

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>

УДК 620.97

Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом

В. А. Седнин¹⁾, Р. С. Игнатович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В рамках политики «обезуглероживания» экономики предлагается технология получения водорода из местных видов топлива и горючих отходов человеческой деятельности в рамках развития функциональности теплофикационных циклов производства энергии. Целью исследования является оценка энергетической эффективности паросиловой мини-ТЭЦ, работающей на местных видах топлива, с модулем производства водорода термохимическим способом. Представлен краткий литературный обзор термохимических циклов производства водорода и показано, что наиболее перспективными считаются гибридные циклы медь-хлор Cu–Cl. В программной среде *Aspen Hysys* была синтезирована математическая модель мини-ТЭЦ с пятиступенчатым циклом производства водорода, которая может в дальнейшем быть использована как компонент в составе цифрового двойника. По результатам анализа математической модели было определено, что удельное потребление электрической энергии на 1 кг водорода для такой схемы составит 9,11 (кВт·ч)/кг, что в среднем в пять раз меньше, чем при производстве водорода электролизом, остальная часть требуемой энергии замещена тепловой, при этом максимальный коэффициент использования топлива мини-ТЭЦ с модулем производства водорода, использующей в качестве топлива отходы древесины, составил 83,1 %, в том числе тепловой КПД составляет 51,5 %, эффективность производства водорода по нижней теплоте сгорания – 31%, электрический КПД по отпуску электроэнергии в сеть – 0,6 %. Для сравнения максимальный коэффициент использования топлива паросиловой мини-ТЭЦ той же электрической мощности достигает 90,9 %. Расширение опций мини-ТЭЦ на местных видах топлива путем ввода в ее схему блока производства водорода гибридным термохимическим методом позволяет повысить маневренность станции, что предполагает возможность организации функционирования мини-ТЭЦ в соответствии с требованиями тепловых потребителей и электрического графика нагрузок энергосистемы в часы максимумов и минимумов ее потребления за счет изменения электрической мощности отпуска в сеть или увеличения мощности потребления электроэнергии из внешней сети до мощности, требуемой для производства водорода. В заключение указывается на возможность развития исследуемой схемы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в сторону дальнейшей утилизации продуктов сгорания с целью генерации искусственного природного газа, который в этом случае можно назвать «зеленым».

Ключевые слова: производство водорода, зеленая энергетика, термохимический метод, цикл Cu–Cl, *Aspen Hysys*, мини-ТЭЦ, местные виды топлива, математическая модель, энерготехнологическая установка, ОРЦ-установка, регенерация

Для цитирования: Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>

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
vsednin@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
vsednin@bntu.by

Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾

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

Abstract. Within the framework of the policy of “decarbonization” of the economy, a technology for hydrogen producing from local fuels (LF) and combustible waste of human activity is proposed as a part of the development of the functionality of heating cycles of energy production. The aim of the present study is to evaluate the energy efficiency of a steam-powered mini-CHP plant operating on local fuels with a thermochemical hydrogen production module. A brief literature review of thermochemical cycles of hydrogen production is presented, and it is shown that hybrid copper-chlorine Cu–Cl cycles are recognized as the most promising. In the *Aspen Hysys* software environment, a mathematical model of a mini-CHP plant with a five-stage hydrogen production cycle was synthesized, which can later be used as a component in the digital twin. According to the results of the analysis of the mathematical model, it was determined that the specific consumption of electric energy per 1 kg of hydrogen for such a scheme will be 9.11 (kW·h)/kg, which is on average more than five times less than in the production of hydrogen by electrolysis, the rest of the required energy is replaced by thermal one, while the maximum fuel utilization factor of mini-CHP with a hydrogen production module using wood waste as fuel amounted to 83.1 %, including a thermal efficiency of 51.5 %, the efficiency of hydrogen production at the lowest calorific value is 31 %, the electrical efficiency for the supply of electricity to the grid is 0.6 %. For comparison, the maximum fuel utilization of a steam-powered mini-CHP of the same electrical capacity reaches 90.9 %. The expansion of mini-CHP options operating on local fuels by introducing a hydrogen production unit by hybrid thermochemical method into its scheme makes it possible to increase the maneuverability of the station, which implies the possibility of organizing the operation of mini-CHP in accordance with the requirements of thermal consumers and electrical graph-reducing the loads of the power system during the hours of maxima and minima of its consumption by changing the electrical power supply to the network or increasing the power consumption of electricity from the external network to the power required for hydrogen production. In conclusion, the possibility of developing the studied scheme of a mini-CHP operating on local fuels towards further utilization of combustion products in order to generate artificial natural gas, which in this case can be called “green”, is indicated.

Keywords: hydrogen production, green energy, thermochemical method, Cu-Cl cycle, *Aspen Hysys*, mini-CHP, local fuels, mathematical model, energy-and-technology installation, ORC-module, regeneration

For citation: Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2023) Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373> (in Russian)

Введение

Подписание в 2015 г. Парижского климатического соглашения окончательно закрепило намерение мирового сообщества постепенно перейти на низкоуглеродные источники первичной энергии [1]. В настоящее время в рамках этой концепции широкий интерес исследователей привлекают возобновляемые источники энергии: солнечная, ветровая, геотермальная и прочие виды. Однако возобновляемые источники энергии обладают рядом недостатков: низкая плотность первичных энергопотоков, нестабильность и непостоянство выработки энергии в зависимости от временных и погодных условий, низкая энергоэффективность преобразования и др. [2]. По этой причине группа исследователей [3–5] сходятся во мнении о значительном потенциале использования водорода в качестве энергоносителя

в промышленности и энергетике. В частности, отмечается, что водород может рассматриваться как промежуточный энергоноситель и средство накопления избыточной электрической энергии.

Сегодня наиболее распространенными технологиями получения водорода в промышленных масштабах являются паровая и парокислородная конверсия природного газа [6]. В условиях стран, не имеющих значительных источников природного газа, к которым относится и Республика Беларусь, такой метод производства водорода может оказаться нецелесообразным ввиду непостоянства цен на импортные энергоносители. Широкое внедрение паровой конверсии метана может привести к увеличению доли природного газа в приходной части энергетического баланса и в результате негативно сказаться на энергетической безопасности страны, кроме того, в этом варианте замена метана водородом в энергетике и промышленности приводит только к дополнительным проблемам, практически не влияя на экологическую составляющую технологических процессов.

Альтернативные методы производства водорода заключаются в расщеплении воды с применением электрической или другой энергии. Наибольшее промышленное применение среди них нашел электролиз, который также рассматривается как потребитель-регулятор для сглаживания неравномерности потребления электрической энергии [7]. В то же время за последние годы было выполнено множество исследований производства водорода термохимическим методом. Данный метод заключается в проведении ряда химических реакций, для протекания которых подводятся вода, а также либо только тепловая энергия, либо тепловая и электрическая энергия, в результате чего образуются водород и кислород. В настоящее время среди термохимических технологий наиболее перспективным считается термохимический цикл Cu–Cl [8].

Для Республики Беларусь в условиях образовавшегося после запуска в эксплуатацию двух блоков АЭС профицита электрической энергии [9] электролиз кажется наиболее подходящей технологией производства водорода. Однако, согласно [10], термохимические методы производства водорода по сравнению с электролизом потенциально могут иметь более высокую эффективность, а также экономические преимущества при расширении масштаба производства водорода. Отмечается, что непосредственное использование тепловой энергии напрямую в термохимическом методе позволит избежать потерь энергии на производство электрической энергии, необходимой для осуществления электролиза. В связи с решением проблемы снижения выбросов CO₂ в большинстве работ по применению термохимических методов производства водорода рассматривается использование ядерной или солнечной энергии [8, 11, 12]. Однако внедрение термохимических технологий в схему действующей атомной электростанции может оказаться проблематичным. В Республике Беларусь существует возможность реализации данного метода на базе мини-ТЭЦ, использующих местные виды топлива (МВТ), а именно древесную щепу, отходы деревообрабатывающей промышленности, а также промышленные и бытовые органические отходы. Данное техническое решение хорошо согласуется и с тем, что, по данным Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь [13], более 40 % территории страны занимают леса, а древесина относится к возобновляемым источникам энергии, ее использование в качестве топлива не приводит к повышению уровня CO₂ в атмосфере.

С этой точки зрения вызывает практический интерес определение энергетической эффективности производства водорода на мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, при включении в нее комплекса оборудования для реализации термохимической технологии в условиях Республики Беларусь. Для этого текущие разработки основ протекания химических процессов, представленные в литературных источниках, были связаны с конкретным теплоисточником, а в программной среде *Aspen Hysys* была построена математическая модель топливно-регенеративного паросилового блока мини-ТЭЦ на МВТ. В качестве исходных данных по протекающим термохимическим реакциям были использованы экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках [10, 11, 14, 15].

Основы термохимического метода получения водорода

Как отмечалось выше, среди термохимических методов получения водорода можно выделить термические циклы, где требуется подводить только тепловую энергию и подготовленную воду, и гибридные термохимические циклы, где требуется дополнительный подвод электрической энергии. При этом выделяют три наиболее перспективные группы термохимических циклов получения водорода: группа с хлором (Cu–Cl, Mg–Cl, Fe–Cl, V–Cl), группа с серой (S–I, H_2S), группа оксидов металлов (ZnO/Zn). На рис. 1 представлена диаграмма, отражающая отношения основных показателей эффективности (энергетическая и эксергетическая эффективность, а также стоимость 10 кг получаемого водорода) различных групп термохимических циклов, приведенных в работе [16], там же представлен подробный сравнительный анализ групп термохимических циклов.

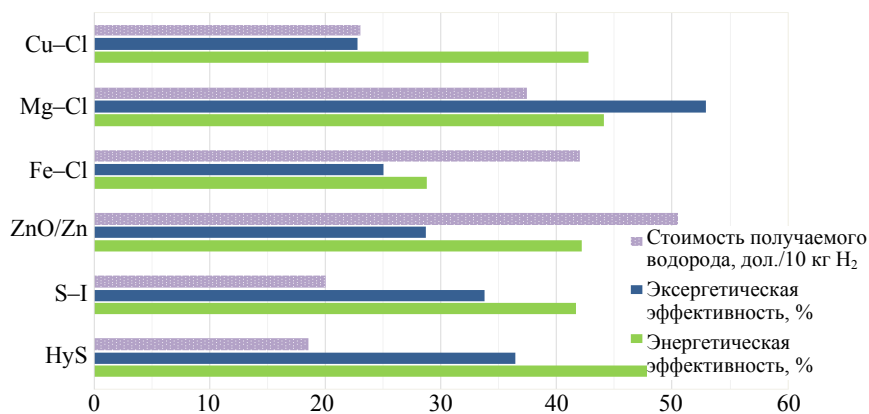


Рис. 1. Основные показатели термохимических циклов

Fig. 1. The main indicators of thermochemical cycles

В [16] показано, что циклы Cu–Cl протекают при наименьшей рабочей температуре 450–500 °С, что значительно снижает затраты на материалы и техническое обслуживание [17] и позволяет использовать для утилизации тепловые потоки с относительно низкими температурами. При этом они обладают высокой энергетической эффективностью, потенциально самой низкой себестоимостью производимого водорода, а промежуточные реакции протекают практически без побочных реакций [17]. К недостаткам циклов Cu–Cl относятся необходимость работы с твердыми вещества-

ми, образующимися в ходе промежуточных реакций, а также работа с опасной соляной кислотой HCl. Сотрудники *Atomic Energy of Canada LTD (AECL)* в своих работах [18, 19] так же выделяют термохимические циклы Cu–Cl для получения водорода как наиболее перспективные. В этой связи нами для анализа эффективности производства водорода на мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, были выбраны гибридные термохимические циклы Cu–Cl.

В работе [20] подробно представлены химические реакции преобразования Cu–Cl для трех-, четырех- и пятиступенчатых циклов производства водорода. В данной работе рассматривается модель пятиступенчатого цикла получения водорода гибридным термохимическим методом, подробно описанным в работе [10]. Выбор такого цикла связан с ограниченностью температуры дымовых газов, которую можно получить при сжигании МВТ. Как отмечается в работе [20], увеличение количества ступеней в термохимическом цикле приводит к снижению температурного уровня и повышению энергетической эффективности процесса производства водорода. Однако при этом повышаются количество используемого оборудования и эксергетические потери при протекании процесса. В табл. 1 представлены основные термохимические реакции, протекающие в пятиступенчатом термохимическом цикле.

Таблица 1

Реакции, протекающие в пятиступенчатом термохимическом цикле [10]

Reactions that occur during a five-step thermochemical cycle [10]

Реакция	Химическая реакция	Температура реакции, °С
1. Гидролиз	$2\text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g})$	400–450
2. Производство O ₂	$\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{l}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$	500–550
3. Электролиз	$4\text{CuCl}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{CuCl}_2(\text{aq}) + 2\text{Cu}(\text{s})$	20–80
4. Сушка	$\text{CuCl}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$	80–150
5. Производство H ₂	$2\text{Cu}(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g}) \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{l}) + \text{H}_2(\text{g})$	430–475

В общем виде пятиступенчатый термохимический цикл получения водорода методом Cu–Cl заключается в следующем [10]: перегретый водяной пар и твердый CuCl₂, получаемый в распылительной сушилке, с одинаковой температурой 400 °С поступают в реактор гидролиза с кипящим слоем, где протекает реакция 1. Данная реакция является эндотермической и протекает с поглощением теплоты, а в результате выделяется HCl в газообразной форме и CuO·CuCl₂ в твердом виде. Полученный таким образом CuO·CuCl₂ далее нагревается до температуры 500 °С, в результате чего, согласно реакции 2, образуется газообразный кислород и жидкий расплав CuCl, который в дальнейшем охлаждается до температур 20–80 °С и кристаллизуется. Твердый CuCl направляется на электролиз для получения твердой меди и CuCl₂. Электролизу соответствует реакция 3. Вода является катализатором электролиза и не используется в реакции, а выходит в виде водного раствора с CuCl₂. Данный водный раствор направляется в распылительную сушилку (реакция 4) для получения твердого CuCl₂, направляемого на гидролиз. Полученная в процессе электролиза твердая медь вместе

с HCl, полученной в результате гидролиза, вступают в экзотермическую реакцию 5, согласно которой образуются водород и жидкий CuCl.

Технологическая схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива для производства водорода термохимическим методом

На рис. 2 представлена принципиальная схема мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, с опцией производства водорода термохимическим методом Cu-Cl. В качестве топлива на мини-ТЭЦ на МВТ используется древесная щепа.

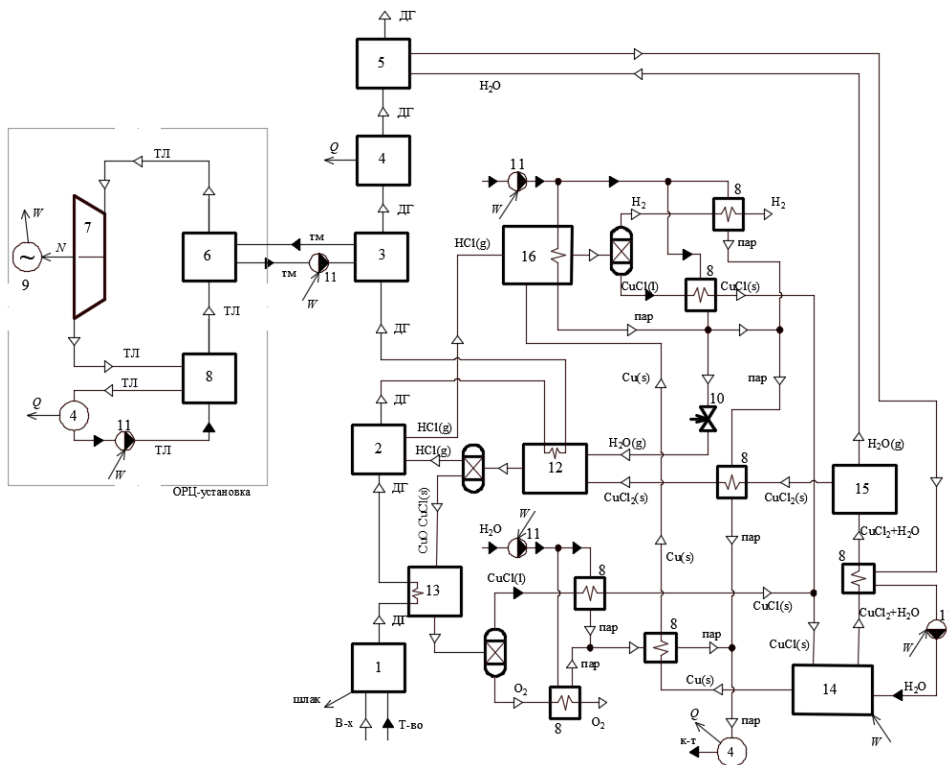


Рис. 2. Принципиальная схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива с опцией производства водорода термохимическим методом Cu-Cl: В-х – воздух; Т-во – топливо; ДГ – дымовые газы; ТМ – термическое масло; ТЛ – толуол; Q – мощность отводимого теплового потока; W – мощность подводимой (отводимой) электрической энергии; 1 – топка котла; 2 – подогреватель HCl; 3 – масляный подогреватель; 4 – подогреватель сетевой воды; 5 – подогреватель пара; 6 – испаритель; 7 – паровая турбина; 8 – регенеративный подогреватель; 9 – генератор; 10 – регулирующий клапан; 11 – насос; 12 – реактор гидролиза; 13 – реактор O₂; 14 – электролизер; 15 – струйная сушилка; 16 – реактор H₂

Fig. 2. Schematic diagram of a mini-CHP using local fuels with the option of producing H₂ by the Cu-Cl thermochemical method: B-x – air; T-vo – fuel; ДГ – flue gases; ТМ – thermal oil; ТЛ – silicone oil; Q – the power of the diverted heat flow; W – the power of the supplied (discharged) electrical energy; 1 – boiler furnace; 2 – HCl heater; 3 – thermal oil heater; 4 – mains water heater; 5 – vapor heater; 6 – vaporizer; 7 – steam turbine; 8 – regenerative heater; 9 – generator; 10 – control valve; 11 – pump; 12 – hydrolysis reactor; 13 – O₂ reactor; 14 – electrolyzer; 15 – jet air dryer; 16 – H₂ reactor

Моделируемая технологическая схема состоит из котлоагрегата, состоящего из топки 1, газохода реактора O₂ 13, газохода подогревателя HCl 2,

термомасляного подогревателя 3 к контуру ОРЦ-установки, далее подогреватель сетевой воды 4 и подогреватель выпара 5. В рамках развития схемы стандартная схема с ОРЦ-модулем получила свое развитие путем включения в нее подсистемы производства водорода термохимическим методом Cu–Cl с пятиступенчатым циклом. Таким образом, древесная щепа сжигается в топке 1, откуда продукты сгорания с температурой на уровне 800–950 °С направляются к реактору производства кислорода 13, где протекает эндотермическая реакция при температуре около 500 °С. Затем продукты сгорания поступают в поверхностный теплообменник HCL 2, где осуществляется нагрев паров HCl от 400 до 450 °С, после чего они поступают в реактор гидролиза, где протекает эндотермическая реакция при температуре 400–450 °С. Далее продукты сгорания из реактора гидролиза поступают в масляный подогреватель 3, где термомасло нагревается от 230 °С до 300 °С. Термическое масло используется как промежуточный теплоноситель в контуре: масляный подогреватель 3 и испаритель 6 ОРЦ-установки. Циркуляция масла обеспечивается циркуляционным насосом 11. Для повышения коэффициента использования топлива (КИТ) мини-ТЭЦ после масляного подогревателя 3 продукты сгорания поступают в сетевой подогреватель 4, где осуществляется нагрев сетевой воды по температурному графику 130/70 °С. Затем уходящие дымовые газы используются для нагрева водяного пара после струйной сушильной установки в подогревателе выпара 5 и выбрасываются в атмосферу.

В качестве рабочего тела в ОРЦ-цикле используется толуол. В испарителе 6 происходит его нагрев до температуры насыщения, равной 230 °С. Полученный пар давлением 12,5 бара направляется в паровую турбину 7 с относительным внутренним КПД, равным 87 %, где расширяется до давления 0,5 бара. После паровой турбины рабочее тело через регенератор 8 направляется в конденсатор 11. Конденсатор 11 ОРЦ-установки, благодаря достаточно высокой температуре рабочего тела, также служит подогревателем сетевой воды по температурному графику 130/70 °С. Толуол в состоянии насыщенной жидкости через питательный насос с относительным внутренним КПД 65 % подается в испаритель через регенератор. Температурный напор регенератора составляет 15 °С.

Как обозначалось ранее, в рассматриваемой схеме мини-ТЭЦ предусматривается пятиступенчатый термохимический цикл Cu–Cl с максимальной температурой протекающих реакций, равной 500 °С. Первая ступень цикла протекает в реакторе гидролиза 12, куда подаются CuCl_2 в твердом состоянии с температурой 400 °С и пары воды с температурой 400 °С. Продуктами эндотермической реакции (1) являются пары HCl и твердое вещество $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$ при температуре 400 °С. $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$, полученный в реакции гидролиза, направляется в реактор производства кислорода 2, где происходит эндотермический процесс его разложения на O_2 и CuCl в состоянии расплавленной соли (реакция (2)). Согласно [10], оптимальной температурой реакции является 500 °С. Полученный кислород

охлаждается водой в рекуперативном подогревателе до 60 °С, а CuCl в регенеративном подогревателе охлаждается водой до температуры 25 °С. Полученная в процессе гидролиза соляная кислота с температурой 400 °С нагревается продуктами сгорания в рекуперативном подогревателе до 450 °С и направляется в реактор водорода, где протекает экзотермическая реакция (5) с выделением теплоты. Помимо HCl в реактор производства водорода подается твердая медь с температурой 450 °С. В результате реакции получают газообразный H₂ и CuCl в состоянии расплавленной соли с температурой 450 °С, которые охлаждаются водой в рекуперативных теплообменниках до температуры 60 °С и 25 °С соответственно. Охлаждение реактора производства водорода осуществляется водой. Часть пара, получаемая при охлаждении реактора производства водорода и продуктов реакции (5), направляется в реактор гидролиза 12. Остальная часть, в том числе и пар, полученный при охлаждении продуктов реакции, используется для нагрева CuCl₂, направляемого в реактор гидролиза от 110 до 400 °С. Теплота оставшегося пара низких параметров используется для нагрева сетевой воды.

Полученные в реакторе производства водорода и реакторе производства кислорода CuCl с температурой 25 °С направляются на электролиз (реакция (3)), катализатором которого является вода. Продуктами реакции электролиза являются твердая медь и водный раствор CuCl₂, который далее направляется на процесс сушки (реакция (4)) в струйной сушилке. Выпар из струйной сушилки нагревается потоком уходящих продуктов сгорания и используется для нагрева водного раствора CuCl₂. Получаемый таким образом CuCl₂ через рекуперативный подогреватель подается в реактор гидролиза 12. Твердая медь, являющаяся продуктом реакции электролиза, нагревается от 25 до 450 °С за счет теплоты охлаждения продуктов реакции производства кислорода и направляется в реактор получения водорода. Оставшаяся теплота охлаждения продуктов реакции кислорода и водорода используется для нагрева сетевой воды.

Математическая модель *Aspen Hysys* мини-ТЭЦ на местных видах топлива для производства водорода термохимическим методом

Так как в стандартной библиотеке *Aspen Hysys* отсутствуют термодинамические свойства ряда компонентов (CuCl, CuCl₂, Cu, CuO·CuCl₂), необходимых для создания модели термохимических реакций Cu–Cl, первым этапом создания расчетной модели являлось определение этих свойств по данным из программного комплекса *Aspen One*, литературы и экспериментальным данным, подробно приведенным в работе [14]. Для получения некоторых термодинамических свойств компонентов и реакций были использованы базы данных программного комплекса *HSC Chemistry* [15]. Термодинамические свойства веществ, использованных при построении модели и отсутствующие в стандартной библиотеке *Aspen Hysys*, приведены в табл. 2. При создании модели указанные выше компоненты были добавлены в программу как гипотетические (*Hypothetical Solid*). В качестве пакета свойств при моделировании химических реакций, теплообмена дымовых га-

зов, а также процессов, протекающих в ОРЦ-установке, был использован стандартный пакет *Peng-Robinson*. Для моделирования процессов теплообмена по стороне чистой воды был использован пакет *IAPWS-IF97*.

Таблица 2

Основные термохимические свойства
Main thermochemical properties

Свойство	Обозначение	CuO·CuCl ₂	CuCl ₂	CuCl	Cu
Молярная масса [14], кг/кмоль	M	214	134,452	98,999	63,546
Плотность при 25 °С [14, 15], кг/м ³	ρ	4080	3400	4140	8960
Теплота образования [10], кДж/моль	$\Delta_f H^0$	-381,3	-217,4	-137	0
Энтропия образования [14], Дж/(моль·К)	$\Delta_f S^0$	154,352	108,07	87,446	–
Свободная энергия образования Гиббса [14], кДж/моль	$\Delta_f G^0$	-369,7	-173,84	-119,4	–
Эксергия химического преобразования [14], кДж/моль	e_x^{ch}	21,08	82,474	75	–
Удельная теплоемкость в стандартных условиях [14, 15], кДж/(кмоль·К)	c_p^0	116,77	71,88	53,34	24,375

Помимо термодинамических параметров, представленных в табл. 2, для более корректного расчета теплообмена в промежуточных ступенях термохимических реакций для компонентов, отсутствующих в стандартной библиотеке *Husys*, по литературным источникам [14, 15] были определены зависимости удельной массовой теплоемкости веществ от температуры. Зависимость, используемая в *Aspen Husys*, представляет собой полином 4-й степени. Полученные при анализе литературных источников зависимости представлены на рис. 3.

Как отмечается в работе [11], одним из наиболее важных компонентов термохимических реакций Cu–Cl является CuCl, который встречается как в состоянии расплавленной соли, так и в состоянии твердого компонента. Вещество находится в твердом состоянии при температуре до 412 °С, а при нагревании до 423 °С происходит фазовый переход в жидкое состояние. Вместе с этим меняется характер кривой зависимости удельной теплоемкости элемента от температуры, что отчетливо видно на рис. 3.

В модели *Aspen Husys* изменение характера кривой реализовано путем добавления элементов *Stream Cutter* после реактора производства водорода (Фазовый переход 1) и реактора производства кислорода (Фазовый переход 2) соответственно.

На рис. 4 представлена построенная в *Aspen Husys* расчетная модель мини-ТЭЦ, работающая на МВТ, с включенной подсистемой производства водорода термохимическим методом Cu–Cl.

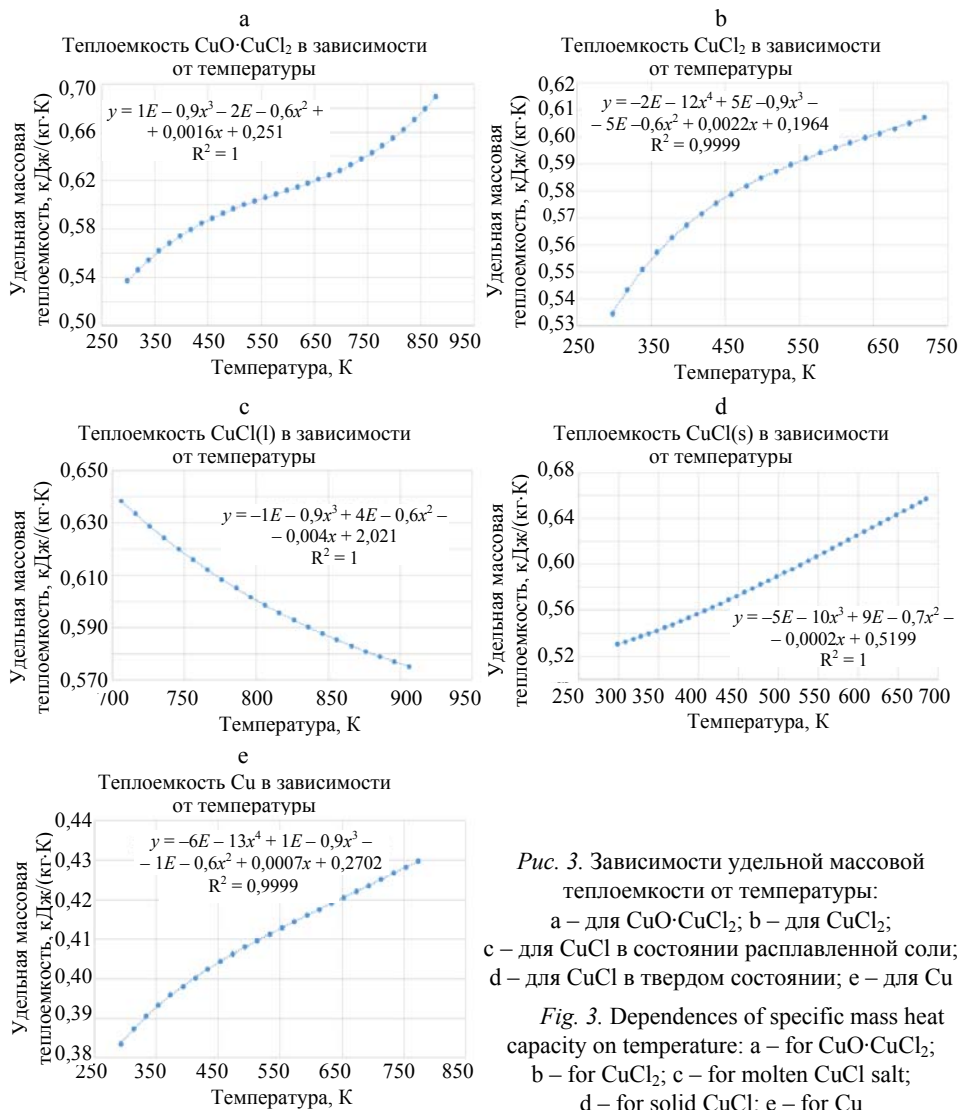


Рис. 3. Зависимости удельной массовой теплоемкости от температуры: а – для CuO-CuCl₂; б – для CuCl₂; в – для CuCl в состоянии расплавленной соли; д – для CuCl в твердом состоянии; е – для Cu

Fig. 3. Dependences of specific mass heat capacity on temperature: а – for CuO-CuCl₂; б – for CuCl₂; в – for molten CuCl salt; д – for solid CuCl; е – for Cu

Так как основная задача данной работы не изучение кинетики протекающих реакций, а оценка целесообразности и эффективности схемы получения водорода на мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, термохимическим методом, все химические реакции реализованы в модели в конверсионных реакторах со степенью конверсии 100 % при давлении 1 бар и с учетом определенных в работе [10] оптимальных параметров процессов.

Поскольку в программном комплексе *Aspen Hysys* нет возможности непосредственного моделирования процесса горения древесной щепы, состав продуктов сгорания был рассчитан в соответствии с [26] по исходному составу древесной щепы, используемой на существующей мини-ТЭЦ, при принятом коэффициенте избытка воздуха на горение, равном 1,4. Состав древесной щепы, полученных дымовых газов и низшая рабочая теплота сгорания топлива представлены в табл. 3.

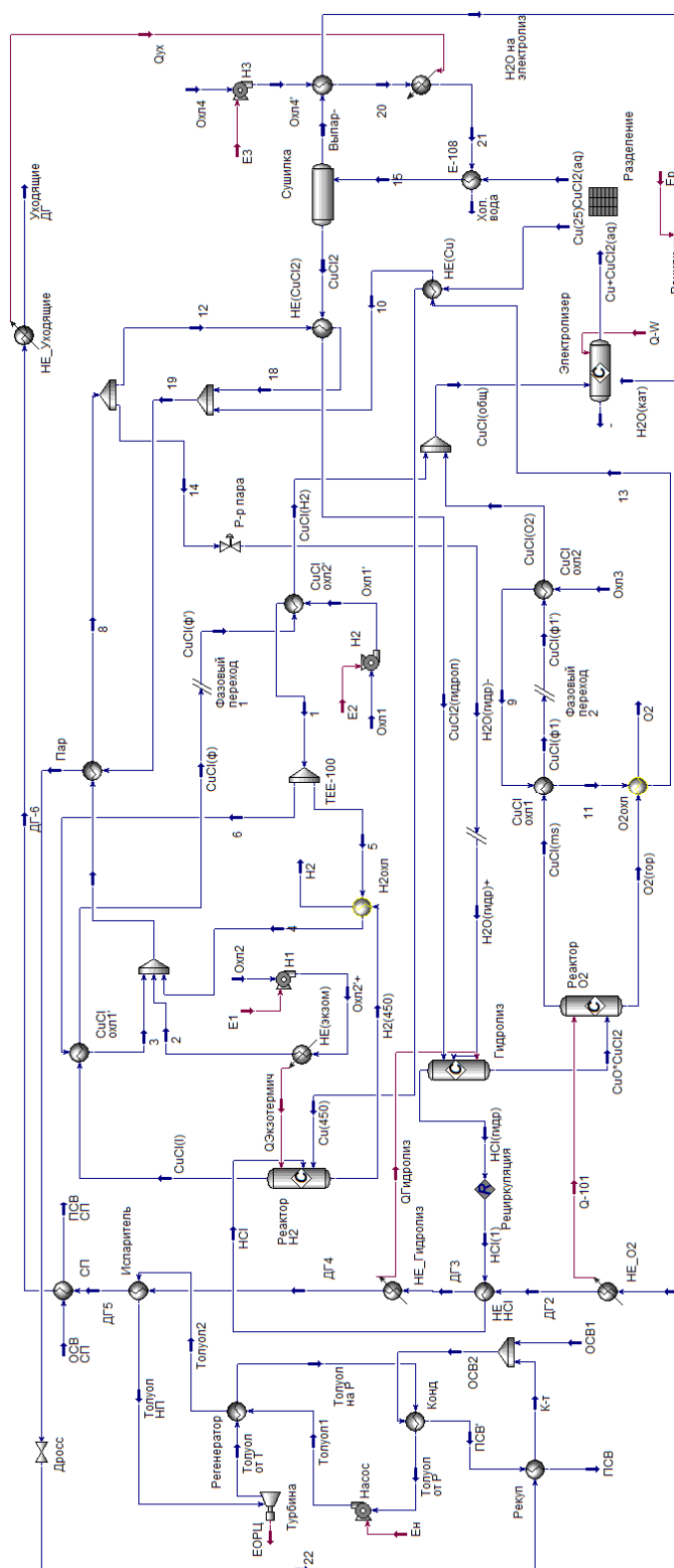


Рис. 4. Схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива с опцией производства H_2 термохимическим методом Cu-Cl в Aspen Hysys
 Fig. 4. Diagram of a mini-CHP using local fuels with the option of producing H_2 by the Cu-Cl thermochemical method in Aspen Hysys

Таблица 3

Состав древесной щепы и продуктов сгорания
Composition of wood chips and combustion products

Состав топлива, %	C ^p	O ^p	H ^p	N ^p	W ^p	Сумма
		29,7	26,46	3,78	0,06	40
Состав продуктов сгорания, % об.	N ₂	RO ₂	H ₂ O	O ₂		Сумма
	62,58	11,36	21,31	4,75		100
Низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг	10,081					

В программном комплексе *Aspen Hysys* невозможно напрямую смоделировать реакцию электролиза ввиду отсутствия соответствующего элемента моделирования. Поэтому для определения количества электрической энергии, необходимой для осуществления электролиза, использовалось уравнение Нернста

$$\Delta G = -nFE, \quad (1)$$

где n – число электронов, передающихся в электрохимической реакции; F – постоянная Фарадея (96454,56 Кл/моль); E – электродный потенциал, В.

Требуемое количество электрической энергии для осуществления термохимической реакции, согласно работе [21], определяется по формуле

$$W = -\Delta G. \quad (2)$$

В соответствии с [22, 23] на электрохимической стадии термохимического процесса значение электродного потенциала E при наличии мембраны в электролизере принимается 0,4 В. Однако в данной работе значение электродного потенциала реакции принято 0,34 В, что соответствует стандартному потенциалу меди [24] и лучше коррелирует с результатами, приведенными в работе [10].

Энергетический баланс термохимического процесса электролиза, в соответствии с работой [25], сводится к выражению

$$Q - W = \sum_P N_i [\Delta H_f^0 + H_i(T_P) - H_i^0] - \sum_R N_i [\Delta H_f^0 + H_i(T_R) - H_i^0], \quad (3)$$

где Q – тепловой эффект реакции, кВт; N_i – молярный расход соответственно исходных веществ и продуктов реакции, моль/с; ΔH_f^0 – теплота образования компонента при стандартных условиях, кДж/моль; $H_i(T) - H_i^0$ – изменение энтальпии каждого компонента реакции, кДж/моль (индексы P , R обозначают исходные вещества и продукты реакции).

В расчетной модели описанный выше способ определения потребляемой электрической энергии в процессе электролиза реализован при помощи блока *Spreadsheet*.

Анализ полученных результатов

На базе построенной математической модели была проанализирована энергетическая эффективность схемы мини-ТЭЦ на МВТ с опцией производства водорода термохимическим методом в пятиступенчатом цикле Cu–Cl. Основные результаты представлены в табл. 4. Расчет модели осуществлялся для двух вариантов: расчет схемы мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, с опцией производства водорода для выработки одного кмоль водорода в час, и для реального аналога мини-ТЭЦ с установленной электрической мощностью ОРЦ-установки 1280 кВт. Для первого варианта электрическая мощность ОРЦ-установки подобрана так, чтобы удовлетворять потребность в электрической энергии на производство водорода и компенсировать потребности собственных нужд с минимальным избытком электрической энергии, отпускаемой в сеть, для второго варианта – это соотношение было выдержано автомодельно.

В работах [27, 28] приведены величины средних расходов электрической энергии на выработку 1 кг водорода для различных технологий электролиза. Так, для щелочного электролиза (АЕС) удельные затраты электрической энергии составляют 50–78 (кВт·ч)/кг, для технологии электролиза на протонообменной мембране (РЕМ) – 50–83 (кВт·ч)/кг, для технологии электролиза на твердых оксидах (SOEC) – 45–55 (кВт·ч)/кг. В предлагаемом варианте термохимического цикла Cu–Cl удельное потребление электроэнергии составит 9,11 (кВт·ч)/кг, что в среднем более чем в пять раз меньше затрат на электролиз по сравниваемым технологиям. В связи с этим можно говорить о целесообразности внедрения модуля производства водорода термохимическим методом Cu–Cl в схему мини-ТЭЦ, работающую на МВТ, тем более водород мы получаем на основе электроэнергии из возобновляемого источника энергии.

Таблица 4

Сводная таблица полученных результатов
Summary table of the results obtained

Вариант расчета	1	2
Расход древесной щепы, кг/ч	77,5	5100
Производство электрической энергии на ОРЦ-установке, кВт	20	1280
Электроэнергия на процесс производства водорода, кВт	18,22	1239
Производство тепловой энергии, кВт	111,7	7212
Расход воды на электролиз, кмоль/ч	1	68
Производство водорода, кмоль/ч	1	68
Производство кислорода, кмоль/ч	0,5	34
Удельное потребление электроэнергии на выработку 1 кг водорода, (кВт·ч)/кг	9,11	

Оценка энергетической эффективности схемы мини-ТЭЦ с опцией производства водорода термохимическим методом производится через КИТ, определенный по уравнению

$$\eta_{\text{ит.}} = \frac{(E_{\text{ОРЦ}} - E_{\text{эл}} - E_{\text{СН}}) + Q_{\text{св}} + B_{\text{H}_2} Q_{\text{H}_2}^{\text{p}}}{B_{\text{T}} Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{ОРЦ}}$ – электрическая мощность ОРЦ-установки, отдаваемая в сеть, кВт; $E_{\text{эл}}$ – электрическая мощность, потребляемая на процесс электролиза, кВт; $E_{\text{СН}}$ – электрическая мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием, кВт; $Q_{\text{св}}$ – тепловая мощность на подогрев сетевой воды, кВт; B_{H_2} – расход полученного водорода, кг/с; $Q_{\text{H}_2}^{\text{p}}$ – низшая рабочая теплота сгорания водорода (согласно источнику [10], для чистого водорода составляет 120 МДж/кг), МДж/кг; B_{T} – расход потребляемого мини-ТЭЦ топлива, кг/с; Q_{H}^{p} – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

На рис. 5 представлены зависимость КИТ для схемы мини-ТЭЦ на МВТ с работающим модулем термохимического цикла производства водорода, определенный по (4), а также КИТ для стандартной схемы мини-ТЭЦ без него от температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Максимальная величина КИТ в первом случае составила 83,1 %, во втором – 90,9 %.

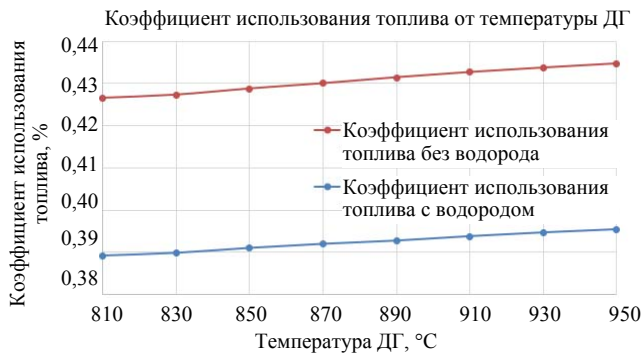


Рис. 5. Сравнение эффективности исследуемой системы мини-ТЭЦ с исходным аналогом

Fig. 5. Comparison of the efficiency of the mini-CHP system under study with the reference analog

На рис. 6 представлены структура КИТ обоих сравниваемых вариантов через тепловые и электрические абсолютные коэффициенты полезного действия (КПД), а также КПД генерации водорода для исследуемой схемы от температуры дымовых газов на выходе из топки котла.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что строительство мини-ТЭЦ, использующей в качестве топлива МВТ, с интегрированным модулем для постоянного производства водорода термохимическим способом, который в дальнейшем сжигается в чистом виде, способствует решению задач декарбонизации экономики, но энергетически менее эффективен, чем мини-ТЭЦ аналогичной мощности без модуля производства водорода. Однако данная технология может быть использована для балансирования графика потребления тепловой и электрической энергии в районе размещения электростанции.

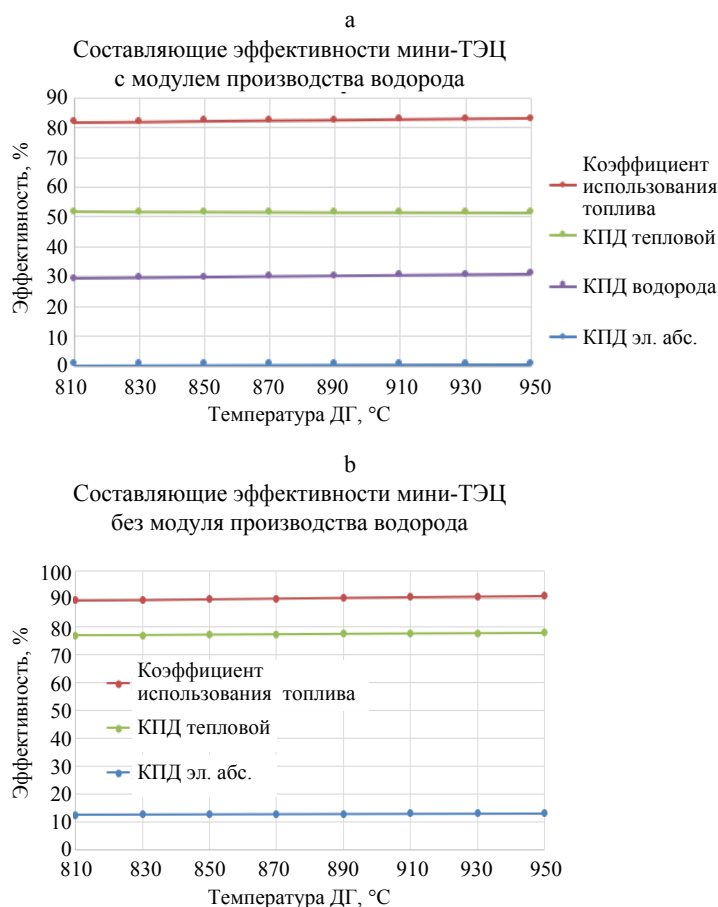


Рис. 6. Сравнение структур коэффициентов использования топлива для исследуемой системы мини-ТЭЦ и исходного аналога: а – составляющие энергетической эффективности в схеме с модулем производства водорода от температуры продуктов сгорания; б – составляющие энергетической эффективности в схеме без модуля производства водорода от температуры продуктов сгорания

Fig. 6. Comparison of the structures of the fuel utilization coefficients for the system of the mini-CHP under study and the reference analogue: а – components of energy efficiency in a scheme with a hydrogen production module on the temperature of combustion products; б – components of energy efficiency in the scheme without a hydrogen production module on the temperature of combustion products

Так, во время пиков графика потребления электрической энергии в энергосистеме мини-ТЭЦ может включать реверс электроэнергии из электросети, которая расходуется на производство водорода, при этом собственная выработка электроэнергии может регулироваться в диапазоне от 10 до 100 % установленной мощности практически без изменения эффективности ее выработки в зависимости от мощности потребляемого потока электроэнергии извне. Суточный баланс производства и потребления теплоты в этом случае необходимо осуществлять применением аккумуляторов теплоты.

Получаемый водород может быть накоплен и использован как для продажи, в том числе подачи в существующую газораспределительную сеть

природного газа в объеме до 10 % расхода последнего [5, 29], так и для собственных нужд непосредственного сжигания в газовых котлах или в транспортных, или стационарных топливных элементах. Наибольшая эффективность при внедрении технологии термохимического производства водорода на мини-ТЭЦ будет достигнута при наличии непосредственного потребителя водорода, благодаря более высокой эффективности производства водорода по сравнению с технологиями электролиза. Примерами потребителей водорода могут быть металлургические предприятия, как отмечалось в работе [20], либо предприятия химической промышленности. Поэтому следующим шагом по использованию водорода в собственных целях с решением экологической задачи является производство «зеленого» природного газа путем объединения представленной в статье технологии производства водорода и технологии извлечения диоксида углерода из дымовых газов мини-ТЭЦ на МВТ [30].

Следует отметить, что успешная реализация разработанного технического решения во многом опирается на моделирование процессов теплопереноса и гидродинамики с помощью программного комплекса *Aspen Hysys*, что, несомненно, лежит в русле применения технологии цифровых двойников и актуально в рамках развития цифровой экономики в целом и при создании автоматизированных систем управления теплоснабжения в частности [31, 32].

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования синтезирована оригинальная принципиальная схема топливно-регенеративного цикла для мини-ТЭЦ с паросиловой ОРЦ-установкой, работающей на МВТ и отличающейся включением в состав пятиступенчатого гибридного термохимического цикла медь-хлор Cu-Cl, что позволило получить дополнительную опцию – генерацию водорода с производительностью, соответствующей электрической мощности энергоблока. Для анализа эффективности данного технического решения разработана математическая модель на базе программного продукта *Aspen Hysys*. При построении модели были использованы основные термохимические свойства компонентов реакций гибридного термохимического цикла производства водорода Cu-Cl и термодинамические условия протекания термохимических реакций, приведенные в открытых литературных источниках.

2. Выполнено численное исследование и анализ энергетической эффективности топливно-регенеративного паросилового блока с циклом ОРЦ в зависимости от температуры продуктов сгорания МВТ на выходе из топki, находящейся в диапазоне 850–950 °C для среднего состава древесной щепы влажностью 40–50 %. Полученные результаты позволяют утверждать, что общий коэффициент использования топлива для синтезированной схемы составляет 82,5±1 % при тепловом КПД 51,5±1 % и эффективности производства водорода по низшей теплоте сгорания 31±2 %. Для справки: в исследованном диапазоне температур коэффициент использования топлива мини-ТЭЦ на МВТ с циклом ОРЦ без модуля производства водорода составляет 89,3–90,9 %, а электрический КПД – 13 %. Удельный расход электрической энергии генерации водорода у топливно-

регенеративного паросилового энергоблока ОРЦ мини-ТЭЦ на МВт по результатам численного анализа составляет $9,1 \pm 0,1$ (кВт·ч)/кг, что более чем в пять раз меньше, чем для установок на основе технологий щелочного электролиза, электролиза на протонообменной мембране и электролиза на твердых оксидах.

3. Ввиду перспективности применения представленного метода производства водорода дальнейшее исследование предполагает изучение гибкости топливно-регенеративного паросилового энергоблока на МВт с циклом ОРЦ в условиях работы в энергосистеме и возможности ее функционирования в соответствии с требованиями тепловых потребителей и электрического графика нагрузок энергосистемы, в том числе с использованием реверса электроэнергии в часы максимумов и минимумов суточных графиков потребления электроэнергии. Дальнейшее исследование предполагает также последующее изучение технологии производства «зеленого» природного газа для мини-ТЭЦ на МВт путем метанирования полученного в термохимическом цикле водорода, а также рассмотрение отличительных особенностей работы топливно-регенеративного паросилового блока с циклом ОРЦ на фрезерном топливе и при утилизации органических, промышленных и бытовых отходов.

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор T22УЗБ-052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Парижское климатическое соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 09.11.2022.
2. Maradin, D. Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization / D. Maradin // International Journal of Energy Economics and Policy. 2021. Vol. 11, № 3. P. 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.11027>.
3. A review of Four Case Studies Assessing the Potential for Hydrogen Penetration of the Future Energy System / A. Chapman [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, № 13. С. 6371–6382. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.168>.
4. Hydrogen and the Decarbonization of the Energy System in Europe in 2050: A detailed Model-Based Analysis / G. S. Seck [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>.
5. 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.
6. Седнин, В. А. Прогнозная оценка себестоимости водорода в разрезе различных технологий производства / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Киев, 2021. С. 190–194.
7. Аминов, Р. З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов. М.: Наука, 2016. 254 с.
8. Rosen, M. A. Advances in Hydrogen Production by Thermochemical Water Decomposition: A Review / M. A. Rosen // Energy. 2010. Vol. 35 № 2, 1068–1076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.018>.
9. Романюк, В. Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2015. № 6 (87). С. 3–7.
10. 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>.
11. Nuclear-Based Hydrogen Production with a Thermochemical Copper-Chlorine Cycle and Supercritical Water Reactor: Equipment Scale-Up and Process Simulation / M. A. Rosen [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2010. Vol. 36(4), P. 456–465. <https://doi.org/10.1002/er.1702.3>.
 12. Жизнин, С. З. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России / С. З. Жизнин, В. М. Тимохов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. 2020. № 1–6. С. 40–59.
 13. Лесной фонд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/>. Дата доступа: 31.10.2022.
 14. Zamfirescu, C. Thermophysical Properties of Copper Compounds in Copper–Chlorine Thermochemical Water Splitting Cycles / C. Zamfirescu, I. Dincer, G. F. Naterer // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. № 10. P. 4839–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.101>.
 15. HSC Chemistry Software [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.mogroup.com/portfolio/hsc-chemistry>. Date of access: 12.12.2022.
 16. 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. С. 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>.
 17. 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>.
 18. Future Hydrogen Production Using Nuclear Reactors / R. R. Sadhankar [et al.] // 2006 IEEE EIC Climate Change Conference. IEEE, 2006. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277205>.
 19. Sadhankar, R. R. Leveraging Nuclear Research to Support Hydrogen Economy / R. R. Sadhankar // *International Journal of Energy Research*. 2007. Vol. 31, No 12. P. 1131–1141. <https://doi.org/10.1002/er.1324>.
 20. 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>.
 21. Balta, M. T. Energy and Exergy Analyses of Magnesium-Chlorine (Mg-Cl) Thermochemical Cycle / M. T. Balta, I. Dincer, A. Hepbasli // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. No 6. P. 4855–4862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.044>.
 22. Lewis, M. A. Evaluation of Alternative Thermochemical Cycles, Part I: The Methodology / M. A. Lewis, J. G. Masin, P. A. O'Hare // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, No 9. P. 4115–4124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.045>.
 23. High efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Solar Thermo-chemical Splitting of Water (Solar Thermo-Chemical Splitting for H₂) [Electronic Resource]: Annual Report for the Period October 1, 2003 through September 30, 2004: GA-A24972 / B. W. McQuillan [et al.]. General Atomics, 2010. Mode of access: <https://kurl.ru/zjoIW>.
 24. Иванов, М. Г. Свойства металлов [Электронный ресурс] / М. Г. Иванов, А. В. Нечаев. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2274742/svoystva-metallov-m.g.-ivanov%E2%80%94a.v.-nechaev-uchebnoe-e-lektr>.
 25. Engineering Process Model for High-Temperature Steam Electrolysis System Performance Evaluation [Electronic Resource]: AIChE 2005 Annual Meeting / Stoots C. M. [et al.]. Idaho National Laboratory, 2005. Mode of access: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc886919/>.
 26. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова [и др.]. М.: Энергия, 1973. 296 с.
 27. Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal [Electronic Resource]. 2020. Mode of access: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
 28. Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments / M. Chatenet [et al.] // *Chemical Society Reviews*. 2022. Vol. 51, No 11. P. 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
 29. Sednin, V. A. Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants / V. A. Sednin, A. V. Sednin, A. A. Matsyavin. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Vol. 66, № 2, 158–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168>.

30. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
31. Седнин, В. А. Интеграционные тенденции в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Энергоэффективность. 2021. № 6. С. 23–27.
32. Sednin, A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. Р. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

Поступила 10.11.2022 Подписана в печать 11.01.2023 Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. *Paris Climate Agreement*. Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru> (accessed 09 November 2022) (in Russian).
2. Maradin D. (2021) Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources. *Utilization. International Journal of Energy Economics and Policy*, 11 (3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11027>.
3. Chapman A., Itaoka K., Hirose K., Davidson F. T., Nagasawa K., Lloyd A. C. [et al.] (2019) A Review of Four Case Studies Assessing the Potential for Hydrogen Penetration of the Future Energy System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (13), 6371–6382. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.168>.
4. Seck G. S., Hache E., Sabathier J., Guedes F., Reigstad G. A., Straus J. [et al.] (2022) Hydrogen and the Decarbonization of the Energy System in Europe in 2050: A Detailed Model-Based Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>.
5. 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).
6. Sednin V. A., Abrazovsky A. A. (2021) Predictive Estimation of the Cost of Hydrogen in the Context of Various Production Technologies. *Problemy Ekologii i Eksploatatsii Ob'ektov Energetiki [Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities]*. Kyiv, 190–194 (in Russian).
7. Aminov R. Z., Bayramov A. N. (2016) *Combining Hydrogen Energy Cycles with Nuclear Power Plants*. Moscow, Nauka Publ. 254 (in Russian).
8. Rosen M. A. (2010) Advances in Hydrogen Production by Thermochemical Water Decomposition: A Review. *Energy*, 35 (2), 1068–1076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.018>.
9. Romanyuk V. N., Babich A. A. (2015) On the Issue of Diversification of Options for Regulating the Generation Capacity of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (6), 3–7 (In Russian).
10. 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>.
11. Rosen M. A., Naterer G. F., Chukwu C. C. Sadhankar R., Suppiah S. (2010) Nuclear-Based Hydrogen Production with a Thermochemical Copper-Chlorine Cycle and Supercritical Water Reactor: Equipment Scale-Up and Process Simulation. *International Journal of Energy Research*, 36 (4), 456–465. <https://doi.org/10.1002/er.1702.3>.
12. Zhiznin S. Z., Timokhov V. M. (2020) Economic Aspects of Nuclear and Hydrogen Energy Development in the World and Russia. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, (1–6), 40–59 (in Russian).
13. *Forest Fund*. Available at: <https://mlh.by/our-main-activites/forestry/forests> (accessed 31 October 2022) (in Russian).
14. Zamfirescu C., Dincer I., Naterer G. F. (2010) Thermophysical Properties of Copper Compounds in Copper–Chlorine Thermochemical Water Splitting Cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (10), 4839–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.101>.
15. *HSC Chemistry Software*. Available at: <https://www.mogroup.com/portfolio/hsc-chemistry>. (accessed 12 December 2022).

16. 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>.
17. 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>.
18. Sadhankar R. R., Li J., Li H., Ryland D. K., Suppiah S. (2006) Future Hydrogen Production Using Nuclear Reactors. *2006 IEEE EIC Climate Change Conference*. IEEE, 1–9. <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277205>.
19. Sadhankar R. R. (2007) Leveraging Nuclear Research to Support Hydrogen Economy. *International Journal of Energy Research*, 31 (12), 1131–1141. <https://doi.org/10.1002/er.1324>.
20. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142> (in Russian).
21. Balta M. T., Dincer I., Hepbasli A. (2012) Energy and Exergy Analyses of Magnesium-Chlorine (Mg-Cl) Thermochemical Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (6), 4855–4862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.044>.
22. Lewis M. A., Masin J. G., O'Hare P. A. (2009) Evaluation of Alternative Thermochemical Cycles, Part I: The Methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (9), 4115–4124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.045>.
23. McQuillan B. W., Brown L. C., Besenbruch G. E., Tolman R., Cramer T., Russ B. E. [et al.] (2010) *High efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Solar Thermo-Chemical Splitting of Water (Solar Thermo-Chemical Splitting for H₂)*. Annual Report for the Period October 1, 2003 Through September 30, 2004: GA-A24972. General Atomics. Available at: <https://kurl.ru/zjoIW>.
24. Ivanov M. G., Nechaev A. V. (2014) *Properties of Metals*. Yekaterinburg, Ural University Publ. Available at: <https://studlib.ru/doc/2274742/svoystva-metallov-m.g.-ivanov%E2%80%9494a.v.-nechaev-uchebnoe-e-lektr> (in Russian).
25. Stoots C. M., O'Brien J. E., McKellar M. G., Hawkes G. L. (2005) *Engineering Process Model for High-Temperature Steam Electrolysis System Performance Evaluation: AIChE 2005 Annual Meeting*. Idaho National Laboratory. Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc886919/>.
26. Kuznetsov N. V., Mitor V. V., Dubovskii I. E., Karasina E. S., Rubin M. M., Blokh A. G. [et al.] (1973) *Thermal Calculation of Boiler Units (Normative Method)*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
27. *Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal* (2020). Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
28. Chatenet M., Pollet B. G., Dekel D. R., Dionigi F., Deseure J., Millet P. (2022) Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments. *Chemical Society Reviews*, 51 (11), 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
29. Sednin V. A., Sednin A. V., Matsyavin A. A. (2023) Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 158–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168>.
30. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538> (in Russian).
31. Sednin V. A., Sednin A. V. (2021) Integration Trends in Heat Supply Systems. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 23–27 (in Russian).
32. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.