

УДК 338.5:69

Беляев Евгений Игнатьевич, Куклите Йола Яновна,
Музыка Виталий Александрович

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СЕБЕСТОИМОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ

В статье приводятся результаты исследования влияния технологической схемы получения водорода на его себестоимость. Были рассмотрены данные себестоимости водорода в различных технологических схемах его получения и определены факторы, влияющие на себестоимость. Получено уравнение для прогнозной оценки себестоимости водорода в зависимости от технологической схемы его получения и цены на электроэнергию. Разработана методика прогнозной оценки себестоимости водорода.

Ключевые слова: себестоимость, водород, прогноз, оценка, схема, элементарный технологический процесс, методика.

Evgeniy Beliaev, Vitali Muzyka, Iola Kuklite
PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE COST OF HYDROGEN PRODUCTION
IN TECHNOLOGICAL SCHEMES

The article presents the results of the study of the influence of the technological scheme of hydrogen production on its cost. The data on the cost of hydrogen in various technological schemes of its production were considered and the factors influencing the cost price were determined. The equation for the forecast estimation of cost price of hydrogen depending on the technological scheme of its reception and the price of the electric power is received. Developed a method of predictive estimate of the cost of hydrogen.

Keywords: cost, hydrogen, forecast, estimate, diagram, basic technological process, the methodology.

Введение / Introduction. В последние годы не ослабевает интерес к применению водорода в качестве энергоресурса. Его использование приводит к уменьшению загрязнения окружающей среды выбросами отработанного топлива. Сейчас в мире получают около 30 млн т водорода в год, причем в основном из природного газа. Согласно прогнозам, за 40 лет производство водорода должно увеличиться в 20–30 раз [1].

В настоящее время производство водорода достаточно дорогое. Поэтому современное применение его ограничено специфическими областями. В то же время использование для производства водорода возобновляемых источников энергии может обеспечить более низкие затраты на его производство и расширить тем самым область его применения.

Разные технологические схемы обеспечивают различную себестоимость получения водорода. При подготовке инвестиционных проектов, связанных с получением водорода, вопрос себестоимости, имеющий важнейшее значение, будет определять выбор технологической схемы получения водорода. Кроме того, величина себестоимости будет влиять на срок окупаемости и другие показатели инвестиционного проекта. Повышение эффективности проекта позволит, в свою очередь, рассчитывать на привлечение инвестиций.

Материалы и методы / Materials and methods. При разработке технологических схем получения водорода возникает необходимость расчета себестоимости получения водорода. Методики этих расчетов достаточно громоздки, вплоть до составления смет. Поэтому была поставлена цель – разработать методику прогнозной оценки себестоимости водорода в технологических схемах, не требующую детального проектирования и составления смет.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ имеющихся данных по себестоимости водорода в промышленности, в проектных расчетах и экспертных оценках;
- выполнить анализ имеющихся технологических схем получения водорода;
- дать классификацию способов использования и получения водорода;
- найти взаимосвязь между себестоимостью водорода и технологическими схемами его получения;
- определить факторы, влияющие на себестоимость водорода в различных технологических схемах;
- получить уравнение для прогнозной оценки себестоимости водорода.

Анализ литературных данных позволил дать классификацию способов производства и использования водорода по отраслевому и целевому признакам.

Водород применяется в отраслях:

- химическая промышленность;
- нефтехимическая промышленность;
- металлургическая промышленность;
- наземный транспорт;
- авиация.

Традиционные и перспективные области применения водорода:

- в качестве ракетного топлива;
- получение пищевых белков;
- сварка и резка металлов.

Применение водорода в перспективе возможно в следующих отраслях:

- атомная энергетика;
- сельское хозяйство;
- коммунальное хозяйство.

Также был проведен анализ методов получения водорода. Основными способами его получения являются:

- физические методы извлечения водорода из водосодержащих примесей;
- электролиз воды;
- парциальное окисление и паровая конверсия углеводородов и оксида углерода;
- переработка угля и кокса;
- термические и термомагнитные методы получения водорода;
- фотолиз;
- термохимический метод;
- радиолиз;
- комбинированные методы получения водорода.

Результаты и обсуждение / Results and discussion. В ходе исследований на основе литературных источников была подготовлена база данных [2, 3, 4, 5], включающая: способ получения водорода; технологическую схему его получения; цены на основные виды сырья в соответствующий период времени и себестоимость водорода. Стоимостные показатели использовались в долларовой оценке в связи с резкими колебаниями рубля за последние 20 лет. Использовались данные с 1993 по 2015 гг.

В результате была найдена зависимость себестоимости водорода от вида технологических схем, стоимости электроэнергии и от количества элементарных процессов в технологических схемах. Получено уравнение в виде линейной регрессии.

В результате проведенных исследований была разработана методика прогнозной оценки себестоимости водорода. Она состоит из следующих действий:

1. Декомпозиция технологической схемы производства водорода на элементарные технологические процессы в соответствии с правилами.
 - 1.1. Учет элементарных технологических процессов на базе основного технологического оборудования в схеме. Рассматриваются только основные технологические потоки.
 - 1.2. При сравнении схем добавляются элементарные технологические процессы, которые очевидны в данной технологии, но автором опущены, т. е. соблюдается принцип единого подхода при сравнении технологий.
 - 1.3. Насосное оборудование и соединительные трубопроводы в качестве элементарных технологических процессов не рассматриваются.
 - 1.4. Исключается дублирование при наличии параллельных элементарных технологических процессов.
 - 1.5. Принципиальная схема замещается сетевой, в узлах которой показываются элементарные технологические процессы технологии. Узлы соединяются стрелками в соответствии с движением потоков в исходной схеме.
2. Определение значений факторов в уравнении прогнозной оценки себестоимости водорода:
 - стоимость электроэнергии для предполагаемых условий применения технологической схемы, долл./кВт·ч;
 - общее количество элементарных технологических процессов в сетевой модели схемы по п. 1.5 настоящей методики;
 - количество процессов, непосредственно связанных с получением водорода в сетевой модели схемы по п. 1.5 настоящей методики;
 - находим отношение общего количества элементарных технологических процессов схемы к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода.
3. Определение прогнозной оценки себестоимости водорода по уравнению:

$$Y = -5,114 + 33 \cdot X_1 + 2,745 \cdot X_2,$$

где Y – себестоимость водорода, долл./кг; X_1 – стоимость электроэнергии, долл./кВт·ч; X_2 – отношение общего количества элементарных технологических процессов в схеме к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода.

На диаграмме иллюстрируются совпадение базовых и расчетных значений на основе полученного уравнения.

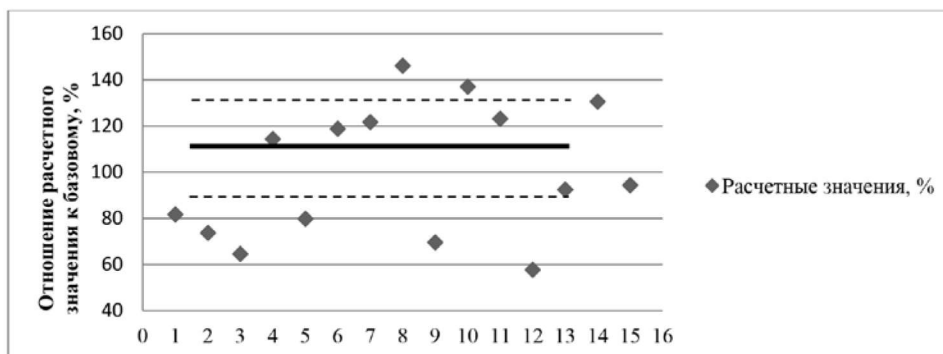


Рис. 1. Оценка совпадения расчетных значений с базовыми

Из рис. 1 видно, что большинство расчетных значений находится в диапазоне $\pm 25\%$ (пунктирная линия). Такая оценка объясняется сравнением разных технологий и базовых данных разных лет.

На рис. 2 показано влияние цены на электроэнергию на себестоимость водорода для различных технологий его получения. Данный график был построен для одного и того же значения второго фактора, ($X_2 = 1,5$).

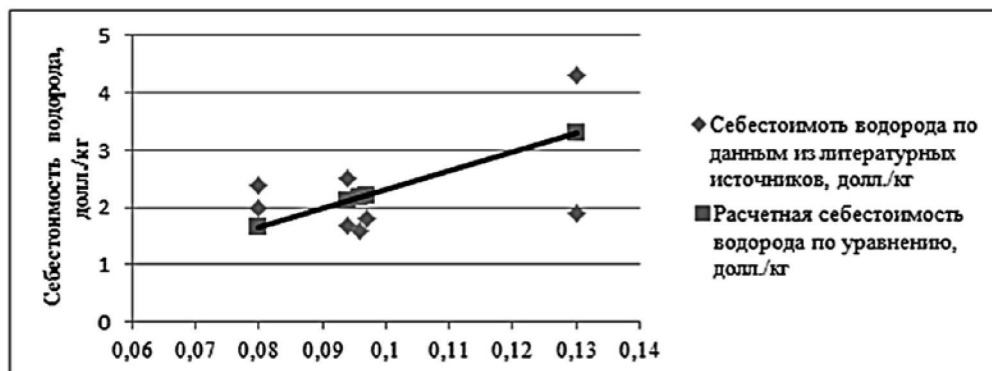


Рис. 2. Влияние цены на электроэнергию на себестоимость водорода для различных технологий его получения

Как видим, рост цены электроэнергии приводит к росту себестоимости водорода. Довольно значимый разброс связан с различием технологий получения водорода.

На рис. 3 представлено влияние отношения общего количества элементарных технологических процессов к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода, на его себестоимость при одинаковом значении первого фактора (цена электроэнергии).

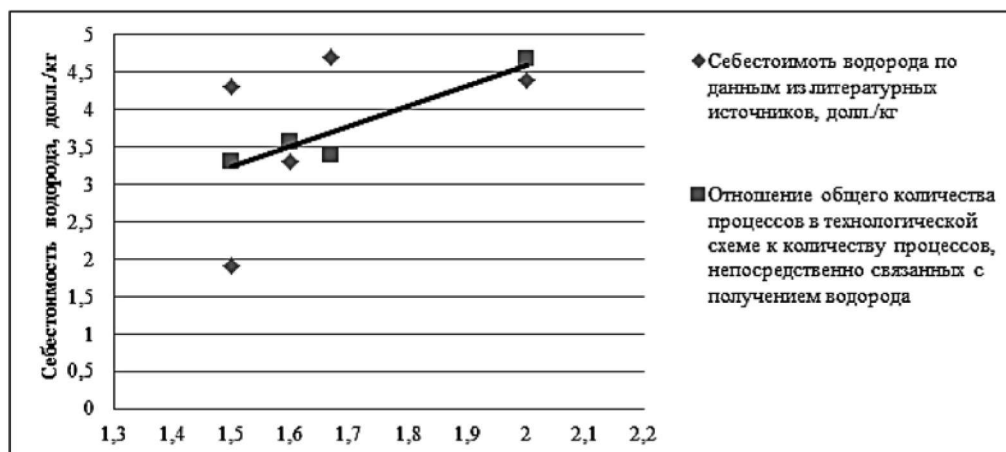


Рис. 3. Влияние отношения общего количества элементарных процессов в технологической схеме к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода, на его себестоимость при одинаковой цене на электроэнергию.

Ниже показан пример применения разработанной методики для прогнозной оценки себестоимости водорода для заданной технологической схемы [6], представленной на рис. 4.

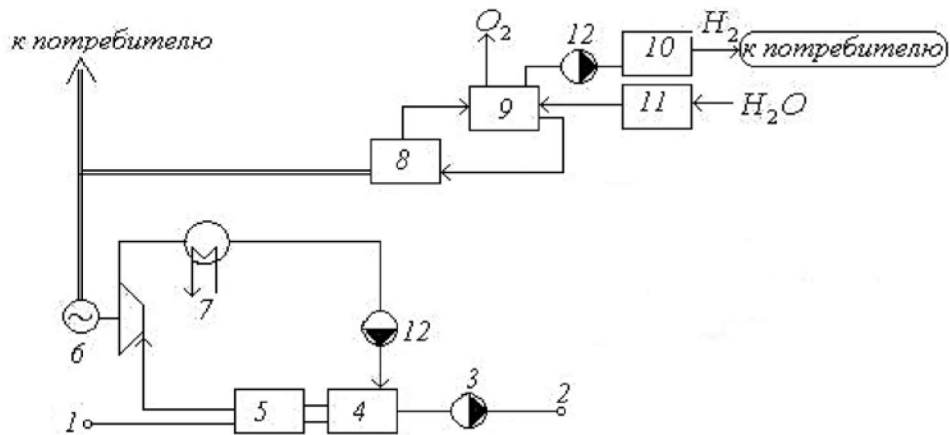


Рис. 4. Схема получения водорода электролизом воды за счет геотермальной энергии
 1 – добывающая скважина; 2 – нагнетательная скважина; 3 – насос закачки отработанной термальной воды; 4 – теплообменник – подогреватель; 5 – испаритель; 6 – турбоэлектрический агрегат; 7 – конденсатор; 8 – трансформаторно-выпрямительное устройство; 9 – электролизер; 10 – хранилище водорода; 11 – приготовление раствора; 12 – насос.

Применение разработанной методики дает при декомпозиции следующую модель схемы (рис. 5).

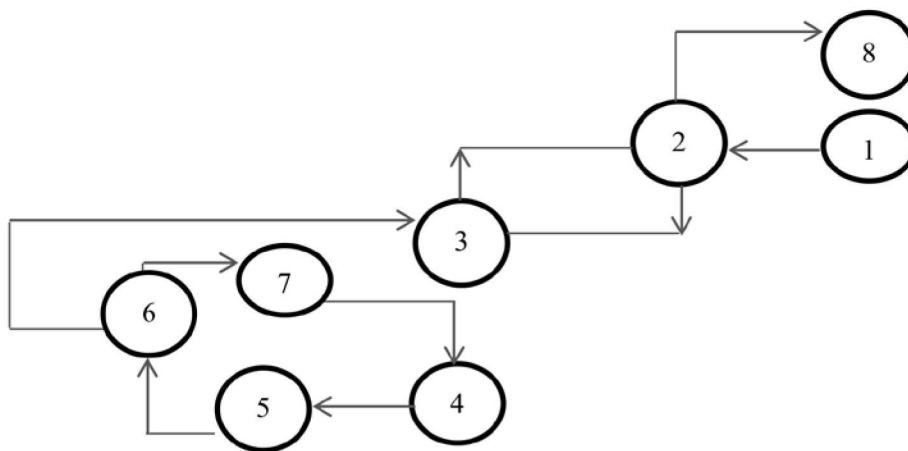


Рис. 5. Сетевая модель получения водорода электролизом воды за счет геотермальной энергии:
 1 – процесс приготовления рабочего вещества; 2 – процесс электролиза рабочего вещества; 3 – процесс генерации постоянного тока; 4 – процесс подогревания рабочего тела; 5 – процесс генерации пара рабочего тела; 6 – процесс получения переменного тока; 7 – процесс конденсации пара рабочего тела; 8 – процесс хранения водорода (Элементарные технологические процессы).

По схеме видим, что общее количество элементарных технологических процессов в схеме (рис. 5), равно 8. Количество процессов в технологической схеме, непосредственно связанных с получением водорода, равно 5.

Определяем значение факторов: X_1 – стоимость электроэнергии в 2016 году – это 0,14 долл./кВт·ч; X_2 – отношение общего количества элементарных технологических процессов в схеме к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода ($8/5 = 1,6$).

Находим прогнозную оценку себестоимости водорода для заданной технологической схемы в 2016 году.

$$Y = -5,114 + 33 \cdot 0,14 + 2,745 \cdot 1,6 = 3,898 \text{ долл./кг.}$$

Заключение / Conclusion. Полученная методика анализа прогнозной оценки себестоимости водорода может быть применена в следующих областях:

- для укрупненных оценок себестоимости при разработке новых технологических схем производства водорода;
- для оптимизации технологических схем при подготовке инвестиционных проектов получения водорода;
- для определения финансово-экономических показателей по представленным технологическим схемам получения водорода.

Область применения указанной методики:

- для финансово-экономических расчетов при производстве водорода по различным технологиям;
- при уровне цен на электроэнергию в интервале от 0,04 до 0,13 долл./кВт·ч;
- при отношении общего количества элементарных технологических процессов в схеме к количеству элементарных технологических процессов, непосредственно связанных с получением водорода, от 1,5 до 2.

Рассматриваемая методика также применима для расчета технико-экономических показателей рекомендуемых энергосберегающих мероприятий в сфере жилищно-коммунального хозяйства и энергетики.

ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Скляр Н. Е., Назиров Р. Р. Состояние и перспективы развития водородной энергетики // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2006.
2. Кулик О. П., Чернышев Л. И. Основные направления развития водородной энергетики, 2010. 40 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.materials.kiev.ua/hydrogen_2011-2015/obzor1.pdf
3. Синяк Ю. В., Петров В. Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его центрального производства // Отрасли и межотраслевые комплексы, 2008. 12 с.
4. Dr. Steinberger-Wilckens R., Linnemann J., Trümper S. Ch. Cost model for current and future hydrogen production. PLANET GbR, 2008. 43 с.
5. Ekins P. Hydrogen energy: economic and social challenges // Publishing for a sustainable future. London and Washington, DC, 2010. 313 p.
6. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учеб пособие / сост. В. Д. Плыкин / Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2013. 172 с.
7. Калиниченко М. Ю., Калиниченко А. С., Аборнев Д. В. Методика определения экономической целесообразности применения энергосберегающего мероприятия // Материалы III ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону». Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техноферной безопасности. Ставрополь: ООО ИД «ТЭСЭРА», 2015. 396 с.
8. Богачев В. В., Калиниченко М. Ю., Организационно-технические мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов // Материалы XV региональной научно-технической конференции «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». Ставрополь: Сев-КавГТУ, 2011. С. 178.
9. Беляев Е. И., Куклите Й. Я., Беляева П. Е. Методология применения энергосберегающих технологий при реконструкции жилого фонда // Современная наука и инновации: научный журнал. 2015. № 4 (12). С. 87–91.

REFERENCES AND INTERNET RESOURCES

1. Sklyarov N. E., Nazirov R. R. Sostoyanie i perspektivy razvitiya vodorodnoj ehnergetiki. // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo», 2006.

2. Kulik O. P., Chernyshev L. I. Osnovnye napravleniya razvitiya vodorodnoj ehnergetiki, 2010. 40 s. [EHlektronnyj resurs]. URL: http://www.materials.kiev.ua/hydrogen_2011-2015/obzor1.pdf
3. Sinyak YU. V., Petrov V. YU. Prognoznye ocenki stoimosti vodoroda v usloviyah ego central'nogo proizvodstva // Otrashi i mezhotraslevye komplekсы, 2008. 12 s.
4. Dr. Steinberger-Wilckens R., Linnemann J., Trümper S. Ch. Cost model for current and future hydrogen production. PLANET GbR, 2008. 43 c.
5. Ekins P. Hydrogen energy: economic and social challenges // Publishing for a sustainable future. London and Washington, DC, 2010. 313 c.
6. Netradicionnye vozobnovlyaemye istochniki ehnergii: ucheb posobie / sost. V. D. Plykin. Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universiteta», 2013. 172 p.
7. Kalinichenko M. YU., Kalinichenko A. S., Abornev D. V. Metodika opredeleniya ehkonomicheskoy celesoobraznosti primeneniya ehnergoberegayushchego meropriyatiya // Materialy III ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Severo-kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaya nauka – regionu». Aktual'nye problemy stroitel'stva, transporta, mashinostroeniya i tekhnosfernoj bezopasnosti. Stavropol': OOO ID «TEHSEHRA», 2015. 396 p.
8. Bogachev V. V., Kalinichenko M. YU. Organizacionno-tekhnicheskie meropriyatiya po ehkonomii toplivno-ehnergeticheskikh resursov // Materialy XV regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Vuzovskaya nauka – Severo-Kavkazskomu regionu». Stavropol': Sev-KavGTU, 2011. – P. 178.
9. Belyaev E. I., Kuklite J. YA., Belyaeva P. E. Metodologiya primeneniya ehnergoberegayushchih tekhnologij pri rekonstrukcii zhilogo fonda, Sovremennaya nauka i innovacii: nauchnyj zhurnal. 2015. № 4 (12). P. 87–91.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляев Евгений Игнатьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости», Инженерный институт, Северо-Кавказский федеральный университет. E-mail: e.belyaev@mail.ru

Куклите Йола Яновна, ассистент кафедры «Теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости», Инженерный институт, Северо-Кавказский федеральный университет. E-mail: iola67@mail.ru

Музыка Виталий Александрович, студент магистратуры кафедры «Теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости», Инженерный институт, Северо-Кавказский федеральный университет. E-mail: iola67@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Beliaev Evgeniy, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, Department of heat and gas supply and appraisal of real estate, Engineering Institute, North Caucasus Federal University. E-mail: e.belyaev@mail.ru

Kuklite Iola, assistant, Department of heat and gas supply and appraisal of real estate, Engineering Institute, North Caucasus Federal University. E-mail: iola67@mail.ru

Muzyka Vitalij, student the Department of heat and gas supply and appraisal of real estate, Engineering Institute, North Caucasus Federal University. E-mail: iola67@mail.ru