

ХРАНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ В ЗАМЕНИТЕЛЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА*

Дж. Спаццафумо

³Кафедра гражданского машиностроения, Университет Кассино и Южного Лацио
д. 43, Виа-Гаэтано-ди-Биасио, I-03043 Кассино, Италия
тел.: +39 0585 52761; e-mail: spazzafumo@unicas.it.

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.067-075

Заключение совета рецензентов: 07.06.18 Заключение совета экспертов: 15.06.18 Принято к публикации: 25.06.18

Предлагается способ получения ценной электрической энергии и ценного топлива, начиная с возобновляемой электрической энергии, а также биомассы и / или отходов. Биомассу / биотопливо можно сжигать с помощью электролитического кислорода для выработки электроэнергии. Газовые турбины или двигатели внутреннего сгорания подходят для такой задачи, но существует проблема очень высокой температуры, связанной с кислородным сгоранием. В случае газовой турбины температуру на входе можно регулировать путем добавления пара и / или диоксида углерода, тогда как в случае двигателей внутреннего сгорания можно использовать только диоксид углерода. Таким образом отработавший газ продолжает образовываться углекислым газом и паром, которые легко могут быть разделены путем конденсации. Двуокись углерода подается в процесс Сабатье вместе с электролитическим водородом для получения газа с характеристиками, аналогичными природному газу. Несмотря на то что электролитический водород можно использовать непосредственно как в двигателях внутреннего сгорания, так и в топливных элементах, значительные проблемы с распределением водорода и хранением на борту все еще существуют. Поэтому заменитель природного газа может стать реальным промежуточным решением для краткосрочного / среднесрочного периода. Было проведено моделирование и установлено, что эффективность варьируется от 0,52 до 0,58.

Ключевые слова: возобновляемая электроэнергия; хранение энергии; электролиз; биомасса; устойчивый заменитель природного газа.

STORING RENEWABLE ENERGIES IN A SUBSTITUTE OF NATURAL GAS

G. Spazzafumo

³Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and Southern Lazio
Via G. Di Biasio 43, I-03043 Cassino, Italy
tel.: +39 0585 52761; e-mail: spazzafumo@unicas.it.

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.067-075

Referred 7 June 2018 Received in revised form 15 June 2018 Accepted 25 June 2018

This paper proposes a way to obtain valuable electric power and valuable fuel starting from renewable variable electric power plus biomass and/or waste products. Biomass/biofuel can be oxyburned using electrolytic oxygen to generate electric power. Gas turbines or internal combustion engines are suitable to such a task, but there is the problem of very high temperatures connected to oxy combustion. In the case of gas turbine the inlet temperature could be controlled by adding steam and/or carbon dioxide, while in the case of internal combustion engines only carbon dioxide could be used. In such a way the exhaust gas continues to be formed by carbon dioxide and steam which can be

* Спаццафумо Дж. Хранение возобновляемой энергии в заменителе природного газа // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;01-03:67-75.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy, 2016;41:19492-19498; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.209>
Copyright © 2016, Hydrogen Energy Publications, LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

easily separated by condensation. Carbon dioxide is fed to a Sabatier process together with electrolytic hydrogen to generate a gas with characteristics similar to natural gas. Although electrolytic hydrogen could be used directly both in internal combustion engines and fuel cells, significant problems to hydrogen distribution and on-board storing still exists. Therefore the substitute of natural gas could be a real bridge solution for the short/medium term. A simulation has been carried out and the resulting efficiencies range from 0.52 to 0.58.

Keywords: renewable electric power; energy storage; electrolysis; biomass; sustainable natural gas substitute.



Джузеппе Спаццафумо
Giuseppe Spazzafumo

Информация об авторе: доктор наук; доцент Университета Кассино и Южного Лацио; координатор международных симпозиумов HYPOTHESIS («Теоретические и технические решения по водородной энергетике»); член совета директоров IAHE (Международная ассоциация водородной энергетике); президент отдела энергетических систем IAHE.

Награды: награда имени Рудольфа А. Эррена от Международной ассоциации водородной энергетике (2018 г.).

Образование: Университет Пизы (Италия); докторская степень по энергетике (Университет Пизы, Италия).

Область научных интересов: водородные энергетические системы; системы топливных элементов; возобновляемые источники энергии; хранение энергии; преобразование электроэнергии в топливо; оценка жизненного цикла.

Публикации: более 80, опубликованных в международных журналах и в материалах конференций; одна книга (Бент Соренсен и Джузеппе Спаццафумо «Водород и топливные элементы»).

Information about the author: Ph.D.; Associate Professor at University of Cassino and Southern Lazio; Coordinator of HYPOTHESIS (Hydrogen Power Theoretical and Engineering Solutions International Symposium) Series; Member of the Board of Directors of IAHE (International Association for Hydrogen Energy); President of IAHE Hydrogen Energy Systems Division.

Awards: the Rudolph A. Erren Award from the International Association for Hydrogen Energy, 2018.

Education: graduate in mechanical engineering (University of Pisa, Italy) and doctorate in energy engineering (University of Pisa, Italy).

Research interests: hydrogen energy systems; fuel cell systems; renewable energy sources; energy storage; power to fuel; life cycle assessment.

Publications: more than 80 papers published on international journals and conference proceedings; one book (Bent Sørensen and Giuseppe Spazzafumo “Hydrogen and Fuel Cells”).

1. Введение

В Италии и, возможно, в других странах распространение систем, основанных на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), было неправильно спланировано. Результатом стало то, что выработка электроэнергии на русловой гидроэлектростанции, ветровой и особенно фотоэлектрической станциях иногда превышает потребности в энергосистеме, а система хранения энергии еще не реализована. Следствием этого является то, что цена на электроэнергию падает, и некоторые электростанции с комбинированным циклом, работающие на природном газе (NG), могут быть закрыты, потому что их эксплуатация дороже эксплуатации угольных электростанций, которые гораздо больше загрязняют окружающую среду. Это снижает экологические выгоды от распространения ВИЭ.

Кроме того, ВИЭ имеют нерегулярный характер, а стабильность сети ограничивает количество потребляемой электроэнергии.

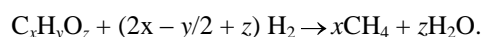
Третья проблема заключается в том, что в настоящее время все ВИЭ, за исключением биомассы, преобразуются в электроэнергию, в то время как в большинстве стран конечное использование энергии в значительной степени определяется топливом (обычно > 75 %), которое используется для транс-

портировки: по суше, морю и воздуху для отопления, приготовления пищи и промышленных процессов.

Наконец, можно отметить, что даже биомасса (и отходы) часто используется для производства электроэнергии. Это связано с тем, что биомасса первоначально превращается в газ, характеризующийся низкой теплотворной способностью, поэтому такой газ не подходит для распределения в качестве топлива и сжигается на месте для выработки тепла или электроэнергии.

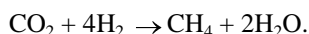
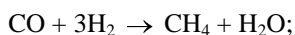
Электролитический водород, безусловно, может стать долгосрочным решением для хранения электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ. К сожалению, в настоящее время все еще существуют критические аспекты в хранении и распределении самого водорода, особенно когда его рассматривают как чистое топливо для городского транспорта.

Вначале ископаемое топливо было биомассой. То, что сделало его энергетически ценным, – постепенное сокращение кислорода, который в процентах обогащал это топливо углеродом. Такое изменение потребовало миллионов лет и особых термодинамических условий, но водород может таким же образом повлиять на биомассу гораздо быстрее, потому что способен удалить из нее кислород:



Это то, что непосредственно происходит в теоретических условиях, если подвергнуть биомассу гидрогазификации.

Однако это опосредованно происходит и в других процессах. Например, когда биомасса или влажная фракция отходов подвергаются анаэробному сбраживанию с последующим метанированием водородом. В этом случае углерод сначала превращается в метан и оксиды углерода, а затем оксиды углерода тоже превращаются в метан:



В реальных условиях такие реакции являются неполными, но можно подтолкнуть их к высокому уровню развития путем подачи сверхстехиометрического водорода. В результате после конденсации пара и отделения воды получается газ, очень богатый метаном и содержащий остаточное количество водорода, в то время как оксиды углерода практически полностью отсутствуют. В связи с этим такой газ имеет характеристики, очень похожие на характеристики природного газа, и его можно распределять, хранить и использовать точно так же, как используется природный газ. Фактически возможность распределения водорода до концентрации 20 % по трубопроводу NG уже была доказана [1], и такую смесь можно использовать непосредственно в двигателях внутреннего сгорания, что приводит к повышению производительности [2]. Такое решение может быть очень интересным, особенно для развивающихся стран, которые не имеют ископаемых ресурсов, но имеют большие объемы технически доступных биомассы и других ВИЭ. Типичным примером может служить Коста-Рика [3].

Таким образом, соединение излишков электрической энергии от ВИЭ в качестве источника водорода с биомассой или отходами в качестве источника углерода может позволить накапливать энергию из ВИЭ наилучшим образом, насколько это возможно для нынешней энергетической системы, то есть как химическую энергию уже широко используемого топлива.

Другая возможность состоит в том, чтобы генерировать электроэнергию для сети до производства заменителя NG (SNG). Это означает, что сгорание должно осуществляться в присутствии кислорода, а не воздуха. Однако это не является проблемой, поскольку электролиз также генерирует кислород, и количество доступного кислорода превышает потребность в сжигании. Излишки кислорода могут быть направлены в промышленный сектор или больницы. С этой точки зрения, можно было бы получить смесь чистого топлива и стабильной электрической энергии, близкую к фактическим местным требованиям.

Использование электролитического кислорода позволяет после очистки газа получить продукт сгорания, содержащий только диоксид углерода и пар, которые легко отделяются при конденсации. Затем диоксид углерода используется вместе с электролитическим водородом в качестве реагента для реакции Сабатье (например, [4]).

Тот же самый процесс может быть реализован и с помощью ископаемого топлива, в частности, угля в качестве источника углерода [5–7] или, наконец, путем смешивания угля, биомассы и отходов в качестве источника углерода.

Кислород, получаемый электролизом, превышает количество, которое необходимо для процесса, и, следовательно, может продаваться для других применений, требующих особой чистоты.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
η	Эффективность
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>E</i>	Энергия
<i>Q</i>	Количество теплоты
<i>Индексы нижние</i>	
<i>cog</i>	Когенерация
<i>ch</i>	Химическая
<i>el</i>	Электрическая
<i>sys</i>	Система
<i>Аббревиатуры</i>	
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
BTC	Высшая теплотворная способность
NG	Природный газ (Natural Gas)
POx	Частичное окисление
SNG	Синтетический природный газ (Synthetic Natural Gas)

2. Системные компоновки и моделирование

Были исследованы две возможные компоновки системы: первая основана на газовой турбине, а вторая – на двигателе внутреннего сгорания.

В обоих случаях основные проблемы заключаются в увеличении скорости пламени и очень высокой температуре, получаемой при кислородном сгорании, а также в необходимости добавления разбавителя, способного заменить азот воздуха: конечными



продуктами должны быть только вода и углекислый газ – два уникальных кандидата, хотя они и не являются разбавителями, то есть они способны снизить температуру, но при этом могут препятствовать сгоранию.

Добавление пара в газотурбинную установку является уже разработанной технологией – STIG (Steam Injected Gas). В этом случае, однако, требуемый поток пара может быть очень высоким. Кроме того, можно добавлять как пар, так и углекислый газ. Два крайних случая (только пар или только диоксид

углерода) были проанализированы и идентифицированы как ST и GT.

В случае двигателей внутреннего сгорания невозможно добавить большое количество пара, поэтому добавление углекислого газа является единственным разумным решением, и было идентифицировано как ICE.

Начиная с лигноцеллюлозной биомассы (табл. 1) и электролитического водорода и кислорода, было проведено моделирование с помощью термодинамического программного обеспечения (AspenONE® v8.4).

Состав биомассы (вес %)

Таблица 1

Biomass composition (weight %)

Table 1

H ₂ O	Ash	C	H	N	O	FC	VM
20	0,24	40,32	4,88	0,08	34,48	14,89	64,87

На рис. 1 представлена упрощенная схема общей компоновки. Поток кислорода, поступающий из электролизера, подается в газификатор биомассы, который осуществляет частичное окисление (POX) биомассы. Поскольку предполагается, что электролиз проводится при 30 бар, реактор POX работает при таком же давлении и подает топливо в газовую турбину или в двигатель внутреннего сгорания. Обработка биомассы включает также отделение золы (циклон), в то время как очистная установка не требуется, потому что лигноцеллюлозная биомасса не содержит значительного коли-

чества соединений серы или хлора. Полученный синтез-газ поступает в энергоблок вместе со вторым потоком кислорода и потоком разбавителя, который позволяет контролировать температуру горения. Отработавшие газы из энергоблока практически полностью состоят из пара и углекислого газа, которые повторно сжимаются и отделяются. Сепаратор подает три различных потока: 1) разбавителя, 2) восстановленной воды в электролизер и 3) диоксида углерода в процесс Сабатье. Этот процесс получает также сверхстехиометрический поток водорода для генерации SNG.

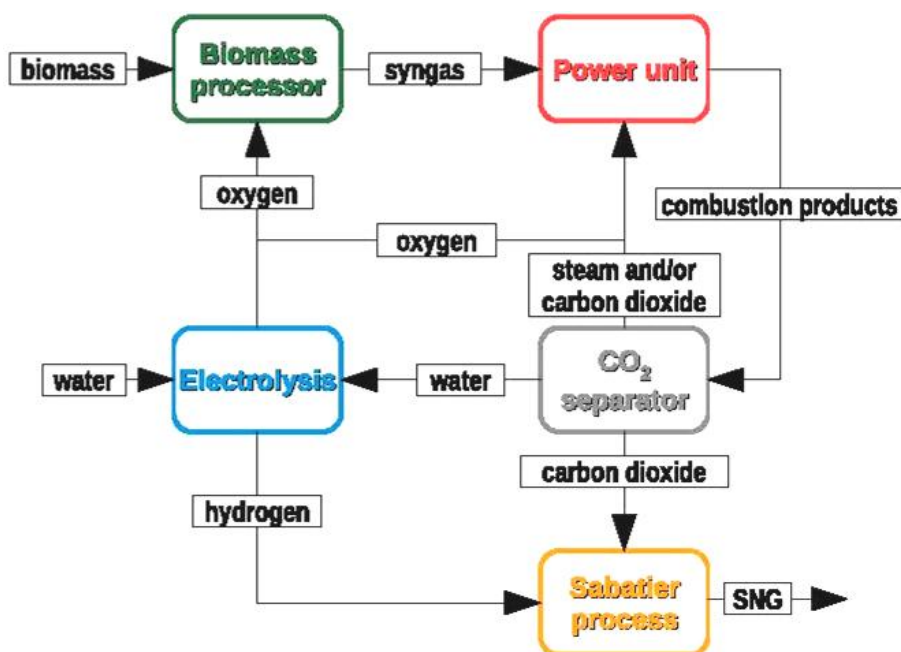


Рис. 1 – Упрощенная схема общей компоновки
Fig. 1 – Simplified schematic of the general layout

Реактор POX, схематически изображенный как комбинация реактора Йельда и реактора Гиббса, и циклон являются общими элементами для всех схем

(рис. 2), так же как часть установки, выделенная для процесса Сабатье (рис. 3).

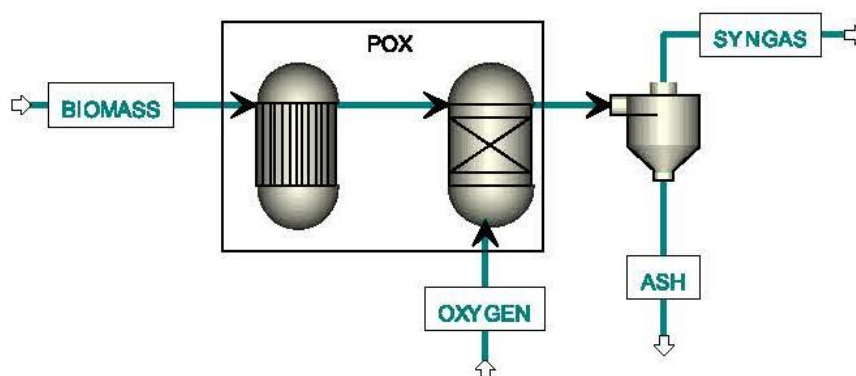


Рис. 2 – Схема обработки биомассы
Fig. 2 – Aspen schematic of the biomass treatment

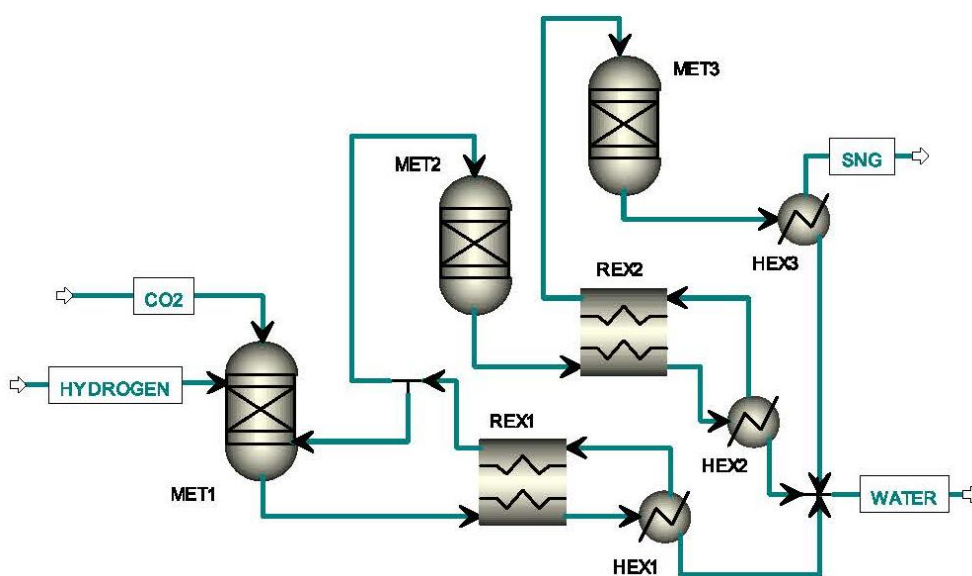


Рис. 3 – Схема процесса Сабатье
Fig. 3 – Aspen schematic of the Sabatier process

Это реализуется с помощью трех блоков. Первый блок состоит из реактора Гиббса (MET1) и двух теплообменников. REX1 – это рекуперативный теплообменник, задача которого заключается в подогреве синтез-газа до 300 °C перед входом в следующий блок. У HEX1 двойная задача: восстановить избыточное тепло и обеспечить частичную конденсацию воды, образующейся в результате реакции Сабатье. Реактор снабжается электролитическим водородом и диоксидом углерода, извлеченным из отработавших газов ниже по потоку от энергоблока. Кроме того, происходит частичная рециркуляция отработанного газа в соответствии с типичной схемой процесса метанирования от Haldor Topsoe [8]. Второй блок практически идентичен первому с реактором Гиббса (MET2), регенеративным теплообменником (REX2) и теплообменником (HEX2), но в нем нет рециркуляции, и реактор питается только синтез-газом, поступающим из первого блока. Наконец,

третий блок получает синтез-газ от второго блока и имеет только реактор Гиббса (MET3) и теплообменник (HEX3) без регенеративного теплообменника.

Часть установок с энергоблоком и с улавливанием углекислого газа отличаются.

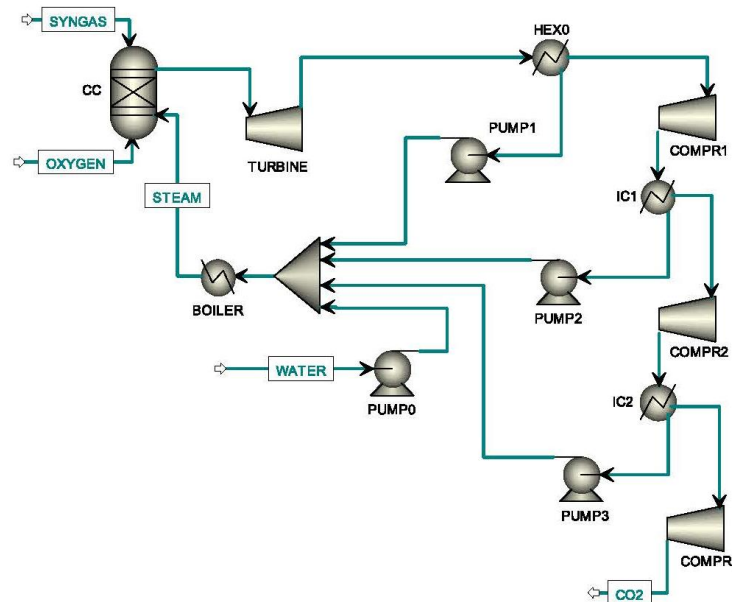
Компоновка ST (рис. 4) требует подачи пара под давлением 30 бар в камеру сгорания (CC) турбины вместе с синтез-газом из циклона и стехиометрическим кислородом. Продукты сгорания расширяются в турбине, а затем охлаждаются в теплообменнике (HEX0). Диоксид углерода отделяется от конденсированной воды и повторно сжимается до 30 бар внутри многоступенчатого компрессора с промежуточным охлаждением, что также способствует снижению остаточного содержания воды. В конце линии сжатия поток диоксида углерода подается в ранее описанный процесс Сабатье. Вода, извлеченная из HEX0 и из промежуточных охладителей (IC1 и IC2),



вместе с внешним потоком воды перекачивается в котел-утилизатор, который получает тепло от HEX0,

HEX1, HEX2 и HEX3 для выработки необходимого пара при 30 бар и 250 °С.

Рис. 4 – Схема компоновки ST
Fig. 4 – Aspen schematic for ST layout



Компоновка GT (рис. 5) отличается от предыдущей тем, что в камеру сгорания поступает не поток пара, а поток углекислого газа, рециркулирующий с последней ступени сжатия.

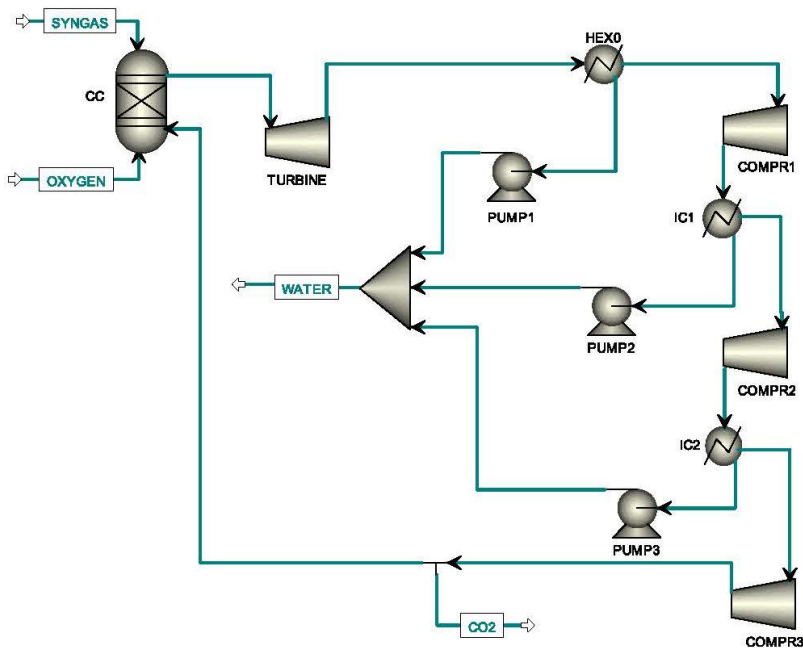


Рис. 5 – Схема компоновки GT
Fig. 5 – Aspen schematic for GT layout

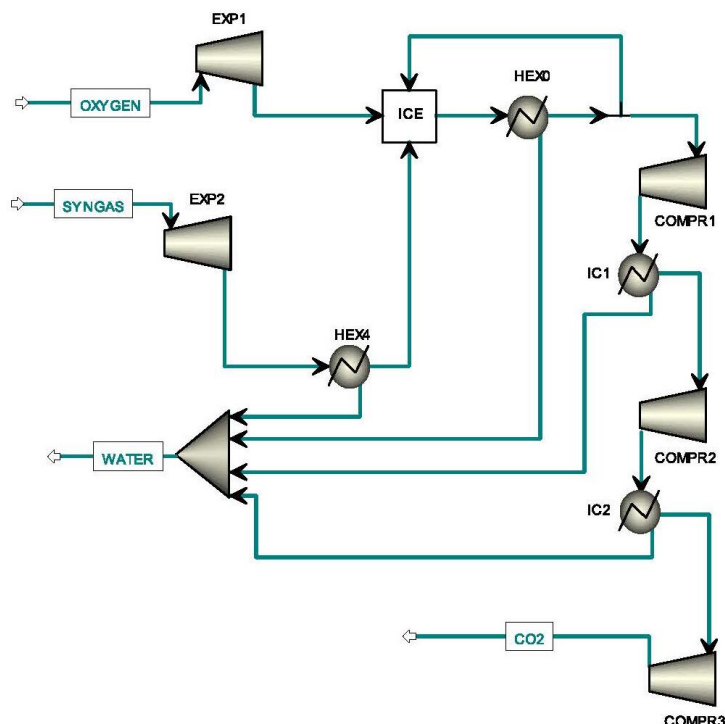
Такая концепция похожа на концепцию цикла Матанга [9]. Отделенная вода не используется напрямую, но может быть подана в электролизер вместе с водой, полученной в процессе Сабатье.

Наконец, схема ICE показана на рис. 6.

Предполагается, что ICE будет безнаддувным двигателем, даже при возможности подачи синтез-газа и кислорода при 30 бар. Поэтому механическую работу получают с помощью двух машин расширения (EXP1 и EXP2), а расширенный синтез-газ охла-

ждается в теплообменнике (HEX4). Отработавший газ из ICE охлаждается и частично обезвоживается в другом теплообменнике (HEX0), а затем разделяется на два потока, один из которых напрямую подается в ICE, а другой повторно сжимается и дополнительно обезвоживается в многоступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением, как в предыдущих схемах, для подачи в процесс Сабатье. Также в этом случае вся извлеченная вода может быть подана в электролизер.

Рис. 6 – Схема компоновки ICE
Fig. 6 – Aspen schematic for ICE layout



В табл. 2 приведены основные предположения.

Основные предположения
Basic assumption

Таблица 2
Table 2

Температура окружающей среды	20 °C
Температура на входе в турбину	1 500 °C
Температура пара	300 °C
Эффективность электролиза (HHV)	0,70
КПД насоса	0,70
КПД компрессора	0,80
КПД турбины	0,85
Эффективность ICE	0,32
Тепловые потери ICE	0,20
Электрическая эффективность	0,985

3. Результаты и их обсуждение

Несмотря на то что анализируемые системы подходят для разных значений расхода биомассы, все модели были отнесены к 1 Мг / ч для прямого сравнения. Состав рассматриваемой биомассы приведен в табл. 1, а ее высшая теплотворная способность (ВТС) составляет 14,078 МДж / кг.

Стехиометрический O₂ составляет 9 702 моль/с и должен быть разделен между частичным окислением и сгоранием. Чем больше кислорода подается в реактор POX, тем выше температура, а ВТС синтез-газа уменьшается. На рис. 7 показаны изменения тепловой и химической энергии синтез-газа и его температуры при изменении потока кислорода, подаваемого в POX, а на рис. 8 показано, как варьируется состав газа при изменении потока подаваемого кислорода.

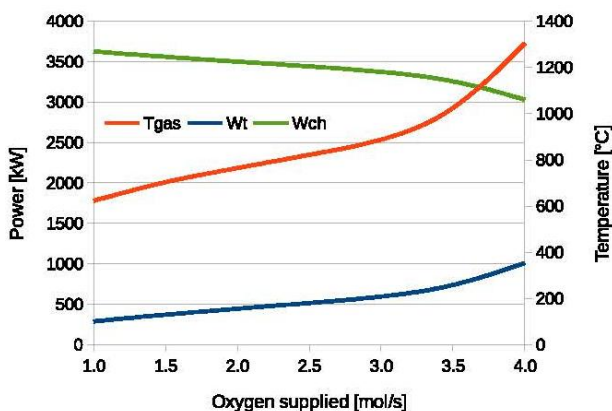


Рис. 7 – Энергия и температура в зависимости от подачи кислорода
Fig. 7 – Power and temperature vs oxygen supplied

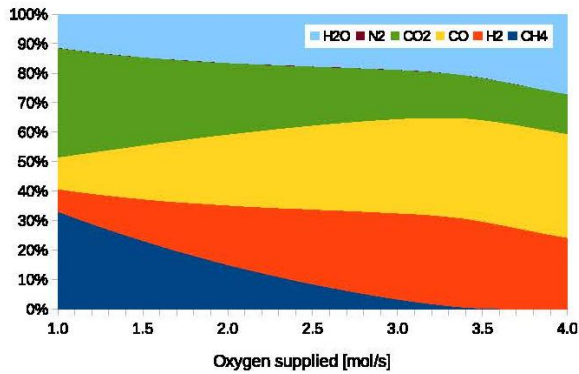


Рис. 8 – Состав синтез-газа в зависимости от подаваемого кислорода
 Fig. 8 – Syngas composition vs oxygen supplied

При низких скоростях подачи кислорода температура довольно низкая – метан и углекислый газ являются основными компонентами синтез-газа. Увеличение доступного кислорода приводит к более высоким температурам, и метан постепенно исчезает, в то время как водород и окись углерода начинают преобладать. Свыше 3 моль/с экзотермичность горения больше не противодействует эндотермичности риформинга метана, и температура начинает быстро расти. Поэтому поток кислорода в 3 моль/с был выбран для подачи в реактор POX с получением синтез-газа при температуре около 890 °C.

Максимальная температура на входе в турбину принята равной 1 500 °C, и для нее требуется поток пара 48,39 моль/с, в результате чего содержание пара в продуктах сгорания выше 86 % по объему. На самом деле это больше похоже на паровую силовую установку, чем на STIG, и может потребоваться турбина особой конструкции. Однако пар при 1 500 °C является газом, и только последние стадии должны расширять пар. Тепло, необходимое для производства пара, составляет 2 484 кВт и поглощает большую часть полезного тепла, извлекаемого из теплообменников. DT в крайней точке составляет 25 °C. Диаграмма тепло-

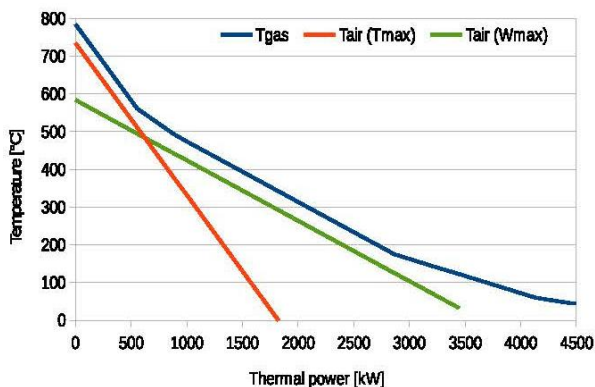


Рис. 10 – Схема теплообмена (GT)
 Fig. 10 – Heat exchange diagram (GT)

обмена, показанная на рис. 9, была получена с накоплением тепла, имеющегося при надлежащей температуре: очевидно, что чистая доступная остаточная теплота (которая не была полностью отражена в диаграмме и составляет более 4 000 кВт) едва ли полезна. Только чуть более 1 000 кВт может быть использовано, например, для добавления второго уровня давления или в качестве источника тепла для органического цикла Ренкина. Приблизительно двойное количество (1 974 кВт при $T > 60$ °C) можно было бы использовать для прямого получения теплой воды.

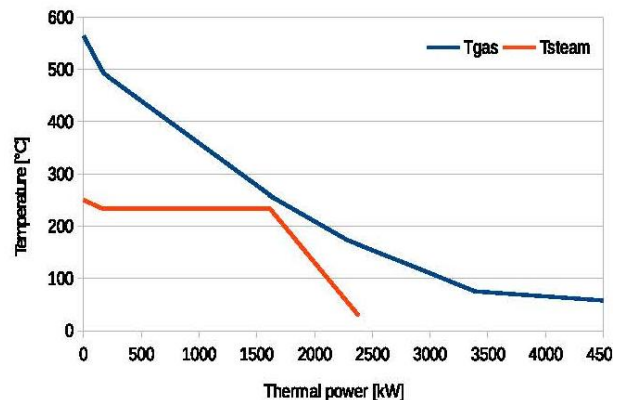


Рис. 9 – Схема теплообмена (ST)
 Fig. 9 – Heat exchange diagram (ST)

В других случаях количество рекуперированного тепла намного выше, потому что пар не производится. Однако, хотя значения температуры подходят для эффективного преобразования в электроэнергию, например, с паровой силовой установкой, размер установки не может обеспечить высокую эффективность. С другой стороны, рассматривая замыкание цикла Брайтона с воздухом, невозможно получить максимальную мощность и максимальную температуру одновременно, как показано на рис. 10 для компоновки GT и на рис. 11 для компоновки ICE.

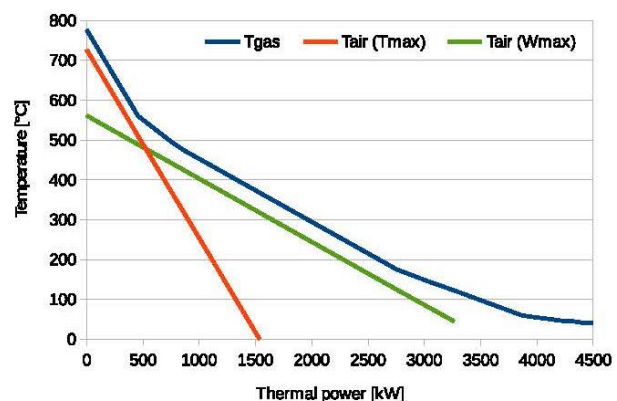


Рис. 11 – Схема теплообмена (ICE)
 Fig. 11 – Heat exchange diagram (ICE)



В табл. 3 представлен энергетический баланс, полученный в результате проведенного моделирования.

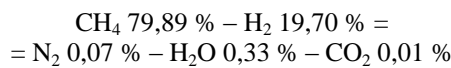
Энергетический баланс
Energy balance

Таблица 3

Table 3

	Unit	ST	GT	ICE
Мощность для электролиза	kW	16 044		
Биомасса (HHV)	kW	3 911		
SNG (HHV)	kW	8 929		9 067
Выработка электроэнергии	kW	2 548	1 417	1 299
Доступное остаточное тепло ($T > 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)	kW	1 974	4 134	3 872
Максимальная температура остаточного тепла	$^{\circ}\text{C}$	164,5	784,5	777
Эффективность когенерации		0,676	0,727	0,714
Эффективность системы		0,575	0,519	0,520

Разница в химической энергии генерируемого SNG зависит от различного количества отделенной воды, что незначительно влияет на конечный состав. А средняя по объему композиция составляет:



с очень небольшими отличиями.

Для сравнения проанализированных схем можно определить две разные эффективности:

– эффективность системы, которая учитывает электрический (E_{el}) и химический (E_{ch}) выходы, поделённые на входы:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{E_{\text{ch,SNG}} + E_{\text{el,produced}}}{E_{\text{ch,biomass}} + E_{\text{el,consumed}}};$$

– эффективность когенерации, которая учитывает также прямое использование извлекаемого тепла (Q), например, для нагрева воды или производства пара:

$$\eta_{\text{cog}} = \frac{E_{\text{ch,SNG}} + E_{\text{el,produced}} + Q_{\text{recovered}}}{E_{\text{ch,biomass}} + E_{\text{el,consumed}}}$$

4. Заключение

Предлагаемая система позволяет преобразовывать низкокачественную входную энергию (уголь, биомасса, отходы, нестабильная электроэнергия) в высококачественную выходную энергию (смеси метан + водород, кислород, стабильная электроэнергия).

С точки зрения количества, эффективность этой системы ниже, чем другой системы накопления энергии (например, гидроаккумулирующих накопительных электростанций), однако она также использует и наращивает использование биомассы. Более того, очень важно, что основной конечный продукт – чистое газообразное топливо, которое в случае замены им бензина позволяет повысить эффективность и снизить выбросы. В связи с этим правильно было бы распространить это сравнение на мировую энергетическую цепочку.

Наконец, когда система будет применена к отходам, появятся дополнительные преимущества.

Это предварительный анализ. Следующими шагами станут: улучшенный анализ компоновки ICE с по-

мощью специального программного обеспечения, анализ альтернативных компоновок, включая дальнейшее восстановление энергии, например, с помощью ORC, и анализ альтернативных компоновок на основе высокотемпературных топливных элементов.

References

- [1] Melaina M.W., Antonia O., Penev M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues. Technical Report NREL/TP-5600-51995. March 2013.
- [2] Akansu S.O., Dulger Z., Kahranman N., Veziroglu N.T. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures. *Int. J. Hydrogen. Energy*, 2004;29:1527–39; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>.
- [3] Roldan C., Spazzafumo G., Zamora J.P. Costa Rica: potential production of renewable methane/hydrogen mixtures for vehicles. In: Proc. Of HYPOTHESIS IX, San José (Costa Rica); December 2011.
- [4] Hoekman S.K., Broch A., Robbins C., Purcell R. CO₂ recycling by reaction with renewably-generated hydrogen. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 2010;4:44–50; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.09.012>.
- [5] Spazzafumo G. South Patagonia: wind/hydrogen/coal system with reduced CO₂ emissions. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013;38:7599–604; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.152>.
- [6] Buceti G., Capobianco D., Spazzafumo G., Tosti S. Wind & coal to generate a substitute of natural gas by hydro-gasification. In: Book of extended abstracts HYPOTHESIS XI, Toledo (Spain); September 2015. Available on: www.hypothesis.ws.
- [7] Buceti G., Capobianco D., Spazzafumo G., Tosti S. Wind & coal to generate a substitute of natural gas using electrolytic hydrogen and oxygen. In: Book of extended abstracts HYPOTHESIS XI, Toledo (Spain); September 2015. Available on: www.hypothesis.ws.
- [8] From solid fuels to substitute natural gas (SNG) using TREMP™. Available on: <https://www.netl.doe.gov>.
- [9] Iantovski E., Ph. Mathieu. Highly efficient zero emission CO₂-based power plant. In: Third intern. conf. on carbon dioxide removal (ICCD-3), Boston; 1996.

