



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ РЕШЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ: НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИТАЛИИ\*

*А. Валенте<sup>1</sup>, Д. Ирибаррен<sup>1\*</sup>, Х. Дюфур<sup>1,2</sup>, Дж. Спаццафумо<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Отдел системного анализа, Институт IMDEA Энергия  
28935, Мостолес, Испания

тел.: +34 (91) 737-11-19, e-mail: diego.iribarren@imdea.org

<sup>2</sup>Кафедра химической и энергетической технологии, ESCET, Университет Рей Хуана Карлоса  
28933, Мостолес, Испания

<sup>3</sup>Кафедра 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.2018.31-36.035-051

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

Пригодность водорода для решения вопроса регулирования энергопотребления на гидроэлектростанции в центральной части Италии оценивается с точки зрения жизненного цикла. Рассматривается производство водорода в непиковые часы посредством электролиза, а также потенциальное хранение водорода в гидридах металлов с последующим использованием водорода в пиковые часы для выработки электроэнергии с помощью технологии топливных элементов. Выработка гидроэлектроэнергии и выработка водорода определяются как подсистемы, в наибольшей степени соответствующие девяти оцененным категориям воздействия (например, глобальное потепление, абиотическое истощение и совокупная потребность в энергии). Получаемый возобновляемый водород демонстрирует более благоприятные экологические и энергетические характеристики в течение жизненного цикла, чем традиционный водород, образующийся при риформинге с водяным паром. Кроме того, при расширении системы с использованием водорода для выработки электроэнергии возобновляемый продукт электроэнергии показывает лучшие параметры жизненного цикла по сравнению с традиционным электричеством для итальянской электрической сети. В целом, с точки зрения жизненного цикла, водород является подходящим энергетическим решением на гидроэлектростанциях как в виде самого водорода (например, для транспортировки), так и в качестве исходного сырья для последующего производства электроэнергии в часы пик.

Ключевые слова: электричество; хранилище энергии; топливная ячейка; оценка жизненного цикла; возобновляемая энергия.

## LIFE-CYCLE PERFORMANCE OF HYDROGEN AS AN ENERGY MANAGEMENT SOLUTION IN HYDROPOWER PLANTS: A CASE STUDY IN CENTRAL ITALY

*Antonio Valente<sup>a</sup>, Diego Iribarren<sup>a\*</sup>, Javier Dufour<sup>a,b</sup>, Giuseppe Spazzafumo<sup>c</sup>*

\* Валенте А., Ирибаррен Д., Дюфур Х., Спаццафумо Дж. Эффективность жизненного цикла водорода в качестве решения регулирования энергопотребления на гидроэлектростанциях: на примере Центральной Италии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;31-36:35-51.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy, 2015;40:16660-16672; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.104>  
Copyright © 2015, Hydrogen Energy Publications, LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.



<sup>a</sup>Systems Analysis Unit, Instituto IMDEA Energy  
28935, Móstoles, Spain

tel.: +34 91 7371119, e-mail: diego.iribarren@imdea.org

<sup>b</sup>Department of Chemical and Energy Technology, ESCET  
Rey Juan Carlos University, 28933, Móstoles, Spain

<sup>c</sup>Department 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.2018.31-36.035-051

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

The suitability of hydrogen as an energy management solution in a run-of-river hydropower plant in Central Italy is evaluated from a life-cycle perspective. Hydrogen production at off-peak hours via electrolysis is considered, as well as potential hydrogen storage in metal hydrides followed by hydrogen use at peak hours for power generation using fuel cell technology. Hydropower generation and hydrogen production are identified as the subsystems contributing most to the nine evaluated impact categories (e.g., global warming, abiotic depletion and cumulative energy demand). The renewable hydrogen produced shows a more favourable life-cycle environmental and energy performance than conventional hydrogen generated via steam methane reforming. Furthermore, when enlarging the system with hydrogen use for power generation, the renewable electricity product shows a better life-cycle profile than conventional electricity for the Italian electrical grid. Overall, under life-cycle aspects, hydrogen is found to be a suitable energy solution in hydropower plants both as a hydrogen product itself (e.g., for transportation) and as a feedstock for subsequent power generation at peak hours.

Keywords: electricity; energy storage; fuel cell; life cycle assessment; renewable energy.



Антонио Валенте  
Antonio Valente

**Сведения об авторе:** магистр, научный сотрудник Института энергетике IMDEA в Мадриде; Секретарь / Казначей Отдела водородных энергетических систем IAHE.

**Образование:** бакалавр и магистр наук в области экологической инженерии (Университет Кассино и Южного Лацио, Италия), в настоящее время аспирант в области промышленных технологий (Университет Рей Хуан Карлос, Мадрид).

**Область научных интересов:** водородные энергетические системы; оценка жизненного цикла; оценка устойчивости жизненного цикла; оценка социального жизненного цикла; возобновляемые источники энергии; хранение энергии; мощность для топлива.

**Публикации:** 9 статей, опубликованных в международных журналах; одна глава книги и 15 материалов конференции.

**Information about the author:** M.Sc.; Researcher at the IMDEA Energy Institute of Madrid; Secretary/Treasurer of IAHE Hydrogen Energy Systems Division.

**Education:** B.Sc. and M.Sc. in environmental engineering (University of Cassino and Southern Lazio, Italy), currently Ph.D. student in Industrial Technologies (University Rey Juan Carlos, Madrid).

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

**Publications:** 9 papers published on international journals one book chapter, and 15 conference contributions.



Диего Ирибаррен  
Diego Iribarren

**Сведения об авторе:** доктор наук, научный сотрудник отдела системного анализа IMDEA Energy (Испания); эксперт по задачам IEA HIA 30 и 36; председатель испанской сети оценки жизненного цикла esLCA.

**Награды:** премия HER Young Scientist 2018 (сквозная опора); Hydrogen Europe Research, ноябрь 2018.

**Образование:** бакалавр в области химического машиностроения (Университет Сантьяго-де-Компостела, Испания, 2005); доктор наук в области химической и экологической инженерии (Университет Сантьяго-де-Компостела, Испания, 2010 г.).

**Область научных интересов:** моделирование энергетических систем; водородная энергия; оценка жизненного цикла; многокритериальный анализ решений; моделирование процесса; возобновляемая энергия; оценка устойчивости.

**Публикации:** более 60 статей, опубликованных в международных журналах, 8 глав книг и более 80 статей для научных конференций.

**Information about the author:** Ph.D.; Researcher in the Systems Analysis Unit of IMDEA Energy (Spain); expert in IEA HIA Tasks 30 and 36; Chair of the Spanish Network for Life Cycle Assessment esLCA.

**Awards:** HER Young Scientist Award 2018 (Cross-Cutting Pillar), Hydrogen Europe Research, November 2018.

**Education:** B.Sc. in Chemical Engineering (University of Santiago de Compostela, Spain, 2005) and Ph.D. in Chemical and Environmental Engineering (University of Santiago de Compostela, Spain, 2010).

**Research interests:** energy systems modelling; hydrogen energy; life cycle assessment; multi-criteria decision analysis; process simulation; renewable energy; sustainability assessment.

**Publications:** more than 60 papers published in international journals, 8 book chapters, and more than 80 contributions to scientific conferences.



Хавьер Дюфур  
Javier Dufour

**Сведения об авторе:** доктор наук, профессор Университета Рей Хуана Карлоса; профессор-исследователь и руководитель отдела системного анализа в энергетическом институте IMDEA; Заместитель председателя Межотраслевых исследований Hydrogen Europe Research; бывший председатель испанской сети оценки жизненного цикла (esLCA); операционный агент задачи 36 «Оценка устойчивости жизненного цикла водородных энергетических систем». Водородное соглашение Международного энергетического агентства. 01/01 / 15-31 / 12/17.

**Образование:** аспирант по химии (Университет Complutense в Мадриде, Испания) и докторская степень по химической инженерии (Университет Complutense, Мадрид, Испания).

**Область научных интересов:** водородные энергетические системы; проектирование, моделирование и оптимизация процессов; моделирование энергии; оценка жизненного цикла.

**Публикации:** более 270 статей, опубликованных в международных журналах и материалах конференций; 8 глав книги.

**Information about the author:** Ph.D.; Full Professor at Rey Juan Carlos University; Research Professor and Head of the Systems Analysis Unit at IMDEA Energy Institute; Vice-chair of Cross Cutting Research Activities of Hydrogen Europe Research; Former Chair of the Spanish Life Cycle Network (esLCA); Operating Agent of Task 36 “Life Cycle Sustainability Assessment of Hydrogen Energy Systems”. Hydrogen Implementing Agreement of International Energy Agency. 01/01/15-31/12/17.

**Education:** Graduate in Chemistry (University Complutense of Madrid, Spain) and Doctorate in Chemical Engineering (University Complutense of Madrid, Spain).

**Research interests:** hydrogen energy systems; process design, simulation and optimization; energy modelling; life cycle assessment.

**Publications:** more than 270 papers published on international journals and conference proceedings; 8 book chapters.



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 энергетики); президент отдела энергетических систем IAHE.

**Награды:** награда имени Рудольфа А. Эррена от Международной ассоциации водородной энергетики (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

Постоянный рост спроса на первичную энергию и уменьшение доступности ископаемого топлива привели к возникновению проблем энергетической безопасности [1]. Кроме того, энергетический сектор по-прежнему в основном зависит от ископаемого топлива, сжигание которого приводит к выбросам парниковых газов (ПГ) [2]. Проблемы безопасности и окружающей среды являются ключевыми факторами исследований в области систем чистой энергии.

Традиционные возобновляемые источники энергии (например, энергия ветра и солнечная энергия) играют ведущую роль в экологизации энергетического сектора. Тем не менее, значительные улучшения (в основном в области управления энергопотреблением)

все еще необходимы для того, чтобы продвигать этот тип возобновляемых источников энергии на пути к устойчивому энергетическому сектору. В этом отношении непостоянство возобновляемых ресурсов (в течение дня и в течение сезонов) является одной из основных проблем, с которыми сталкиваются системы, основанные на энергии ветра и солнца [3–6]. Гидроэнергетика не подвержена изменениям, сопоставимым с вариациями солнечной и ветровой энергии. Однако на русловых гидроэлектростанциях (ГЭС), в которых водохранилище выше по течению недоступно, накопление энергии является ключевой проблемой, когда речь идет об управлении избытком электроэнергии в периоды низкого спроса (непиковые часы). Это также относится к избытку электроэнергии от ветряных и солнечных электростанций.



В этом контексте водород рассматривается как перспективное решение для хранения энергии в системах возобновляемой энергии. Производство экологически чистого водорода из возобновляемых источников, высокое содержание энергии в водороде и тот факт, что единственным побочным продуктом его сжигания является вода, делают эти системы весьма интересными с точки зрения устойчивости [7–9]. В этой статье пригодность водорода для решения вопроса регулирования энергопотребления на русловой

ГЭС оценивается с точки зрения жизненного цикла. Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) – это хорошо разработанная методология для оценки экологических аспектов продукционной системы [10, 11]. ОЖЦ гидроэлектростанции, производящей водород в непиковые часы, проводится для того, чтобы дать представление о реальной пригодности систем на водородной основе как для хранения энергии, так и для последующего использования водорода в энергетических целях.

Список обозначений	
Аббревиатуры	
ГЭС	Гидроэлектростанция
МГЭИК	Межправительственная группа экспертов по изменению климата
ОЖЦ	Оценка жизненного цикла
ПГ	Парниковые газы
ПКМ	Паровая конверсия метана
ФЕ	Функциональная единица

## 2. Материалы и методы

Методология ОЖЦ используется для компиляции и оценки входных данных, результатов и потенциальных воздействий на окружающую среду, связанных с продукционной системой в течение ее жизненного цикла. В исследования ОЖЦ включены четыре этапа [10, 11]: 1) определение цели и области применения; 2) анализ учёта жизненного цикла; 3) оценка воздействия жизненного цикла; 4) интерпретация.

На первом этапе определяются цели и потенциальное применение исследования, а также другие ключевые аспекты, такие как системные границы, функциональная единица (ФЕ), предположения и ограничения. Второй этап сосредоточен на сборе данных, который требует учёта входных и выходных данных исследуемой системы.

Третий этап состоит из трех обязательных шагов: 1) выбор категорий воздействия, индикаторов и моделей характеристик; 2) классификация, то есть связь данных учёта с выбранными категориями воздействия; 3) характеристика, то есть вычисление результатов каждого показателя категории путем преобразования элементов учёта жизненного цикла в общие единицы (с помощью факторов характеристики) и агрегирования преобразованных результатов в одной и той же категории воздействия. Наконец, на этапе интерпретации результаты обобщаются и обсуждаются с целью выявления актуальных проблем и предоставления выводов, рекомендаций

и информации, что способствует процессу принятия решений.

### 2.1. Цель и область применения: система гидро-Н<sub>2</sub>

Цель данной работы – охарактеризовать экологические и энергетические показатели жизненного цикла системы возобновляемой энергии (далее называемой «система гидро-Н<sub>2</sub>»), состоящей из русловой ГЭС, с накоплением энергии в непиковые часы в виде водорода. Кроме того, параметры жизненного цикла полученного водорода (гидро-Н<sub>2</sub>) сравниваются с параметрами обычного (на основе ископаемого топлива) водорода, полученного путем паровой конверсии метана (ПКМ-Н<sub>2</sub>). Наконец, пригодность использования этого возобновляемого водорода для выработки электроэнергии в часы пик также оценивается в соответствии с критериями жизненного цикла по сравнению с обычным электричеством из сети.

Подход полного цикла применяется для ОЖЦ системы гидро-Н<sub>2</sub>, охватывающей потенциальную энергию подводимой воды, путем выработки электроэнергии на ГЭС в русле реки (реальная установка мощностью 7 МВт в Центральной Италии [12]) для производства водорода с помощью электролиза. На рис. 1 показаны основные материальные и энергетические потоки системы, которая разделена на две подсистемы: выработка гидроэлектроэнергии (SS1) и выработка водорода (SS2). Средства производства включены в системные границы.

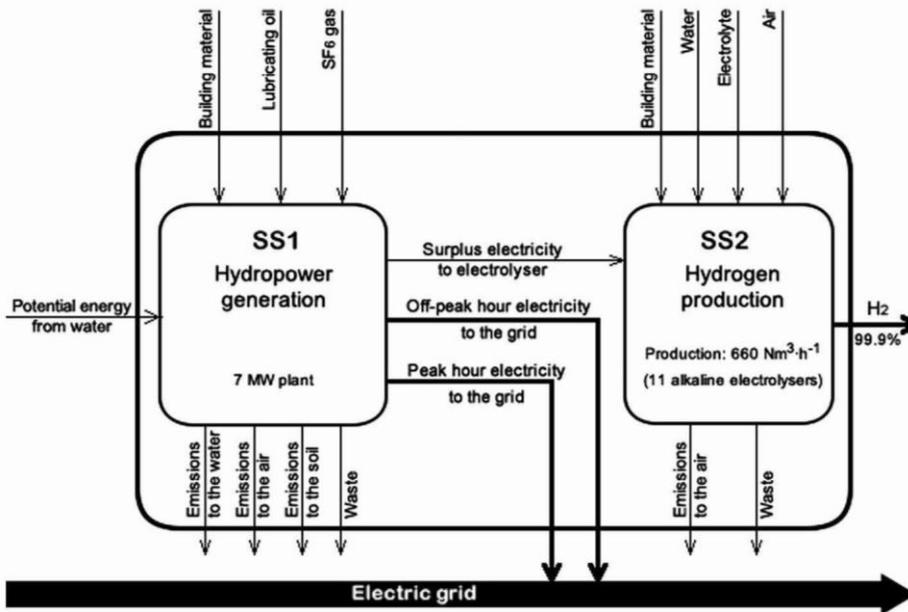


Рис. 1 – Упрощенная схема жизненного цикла системы гидро-Н<sub>2</sub>  
Fig. 1 – Simplified life-cycle flowchart of the hydro-H<sub>2</sub> system

В исследованиях ОЖЦ функциональная единица количественно определяет функцию производственной системы и предоставляет контрольную единицу [10, 11]. Поскольку ключевой функцией системы является обеспечение энергией для коммерциализации, ФЕ этого исследования определяется как 1 МВт · ч товарной энергии, обеспечиваемой всей системой. Это означает, что тематическое исследование оценивается с точки зрения системы, а не с точки зрения (конкретного) продукта.

На рис. 1 энергетические продукты системы гидро-Н<sub>2</sub> соответствуют стрелкам, выделенным жирным шрифтом. Эти продукты включают электричество в часы пик и в непиковое время, подаваемое в сеть, и водород с чистотой 99,9 об.%. Электричество как в часы пик, так и в непиковое время вырабатывается на самой ГЭС (SS1, см. 2.2.), а водород – посредством электролиза за счёт избыточного электричества от ГЭС (см. 2.3.). Следует отметить, что количество электролизеров, используемых для производства водорода в непиковые часы, является не максимальным, а значительно меньшим, скорректированным в соответствии с количеством избыточного электричества (то есть нерыночного электричества, произведенного ГЭС в непиковые часы). Таким образом, только часть электроэнергии, произведенной в непиковые часы (около трети ежегодного рабочего времени ГЭС), используется для производства водорода, а остальная часть предназначена для итальянской электрической сети. Необходимо также отметить, что поток кислорода, поступающий из электролизеров, предполагается выбрасывать в атмосферу, и поэтому он не считается побочным продуктом системы [13].

## 2.2. Гидроэлектроэнергетическая подсистема

Для оценки средней выработки электроэнергии на ГЭС мощностью 7 МВт (SS1) используются дан-

ные о потоках реки, зарегистрированные ближайшей к ГЭС гидрометрической станцией [14]. Имеющаяся потенциальная энергия основана на продолжительности речных потоков, наблюдаемых с января 2003 г. по ноябрь 2011 г. (по личному общению с функциональным центром региона Лацио), и на имеющихся технических данных о ГЭС [12]. Основные потери энергии в стояках [15], турбинах [16] и трансформаторе [17] также основаны на технической информации ГЭС. Поскольку эффективность турбин и заглушек зависит от скорости потока воды, общая эффективность установки также зависит от скорости потока, преобразуемого турбинами. Интегрирование кривой фактической продолжительности мощности, имеющейся на ГЭС, приводит к среднегодовому производству электроэнергии в 29,24 ГВт · ч (из которых 19,01 ГВт · ч ежегодно производится в часы непиковой нагрузки). Это значение соответствует объему производства, заявленному энергетической компанией [12].

Различия между пиковыми и непиковыми часами основаны на кривой почасовой нагрузки для итальянской электрической сети в 2013 г. Предполагается, что в качестве порогового значения требуется 40 ГВт нагрузки при 15,6 непиковых часа в день и 8,4 пиковых часа в день в среднем [18], что соответствует 5 694 часам непиковой нагрузки в год и 3 066 часам пиковой нагрузки в год.

В дополнение к рассмотрению генерации гидроэнергии как подсистемы системы гидро-Н<sub>2</sub>, она также используется в этом исследовании в качестве отдельной базовой системы, чтобы облегчить интерпретацию результатов ОЖЦ с использованием той же ФЕ. Соответственно, базовая система включает в себя только выработку гидроэлектроэнергии и вырабатывает рыночную электроэнергию в часы пик и непиковые часы, а также нерыночную электроэнергию в непиковые часы (то есть избыточную электроэнергию).



### 2.3. Водородная подсистема

Электролиз щелочной воды – это технология, выбранная для гипотетического производства водорода (SS2), исключительно за счет избыточного электричества, вырабатываемого на ГЭС в непиковые часы. Электролиз щелочной воды позволяет получать водород как в малых, так и в больших масштабах с эффективностью 40 ÷ 65 % (в соответствии с более низкой теплотворной способностью водорода) и чистотой выше 99,9 об.% [13, 19]. Рассматриваются коммерческие щелочные электролизеры, в которых в качестве электролита применяется раствор гидроксида калия (30 %) [20]. Для процесса электролиза используется водопроводная вода, которая подвергается обратному осмосу для соответствия требованиям качества электролизеров [20].

В соответствии с техническими характеристиками коммерческого электролизера (максимальная потребляемая мощность 312 кВт, включая все необходимые коммунальные услуги и уровни производства водорода до  $60 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  при 10 бар [20]) и кривой выходной нагрузки на ГЭС в течение одного года, максимальное количество электролизеров может быть использовано при полной нагрузке, что требует всей произведенной непиковой электроэнергии. Тем не менее, эта конфигурация означает, что общее количество электролизеров используется при полной нагрузке только в течение примерно 15 % непиковых часов в год. Это будет иметь негативные экономические последствия из-за высоких капиталовложений.

Следовательно, фактическое количество электролизеров корректируется с учетом количества избыточного электричества, поэтому в SS2 предполагается использовать 11 электролизеров, которые будут работать при полной нагрузке в течение около 45 % непиковых часов в год с максимальной производительностью  $660 \text{ Nm}^3$  чистого водорода в час. Это приведет к ежегодному производству водорода в размере 105 кг за 2,46 долл. США при потреблении  $14,39 \text{ ГВт} \cdot \text{ч}$  избыточного электричества.

### 3. Дальнейшее получение данных

Материальные и энергетические потоки для строительства русловой ГЭС оцениваются на основе базы данных ecoinvent [21, 22]. Что касается работы электростанции (SS1), то объемы смазочного масла, газа SF6 и отходов рассчитываются в соответствии с официальными экологическими данными компании [23] и информацией, предоставленной в ходе интервью с сотрудниками ГЭС. Выбросы SS1 определяются количественно в соответствии с подходами, рекомендованными Dones и др. [22] и Flury и Frischknecht [21]. Испарение воды через поверхность искусственного водоема оценивается с использованием имеющихся климатических данных для территории ГЭС [24] в соответствии с подходом, предложенным Dragoni и Valigi [25]. Основные данные учёта действующей ГЭС в виде отдельной справочной системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные данные учёта ГЭС (ФЕ: 1 МВт · ч товарной энергии)

Table 1

Main inventory data of the hydropower plant (FU: 1 MWh of marketable energy)

На входе			На выходе		
Из техносферы			В техносферу		
Газ SF6 (SS1)	$7,17 \cdot 10^{-5}$	кг	<i>Продукты</i>		
Смазочное масло (SS1)	$1,21 \cdot 10^{-2}$	л	Электричество (SS1)	0,69	МВт
Хромированная сталь (SS1)	$2,94 \cdot 10^{-2}$	кг	Непиковое электричество (SS1)	0,31	МВт
Дизельное топливо, сжигаемое (SS1)	9,61	МДж	Излишки электроэнергии <sup>a</sup> (SS1)	0,97	МВт
Взрывчатые вещества (SS1)	$1,24 \cdot 10^{-3}$	кг	<i>Отходы, подлежащие обработке</i>		
Гравий (SS1)	31,30	кг	Отходы для сжигания (SS1)	0,23	кг
Портландцемент (SS1)	3,68	кг	Металлы для переработки (SS1)	0,11	кг
Армирующая сталь (SS1)	0,29	кг	Бетон для захоронения (SS1)	41,30	кг
Сталь низколегированная (SS1)	0,40	кг	Сталь для захоронения (SS1)	$3,06 \cdot 10^{-2}$	кг
Водопроводная вода (SS1)	1,84	кг	<i>В окружающую среду</i>		
Транспорт, грузовой автомобиль (SS1)	0,75	т · км	<i>Выбросы в воздух</i>		
Медь (SS1)	$1,95 \cdot 10^{-2}$	кг	SF6 (SS1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$	кг
Электричество (SS1)	0,98	МВт	H <sub>2</sub> O (SS1)	54,40	кг
<i>Из окружающей среды</i>			Отработанное тепло (SS1)	3,54	МДж
Вода, используются турбины (SS1)	$3,32 \cdot 10^7$	кг	PM < 2,5 мм (SS1)	$8,16 \cdot 10^{-5}$	кг
Потенциальная энергия, вода (SS1)	$8,35 \cdot 10^3$	МДж	PM > 10 мм (SS1)	$1,63 \cdot 10^{-3}$	кг
Создание водоемов (SS1)	$2,18 \cdot 10^{-1}$	м <sup>2-3</sup>	PM 2,5–10 мм (SS1)	$4,63 \cdot 10^{-4}$	кг
Преобразование в промышленную зону (SS1)	$5,45 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>	<i>Выбросы в воду</i>		
Преобразование в водотоки (SS1)	$2,73 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>	Вода (SS1)	$3,32 \cdot 10^7$	кг
Преобразование в пастбища (SS1)	$4,09 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>	Нефтепродукты (SS1)	$9,51 \cdot 10^{-4}$	кг
Преобразование в землю под кустарники (SS1)	$4,09 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>	<i>Выбросы в воду</i>		
			Нефтепродукты (SS1)	$4,22 \cdot 10^{-4}$	кг

<sup>a</sup>Нерыночная (не требует сети).

Основные средства, касающиеся электролизеров для производства водорода (SS2), учитываются на основе информации проекта NEEDS [26]. Большая часть информации о рабочих объемах в SS2 взята из спецификаций, приведенных в техническом описании продукта [20]. Объемы, связанные с выбросами от потерь газа и потреблением электродов, основаны на предыдущих исследованиях в научной литературе [13].

В табл. 2 представлены основные данные учёта системы гидро-Н<sub>2</sub>. Электролизеры в SS2 требуют 0,62 МВт · ч избыточного электричества для производства 10,66 кг чистого водорода (0,36 МВт · ч, в соответствии с более низкой теплотворной способностью водорода [27]). Как пиковое, так и непиковое электричество от SS1 (0,44 и 0,20 МВт · ч соответственно) подается в итальянскую электрическую сеть.

Таблица 2

Основные данные учёта системы гидро-Н<sub>2</sub> (ФЕ: 1 МВт товарной энергии):  
SS1 – производство гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода

Table 2

Main inventory data of the hydro-Н<sub>2</sub> system (FU: 1MWh of marketable energy):  
SS1 – hydropower generation; SS2 – hydrogen production

На входе			На выходе		
Из техносферы			В техносферу		
Газ SF6 (SS1)	4,60 · 10 <sup>-3</sup>	кг	Продукты		
Смазочное масло (SS1)	6,78 · 10 <sup>-3</sup>	л	Пиковое электричество (SS1)	0,44	МВт
Хромированная сталь (SS1)	1,89 · 10 <sup>-2</sup>	кг	Непиковое электричество (SS1)	0,20	МВт
Дизельное топливо, сжигаемое (SS1)	5,92	МДж	Водород (SS2) <sup>a</sup>	10,66	кг
Взрывчатые вещества (SS1)	7,96 · 10 <sup>-4</sup>	кг	<i>Отходы, подлежащие обработке</i>		
Гравий (SS1)	20,10	кг	Отходы для сжигания (SS1)	0,19	кг
Портландцемент (SS1)	2,37	кг	Металлы для переработки (SS1)	9,24 · 10 <sup>-2</sup>	кг
Армирующая сталь (SS1)	0,19	кг	Бетон для захоронения (SS1)	26,50	кг
Сталь, низколегированная (SS1)	0,26	кг	Сталь на свалку (SS1)	1,97 · 10 <sup>-2</sup>	кг
Водопроводная вода (SS1)	1,18	кг	Металлы для переработки (SS2)	0,11	кг
Транспорт, грузовой автомобиль (SS1)	0,48	т · км	Пластмассы для переработки (SS2)	3,11 · 10 <sup>-3</sup>	кг
Медь (SS1)	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	кг	В окружающую среду		
Электричество (SS1)	0,63	кВт	<i>Выбросы в воздух</i>		
Водопроводная вода (SS2)	210,00	кг	SF6 (SS1)	4,60 · 10 <sup>-3</sup>	кг
КОН, электролит (SS2)	2,59 · 10 <sup>-2</sup>	кг	Н <sub>2</sub> O (SS1)	34,90	кг
Хромированная сталь (SS2)	7,99 · 10 <sup>-2</sup>	кг	Отработанное тепло (SS1)	2,28	МДж
Никель (SS2)	9,41 · 10 <sup>-3</sup>	кг	PM < 2,5 м (SS1)	5,24 · 10 <sup>-5</sup>	кг
Электроды (SS2)	1,32 · 10 <sup>-4</sup>	кг	PM > 10 м (SS1)	1,05 · 10 <sup>-4</sup>	кг
Синтетический каучук (SS2)	4,71 · 10 <sup>-4</sup>	кг	PM 2,5–10 м (SS1)	2,97 · 10 <sup>-4</sup>	кг
Армирующая сталь (SS2)	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	кг	Воздух (SS2)	12,39	кг
Медь (SS2)	7,20 · 10 <sup>-3</sup>	кг	Кислород (SS2)	85,55	кг
Изоляционный материал (SS2)	3,20 · 10 <sup>-3</sup>	кг	<i>Выбросы в воду</i>		
Алюминий (SS2)	2,07 · 10 <sup>-3</sup>	кг	Вода (SS1)	1,69 · 10 <sup>7</sup>	кг
Акрилонитрил-бутадиен-стирол (SS2)	7,53 · 10 <sup>-4</sup>	кг	Нефтепродукты (SS1)	6,11 · 10 <sup>-4</sup>	кг
Гранулят ПЭВД (SS2)	1,88 · 10 <sup>-3</sup>	кг	<i>Выбросы в почву</i>		
Стекловолокно (SS2)	1,88 · 10 <sup>-3</sup>	кг	Нефтепродукты (SS1)	2,71 · 10 <sup>-4</sup>	кг
Чугун (SS2)	6,40 · 10 <sup>-4</sup>	кг			
Нейлон 66 (SS2)	2,35 · 10 <sup>-4</sup>	кг			
Транспорт, грузовой автомобиль (SS2)	0,58	т · км			
Тепло, природный газ (SS2)	90,30	МДж			
<i>Из окружающей среды</i>					
Вода, использование турбины (SS1)	2,14 · 10 <sup>7</sup>	кг			
Потенциальная энергия, вода (SS1)	5,36 · 10 <sup>3</sup>	МДж			
Создание водоемов (SS1)	1,40 · 10 <sup>-1</sup>	м <sup>2</sup> · а			
Преобразование в промышленную зону (SS1)	3,50 · 10 <sup>-3</sup>	м <sup>2</sup>			
Преобразование в водотоки (SS1)	1,75 · 10 <sup>-3</sup>	м <sup>2</sup>			
Преобразование в пастбище (SS1)	2,63 · 10 <sup>-3</sup>	м <sup>2</sup>			
Преобразование в землю под кустарники (SS1)	2,63 · 10 <sup>-3</sup>	м <sup>2</sup>			
Воздух (SS2)	12,39	кг			

<sup>a</sup>10,66 кг водорода соответствуют 0,36 МВт · ч в связи с более низкой теплотворной способностью водорода



#### 4. Результаты

Учёт жизненного цикла системы гидро-Н<sub>2</sub> реализован в SimaPro 8 для проведения экологической характеристики данной системы [29]. Оцениваются девять категорий воздействия: абiotическое истощение (ADP), подкисление (AP), эвтрофикация (EP), истощение озонового слоя (ODP), конкуренция за использование земли (LC), образование фотохимического окислителя (POFP), глобальное потепление (GWP; 100-летний временной горизонт), совокупный спрос на невозобновляемую энергию (CED<sub>nr</sub>) и совокупный общий спрос на энергию (CED<sub>t</sub>). Эти категории воздействия оцениваются с помощью метода

CML [30], за исключением категорий GWP и CED (CED<sub>nr</sub> и CED<sub>t</sub>), которые оцениваются в соответствии с МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) [31] и VDI (Verein Deutscher Ingenieure) [32] методов соответственно.

##### 4.1. Экологические показатели жизненного цикла системы гидро-Н<sub>2</sub>

В табл. 3 представлены результаты экологической характеристики системы гидро-Н<sub>2</sub>. Следует отметить, что эти результаты относятся ко всей системе без применения какого-либо фактора распределения для дистрибуции воздействий между различными энергетическими продуктами.

Таблица 3

Результаты характеристики системы гидро-Н<sub>2</sub> (значения на единицу ФЕ):  
SS1 – производство гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода

Table 3

Characterisation results of the hydro-H<sub>2</sub> system (values per FU):  
SS1 – hydropower generation; SS2 – hydrogen production

	SS1	SS2	Всего
ADP (кг Sb eq)	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$5,84 \cdot 10^{-2}$	$8,12 \cdot 10^{-2}$
AP (кг SO <sub>2</sub> eq)	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$2,57 \cdot 10^{-2}$	$4,36 \cdot 10^{-2}$
EP (кг PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$
ODP (кг CFC-11 eq)	$3,21 \cdot 10^{-7}$	$7,96 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$
LC (м <sup>2</sup> а)	0,10	$4,02 \cdot 10^{-2}$	0,14
POFP (кг C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)	$9,39 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$
CED <sub>nr</sub> (МДж)	49,20	121,11	170,31
CED <sub>t</sub> (МДж)	5463,20	123,08	5586,27
GWP (кгг CO <sub>2</sub> eq)	6,00	7,02	13,02

В табл. 3 также показан вклад каждой подсистемы в оцениваемые категории воздействия. Вклад подсистемы производства электроэнергии (SS1) колеблется от 28 % (ADP) до 71 % (LC), за исключением категории CED<sub>t</sub>, в которой эта подсистема полностью (98 %) доминирует из-за потенциальной энергии от ввода воды. В дополнение к CED<sub>t</sub> и LC, SS1 также является основной подсистемой, способствующей EP. В других оцененных категориях воздействия преобладает подсистема производства водорода (SS2).

На рис. 2 показан вклад основных процессов в каждой подсистеме в характерные категории воздействия. Обнаружено, что ведущая роль подсистемы производства водорода (SS2) в ADP (72%), ODP (71%), CED<sub>nr</sub> (71 %) и GWP (54 %) тесно связана с выработкой тепла из природного газа в конструкции электролизеров. Высокий вклад SS2 в AP (59 %) и POFP (58 %) в основном связан с производством никеля, необходимым для электролизера, и в меньшей степени с процессом тепловыделения.

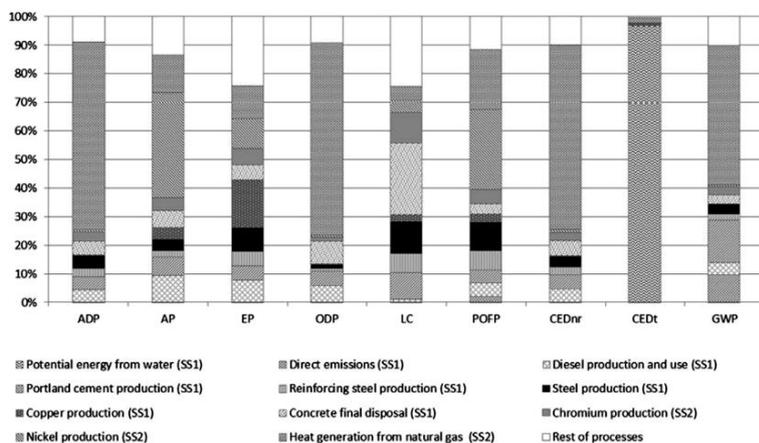


Рис. 2 – Вклад процесса в воздействие системы гидро-Н<sub>2</sub>: SS1 – генерация гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода  
Fig. 2 – Process contribution to the impacts of the hydro-H<sub>2</sub> system: SS1 – hydropower generation; SS2 – hydrogen production

На рис. 2 ясно видно, что единственный значимый вклад в  $CED_i$  вносит потенциальная энергия, поступающая от воды, учитывая процент вклада в 97 %. Ведущий вклад  $SS1$  в  $LC$  (71 %) в основном связан с управлением отходами, в частности с окончательной утилизацией бетона, в то время как его высокий вклад в  $EP$  (59 %) в значительной степени связан (ок. 30 % от общего воздействия) с производством металлов, в основном меди и стали, для капитальных товаров.

Что касается категории  $GWP$ , то, помимо основного вклада процесса выработки тепла в  $SS2$ , выделяются два участника (оба в рамках  $SS1$ ): производство портландцемента для строительства инфраструктуры и прямой выброс  $SF_6$  в воздух. Ввиду отсутствия исследований по характеристикам жизненного цикла аналогичных систем управления энергией с согласованной методологической базой, тщательное сравнение параметров окружающей среды системы гидро- $H_2$  не представляется возможным. Тем не менее, путем адаптации системы и ее продуктов к исследованию  $LCA$ , выполненному Kogoneos и др. [33], можно сделать грубое сравнение с результатом  $GWP$  продукта водорода. В связи с этим и принимая во внимание, что Kogoneos и др. [33] включали сжижение, транспортировку и использование в границах системы производства водорода, такой же порядок значений был найден для результатов, представленных для водорода.

При сравнении результатов системы гидро- $H_2$  (табл. 3) с результатами ГЭС без производства водорода (то есть с результатами определения характеристик базовой системы, как показано в табл. 4), как правило, обнаруживаются более низкие воздействия на ФУ для базовой системы (кроме  $LC$  и  $CED_i$ ). Повышенное воздействие системы гидро- $H_2$  может быть интерпретировано как экологические затраты на решение вопросов планирования на ГЭС. Результаты базовой системы согласуются с экологическими параметрами, соответствующими инвентарному описанию средневропейской ГЭС из базы данных ecoinvent [22]. Результаты показывают одинаковый порядок величины для каждой категории воздействия с отличием ниже 22 % (отличие обусловлено спецификой тематического исследования).

#### 4.2. Энергетические характеристики жизненного цикла системы гидро- $H_2$

Энергетические характеристики жизненного цикла системы гидро- $H_2$  оцениваются путем расчета энергетического баланса жизненного цикла, энергетической эффективности жизненного цикла и показателя возобновляемости, как подробно описано в Susmozas и др. [27]. Энергетический баланс жизненного цикла системы рассчитывается как разница между выходом энергии и индикатором  $CED_{nr}$ . Выход энергии дается ФЭ системы (3 600,00 МДж  $ФЭ^{-1}$ ). Используя индикатор  $CED_{nr}$  в табл. 3 (170,31 МДж  $ФЭ^{-1}$ ), результирующий энергетический баланс жизненного цикла составляет +3 429,69 МДж  $ФЭ^{-1}$ . Этот положительный результат свидетельствует о благоприятных энергетических характеристиках системы гидро- $H_2$ , поскольку она обеспечивает значительно больше энергии, чем невозобновляемая энергия, необходимая в течение ее жизненного цикла.

Энергоэффективность жизненного цикла системы рассчитывается как отношение выходной энергии к показателю  $CED_i$  системы гидро- $H_2$  (5 586,27 МДж  $ФЭ^{-1}$  в табл. 3). Следует отметить, что при использовании индикатора  $CED_i$  учитывается потенциальная энергия возобновляемого ресурса (воды). Установлено, что энергоэффективность жизненного цикла системы гидро- $H_2$  составляет 64 %, что значительно выше для системы возобновляемой энергии (например, по сравнению с биоэнергетическими системами [27]).

Энергоэффективность жизненного цикла базовой системы (только подсистемы гидроэлектроэнергии), как было установлено, составляет 42 % и рассчитывается как отношение выходной энергии  $SS1$  (ФЭ) к показателю  $CED_i$   $SS1$  (8 567,29 МДж  $ФЭ^{-1}$  в табл. 4). Следовательно, включение подсистемы производства водорода ( $SS2$ ) приводит к повышению энергоэффективности жизненного цикла на 22 процентных пункта при переходе от первоначальной ГЭС к системе гидро- $H_2$  в качестве решения по управлению энергией. Это связано с рациональным использованием избыточной электроэнергии, которая в противном случае была бы нерыночной.

Таблица 4

Результаты характеризации базовой системы (значения на единицу):  
 $SS1$  – производство гидроэлектроэнергии

Table 4

Characterisation results of the reference system (values per FU):  $SS1$  – hydropower generation

	<b>Базис (SS1)</b>
ADP (кг Sb eq)	$3,58 \cdot 10^{-2}$
AP (кг $SO_2$ eq)	$2,81 \cdot 10^{-2}$
EP (кг $PO_4^{3-}$ eq)	$1,14 \cdot 10^{-2}$
ODP (кг CFC-11 eq)	$5,04 \cdot 10^{-7}$
LC ( $m^2a$ )	0,15
POFP (кг $C_2H_4$ eq)	$1,47 \cdot 10^{-3}$
$CED_{nr}$ (МДж)	77,15
$CED_i$ (МДж)	8 567,29
GWP (кг $CO_2$ eq)	9,40



Наконец, показатель возобновляемости системы гидро- $H_2$  рассчитывается как отношение совокупной потребности в возобновляемой энергии (то есть разницы между показателями  $CED_t$  и  $CED_{nr}$ ) к показателю  $CED_t$ . Это приводит к 97 % повторного обновления для системы гидро- $H_2$ . Такой высокий процент соответствует результатам, регистрируемых для других систем возобновляемой энергии [13, 27]. В целом три энергетических параметра жизненного цикла, оцененные для системы гидро- $H_2$ , показывают подходящие энергетические характеристики системы с точки зрения жизненного цикла.

## 5. Обсуждение

### 5.1. Водород из возобновляемых и традиционных источников энергии

В настоящее время 96 % производства водорода происходит в системах, которые используют ископаемые ресурсы в качестве основного сырья. В частности, паровая конверсия метана (ПКМ) с использованием природного газа является наиболее распространенным способом получения водорода. Напро-

тив, только 3,9 % водорода производится электролизом воды [9, 26]. Основная причина такой разницы заключается в высоких энергозатратах, необходимых для электролиза по сравнению с ПКМ [13, 26, 34].

В этом разделе экологические параметры водорода, производимого системой гидро- $H_2$ , сравниваются с параметрами водорода, получаемого с помощью ПКМ (ПКМ- $H_2$ ). С одной стороны, параметры гидро- $H_2$  рассчитываются путем применения коэффициента распределения энергии для водорода («Дальнейшее получение данных») к результатам характеристики окружающей среды, представленным в табл. 3. С другой стороны, параметры жизненного цикла ПКМ- $H_2$  рассчитываются в соответствии с моделированием обычной системы ПКМ, описанной в Susmozas et al. [27].

На рис. 3 показаны сравнительные данные параметров жизненного цикла гидро- $H_2$  и ПКМ- $H_2$ . Обнаружено, что гидро- $H_2$  обладает более благоприятными характеристиками, чем ПКМ- $H_2$ , во всех категориях воздействия. Несмотря на то, что  $CED_t$  улучшается на менее чем 0,5 %, остальные категории показывают значительные улучшения, варьирующиеся от 78 % (EP) до 97 % (ADP).

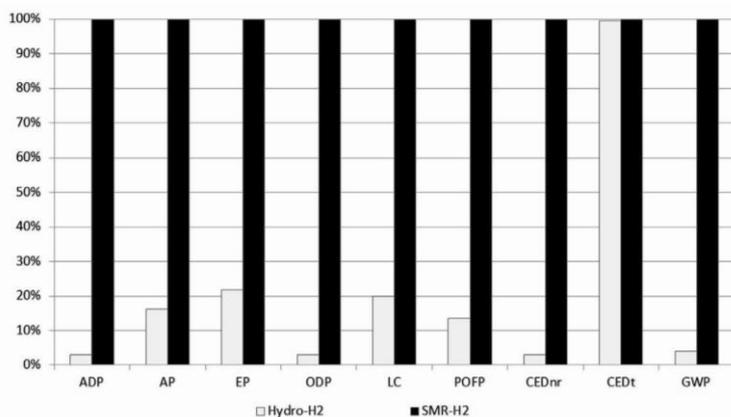


Рис. 3 – Сравнение воздействия гидро- $H_2$  и ПКМ- $H_2$   
Fig. 3 – Comparison of the impacts of hydro- $H_2$  and SMR- $H_2$

Кроме того, обычная система ПКМ обеспечивает 64 % энергоэффективности жизненного цикла и 1 % показателя возобновляемости. Следовательно, система гидро- $H_2$  (эффективность 64 % и возобновляемость 97 %, как рассчитано в энергетических характеристиках жизненного цикла системы гидро- $H_2$ ) демонстрирует благоприятные энергетические характеристики жизненного цикла благодаря своей возобновляемой природе.

### 5.2. Расширенная система с использованием водорода для производства электроэнергии

Получаемый водород имеет широкий спектр применения. В этом разделе оценивается применимость водорода для производства электроэнергии в пиковые часы в топливном элементе с протоно-обменной мембраной (PEMFC). В этом смысле цель «расширенной системы гидро- $H_2$ » состоит в том, чтобы вне-

сти дополнительный вклад в удовлетворение потребности в энергии электрической сети в часы пик в географической области с высоким спросом [35]. Используется та же ФЕ, что и для оценки базовой системы (1 МВт · ч выходной товарной энергии).

На рис. 4 показаны основные материальные и энергетические объемы расширенной системы, что определяется путем внедрения двух дополнительных подсистем в исходную систему гидро- $H_2$ . Первый (SS3) хранит водород, вырабатываемый электролизерами в непииковые часы, а второй (SS4) включает стек PEMFC, который использует водород, хранящийся для производства электроэнергии в часы пик для итальянской электрической сети.

Использование традиционных гидридов металлов в качестве варианта хранения водорода рассматривается в SS3 из-за их высокой объемной плотности энергии. Хотя для бортовых систем требуются легкие

и компактные системы хранения водорода, объемные характеристики являются наиболее важным аспектом в стационарных системах. В этом отношении гидриды металлов дают преимущества перед хранением водорода при высоком давлении [36, 37]. Кроме того, с точки зрения потребления энергии, хранение водорода с использованием гидридов металлов позволяет рекуперацию тепла для десорбции водорода. Тем не

менее возможность рекуперации тепла зависит от нескольких факторов, таких как тип гидрида, рабочие условия и тепловые требования для десорбции [36, 38]. С точки зрения безопасности, хранение водорода в гидридах металлов рассматривается как подходящий выбор, потому что выделение водорода не происходит самопроизвольно, но необходимо обеспечить тепло для десорбции водорода [39].

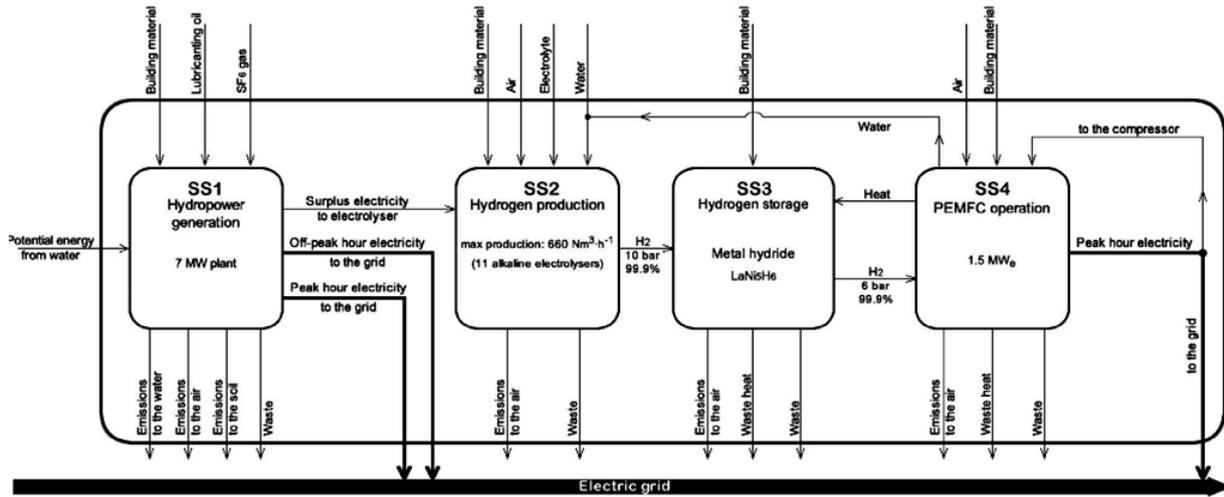


Рис. 4 – Упрощенная схема жизненного цикла расширенной системы гидро-H<sub>2</sub>  
 Fig. 4 – Simplified life-cycle flowchart of the enlarged hydro-H<sub>2</sub> system

Выбранный гидрид представляет собой интерметаллический сплав на основе LaNi<sub>5</sub> с подходящими характеристиками с точки зрения объемной плотности водорода (около 130 кг H<sub>2</sub>·м<sup>-3</sup>), кинетики и обратимости (в отличие от гидридов на основе Ti) и накопительной способности водорода приблизительно 1,3 % (вес) [36, 40]. Более того, температура адсорбции и десорбции водорода для LaNi<sub>5</sub> значительно ниже, чем для гидридов на основе Mg, для которых температура превышает 350 °C при рабочем давлении SS3 [36, 41].

Размеры SS3 и SS4 рассчитаны с учетом максимального количества 916,4 кг водорода, хранящегося в течение 15,6 непиковых часов в день. Этот водород подается на SS4 для выработки электроэнергии в течение 8,4 часов пик. Предполагая, что КПД PEMFC составляет 47,6 % (согласно более низкой теплотворной способности водорода) [42], мощность SS4 составляет 1,5 МВт. Технология PEMFC для производства электроэнергии используется с учетом высокой чистоты доступного водорода [43–45]. Конфигурация заземленного анода рассматривается для увеличения количества реагирующего водорода в топливном элементе. Тем не менее, периодическая продувка анода все же необходима [46, 47]. Что касается подачи воздуха в катод, увеличенная система гидро-H<sub>2</sub> (см. рис. 4) включает сжатие воздуха за счет использования части электричества, вырабатываемого топливным элементом. Рабочие условия подсистемы PEMFC (SS4) позволяют рекуперацию тепла для десорбции водорода в SS3.

Рабочая температура современных PEMFC обычно находится в диапазоне 60 ÷ 80 °C [42, 48]. Исходя из уравнения Ван-Хоффа и предполагая, что SS3 обеспечивает водородом SS4 при 6 бар, температура, при которой должен подаваться пар составляет приблизительно 50 °C [36, 41, 49, 50]. Предполагается, что тепловая энергия, необходимая для десорбции водорода, составляет 4,3 кВт · ч кг<sup>-1</sup> H<sub>2</sub> [51, 52], в то время как доступная теплота от крупномасштабной стационарной системы PEMFC для производства электроэнергии превышает 15 кВт · ч кг<sup>-1</sup> H<sub>2</sub> [42].

В табл. 5 и 6 представлены основные данные учёта расширенной системы гидро-H<sub>2</sub>. Это многофункциональная система с двумя продуктами: пиковая и непиковая электроэнергия. Данные учёта жизненного цикла системы распределяются между этими продуктами в соответствии с содержанием энергии. Процент распределения, рассчитанный для пиковой и непиковой электроэнергии, составляет 74 % и 26 % соответственно.

Данные учёта для SS3 (см. табл. 6) учитывают способность накопления водорода 1,3 % (вес) и тепловыделение при адсорбции водорода 28 кДж моль<sup>-1</sup> H<sub>2</sub> [51]. Согласно способности накопления водорода выбранного гидрида и его плотности (8 300 кг · м<sup>-3</sup>) [53], количество сплава LaNi<sub>5</sub>, необходимое для хранения суточной выработки водорода в непиковые часы, составляет 70,5 т LaNi<sub>5</sub>, занимая 8,5 м<sup>3</sup>. Наконец, данные учёта для SS4 (табл. 6) взяты из научной литературы [54] и технических спецификаций [42].

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 5

Основные данные учёта расширенной гидроэлектроэнергетической системы  
(ФЕ: 1 МВт · ч товарной энергии):

SS1 – производство гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода

Table 5

Main inventory data of the enlarged hydro-H<sub>2</sub> system (FU: 1 MWh of marketable energy):  
SS1 – hydropower generation and SS2 – hydrogen production

На входе			На выходе		
Из техносферы			В техносферу		
Газ SF6 (SS1)	$5,94 \cdot 10^{-5}$	кг	Продукты		
Смазочное масло (SS1)	$1,13 \cdot 10^{-2}$	л	Пиковое электричество (SS1)	0,57	МВт
Хромированная сталь (SS1)	$2,44 \cdot 10^{-2}$	кг	Непиковое электричество (SS1)	0,26	МВт
Дизельное топливо, сжигаемое (SS1)	7,63	МДж	<i>Отходы для переработки</i>		
Взрывчатые вещества (SS1)	$1,03 \cdot 10^{-3}$	кг	Отходы для сжигания (SS1)	0,24	кг
Гравий (SS1)	26,00	кг	Металлы для переработки (SS1)	0,12	кг
Портландцемент (SS1)	3,05	кг	Бетон для захоронения (SS1)	34,20	кг
Армирующая сталь (SS1)	0,24	кг	Сталь на свалку (SS1)	$2,54 \cdot 10^{-2}$	кг
Сталь, низколегированная (SS1)	0,33	кг	Металлы для переработки (SS2)	0,14	кг
Водопроводная вода (SS1)	1,53	кг	Пластмассы для переработки (SS2)	$4,01 \cdot 10^{-3}$	кг
Транспорт, грузовой автомобиль (SS1)	0,62	т · км	<i>В окружающую среду</i>		
Медь (SS1)	$1,62 \cdot 10^{-2}$	кг	<i>Выбросы в воздух</i>		
Электричество (SS1)	0,81	кВт	SF6 (SS1)	$5,94 \cdot 10^{-5}$	кг
Водопроводная вода (SS2)	181,00	кг	H <sub>2</sub> O (SS1)	45,10	кг
КОН, электролит (SS2)	$3,31 \cdot 10^{-2}$	кг	Отработанное тепло (SS1)	2,94	МДж
Хромированная сталь (SS2)	0,10	кг	PM < 2,5 мм (SS1)	$6,77 \cdot 10^{-5}$	кг
Никель (SS2)	$1,21 \cdot 10^{-2}$	кг	PM > 10 мм (SS1)	$1,35 \cdot 10^{-4}$	кг
Электроды (SS2)	$1,68 \cdot 10^{-4}$	кг	PM 2,5 ÷ 10 мм (SS1)	$3,84 \cdot 10^{-4}$	кг
Синтетический каучук (SS2)	$6,08 \cdot 10^{-4}$	кг	Воздух (SS2)	15,77	кг
Армирующая сталь (SS2)	$3,22 \cdot 10^{-2}$	кг	Кислород (SS2)	109,27	кг
Медь (SS2)	$9,30 \cdot 10^{-3}$	кг	<i>Выбросы в воду</i>		
Изоляционный материал (SS2)	$4,13 \cdot 10^{-3}$	кг	Вода (SS1)	$2,76 \cdot 10^7$	кг
Алюминий (SS2)	$2,67 \cdot 10^{-3}$	кг	Нефтепродукты (SS1)	$7,88 \cdot 10^{-4}$	кг
Акрилонитрил-бутадиен-стирол (SS2)	$9,71 \cdot 10^{-4}$	кг	<i>Выбросы в почву</i>		
Гранулят ПЭВД (SS2)	$2,43 \cdot 10^{-3}$	кг	Нефтепродукты (SS1)	$3,50 \cdot 10^{-4}$	кг
Стекловолокно (SS2)	$2,43 \cdot 10^{-3}$	кг			
Чугун (SS2)	$8,26 \cdot 10^{-4}$	кг			
Нейлон 66 (SS2)	$3,03 \cdot 10^{-4}$	кг			
Транспорт, грузовой автомобиль (SS2)	0,75	т · км			
Тепло, природный газ (SS2)	115,00	МДж			
<i>Из окружающей среды</i>					
Вода, использование турбины (SS1)	$2,76 \cdot 10^7$	кг			
Потенциальная энергия, вода (SS1)	$7,00 \cdot 10^3$	МДж			
Создание водоёмов (SS1)	$1,81 \cdot 10^{-1}$	м <sup>2</sup> · а			
Преобразование в промышленную зону (SS1)	$4,52 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>			
Преобразование в водотоки (SS1)	$2,26 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>			
Преобразование в пастбище (SS1)	$3,39 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>			
Преобразование в землю под кустарники (SS1)	$3,39 \cdot 10^{-3}$	м <sup>2</sup>			
Воздух (SS2)	15,77	кг			



Таблица 6

Результаты характеризации расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> (значения на единицу ФЕ):  
 SS1 – производство гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода;  
 SS3 – хранение водорода; SS4 – работа PEMFC

Table 6

Characterisation results of the enlarged hydro-H<sub>2</sub> system (values per FU):  
 SS1 – hydropower generation; SS2 – hydrogen production;  
 SS3 – hydrogen storage; SS4 – PEMFC operation

	SS1	SS2	SS3	SS4	Всего
ADP (кг Sb eq)	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$7,56 \cdot 10^{-2}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$	$3,29 \cdot 10^{-3}$	0,11
AP (кг SO <sub>2</sub> eq)	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$4,70 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-2}$
EP (кг PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	$9,40 \cdot 10^{-3}$	$6,47 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$
ODP (кг CFC-11 eq)	$4,16 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
LC (м <sup>2</sup> ·а)	0,13	$5,20 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	0,19
POFP (кг C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$6,96 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$
CED <sub>пр</sub> (МДж)	63,74	156,87	0,16	7,36	228,13
CED <sub>t</sub> (МДж)	7 077,33	159,41	0,26	11,90	7 248,90
GWP (кг CO <sub>2</sub> eq)	7,77	9,10	0,01	0,42	17,29

### 5.3. Экологическая и энергетическая характеристика жизненного цикла расширенной системы

Категории и методы, используемые для оценки расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub>, такие же, как в главе 4 «Результаты». В табл. 7 представлены результаты

экологической характеристики расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> и показан вклад каждой подсистемы в оцененные категории воздействия. Результаты в табл. 7 относятся ко всей системе без применения какого-либо коэффициента распределения для дистрибуции воздействий между продуктами электричества.

Таблица 7

Результаты характеризации расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> (значения на единицу ФУ):  
 SS1 – производство гидроэлектроэнергии; SS2 – производство водорода; SS3 – хранение водорода;  
 SS4 – работа PEMFC

Table 7

Characterisation results of the enlarged hydro-H<sub>2</sub> system (values per FU); SS1 – hydropower generation; SS2 – hydrogen production; SS3 – hydrogen storage; SS4 – PEMFC operation

	SS1	SS2	SS3	SS4	Всего
ADP (кг Sb eq)	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$7,56 \cdot 10^{-2}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$	$3,29 \cdot 10^{-3}$	0,11
AP (кг SO <sub>2</sub> eq)	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$4,70 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-2}$
EP (кг PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	$9,40 \cdot 10^{-3}$	$6,47 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$
ODP (кг CFC-11 eq)	$4,16 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
LC (м <sup>2</sup> ·а)	0,13	$5,20 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	0,19
POFP (кг C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$6,96 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$
CED <sub>пр</sub> (МДж)	63,74	156,87	0,16	7,36	228,13
CED <sub>t</sub> (МДж)	7 077,33	159,41	0,26	11,90	7 248,90
GWP (кг CO <sub>2</sub> eq)	7,77	9,10	0,01	0,42	17,29

При сравнении воздействий базовой системы гидро-Н<sub>2</sub> (см. табл. 3) и расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> (см. табл. 7) ожидаемое увеличение всех воздействий связано с расширением системы, главным образом из-за подсистемы PEMFC (SS4). SS3 (хранение водорода) вряд ли вносит вклад в общее воздействие расширенной системы (доля вклада ниже 1 % для всех категорий воздействия). Фактически, идентификация подсистем, доминирующих в различных категориях в расширенной системе, остается такой же, как и для исходной системы (см. гл. 4), где SS1 (выработка гидроэлектроэнергии) доминирует над CED<sub>t</sub>, LC и EP, а

SS2 (выработка водорода) доминирует над ADP, CED<sub>пр</sub>, ODP, GWP, POFP и AP.

С одной стороны, роль SS4 как основного источника дополнительных воздействий главным образом связана с инвертором мощности, а также с платиновым электрокатализатором в стеке PEMFC. С другой стороны, второстепенная роль подсистемы хранения водорода (SS3) связана с тем фактом, что тепловые требования для десорбции водорода удовлетворяются за счет рекуперации тепла из подсистемы PEMFC. Кроме того, внешнее электричество не используется для сжатия воздуха в SS4, но производится в SS4. Эта



энергетическая стратегия повышает производительность системы в течение всего жизненного цикла.

Результаты как базовой, так и расширенной систем гидро-Н<sub>2</sub> зависят от количественного определения пиковых и непиковых значений в подсистеме генерирующей гидроэлектроэнергию. Как сообщили в итальянском регулирующем органе по электроэнергии, газу и воде [55], валовое производство энергии в Италии демонстрирует тенденцию к снижению с 2011 г. Влияние этих тенденций на результаты данного исследования оценивается путем уменьшения порогового значения мощности, востребованной сетью. Как сообщается, пороговое значение подсистемы, производящей гидроэлектроэнергию, варьируется от 38 ГВт до 40 ГВт. Количество непиковых часов варьируется от 59 % до 65 % соответственно. Для того чтобы сохранить годовое количество часов при полной нагрузке в качестве одной трети от годового рабочего времени ГЭС [56], необходимы 10 ÷ 11 электролизеров. Это означает, что годовой объем производства водорода колеблется от 212 т до 246 т. Количество гидрида металла, необходимое для хранения водорода, находится в диапазоне 58,3 ÷ 70,5 т, а мощность, обеспечиваемая SS4 посредством преобразования водорода в пиковую электроэнергию, варьируется от 1,0 МВт до 1,5 МВт. С точки зрения системы, эти изменения умеренно влияют на воздействия, о которых сообщалось в расчете на ФЕ (снижение воздействия ниже 12 % и 21 % для исходной и расширенной гидро-Н<sub>2</sub> систем соответственно), без влияния на основные выводы исследования.

В случае энергетических характеристик жизненного цикла расширенной гидро-Н<sub>2</sub> системы, энергетическая эффективность жизненного цикла составляет 50 % и показатель возобновляемости – 97 %. При сравнении энергетической эффективности жизненного цикла расширенной системы (50 %) и исходной системы гидро-Н<sub>2</sub> в энергетических характеристиках жизненного цикла системы гидро-Н<sub>2</sub> (64 %) обнаруживается потеря эффективности из-за дополнительного преобразования накопленного водорода в пиковое электричество. Однако энергетическая эффективность жизненного цикла расширенной системы все еще выше эффективности базовой системы, включающей только ГЭС (42 %).

По сравнению с базовой системой снижение общих экологических характеристик расширенной системы на ФЕ компенсируется тем фактом, что она обеспечивает более высокое соотношение пиковой / непиковой электроэнергии (2,85). Кроме того, потенциальные изменения в конструкции расширенной системы могут привести к повышению производительности жизненного цикла. Например, для того чтобы избежать сжатия воздуха можно рассмотреть хранение кислорода, поступающего из электролизеров (выходит за рамки настоящей работы), что также позволяет использовать технологию щелочных топливных элементов.

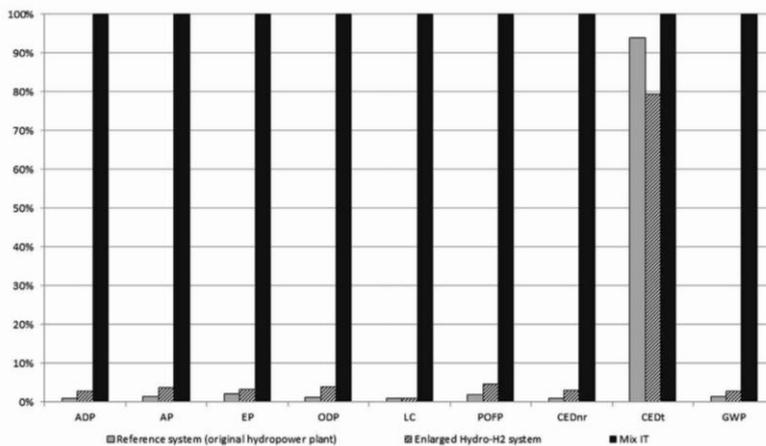
#### 5.4. Возобновляемая и традиционная электроэнергия

В этом разделе сравниваются параметры жизненного цикла возобновляемой электроэнергии из расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> и традиционной электроэнергии итальянской электрической сети [55], то есть проводится сравнение между продуктом, предназначенным для балансировки сети, и традиционным продуктом, подаваемым в сеть. Сравнение с другими возобновляемыми источниками здесь не рассматривается, так как могут возникнуть вводящие в заблуждение результаты, если базовые системы возобновляемых источников энергии также не будут оснащены технологией балансировки энергосистем. Тем не менее, параметры жизненного цикла возобновляемой электроэнергии от первоначальной ГЭС, то есть базовой системы, включены в сравнительное исследование, чтобы облегчить интерпретацию результатов.

Характеристика традиционной электроэнергии для итальянской электрической сети выполняется путем внедрения соответствующего учета в SimaPro 8. Первичные данные о производстве электроэнергии по источникам (уголь, нефть, природный газ, другие ископаемые источники, гидроэнергия, перекачиваемая энергия, фотоэлектрическая энергия, энергия ветра, геотермальная энергия и биомасса / отходы) получены из регулирующего органа Италии по электроэнергии, газу и воде [55]. Вторичные данные для каждого источника относятся к итальянским технологиям, когда они имеются в базе данных ecoinvent (а именно: уголь, нефть, природный газ, промышленный газ и гидроэнергия) [22]. Вторичные данные для когенерационных и ветряных электростанций также взяты из базы данных ecoinvent [22], но они не являются специфическими для Италии. Наконец, вторичные данные для геотермальных электростанций получены из Martin-Gamboa et al. [57].

Поскольку используется распределение энергии (в отличие, например, от экономического распределения), воздействия в МВт · ч на уровне продукта одинаковы для пиковой и непиковой электроэнергии из расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub>. Другими словами, параметры жизненного цикла пиковой электроэнергии 1 МВт · ч и параметры жизненного цикла непиковой электроэнергии 1 МВт одинаковы. Как показано на рис. 5, сравнение с традиционным электричеством демонстрирует гораздо более благоприятные параметры продукта возобновляемого электричества как из базовой системы, так и из расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub>. Сокращение больше чем на 95 % достигается во всех категориях воздействия, за исключением CED. Кроме того, обычное электричество связано с неблагоприятными результатами с точки зрения энергоэффективности жизненного цикла (39 %) и показателя возобновляемости (20 %).





**Рис. 5** – Сравнение воздействия возобновляемой электроэнергии от базовой ГЭС, возобновляемой электроэнергии от расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> и традиционного электричества для итальянской сети

**Fig. 5** – Comparison of the impacts of renewable electricity from the original hydropower plant, renewable electricity from the enlarged hydro-H<sub>2</sub> system and conventional electricity for the Italian grid

Таким образом, в аспектах жизненного цикла электроэнергии из расширенной системы гидро-Н<sub>2</sub> считается подходящим продуктом, способствующим выполнению требований электрической сети в периоды как высокого, так и среднего / низкого спроса на электроэнергию. В этом смысле расширенная система балансировки энергосистем успешно справляется с проблемами планирования, связанными с ГЭС, за счет относительно небольшого увеличения воздействий по отношению к базовой системе (исходная ГЭС без решения для балансировки энергосистем).

## 6. Заключение

С точки зрения жизненного цикла водород считается подходящим решением для управления энергией на ГЭС как в виде самого водорода, так и в качестве сырья для выработки электроэнергии в часы пик с использованием технологии топливных элементов. В этом смысле производство водорода для хранения энергии на ГЭС может способствовать экологизации как транспорта, так и энергетики.

В этом типе энергетических систем включение средств производства в сферу оценки имеет первостепенное значение. Воздействия в течение жизненного цикла, как правило, зависят либо от способов производства водорода (например, с точки зрения глобального потепления), либо от выработки гидро-электроэнергии (например, с точки зрения совокупной [общей] потребности в энергии). При внедрении хранения и использования водорода в систему, умеренное увеличение воздействий жизненного цикла в основном обусловлено подсистемой PEMFC для выработки электроэнергии.

Оба продукта на основе гидроэнергии (то есть водород, получаемый путем электролиза воды и электричества, впоследствии генерируемого с использованием технологии PEMFC) демонстрируют благоприятные экологические и энергетические характеристики в течение жизненного цикла по сравнению с их традиционными (на основе ископаемых) эквивалентами. Дополнительные исследования эко-

номической и социальной оценки этого типа продуктов на основе гидроэнергии помогут выяснить их потенциальную роль в создании будущей устойчивой энергетической системы.

## References

- [1] British Petroleum. BP statistical review of world energy. 2014. Available on: [www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-worldenergy-2014-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-worldenergy-2014-full-report.pdf) [accessed 02.03.15].
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report. Available on: [www.ipcc.ch/report/ar5](http://www.ipcc.ch/report/ar5) [accessed 02.03.15].
- [3] Zamfirescu C., Dincer I. Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production. *Sol. Energy*, 2014;107:700–13.
- [4] Khalilnejad A., Riahy G.H. A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer. *Energy Convers Manag.*, 2014;80:398–406.
- [5] Carr S., Premier G.C., Guwy A.J., Dinsdale R.M., Maddy J. Hydrogen storage and demand to increase wind power onto electricity distribution networks. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014;39:10195–207.
- [6] Ahmadi S., Rezaei Mirghaed M., Roshandel R. Performance of a standalone wind-hydrogen power system for regions with seasonal wind profile: a case study in Khaf region. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 2014;7:265–78.
- [7] Mansilla C., Avril S., Imbach J., Le Duigou A. CO<sub>2</sub>-free hydrogen as a substitute to fossil fuels: what are the targets? prospective assessment of the hydrogen market attractiveness. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012;37:9451–8.
- [8] Contaldi M., Gracceva F., Mattucci A. Hydrogen perspectives in Italy: analysis of possible deployment scenarios. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2008;33:1630–42.
- [9] Dincer I. Green methods for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012;37:1954–71.

[10] ISO 14040. Environmental management e life cycle assessment e principles and framework. Int Organ Stand 2006.

[11] ISO 14044. Environmental management e life cycle assessment e requirements and guidelines. Int Organ Stand 2006.

[12] Enel. Fonte Cupa Hydropower plant. Available on: <http://www.enel.it/it-IT/impianti/mappa/dettaglio/fonte-cupa-fontana-liri/p/090027d98192f81d> [accessed 02.03.15].

[13] Dufour J., Serrano D.P., Gálvez J.L., González A., Soria E., Fierro J.L.G. Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012;37:1173–83.

[14] Centro Funzionale Regione Lazio. Liri Ad Isola Del Liri LII\_29. Available on: [www.idrografico.roma.it/asp.net/schede/Stazioni\\_Misura\\_Portata/35.pdf](http://www.idrografico.roma.it/asp.net/schede/Stazioni_Misura_Portata/35.pdf) [accessed 02.03.15].

[15] Citrini D., Noseda G. Hydraulics [in Italian]. Milan: Ambrosiana; 1994.

[16] Della Volpe R. Machines [in Italian]. Naples: Liguori Editore; 2002.

[17] Cordova M.M., Finardi E.C., Ribas F.A.C., de Matos V.L., Scuzziato M.R. Performance evaluation and energy production optimization in the real-time operation of hydropower plants. *Electr. Power Syst. Res.*, 2014;116:201–7.

[18] Terna Rete Italia. Italian electrical grid: data. 2013. Available on: [www.terna.it/default.aspx?tabidj380](http://www.terna.it/default.aspx?tabidj380) [accessed 02.03.15].

[19] Carmo M., Fritz D.L., Mergel J., Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013;38:4901–34.

[20] Hydrogenics HySTAT™-60. Available on: [www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/industrial-hydrogenerators-by-electrolysis/outdoor-installation/hystattrade-60](http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/industrial-hydrogenerators-by-electrolysis/outdoor-installation/hystattrade-60) [accessed 02.03.15].

[21] Flury K., Frischknecht R. Life cycle inventories of hydroelectric power generation. Uster ESU-services 2012.

[22] Dones R., Bauer C., Bolliger R., Burger B., Faist-Emmenegger M., Frischknecht R., et al. Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries,ecoinvent report No. 5. Dübendorf: Swiss centre for life cycle inventories. 2007.

[23] Enel. Environmental statement. Hydropower plants [in Italian]. 2013. Available on: [www.enel.it/it-IT/doc/azienda/ambiente/](http://www.enel.it/it-IT/doc/azienda/ambiente/)

[dichiarazioni\\_ambientali/20130624\\_da\\_emilia-toscana\\_2013.pdf](http://www.enel.it/it-IT/doc/azienda/ambiente/dichiarazioni_ambientali/20130624_da_emilia-toscana_2013.pdf) [accessed 02.03.15].

[24] ENEA. Climate archive: Climate profile of Italy – Lazio – Frosinone. Available on: [clisun.casaccia.enea.it/Profili/\\_images/regionimappe/lazioprovin/fros.html](http://clisun.casaccia.enea.it/Profili/_images/regionimappe/lazioprovin/fros.html) [accessed 02.03.15].

[25] Dragoni W, Valigi D. Contribution to the estimation of evaporation from liquid surfaces in Central Italy [in Italian]. *Geol. Romana*, 1994;30:151–8.

[26] Maack M.H. Deliverable n° 8-5 RS1a e generation of the energy carrier hydrogen in context with electricity buffering generation through fuel cells. Reykjavik: Icelandic New Energy; 2008.

[27] Susmozas A., Iribarren D., Dufour J. Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013;38:9961–72.

[28] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Heck T., Hellweg S., et al. Overview and Methodology,ecoinvent report No. 1. Dübendorf Swiss Centre Life Cycle Invent, 2007.

[29] Goedkoop M., Oele M., Leijting J., Ponsioen T., Meijer E. Introduction to LCA with SimaPro. Amersfoort PRé Consult 2013.

[30] Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., et al. Life cycle assessment e an operational guide to the ISO standards. Leiden: Centre of Environmental Science; 2001.

[31] Myhre G., Shindell D., Bréon F.M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., et al., editors. Climate change 2013: the physical science basis e contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. p. 659–740.

[32] VDI. VDI guideline 4600: cumulative energy demand (KEA) e terms, definitions, methods of calculation. Düsseldorf Ver Dtsch Ingenieure 2012.

[33] Koroneos C., Dompros A., Roubas G., Moussiopoulos N. Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004;29:1443–50.

[34] Bhandari R., Trudewind C.A., Zapp P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis e a review. *J. Clean. Prod.*, 2014;85:151–63.

[35] Terna Rete Italia National and regional energy balances in 2013. Available on: [www.terna.it/default/Home/SISTEMA\\_ELETTRICO/statistiche.aspx](http://www.terna.it/default/Home/SISTEMA_ELETTRICO/statistiche.aspx) [accessed 02.03.15].



- [36] Chandra D., Reilly J.J., Chellappa R. Metal hydrides for vehicular applications: the state of the art. *J. Min. Met. Mater. Soc.*, 2006;58:26–32.
- [37] Hubbard W.N., Rawlins P.L., Connick P.A., Stedwell R.E., O'Hare P.A.G. The standard enthalpy of formation of  $\text{LaNi}_5$  – the enthalpies of hydriding of  $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x$ . *J. Chem. Thermodyn.*, 1983;15:785–98.
- [38] Delhomme B., Lanzini A., Ortigoza-Villalba G.A., Nachev S., de Rango P., Santarelli M., et al. Coupling and thermal integration of a solid oxide fuel cell with a magnesium hydride tank. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013;38:4740–7.
- [39] Cicconardi S.P., Jannelli E., Spazzafumo G. Hydrogen energy storage: hydrogen and oxygen storage subsystems. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1997;22:897–902.
- [40] Miller H.I., Murray J., Laury E., Reinhardt J., Goudy A.J. The hydriding and dehydriding kinetics of  $\text{FeTi}$  and  $\text{Fe}_{0.9}\text{TiMn}_{0.1}$ . *J. Alloy Compd.*, 1995;231:670–4.
- [41] Lototsky M.V., Yartys V.A., Pollet B.G., Bowman R.C. Metal hydride hydrogen compressors: a review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014;39:5818–51.
- [42] Ballard. Distributed generation – ClearGen® 1 MW. Available on: [www.ballard.com/files/PDF/Distributed\\_Generation/CLEARgen\\_Spec\\_Sheet.pdf](http://www.ballard.com/files/PDF/Distributed_Generation/CLEARgen_Spec_Sheet.pdf) [accessed 02.03.15].
- [43] Bizon N. Improving the PEMFC energy efficiency by optimizing the fueling rates based on extremum seeking algorithm. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014;39:10641–54.
- [44] Venturelli L., Santangelo P.E., Tartarini P. Fuel cell systems and traditional technologies e part II: experimental study on dynamic behavior of PEMFC in stationary power generation. *Appl. Therm. Eng.*, 2009;29:3469–75.
- [45] Pérez L.C., Rajala T., Ithonen J., Koski P., Sousa J.M., Mendes A. Development of a methodology to optimize the air bleed in PEMFC systems operating with low quality hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013;38:16286–99.
- [46] Yu J., Jiang Z., Hou M., Liang D., Xiao Y., Dou M., et al. Analysis of the behavior and degradation in proton exchange membrane fuel cells with a dead-ended anode. *J. Power Sources*, 2014;246:90–4.
- [47] Gomez A., Raj A., Sasmito A.P., Shamim T. Effect of operating parameters on the transient performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack with a dead-end anode. *Appl. Energy*, 2014;130:692–701.
- [48] Álvarez G., Alcaide F., Cabot P.L., Lázaro M.J., Pastor E., Solla-Gullón J. Electrochemical performance of low temperature PEMFC with surface tailored carbon nanofibers as catalyst support. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012;37:393–404.
- [49] Chen P., Zhu M. Recent progress in hydrogen storage. *Mater. Today*, 2008;11:36–43.
- [50] Asano K., Yamazaki Y., Iijima Y. Hydrogenation and dehydrogenation behavior of  $\text{LaNi}_{5-x}\text{Co}_x$  ( $x = 0, 0.25, 2$ ) alloys studied by pressure differential scanning calorimetry. *Mater. Trans.*, 2002;43:1095–9.
- [51] An X.H., Gu Q.F., Zhang J.Y., Chen S.L., Yu X.B., Li Q. Experimental investigation and thermodynamic reassessment of  $\text{La-Ni}$  and  $\text{LaNi}_5\text{-H}$  systems. *Calphad.*, 2013;40:48–55.
- [52] Zhao Y.J., Freeman A.J. Accurate heat of formation for fully hydrided  $\text{LaNi}_5$  via the all-electron full-potential linearized augmented plane wave approach. *J. Appl. Phys.*, 2007;102. 033518/1–033518/5.
- [53] Mellouli S., Dhaou H., Askri F., Jemni A., Ben Nasrallah S. Hydrogen storage in metal hydride tanks equipped with metal foam heat exchanger. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009;34:9393–401.
- [54] Garrain D, Lechón Y. Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014;39:1769–74.
- [55] Italian Regulatory Authority for Electricity, Gas and Water. Gross electricity production by source. [www.autorita.energia.it/it/dati/eem6.htm](http://www.autorita.energia.it/it/dati/eem6.htm) [accessed 02.03.15].
- [56] Gutiérrez-Martín F., García-De María J.M., Bañi A., Laraqi N. Management strategies for surplus electricity loads using electrolytic hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009;34:8468–75.
- [57] Martín-Gamboa M., Iribarren D., Dufour J. On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 2015;53:27–37.

