aq)} \rightarrow CuCl_{2(s)}$
	$S4: 2CuCl_{(aq)} + 2HCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + H_{2(g)}$	$S3: 4CuCl_{(aq)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{2(aq)} + 2Cu_{(s)}$
		$S5: 2Cu_{(s)} + 2HCl_{(g)} \rightarrow$ $\rightarrow 2CuCl_{(l)} + H_{2(g)}$

Технологическая схема энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана с применением термохимического цикла Cu–Cl

В [15] представлена технологическая схема энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана с утилизационной воздушной газотурбинной установкой. Дальнейшее ее развитие рассматривается с позиции включения в нее подсистемы, реализующей термохимический цикл Cu–Cl (рис. 4).

Основой энерготехнологической установки является методическая многозонная печь прокатного стана IV, в которой металл нагревается до 1150–1250 °С, продукты сгорания перемещаются противотоком к направлению движения стальных заготовок и на выходе из печи их температура составляет 750–1100 °С. В качестве топлива рассматривается природный газ. Воздух, требуемый для горения в нагревательной печи, поступает в компрессор I, сжимается до давления p_2 и направляется в регенеративный теплообменник VIII, где нагревается до 500–550 °С, затем догревается в регенеративной секции V до 700–850 °С и поступает в воздушную газовую турбину II, являющуюся приводом компрессора I и электрогенера-

тора III. После прохождения турбины воздух с температурой около 400 °С поступает в горелочные устройства нагревательной печи. Таким образом, штатный технологический процесс методической печи сохраняется.

Дымовые газы, выходя из печи, последовательно проходят через каскад теплообменников: V (догрев воздуха после компрессора), VI (нагрев $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$), VII (парогенератор, 2-я ступень), VIII (преднагрев воздуха), IX (парогенератор, 1-я ступень), XX (подогреватель сетевой воды). Температура дымовых газов после секции XX утилизатора 130–180 °С.

В рассматриваемой схеме предусмотрен четырехступенчатый цикл $\text{Cu}\text{--}\text{Cl}$ (табл. 1, вариант 2), состоящий из четырех шагов (стадий) преобразования реагентов и протекающий с максимальной температурой 500–550 °С. Первая ступень цикла проходит в реакторе гидролиза X [17], куда подается поток CuCl под давлением около 24 бар, пар с давлением около 1 бар и температурой 400 °С. Для совершения реакции соотношение массовых расходов пара и CuCl должно составлять 34:1. На выходе из реактора X образуется смесь из пара, не вступившего в реакцию, HCl и $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$, которая движется в сепаратор XII. HCl с температурой 400 °С поступает в теплоутилизатор XI, откуда направляется в реактор электролиза XVI. Полученный в XI пар смешивается с отработанным паром из сепаратора XII и следует в секцию VII утилизатора дымовых газов с температурой 306 °С. Образовавшееся соединение $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$ поступает в секцию теплообменника VI, где нагревается до 500 °С и направляется в стехиометрический реактор для разложения и получения кислорода. Дополнительно в реактор XIII подводится высокопотенциальная теплота, благодаря чему происходит эндотермический процесс разложения $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$ на CuCl и O_2 (в сепараторе XIV). После этого кислород поступает в рекуператор XV, охлаждается до 70 °С и отправляется на доохлаждение и хранение с целью дальнейшего использования в металлургическом производстве. CuCl после охлаждения в рекуператор XIX направляют в реактор электролизера.

В реакторе XVI происходит процесс электролиза, в ходе которого хлорид-ион перемещается с катода через мембрану электролизера и вступает в реакцию на аноде с CuCl с образованием CuCl_2 . Затем водный раствор CuCl_2 переносится в сушилку XVIII. С другой стороны водный раствор HCl перекачивается из накопительной емкости в катод, где ионы H^+ восстанавливаются и образуется водород (H_2). После сепаратора XVII водород отправляется в компрессор, а затем в емкость для хранения с давлением 6 бар. Смесь CuCl_2 и воды подается в сушилку XVIII, после чего CuCl_2 направляется обратно в реактор гидролиза (предварительно нагревается в рекуператоре XIX), а вода возвращается в паровой цикл.

Для снижения потребления энергии воздух перед воздушным компрессором I охлаждается в охладителе XXII за счет холодильной мощности, вырабатываемой абсорбционной холодильной машиной XXI.

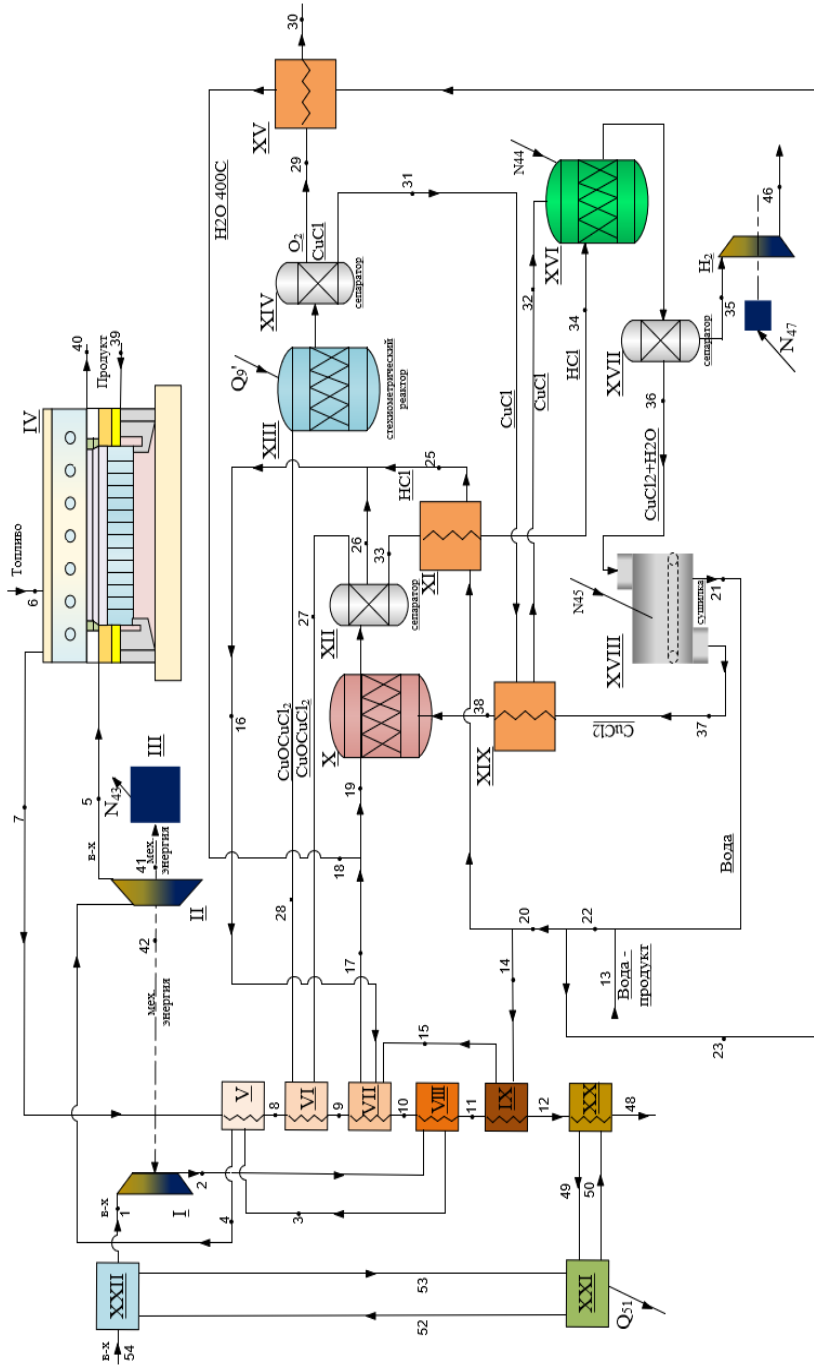


Рис. 4. Технологическая схема энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана с применением термохимического цикла Cu-Cl

Fig. 4. Technological scheme of an energy-and-technology installation based on a heating furnace of rolling production using a Cu-Cl thermochemical cycle

Математическая модель энерготехнологической установки

Для расчета синтезированной технологической схемы (рис. 4) разработана математическая модель макроуровня [16] в составе уравнений материальных и энергетических балансов, записываемых для каждого из элементов схемы:

$$\sum_{j=1}^{N_{ki}} G_j = 0;$$

$$\sum_{j=1}^{N_k} (\gamma_j G_j h_j) + \sum_{n=1}^{P_k} (\gamma_n E_n) = 0,$$

где γ_j, γ_n – коэффициенты, учитывающие рассеяние части потока энергии в окружающую среду; G_j – массовый расход потока j -го теплоносителя, кг/с; h_j – удельная массовая энтальпия теплоносителя, кВт/кг; E_n – мощность электрическая или механическая n -й связи, кВт; N_k, P_k – число много- и однопараметрических связей соответственно.

Сводная система основных балансовых уравнений представлена в табл. 2. Для замыкания она дополнялась уравнениями, отражающими энергетические эффекты химических реакций. При их определении приняты следующие допущения: термодинамические параметры окружающей среды $t_{oc} = 25$ °С, $p_{oc} = 1$ бар; во всех химических реакциях реагенты и продукты находятся при температуре реакции и давлении 1 бар; все процессы адиабатические, протекают в равновесном устойчивом состоянии до полного завершения.

Расчеты проводились на 1 моль водорода, производимого за цикл, поэтому все количественные параметры приведены в пересчете на моль произведенного водорода. Так как термодинамические данные для $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$ недоступны, то энтальпии и энтропии рассчитаны для эквимольной смеси CuCl_2 и CuO .

Энергетический баланс химической реакции в стационарном состоянии сводится к выражению:

$$Q = H_P - H_R = \sum n_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P - \sum n_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R,$$

где Q – тепловой эффект реакции, кВт; H_P, H_R – полная энтальпия потоков соответственно исходных веществ и продуктов реакции, кВт; n_P, n_R – молярные расходы соответственно исходных веществ и продуктов реакции, моль/с; $h_f, \bar{h}^\circ, \bar{h}$ – изменения молярной энтальпии соответственно в стационарных условиях реакции, с учетом изменения температуры и давления, кДж/моль.

Изменения энтальпий химических соединений на каждом этапе реакции оценивали с помощью уравнений Шомата [17] по выражению вида

$$\bar{h} - \bar{h}_0 = AT + B \frac{T^2}{2} + C \frac{T^3}{3} + D \frac{T^4}{4} - E \frac{1}{T} + F - H,$$

где T – 0,001 температуры соединения и константы, К; A, B, C, D, E, F, G, H – коэффициенты.

Таблица 2

Сводная таблица основных балансовых уравнений
 Summary table of the main balance equations

Номер элемента	Наименование элемента	Балансовое уравнение
I	Компрессор	$G_1 h_1 + N_{42} = \eta G_1 h_2$
II	Газовая турбина	$\eta G_1 h_4 = G_1 h_5 + N_{41\text{Mex}} + N_{42\text{Mex}}$
III	Генератор	$N_{42\text{Mex}} \eta_{\text{ген}} = N_{43\text{эл}}$
IV	Печь нагревательная	$G_6 h_6 + Q_{\text{н}}^{\text{p}} B_{\text{т}} + G_1 h_5 + G_{39} h_{39} = G_7 h_7 + G_{39} h_{40} + Q_{\text{oc}}$
V	Секция 1 рекуператора	$G_7 h_7 + G_1 h_2 = G_7 h_8 + G_1 h_3$
VI	Секция 2 рекуператора	$G_7 h_8 + G_{27} h_{27} = G_7 h_9 + G_{27} h_{28} + Q'_3$
VII	Секция 3 рекуператора	$G_7 h_9 + G_{16} h_{16} + G_{15} h_{15} = G_7 h_{10} + G_{17} h_{17}$
VIII	Секция 4 рекуператора	$G_7 h_{10} + G_1 h_3 = G_7 h_{11} + G_1 h_4$
IX	Секция 5 рекуператора	$G_{14} h_{14} + G_7 h_{11} = G_{15} h_{15} + G_7 h_{12}$
X	Реактор гидролиза	$n_{19} [\bar{h}_{f_{19}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{19}] + n_{38} [\bar{h}_{f_{38}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{38}] + Q =$ $= n_{26} [\bar{h}_{f_{26}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{26}] + n_{27} [\bar{h}_{f_{27}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{27}] +$ $+ n_{33} [\bar{h}_{f_{33}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{33}]$
XI	Теплоутилизатор HCl	$n_{33} [\bar{h}_{f_{33}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{33}] + n_{38} [\bar{h}_{f_{38}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{38}] =$ $= n_{31} [\bar{h}_{f_{31}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{31}] + n_{32} [\bar{h}_{f_{32}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{32}]$
XIII	Реактор производства кислорода	$n_{28} [\bar{h}_{f_{28}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{28}] + Q'_0 =$ $= n_{29} [\bar{h}_{f_{29}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{29}] + n_{31} [\bar{h}_{f_{31}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{31}]$
XV	Теплообменник охлаждения кислорода	$n_{29} [\bar{h}_{f_{29}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{29}] + n_{23} [\bar{h}_{f_{23}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{23}] =$ $= n_{18} [\bar{h}_{f_{18}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{18}] + n_{30} [\bar{h}_{f_{30}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{30}]$
XVI	Реактор	$n_{34} [\bar{h}_{f_{34}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{34}] + n_{32} [\bar{h}_{f_{32}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{32}] + N_{H_2} =$ $= n_{35} [\bar{h}_{f_{35}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{35}] + n_{36} [\bar{h}_{f_{36}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{36}]$
XVIII	Сушилка	$n_{36} [\bar{h}_{f_{36}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{36}] + N_{\text{осуш}} =$ $= n_{37} [\bar{h}_{f_{37}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{37}] + n_{21} [\bar{h}_{f_{21}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{21}]$
XIX	Теплообменник охлаждения HCl	$n_{31} [\bar{h}_{f_{31}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{31}] + n_{37} [\bar{h}_{f_{37}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{37}] =$ $= n_{32} [\bar{h}_{f_{32}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{32}] + n_{38} [\bar{h}_{f_{38}} + (\bar{h} - \bar{h}_0)_{38}]$
XX	Секция 6 рекуператора	$G_{12} h_{12} + G_{50} h_{50} = G_{49} h_{49} + G_{48} h_{48}$
XXI	Абсорбционная холодильная машина (COP 0,65)	$\eta G_{49} h_{49} + G_{52} h_{52} = G_{53} h_{53} + \eta G_{50} h_{50}$

Реализация математической модели путем численного эксперимента позволила исследовать эффективность предложенной энерготехнологической установки. Основные характеристики базового варианта представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные показатели базового варианта
The main indicators of the basic version

Расход природного газа, кг/с	0,970
Производство электроэнергии, кВт	1517,970
Электроэнергия на процесс производства водорода, кВт	1466,700
Электроэнергия на процесс гидролиза, кВт	916,700
Электроэнергия на процесс сушки, кВт	550,000
Расход воды, кг/с	35,830
Производство водорода, кг/с	0,033
Производство кислорода, кг/с	0,267
Удельное потребление электроэнергии на выработку 1 кг водорода, (кВт·ч)/кг	12,200
Удельная выработка 1 кг водорода к 1 кг металла в печи, кг/кг	$9,3 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент химической регенерации, %	12,500

При стандартном электролизе воды средний расход электроэнергии на выработку 1 кг водорода 55–59 кВт·ч. В предлагаемом варианте энерготехнологической схемы с применением гибридного термохимического цикла Cu–Cl удельный расход электроэнергии составляет 12,2 кВт·ч/кг, что в 4,8 раза меньше, чем в стандартном варианте выработки. С учетом того, что на предприятиях металлургической отрасли всегда имеется недоиспользование тепловых ВЭР (особенно в межтопительный период), данный способ получения водорода энергетически эффективен и рекомендуется для практического внедрения.

В ходе исследования проанализировано влияние на энергетическую эффективность разработанной энерготехнологической установки температуры дымовых газов на выходе из печи и расхода воды на производства водорода с оптимальными параметрами работы цикла, определенными в [17, 18]. Расчетные данные, характеризующие изменение коэффициента использования топлива, представлены на рис. 5. Численный анализ выполнялся по условию, что выработка водорода должна соответствовать собственной выработке электроэнергии с минимизацией выдачи избытков в заводскую сеть, поэтому расход на производство водорода определялся температурой дымовых газов t_7 . К примеру, для температуры 875 °С рекомендован расход G_{13} около 0,29 кг/с, при этом коэффициент использования топлива составит 83 %.

В результате обработки данных численного эксперимента (рис. 5) получены регрессионные уравнения для определения коэффициента исполь-

зования топлива в зависимости от температуры дымовых газов после методической печи t_7 и расхода исходной воды для производства G_{13}

$$h_{ит} = 0,04t_7 - 8G_{13} + 0,49.$$

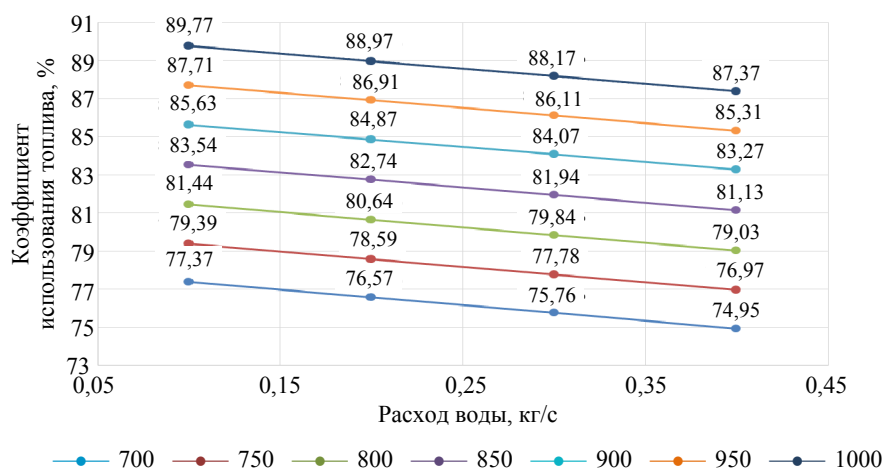


Рис. 5. Характер изменения коэффициента использования топлива в зависимости от температуры дымовых газов на выходе из методической печи t_7 (700–1000 °C) и расхода исходной воды на производство водорода G_{13} (0,10–0,40 кг/с)

Fig. 5. The dependence of the change in the fuel utilization coefficient depending on the flue gas temperature at the outlet of the continuous furnace t_7 (700–1000 °C) and the flow rate of the source water for the production of hydrogen G_{13} (0.10–0.40 kg/s)

Проведено сравнение полученных значений с существующими в реальных условиях с применением системы воздушной регенерации и паровой утилизацией тепловых отходов методических печей прокатных станков в пределах 60–75 % [16, 19]. Эффективность предлагаемой энерготехнологической схемы значительно выше и может изменяться от 75 до 90 %, что доказывает ее эффективность и перспективность.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для предприятий, имеющих недоиспользованный потенциал тепловых вторичных энергоресурсов, перспективно производство водорода с применением термохимических технологий. Показаны основные аспекты и особенности термохимических методов производства водорода с позиций выбора количества этапов реализации химических реакций и определения термодинамических условий их проведения. Установлено, что для нагревательных печей сталелитейного производства наиболее перспективным является гибридный термохимический цикл медь – хлор Cu–Cl, определен рациональный вариант его реализации с учетом использования тепловых вторичных энергоресурсов нагревательных печей прокатного стана.

2. На базе ранее исследованного варианта энерготехнологической установки синтезирована новая технологическая схема в составе нагревательной печи прокатного стана, утилизационной газовой турбины с внешним подводом теплоты, параметры работы которой выбираются так, чтобы сохранять регенеративную составляющую подогрева воздуха-окислителя, и технологического блока, реализующего термохимический цикл медь – хлор Cu–Cl для разделения воды на водород и кислород с использованием избытка тепловых вторичных энергоресурсов и выработанной утилизационной газовой турбинной установкой электроэнергии.

3. Разработанная математическая модель макроуровня позволила провести численный эксперимент, результаты которого показали энергетическую перспективность разработанной энерготехнологической установки. Для тестового режима коэффициент химической регенерации энергии тепловых отходов технологии нагрева металла составил 11,3 %. В исследованном диапазоне изменения температуры дымовых газов на выходе из методической печи коэффициент использования топлива 75–90 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 1. Производство и потребление водорода в промышленном секторе / В. А. Седнин, А. А. Абрамовский // Энергоэффективность. 2020. № 10. С. 22–25.
2. Седнин, В. А. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 2. Водород в интегрированной энергосистеме / В. А. Седнин, А. А. Абрамовский // Энергоэффективность. 2020. № 11. С. 20–24.
3. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 3. Водород в качестве топлива для энергетических систем / В. А. Седнин [и др.] // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 16–21.
4. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию / Т. Митрова [и др.]. Сколково: Центр энергетики Моск. шк. управл. СКОЛКОВО, 2019. 62 с.
5. Радченко, Р. В. P15 Водород в энергетике / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 229 с.
6. Safari, F. A Review and Comparative Evaluation of Thermochemical Water Splitting Cycles for Hydrogen Production / F. Safari, I. Dincer // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 205. 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>.
7. The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities [Electronic Resource] / International Energy Agency. Japan, 2019. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
8. Roeb, M. Fuels – Hydrogen Production: Thermochemical Cycles / M. Roeb, C. Sattler // Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Elsevier, 2009. P. 384–393. <https://doi.org/10.1016/b978-044452745-5.00320-8>.
9. Canada's Program on Nuclear Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle / G. F. Naterer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35, Iss. 20. P. 10905–10926. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.087>.
10. Progress of International Hydrogen Production Network for the Thermochemical Cu–Cl Cycle / G. F. Naterer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38, Iss. 2. P. 740–759. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.023>.
11. Progress in Thermochemical Hydrogen Production with the Copper – Chlorine Cycle / G. F. Naterer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40, Iss. 19. P. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.124>.

12. Orhan, M. F. Conceptual Design, Analysis and Optimization of Nuclear-Based Hydrogen Production Via Copper-Chlorine Thermochemical Cycles / M. F. Orhan. Ontario, 2011. 264 p.
13. Dincer, I. Overview of Hydrogen Production Research in the Clean Energy Research Laboratory (CERL) at UOIT / I. Dincer, G. F. Naterer // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39, Iss. 35. P. 20592–20613. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.074>.
14. Recent Canadian Advances in Nuclear-Based Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle / G. Naterer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. Vol. 34, Iss. 7. P. 2901–2917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.090>.
15. 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. 2021. № 9. С. 25–29.
16. Седнин, В. А. Анализ и параметрическая оптимизация энерготехнологических установок на базе силового оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 571–583. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-571-583>.
17. The Hybrid Cu–Cl Thermochemical Cycle. I. Conceptual Process Design and H₂A Cost Analysis. II. Limiting the Formation of CuCl During Hydrolysis / M. S. Ferrandon [et al.] // Extended Abstract Submitted for the NHA Annual Hydrogen Conference 2008. Sacramento, 2008. Vol. 10. P. 3310–3326.
18. Orhan, M. F. Process Simulation and Analysis of a Five-Step Copper – Chlorine Thermochemical Water Decomposition Cycle for Sustainable Hydrogen Production / M. F. Orhan, I. Dincer, M. A. Rosen // International Journal of Energy Research. 2014. Vol. 38, Iss. 11. P. 1391–1402. <https://doi.org/10.1002/er.3148>.
19. Сорока, Б. С. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении / Б. С. Сорока, Н. В. Воробьев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>.

Поступила 21.12.2021 Подписана в печать 15.02.2022 Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Sednin V. A., Abrazovskii A. A. (2020) The Role of Hydrogen in Modern Energy Technological Metasystems. Part 1. Production and Consumption of Hydrogen in the Industrial Sector. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (10), 22–25 (in Russian).
2. Sednin V. A., Abrazovskii A. A. (2020) The Role of Hydrogen in Modern Energy Technological Metasystems. Part 2. Hydrogen in an Integrated Power System. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (11), 20–24 (in Russian).
3. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Kuz'mich K. A., Ivanchikov E. O. (2021) The Role of Hydrogen in Modern Energy Technological Metasystems. Part 3. Hydrogen as a Fuel for Energy Systems. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (5), 16–21 (in Russian).
4. Mitrova T., Mel'nikov Yu., Chugunov D., Glagoleva A. (2019) *Hydrogen Economy as the Way to Low-Carbon Development*. Skolkovo, Energy Center of Moscow SKOLKOVO School of Management. 62 (in Russian).
5. Radchenko R. V., Mokrushin A. S., Tyul'pa V. V. (2014) *P15 Hydrogen in Power Engineering*. Yekaterinburg, Ural University Publ. 229 (in Russian).
6. Safari F., Dincer I. (2020) A Review and Comparative Evaluation of Thermochemical Water Splitting Cycles for Hydrogen Production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>.
7. International Energy Agency (2019) *The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities*. Japan. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

8. Roeb M., Sattler C. (2009) Fuels – Hydrogen Production: Thermochemical Cycles. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Elsevier, 384–393. <https://doi.org/10.1016/b978-044452745-5.00320-8>.
9. Naterer G. F., Suppiah S., Stolberg L., Lewis M., Wang Z., Daggupati V. [et al.] (2010) Canada's Program on Nuclear Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (20), 10905–10926. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.087>.
10. Naterer G. F., Suppiah S., Stolberg L., Lewis M., Wang Z., Dincer I. [et al.] (2013) Progress of International Hydrogen Production Network for the Thermochemical Cu–Cl Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2), 740–759. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.023>.
11. Naterer G. F., Suppiah S., Stolberg L., Lewis M., Wang Z., Rosen M. A. [et al.] (2015) Progress in Thermochemical Hydrogen Production with the Copper – Chlorine Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (19), 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.124>.
12. Orhan M. F. (2011) *Conceptual Design, Analysis and Optimization of Nuclear-Based Hydrogen Production Via Copper – Chlorine Thermochemical Cycles*. Ontario, 264.
13. Dincer I., Naterer G. F. (2014) Overview of Hydrogen Production Research in the Clean Energy Research Laboratory (CERL) at UOIT. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (35), 20592–20613. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.074>.
14. Naterer G., Suppiah S., Lewis M., Gabriel K., Dincer I., Rosen M. A. [et al.] (2009) Recent Canadian Advances in Nuclear-Based Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (7), 2901–2917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.090>.
15. Sednin V. A., Ivanchikov E. O., Kalii V. A. (2021) Analysis of the Efficiency of a Regenerative-Utilization Scheme with an Air Gas Turbine Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (9), 25–29 (in Russian).
16. Sednin V. A., Abrazovskii A. A. (2017) Analysis and Parametric Optimization of Energy-and-Technology Units on the Basis of the Power Equipment of Compressor Plants of Main Gas Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 571–583. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-571-583> (in Russian).
17. Ferrandon M. S., Lewis M. A., Tatterson D. F., Nankani R. V., Kumar M., Wedgewood L. E. (2008) The Hybrid Cu–Cl Thermochemical Cycle. I. Conceptual Process Design and H₂A Cost Analysis. II. Limiting the Formation of CuCl During Hydrolysis. *Extended Abstract Submitted for the NHA Annual Hydrogen Conference 2008*. Sacramento, 10, 3310–3326.
18. Orhan M. F., Dincer I., Rosen M. A. (2014) Process Simulation and Analysis of a Five-Step Copper – Chlorine Thermochemical Water Decomposition Cycle for Sustainable Hydrogen Production. *International Journal of Energy Research*, 38 (11), 1391–1402. <https://doi.org/10.1002/er.3148>.
19. Soroka B. S., Vorobyov N. V. (2019) Efficiency of the Use of Humidified Gas Fuel and Oxidizing Mixture. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564> (in Russian).