



## АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ В ВОСТОЧНОЙ АМАЗОНИИ\*

*Л.К. де Лима<sup>1\*</sup>, Ж.Б.Ф. Дуэрте<sup>1</sup>, Т.Н. Везироглу<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Центр технологий, CCT-UNIFOR, Университет Форталезы  
Форталеза, СЕ 60811-905, США  
тел.: +1(55-85)477-3083, факс: +1-55-85-477-3061  
e-mail: luterocl@unifor.br

<sup>2</sup>Институт чистой энергии, Университет Майами  
а/я 248294, Coral Gables, Флорида 33124-0620, США  
тел.: +1(305)284-46-66; факс: +1(305)284-47-92

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.076-079

Заключение совета рецензентов: 12.09.17 Заключение совета экспертов: 21.03.18 Принято к публикации: 15.10.18

Бразилия сократила использование древесины в форме древесного угля или топливной древесины примерно до 10 % от потребления энергии в 2000 г. Другая ситуация в бразильской Амазонии, где растет спрос на древесный уголь для производства чугуна по проекту «Большой Каражас». Целью настоящего исследования является проверка возможности использования электролитического водорода вместо древесного угля для прямого восстановления железной руды в этом регионе. Рассматриваются технологические, экономические и экологические аспекты. Это исследование может быть полезным как Бразилии в целом, так и Амазонии в частности, поскольку природные ресурсы могут быть сохранены и загрязнение предотвращено.

Ключевые слова: Амазония; восстановление железной руды водородом; сохранение природы.

## A PROPOSAL OF AN ALTERNATIVE ROUTE FOR THE REDUCTION OF IRON ORE IN THE EASTERN AMAZONIA

*Lutero Carmo de Lima<sup>1\*</sup>, João Batista Furlan Duarte<sup>1</sup>, T. Nejat Veziroglu<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Center of Technological Sciences, CCT-UNIFOR, University of Fortaleza  
Fortaleza, CE 60811-905, USA  
tel.: +1-55-85-477-3083; fax: +1-55-85-477-3061.  
e-mail address: luterocl@unifor.br

<sup>2</sup>Clean Energy Research Institute, University of Miami  
Coral Gables, FL 33124, USA

\*Лима Л.К. де, Дуэрте Ж.Б.Ф., Везироглу Т.Н. Альтернативный способ восстановления железной руды в Восточной Амазонии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;01-03:76-79.



Brazil has decreased the utilization of wood under the form of either charcoal or fuel wood to about 10% of its energy consumption (year 2000). The same is not true for the Brazilian Amazonia where there is a growing demand of charcoal for the production of pig iron in the Greater Carajas Program. The objective of the present study is to verify the feasibility of using electrolytic hydrogen instead of charcoal for the direct reduction of iron ore in that region. Techno, economic and environmental aspects are considered. This study can be beneficial to Brazil in general and Amazonia in particular since natural resources might be preserved and pollution avoided.

Keywords: Amazonia; hydrogen iron ore reduction; natural preservation.



Турхан Н. Везироглу  
T.N. Veziroglu

**Сведения об авторе:** д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

**Образование:** Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

**Награды:** лауреат нескольких международных наград.

**Опыт работы:** профессор, заведующий кафедрой технического факультета в университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергии (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.); почетный профессор университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время); почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ).

**Область научных интересов:** неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

**Публикации:** более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохраняет Землю».

**Information about the author:** Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, a member of 18 scientific organizations.

**Education:** the City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, advanced studies in engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

**Awards:** recipient of several international awards.

**Experience:** University of Miami, Engineering faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, FL, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEЕ).

**Research interests:** two-phase flow instabilities; interstitial heat transfer; solar energy; global warming; environmental problems; renewable energy sources and hydrogen energy system.

**Publications:** more than 350, editor of 160 books and proceedings, co-author of the book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

## 1. Введение

Бразилия в 2000 г. произвела 27,72 млн тонн чугуна, из них 20,32 млн тонн за счет угля и 7,39 млн тонн за счет древесного угля. Как сообщила Abracave – Бразильская ассоциация производителей древесного угля [1], судя по данным о ежегодно добываемом чугуне и обогащаемом в бразильских доменных печах угле, в среднем на производство 1 тонны чугуна идёт 1,1 тонна угля. В 1998 г. независимые производители чугуна потребляли 6,4 млн тонн древесного угля, что составляло 1,4 млн тонн от общей суммы, потраченной по Проекту «Большой Каражас»

(PGC)<sup>†</sup> (Восточная Амазония). В 1999 г. и 2000 г. Проект «Большой Каражас» потреблял 1,6 млн тонн и 1,4 млн тонн древесного угля соответственно. В среднем PGC производит ежегодно 1 млн тонн чугуна. Известно, что почти в каждом секторе, вовлеченном в PGC, стопроцентная рекультивация древесного угля не является экономически жизнеспособной и что только часть произведенного древесного угля по PGC рекультивируется. Если бы учитывались эколо-

<sup>†</sup> более 50 различных промышленных и инфраструктурных объектов по освоению и эксплуатации ресурсов железной, марганцевой, медной руды, бокситов в горнопромышленной зоне Серра-дус-Каражас (120 тыс. км<sup>2</sup>)

гические издержки, связанные с уничтожением лесов, стоимость угля увеличилась бы примерно на 30 долл. США за тонну.

Производство чугуна в штате Минас-Жерайс (исторически крупнейший производитель чугуна в Бразилии) истощило практически все его естественные леса, и Минас начал импортировать древесный уголь из других штатов, таких как Гояс и Мату-Гросу-ду-Сул. Например, статистика Abracave [1] показывает, что в 1994 г. Минас-Жерайс потреблял 80 % древесного угля, произведенного в Бразилии, а другие штаты, которые здесь не упоминались, – 12 %. В 2000 г. Минас потреблял 33 % (5,71 млн тонн), PGC – 16 % (1,44 млн. тонн) и другие не упоминавшиеся штаты – 52 % (9,14 млн тонн). Значительное участие других штатов в производстве древесного угля, вероятно, основано на природной древесине, а большинство сохранившихся природных лесов Бразилии находится в Амазонии.

Если запланированные объемы производства чугуна будут сохранены на следующие годы, местные леса в районе Программы «Большой Каражас» будут исчерпаны не более чем за два-три десятилетия, и металлургия на основе угля в этом регионе будет нежизнеспособной.

В настоящей статье рассматривается альтернативный способ производства железа в PGC, основанный не на использовании древесного угля, и который в ближайшем будущем станет единственным экономически и экологически обоснованным решением для этого региона [2–4]. Решение представляет собой прямое восстановление железной руды водородом, которое далее будет детально рассмотрено.

## 2. Произведенное при помощи водорода железо в восточной Амазонии

Предложение авторов данной статьи заключается в производстве губчатого железа путем прямого восстановления железной руды с использованием электролитического водорода. Как подчеркивалось в докладе Всемирного банка [5], подготовленном в 1998 г.: «... там, где это технически и экономически целесообразно, прямое восстановление железной руды для производства железа и стали является предпочтительным, поскольку оно не требует производства кокса и оказывает меньшее воздействие на окружающую среду». В другом тексте – Фейнмана [6], президента J. Feinman and Associates Inc., сказано, что «прямые процессы восстановления благоприятствуют в тех местах, где имеются большие запасы недорогого природного газа, не коксующихся углей и / или гидроэлектроэнергии, и которые имеют доступ к подходящим железным рудам или агломератам».

Регион PGC выглядит как лучшее место в мире для внедрения программы прямого восстановления железной руды, поскольку имеется: 1) огромный запас железной руды; 2) доступная гидроэлектро-

энергия на электростанции Tucuruí; 3) замечательные условия для получения электролитического водорода; 4) заинтересованность мирового сообщества в сохранении тропических лесов.

Водород можно использовать практически во всех областях, где сегодня применяется ископаемое топливо или древесина, а вместо угля или древесного угля – для восстановления железной руды. Применение водорода для восстановления железной руды имеет много преимуществ, таких как: отсутствует значительное загрязнение; общий расход тепла меньше, чем в доменных печах с коксовым или древесным топливом; получаемое губчатое железо имеет низкий уровень примесей.

Здесь предлагается использовать часть имеющегося гидроэлектричества, генерируемого на гидроэлектростанции Tucuruí, для получения водорода, который будет необходим для производства губчатого железа путем прямого восстановления железной руды. Учитывая тот факт, что внешнековое электричество должно быть очень дешевым (от 0,01 до 0,01 долл. США / кВт·ч), водород должен производиться по цене примерно 10 долл. США / ГДж (долл. США 0,1 / N/m<sup>3</sup>). Производство водорода из воды путем электролиза является принципиально простым процессом, и технология уже разработана и развита. В настоящее время во всем мире существует несколько крупных электролизных установок, производящих водород и кислород. Основной частью электролизной установки являются электролизеры, но также требуются и другие элементы, такие как источник постоянного тока, источник питательной воды, циркуляция электролита, разделение и очистка газа, охлаждение, подача инертного газа, контроль процесса и источник питания для вспомогательных установок. В среднем один N/m<sup>3</sup> водорода может быть произведен из 4,4 кВт·ч электроэнергии.

Существует много разработанных и находящихся в процессе исследования процессов восстановления железной руды, которые могут быть адаптированы к использованию водорода. Как было отмечено Zervas et al. [7], за три последних десятилетия были два отдельных направления в развитии первичной технологии изготовления железа. Главное направление сосредоточено на доменной печи, которая по-прежнему остается основной технологической единицей для производства железа во всем мире. Доминирующие альтернативные технологии, которые возникли в конце 1960-х и начале 1970-х гг., основаны на прямом восстановлении и выплавке – исходное сырье оксида железа восстанавливается до металлического железа посредством восстановительных газов, часто при температурах ниже температуры плавления самого железа, и таким образом избегая использования кокса или древесного угля. Процессы прямого восстановления превращают железную руду в губчатое железо в форме мелких частиц, гранул, агломератов и т.д. Эти процессы можно разделить на два класса в зависимости от используемого



топлива – природного газа или угля. Процессы на основе природного газа наиболее легко адаптируются к использованию водорода. Фактически использование водорода в качестве восстановительного газа в процессе прямого восстановления даже упростит процесс прямой редукиции, поскольку это сделает ненужной установку для производства восстановительного газа (газовый риформинг, при котором природный газ риформируется для получения CO и H<sub>2</sub>) [8].

Среди различных коммерчески доступных процессов прямого восстановления природного газа (DR) наиболее известны: DRD Midrex; HYL DR; Armco DR; Purofer DR; Fior DR; DR в восстановительной шахте [9]. В среднем любой процесс DR требует приблизительно 10 ÷ 12 ГДж для производства 1 тонны губчатого железа. Исключением является FIOR в Uuid, требующий 15 ГДж. После адаптации к водороду разница между этими процессами будет заключаться в потреблении водорода, потреблении электроэнергии, инвестиционных затратах и технологических усовершенствованиях. Например, в среднем для Midrex потребуется 110 кВт·ч электрической энергии и 625 Н/м<sup>3</sup> электролитического водорода для производства 1 тонны губчатого железа. Для HYL потребуется 90 кВт·ч и 750 Н/м<sup>3</sup> соответственно; для Armco – 20 кВт·ч и 700 Н/м<sup>3</sup>; для Purofer – 120 кВт·ч и 750 Н/м<sup>3</sup> соответственно; для DR в восстановительной шахте – 1 100 кВт·ч электрической энергии и около 535 Н/м<sup>3</sup> водорода для производства 1 тонны губчатого железа.

Например, стоимость производства 1 тонны губчатого железа посредством Midrex составит около 115 долларов США. В разбивке эта стоимость составит: 14,2 долл. США – 1,5 тонны железной руды; 62,5 долл. США – 625 Н/м<sup>3</sup> электролитического водорода; 3,3 долл. США – электроэнергия (долл. США 0,03 / кВт·ч); 4,00 долл. США – работа; 4,3 долл. США – обслуживание; 3,55 долл. США – другие поставки полезных ископаемых; 3,2 долл. США – амортизация; 4,5 долл. США – административные расходы; 2,5 долл. США – прочие расходы; 12,8 долл. США – транспортировка. По данным Abracave [1], Бразильской ассоциации производителей древесного угля, в 2001 г. средняя цена произведенного из древесного угля чугуна составляла 103,00 долл. США за тонну с учётом стоимости угля (42 долл. США). До июля 2002 г. чугун восстановил цену в среднем до 113 долларов США за тонну. Если в цене чугуна учитываются экологические издержки, то, без сомнения, железо с прямым восстановлением водородом является конкурентоспособным.

Экологическими факторами для принятия DR будут сокращение выбросов в атмосферу и возможное сохранение бразильских дождевых лесов.

### 3. Заключение

Программа «развития» бразильской восточной Амазонии представляется необратимым процессом. В этом регионе многие проекты по сжиганию древесного угля для производства чугуна были реализованы или находятся в стадии реализации, что влечет за собой рост потребления древесины. Истощение природных ресурсов будет смягчено, если в PGC будет внедрена программа прямого восстановления железной руды. Эта технология в самое ближайшее время будет экономически конкурентоспособной и, безусловно, уже является экологически чистой.

### References

- [1] Abracave—Brazilian Association of Charcoal. Statistical yearbook, 2001.
- [2] De Lima L.C. Readiness of Brazil to be the 8rst country to utilize hydrogen as energy carrier: the Amazon issue. Report to the Clean Energy Research Institute, University of Miami, USA, 1991. 64p.
- [3] De Lima L.C., Barbir F., Veziroglu T.N. Electrolytic hydrogen produced steel instead of charcoal produced steel in the Brazilian Amazonia. *Ninth World Hydrogen Energy Conference*, vol. 3. Paris, France, 22–25 June, 1992. p. 1837–44.
- [4] De Lima L.C., Barretos J.C.N. Hydrogen utilization for the reduction of iron ore in the Brazilian Amazonia: prospective natural resources preservation. *Fourth International Conference on New Energy Systems and Conversions*, Osaka, Japan, 27–30 June, 1999.
- [5] World Bank Group, Pollution prevention and abatement handbook: iron and steel manufacturing, draft technical background document. Environment Department, Washington, DC, USA, 1998. p. 328.
- [6] Feinman J. Direct reduction and smelting process. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA, USA, 1999. p. 763–6 [chapter 11].
- [7] Zervas T., McMullan J.T., Williams B.C. Developments in iron and steel making. *Int. J. Energy Res.*, 1996;20:69–91.
- [8] Tarnay D.S. Hydrogen production at hydro power plants. *Hydrogen energy progress*, V, vol. I. Toronto, Canada: Pergamon Press, 1984. p. 323–33.
- [9] Davis C.G., McFarling J.F., Pratt H.R. Direct reduction technology and economics. *Ironmaking Steelmaking*, 1982;9(3):93–129.

