



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 09.06.17. Ред. рег. № 2601-2

The article has entered in publishing office 09.06.17. Ed. reg. No. 2601-2

УДК 662.769.21

СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ САУДОВСКОЙ АРАВИИ**С. Алмогрен, Т.Н. Везироглу*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
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.030-042

Заключение совета рецензентов: 15.06.17 Заключение совета экспертов: 18.08.17 Принято к публикации: 12.09.17

Авторами разработана модель солнечно-водородной энергетической системы для Саудовской Аравии путем определения соотношений между основными и второстепенными энергетическими характеристиками. В течение некоторого периода времени проводились исследования масштаба и тенденций данных характеристик с внедрением и без внедрения водородных технологий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в ближайшие тридцать-сорок лет нефтяных запасов Саудовской Аравии будет недостаточно для обеспечения собственных энергетических потребностей и реализации экспортной политики. Результаты также показывают, что выбор в пользу солнечно-водородной энергетической системы обеспечит экономию нефтяных запасов, снизит уровень загрязнения окружающей среды и сформирует устойчивую энергетическую систему в стране. Кроме того, Саудовская Аравия сумеет на длительное время закрепить за собой статус экспортера водорода.

Ключевые слова: солнечный водород; энергия водорода; водородная энергетика в Саудовской Аравии.

SOLAR-HYDROGEN ENERGY SYSTEM FOR SAUDI ARABIA

*S. Almogren, T.N. Veziroglu*Clean Energy Research Institute, Mechanical Engineering, University of Miami
P.O. Box 248294 Coral Gables, FL 33124-0620, USA
tel.: +1 305 284 46 66; факс: +1 305 284 47 92
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.030-042

Referred 15 June 2017 Received in revised form 18 August 2017 Accepted 12 September 2017

* Алмогрен С., Везироглу Т.Н. Солнечно-водородная энергетическая система для Саудовской Аравии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):30-42.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2004;29:1181-1190. ©2003 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

A model for solar-hydrogen energy system for Saudi Arabia has been developed by obtaining relationships for and between main energy and energy-related parameters. The parameters' magnitude and trends with and without hydrogen introduction have been investigated over a period of time. The results indicate that the oil resources of Saudi Arabia would not be enough to meet the domestic and export markets starting in three to four decades. The results also show that adopting the solar-hydrogen energy system would extend the availability of oil resources, reduce pollution, and establish a permanent energy system for Saudi Arabia. They also indicate that Saudi Arabia could become an exporter of hydrogen forever.

Keywords: solar hydrogen; hydrogen energy; hydrogen for Saudi Arabia.



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 энергетики (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 сохранит Землю».

Information about the author: Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, 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 book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

1. Введение

Саудовская Аравия – крупнейшее государство на Ближнем Востоке, расположенное на Аравийском полуострове. Это государство граничит с Персидским заливом и Красным морем, занимая между ними территорию общей площадью 1 960 582 км², что составляет чуть более одной восьмой территории США. Саудовская Аравия характеризуется суровым, сухим пустынным климатом с большими перепадами температуры и нулевой или низкой облачностью. Эта огромная территория получает колоссальное количество солнечного излучения.

Население Саудовской Аравии составляет 24 000 000 человек, ВВП на душу населения – \$10 600. В основе экономики Саудовской Аравии лежит нефтяная промышленность: страна располагает самыми богатыми запасами нефти (26 % разведанных мировых запасов) и является крупнейшим экспортером нефти – 75 % доходов бюджета приносит экспорт нефтепродуктов [1].

Солнечный пояс Земли – это территория, расположенная между 40° северной и 40° южной широты, на которую падает колоссальное количество солнечной энергии. Географический центр Саудовской Аравии находится на 25° северной широты, где яркий световой день длится в среднем 8,89 ч, а по данным, по-



лученным на 41 станции за период более 10 лет, суммарное солнечное излучение, попадающее на горизонтальную поверхность, составляет $5\,591\text{Втч м}^{-2}$ [2]. Водород является одним из наиболее перспективных энергоносителей будущего, и на концепцию солнечно-водородной энергетической системы возлагаются большие надежды. Среди преимуществ данной системы можно выделить экологическую безопасность и возобновляемость.

В настоящей работе изучены перспективы и преимущества применения солнечно-водородной энергетической системы в Саудовской Аравии. Авторами предпринята попытка оценить будущую роль такой энергосистемы в обеспечении энергетических потребностей страны, в экспорте водорода и экономии ископаемых энергоресурсов.

Список обозначений	
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
<i>A</i>	Константа
<i>B</i>	Константа; энергопотребление на душу населения
<i>C</i>	Константа; цена на топливо
<i>D</i>	Константа
<i>E</i>	Энергопотребление
<i>F</i>	Объем производства (потребления) ископаемого топлива
<i>G</i>	Валовой продукт
<i>H</i>	Объем производства (потребления) водорода
<i>K</i>	Константа
<i>L</i>	Качество жизни
<i>P</i>	Загрязнение; экологический ущерб
<i>Q</i>	Численность населения
<i>R</i>	Ископаемые ресурсы
<i>t</i>	Время
<i>U</i>	Загрязнение от ископаемого топлива на единицу энергии
<i>V</i>	Безразмерный модификатор времени удвоения
<i>W</i>	Безразмерный модификатор роста
yr	Год
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
Δ	Разница
γ	Функция потребления топлива
δ	Количество ежегодно добываемого ископаемого топлива
ε	Соотношение загрязнения от водорода и ископаемого топлива
θ	Время удвоения, время двукратного увеличения
η	Соотношение эффективности применения водорода и ископаемого топлива
<u>Индексы верхние</u>	
<i>a, b, c</i>	постоянные степени
<i>u, w, x, y, z</i>	малые постоянные степени
<u>Индексы нижние</u>	
<i>c</i>	Составной
<i>d</i>	Потребность
<i>e</i>	Энергия
<i>f</i>	Ископаемое топливо
<i>g</i>	Валовой продукт
<i>h</i>	Водород
<i>n</i>	Количество (лет)
<i>o</i>	Изначальный год
<i>p</i>	Производство
<i>q</i>	Население
<i>r</i>	Безразмерное соотношение
<i>t</i>	Всего
<i>w</i>	Мировой
<i>x</i>	Экспорт
<u>Аббревиатуры</u>	
BTU	Единица измерения тепловой энергии в английской системе мер (англ. British Thermal unit)
KACST	Центр науки и технологий имени короля Абдул-Азиза, Саудовская Аравия
ВВП	Валовой внутренний продукт
\$	Доллар США



2. Солнечно-водородная энергетическая установка

Авторами разработана модель солнечно-водородной энергетической установки для Саудовской Аравии. Эта установка представлена в виде непрерывного динамического взаимодействия между показателями численности населения, энергетики, экономики и ресурсов, которые связаны между собой одинаково зависящими от времени соотношениями, выражающими изменения в главных и вспомогательных переменных. Для построения модели были выбраны такие переменные, как: численность населения; энергопотребление; выработка энергии; производство водорода; стоимость энергии; ВВП; экологический ущерб; качество жизни. Перечисленные параметры будут связаны посредством математических уравнений и их взаимодействиями [3].

2.1. Население

Первоначальное значение численности населения и темпы его роста, или время двукратного увеличения, позволяют определить численность населения в более поздний период времени. Численность населения в любой момент времени рассчитывается посредством сложения количества населения в предыдущий момент времени и фактического значения демографических изменений за прошедший период. Уравнение для определения численности населения запишем в экспоненциальной форме:

$$Q_n = Q_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n / \theta_{qo}], \quad (1)$$

где Q_n – численность население в n году; Q_{n-1} – численность населения в $n-1$ году; $\Delta t_n = (t_n - t_{n-1})$ – шаг времени, равный 1 году; W_n – модификатор прироста населения за период времени Δt_n ; θ_{qo} – время удвоения в годах. Уравнение (1) может быть применено как в масштабе всего мира, так и на уровне Саудовской Аравии или любой другой страны.

Модификатор прироста W_n – это безразмерная функция, заданная как соотношение времени двукратного прироста мирового населения в изначальный момент времени и соответствующего значения в момент времени n ($W_{nw} = \theta_{qo} / \theta_{qn}$), учитывающая воздействие других системных компонентов на прирост населения. Статистическое исследование показало, что величина W_{nw} может соотноситься со значениями безразмерного коэффициента численности мирового населения $Q_{rw}(=Q_w/Q_{wo})$, показателем ВВП на душу населения $G_{rw}(=G_w Q_{wo}/G_{wo} Q_w)$ и степенью загрязнения окружающей среды $P_{rw}(=P_w/P_{wo})$. Общая форма такого соотношения может быть записана в следующем виде:

$$W_{nw} = A - B(G_{rw})^a (P_{rw})^b (G_{rw})^c - C / [(G_{rw})^a (P_{rw})^b (Q_{rw})^c], \quad (2)$$

где A, B, C, a, b, c – безразмерные константы, рассчитанные с помощью доступных статистических

данных по всему миру и отдельным крупным регионам.

Саудовская Аравия связана с миром через множество каналов, важнейшим из которых является ископаемое топливо, поэтому в настоящую работу включены данные по мировым показателям. Постоянные величины в уравнении (2) рассчитаны с помощью статистических данных по всему миру и пяти крупнейшим регионам за последние двадцать лет. Наиболее оптимальное уравнение можно записать в виде:

$$W_w = 1,3 - 0,22 G_{rw} P_{rw}^{0,1} Q_{rw}^{0,5} - 0,08 / (G_{rw} P_{rw}^{0,1} Q_{rw}^{0,5}), \quad (3)$$

где значения W_w, G_{rw}, P_{rw} и Q_{rw} в начальный год равны единице. Как следует из уравнения (3), модификатор прироста W_w в значительной степени зависит от показателя ВВП на душу населения таким образом, что увеличение G_{rw} приведет к росту показателя W_w до максимального значения, а затем к его медленному снижению до нуля – это приведет параметры в устойчивое состояние. Такое же, но менее заметное воздействие демонстрируют показатели экологического загрязнения и коэффициента численности населения.

Уравнение (3) получено с использованием данных по миру и пяти крупнейшим регионам для выявления наилучшего способа прогнозирования возможных взаимодействий мировых показателей. Применение уравнения (3) непосредственно к отдельно взятой стране считается неправомерным, так как приводит к переоценке или недооценке показателей на страновом уровне, а также в сравнении их с мировыми показателями. Для Саудовской Аравии уравнение (3) необходимо откорректировать. Таким образом, оно примет следующий вид:

$$W_n = 1,3 - 0,22 K G_m P_m^{0,1} Q_m^{0,5} - 0,08 / (K G_m P_m^{0,1} Q_m^{0,5}), \quad (4)$$

где

$$K = 0,475. \quad (5)$$

2.2. Энергопотребление

Значение энергопотребления E , как и численность населения, растет с экспоненциальной скоростью. Темп его роста выше темпа прироста населения, что обусловлено стремлением людей к достижению высокого уровня жизни. Следовательно, энергопотребление характеризуется меньшим временем двукратного увеличения по сравнению с численностью населения. Соотношение времени удвоения энергопотребления со временем двукратного демографического прироста можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{\theta_{et}} = \frac{1}{\theta_e} + \frac{1}{\theta_q}, \quad (6)$$

где θ_{et} – общее время удвоения энергопотребления, включающее две составляющие: θ_q – время двукратного демографического прироста и θ_e – время удвоения энергопотребления за счет улучшения качества жизни в результате технического прогресса. Предполагается, что модификатор прироста населения W оказывает определяющее воздействие на энергопотребление. Окончательное уравнение примет следующий вид:

$$E_n = E_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n (1/\theta_{qo} V_{qn} + 1/\theta_{eo} V_{en})], \quad (7)$$

где E_n, E_{n-1} – энергопотребление (ископаемое топливо и водород) в n и $n-1$ годах; V_q, V_e – безразмерные модификаторы времени удвоения θ_q и θ_e соответственно.

Рост энергопотребления, обусловленный приростом населения, происходит медленнее, чем рост населения вследствие снижения бытового и коммерческого потребления в пересчете на человека, а количество энергии, потребляемой населением, пропорционально уменьшается. Таким образом, модификатор двукратного демографического прироста считается слабой функцией коэффициента численности населения (Q_m),

$$V_{qn} = Q_m^x, \quad (8)$$

где показатель степени x – крайне малое число ($x \leq 0,1$).

По мере истощения запасов ископаемого топлива, величина θ_e , обозначающая время удвоения энергопотребления за счет улучшения качества жизни, будет снижаться, так как для добычи ресурсов потребуются больше энергии. Значение этой компоненты будет также уменьшаться с ростом энергопотребления на душу населения. Повышение мировых цен на ископаемое топливо ведет к увеличению времени удвоения. Таким образом, соотношение модификатора времени удвоения примет вид:

$$V_{en} = C_{cr}^y R_m^z / B_m^v, \quad (9)$$

где C_{cr} – соотношение цен на ископаемое топливо и водород; $R_m = R_n/R_o$ – соотношение жидких ископаемых; $B_m = E_m/Q_m$ – энергопотребление на душу населения, нормированное в соответствии со своими начальными значениями. Показатели степени y, z, v – крайне малые числа ($\leq 0,1$).

В случае наличия неограниченных запасов ископаемого топлива, постоянный экспоненциальный темп роста энергопотребления (7) сопровождался бы непрерывным увеличением объемов экспорта. Однако запасы ископаемого топлива ограничены, и с течением времени их добыча усложняется ввиду большой разбросанности и дорогостоящего процесса извлечения. Следовательно, максимальный объем добычи ископаемого топлива, идущего на потребление

и экспорт в определенный момент времени, можно представить в виде функции оставшихся ресурсов R_n :

$$F_{pn} = \delta R_n, \quad (10)$$

где F_p – максимально возможный ежегодный объем добычи ископаемых ресурсов; δ – количество ежегодно добываемого ископаемого топлива. Таким образом, общий объем энергии, вырабатываемой в определенный год за счет ископаемого топлива и водорода, не может превышать значение $F_p + H$, где H – объем производства водорода.

2.3. Получение солнечного водорода

Энергетические потребности Саудовской Аравии и в значительной степени ее национальный доход полностью зависят от ископаемого топлива. За последние двадцать лет энергопотребление страны (рис. 1) резко выросло. За период с 1980 г., когда общее энергопотребление составляло 1,7 квадриллионов ВТУ (квадов), по 2000 г. энергопотребление страны увеличилось практически в три раза – до 4,6 квадов. В целом энергопотребление Саудовской Аравии составляет 1,1 % мирового потребления энергии. Такое высокое энергопотребление с учетом экспорта требует серьезного подхода к солнечной энергии [4].

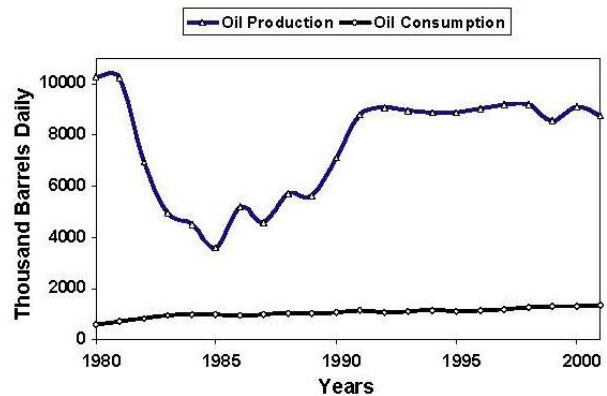


Рис. 1 – Производство и потребление нефти в Саудовской Аравии, 1980–2001 г.
Fig. 1 – Saudi Arabia oil production and consumption, 1980–2001

Среди разнообразных альтернативных источников энергии солнечная энергия выглядит наиболее привлекательной для Саудовской Аравии, так как страна получает солнечную энергию в количестве, превышающем энергию других видов возобновляемых источников.

С 1986 г. Королевство Саудовская Аравия сотрудничает с Германией в области исследований, разработок и экспериментов по получению и использованию солнечного водорода. Работы ведутся на экспериментальной установке Hysolar Project мощностью 350 кВт, разработанной и установленной в Цен-

тре науки и технологий имени короля Абдул-Азиза (KACST) в Саудовской Аравии (в 50 км к северо-западу от Эр-Рияда). Солнечная электростанция, которая была запущена 19 августа 1993 г., использует постоянный электрический ток из 350 кВт, вырабатываемых фотоэлементами. Водород в ежедневном объеме 463 м³ получают с помощью модифицированного электролизера щелочной воды (площадь электрода – 0,25 м², 120 элементов), работающего при нормальном давлении на солнечном электричестве [5].

Солнечная энергия является источником для производства электролизного водорода. Проектом Hysolar Project предусмотрено возведение в пустыне на территории Саудовской Аравии двух электростанций на двигателях Стирлинга мощностью 50 кВт. Полученная электроэнергия будет передаваться на установку мощностью 350 кВт для получения солнечного водорода. Наиболее перспективным способом получения водорода в Саудовской Аравии является именно электролиз. Первая в мире солнечно-водородная установка, работающая в Саудовской Аравии, постоянно совершенствуется в свете последних технологических достижений.

Солнечную энергию можно преобразовать в электрическую и/или тепловую энергию разными способами, среди которых предусмотрено использование фотоэлементов, установок башенного типа, концентрирующих коллекторов и т.д. Тем не менее, в свете прогнозируемой экономической выгоды, в настоящей работе рассматривается только фотоэлектрическая технология как способ производства электроэнергии и электролиз воды как способ получения водорода. Водород как энергоноситель способен стать связующим звеном между солнечной энергетикой и сектором энергопотребления благодаря таким качествам, как чистота, возобновляемость, способность к длительному хранению и транспортировке. Водород имеет высокий КПД и в ближайшем будущем окажется экономически рентабельным.

Существует несколько различных способов расщепления воды на водород и кислород с помощью солнечной энергии, из которых для Саудовской Аравии наиболее оптимальным является электролиз воды в силу следующих причин:

1) фотоэлектрическая технология позволяет непосредственно вырабатывать постоянный электрический ток, являясь в долгосрочной перспективе одним из наиболее многообещающих направлений;

2) электролизеры можно напрямую подключать к солнечному фотоэлектричеству;

3) технология электролиза полностью отработана.

Постепенное внедрение водородной технологии в энергетическую систему Саудовской Аравии, как и в мировую энергосистему, преследует следующие цели:

1) снижение потребления ископаемого топлива и, как результат, уменьшение количества вредных веществ, ежегодно выбрасываемых в биосферу;

2) сбережение запасов жидких ископаемых, являющихся ценнейшим сырьем для химической промышленности и предметом экспорта;

3) создание обоснованной устойчивой энергетической системы до полного отказа от ископаемого топлива.

Скорость внедрения была выбрана как экспоненциальная для того, чтобы отслеживать темп экспоненциального роста энергопотребления, который можно записать в виде:

$$H_n = H_{n-1} \{ \exp \ln 2 \Delta t_n / \theta_{hm} \}, \quad (11)$$

где H_n and H_{n-1} – объемы производства водорода в n и $n - 1$ годах соответственно, а θ_{hm} – время удвоения производства водорода. Последнее считается переменным значением, полученным как:

$$\theta_{hm} = D_1 + D_2(n-1), \quad (12)$$

где D_1 и D_2 – независимые постоянные, всевозможные комбинации которых создадут разнообразные сценарии внедрения водорода. Уравнение (12), представленное в таком виде, дает основание полагать, что с ростом производства водорода увеличивается время удвоения, что сокращает потребность в капитальных вложениях.

Необходимо отметить, что единица водородной энергии обладает более высоким коэффициентом использования, чем единица традиционной энергии. Другими словами, для выполнения одной и той же работы водородной энергии требуется меньше, чем традиционной, что можно записать как:

$$F = \eta H \quad (13)$$

или

$$H = \frac{1}{\eta} F, \quad (14)$$

где η – КПД использования водорода, разделенный на КПД использования ископаемого топлива.

При рассмотрении вопроса внедрения водорода необходимо учитывать, насколько производство водорода отстает или опережает энергопотребление в Саудовской Аравии. Если объем производства водорода меньше или равен уровню внутреннего энергопотребления, то есть при

$$\eta H_{pm} \leq E_n, \quad (15)$$

то значения внутреннего потребления ископаемого топлива F_{dn} , внутреннего потребления водорода H_{dn} и объема экспорта ископаемого топлива F_{xn} могут быть записаны как:



$$F_{dn} = E_n - \eta H_{pn}, \quad (16)$$

$$H_{dn} = H_{pn}, \quad (17)$$

$$F_{xn} = F_{pn} - F_{dn}, \quad (18)$$

где E_n – внутреннее энергопотребление (Саудовская Аравия). Если объем производства водорода превышает уровень внутреннего энергопотребления, то есть при

$$\eta H_{pn} > E_n, \quad (19)$$

то значения внутреннего потребления ископаемого топлива F_{dn} , внутреннего потребления водорода H_{dn} и объема экспорта водорода H_{xn} могут быть записаны как:

$$F_{dn} = 0, \quad (20)$$

$$H_{dn} = \frac{1}{\eta} E_n, \quad (21)$$

$$F_{xn} = F_{pn}, \quad (22)$$

$$H_{xn} = H_{pn} - H_{dn}. \quad (23)$$

2.4. Запасы ископаемого топлива

На сегодняшний день ископаемое топливо удовлетворяет большую часть мировых энергетических потребностей, но в результате его запасы быстро истощаются [6]. Наиболее оптимальным решением станет отказ от сжигания этого вида топлива и рациональное использование исключительно в качестве не имеющего альтернативы сырья для химической промышленности.

Солнечно-водородная энергетическая система позволит сохранить часть запасов ископаемого топлива для использования в качестве промышленного сырья. Оставшийся запас ископаемого топлива в Саудовской Аравии можно рассчитать следующим образом:

$$R_n = R_{n-1} - F_{pn} \Delta t_n. \quad (24)$$

2.5. Стоимость энергии

Доходность и спрос на энергию являются ключевыми факторами, влияющими на стоимость энергии. Предполагается, что эти факторы будут играть главную роль в разработке моделей долгосрочного энергопотребления [7]. В связи с той значимостью, которую они имеют в экономике Саудовской Аравии, в них включена стоимость традиционной и водородной энергии. На основании статистических данных соотношение стоимости жидкого ископаемого топлива (нефть и газ) можно записать как [8]:

$$C_{rjn} = 0,33 + 0,67 G_{rwn}^{0,2} F_{rwn}^{0,5} / R_{rwn}^{0,5}, \quad (25)$$

где $C_{rjn}(=C_{jn}/C_{jo})$ – соотношение стоимости ископаемого топлива (а именно, стоимость ископаемого топлива в n году, разделенная на стоимость ископаемого топлива в начальном году); $G_{rwn}(=G_{wn}/G_{wo})$ – соотношение мирового ВВП; $F_{rwn}(=F_{wn}G_{wo}/F_{wo}G_{wn})$ – соотношение мирового потребления ископаемого топлива на душу населения; $R_{rwn}(=R_{wn}/R_{wo})$ – соотношение мировых запасов ископаемого топлива.

Аналогичным путем соотношение мировых цен на водород запишем в виде:

$$C_{rhn} = 0,2 + 0,8 G_{rwn}^{0,2} F_{rwn}^{0,4} / H_{rwn}^{0,3}, \quad (26)$$

где $C_{rhn}(=C_{hn}/C_{ho})$ – соотношение стоимости водорода; $H_{rwn}(=H_{wn}/H_{wo})$ – соотношение объема мирового производства водорода.

Соотношение составной стоимости энергии можно записать как:

$$C_{rcn} = \gamma_{jn} C_{rjn} + \gamma_{hn} C_{rhn}, \quad (27)$$

где $C_{rcn}(=C_{rn}/C_{ro})$ – соотношение составной стоимости энергии; $\gamma_{jn}(=F_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления ископаемого топлива; $\gamma_{hn}(=\eta H_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления водорода (от общего объема мирового энергопотребления).

2.6. Валовой внутренний продукт (ВВП)

Темп роста ВВП в большинстве случаев выше, чем темп роста энергопотребления. Другими словами, время его удвоения несколько короче времени удвоения энергопотребления. Эту разницу можно объяснить постоянным развитием и совершенствованием технологий, способствующих повышению эффективности процессов преобразования энергии и производительности труда.

ВВП Саудовской Аравии делится, как правило, на две основные части в соответствии с его происхождением: 1) ВВП за счет обычной экономической деятельности населения G ; 2) ВВП за счет экспорта энергии на внешний рынок G_e . Первая часть характеризуется экспоненциальным темпом роста, что можно выразить как:

$$G_n = G_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n \times (1/\theta_{go} V_{qn} + 1/\theta_{eo} V_{en} + 1/\theta_{go} V_{gn})], \quad (28)$$

где G_n и G_{n-1} – ВВП за счет обычной экономической деятельности в n и $n-1$ годах соответственно; θ_{go} – компонент времени удвоения изначального роста, учитывающий вклад технологического прогресса в экономический рост; V_{gn} – его модификатор, который соотносится со значениями времени двукратного демографического прироста, энергопотребления и ВВП следующим образом:



$$1/\theta_{gt} = 1/\theta_g + 1/\theta_q + 1/\theta_e, \quad (29)$$

где θ_{gt} – время удвоения роста ВВП.

Значение компонента времени удвоения будет уменьшаться с увеличением значения мирового ВВП на душу населения, так как последнее способствует развитию научно-исследовательской деятельности. Таким образом, значение модификатора V_{gn} можно записать как:

$$V_{gn} = 1/(G_{rn})^w, \quad (30)$$

где w – предположительно малое число ($w \leq 0,1$).

Вторая часть – ВВП за счет экспорта энергии – напрямую связана со стоимостью жидкого ископаемого топлива и объемом его экспорта, обусловленными мировым потреблением ископаемого топлива и доступностью его запасов в Саудовской Аравии. Предполагается, что по мере истощения запасов ископаемого топлива его постепенно заменит водород, способствуя таким образом увеличению ВВП за счет экспорта энергии. Это можно записать в следующем виде.

Если

$$\eta H_{pm} \leq E_n, \quad (31)$$

то

$$G_{en} = F_{xn} C_{fn}. \quad (32)$$

Если

$$\eta H_{pm} > E_n, \quad (33)$$

то

$$G_{en} = F_{xn} C_{fn} + H_{xn} C_{hm}, \quad (34)$$

где C_f and C_h – мировые цены на жидкое ископаемое топливо и водород. Эта составляющая ВВП подвержена колебаниям, порой резким, вследствие принятых на государственном и международном уровне решений, влияющих на цену, производство и т.д. Таким образом, ВВП Саудовской Аравии можно записать как:

$$G_m = G_n + G_{en}. \quad (35)$$

2.7. Экологический ущерб и качество жизни

Ископаемые виды топлива широко применяются в транспортной сфере, а также для выработки тепла и электроэнергии. Экологический ущерб прямо пропорционален объему потребления ископаемого топлива,

поэтому уравнение, описывающее это соотношение для Саудовской Аравии, примет следующий вид [9]:

$$P_n = U[F_{pn} - F_{xn} + \varepsilon(H_n - H_{xn})], \quad (36)$$

где P_n – объем экологического ущерба в n году; U – константа пропорциональности в единицах экологического ущерба на единицу энергии; ε – безразмерное соотношение экологического ущерба, нанесенного производством водорода на единицу водородной энергии, с экологическим ущербом, нанесенным производством традиционной энергии на единицу энергии.

Качество жизни меньше поддается определению и измерению. Более того, в каждой общественной формации может быть свое представление о нем, что подразумевает множество нюансов. В настоящей работе рассматриваются только четыре фактора, непосредственно влияющие на качество жизни: ВВП, запасы ресурсов, численность населения и экологический ущерб. Используя эти факторы в безразмерном виде, получаем показатель качества жизни:

$$L_n = (G_m R_m) / (P_m Q_m). \quad (37)$$

Уравнение (37) позволяет предположить, что показатель качества жизни прямо пропорционален ВВП и объему запаса ресурсов и косвенно пропорционален уровню экологического ущерба и численности населения.

3. Данные и расчеты

Для изучения будущей динамики параметров, указанных в предыдущем разделе статьи, необходимо выбрать отправную точку – в настоящей статье 2000 г. Временной период Δt равен одному году. Значения, характеризующие условия в 2000 г., взяты из соответствующей литературы и/или рассчитаны с помощью соответствующих соотношений.

Для удобства данные разделены на два раздела: глобальные данные и данные по Саудовской Аравии.

3.1. Глобальные данные

Уравнения для численности мирового населения и времени двукратного демографического прироста (удвоения численности населения) запишем как:

$$Q_{wo} = 6,1 \cdot 10^9, \quad (38)$$

$$\theta_{qvo} = 55,38 \text{ уг}. \quad (39)$$

Значения энергопотребления (только ископаемое топливо; атомная энергия и гидроэнергия не включены) и компонента удвоения времени энергопотребления за счет улучшения качества жизни:



$$E_{wo} = 147,36 \cdot 10^6 TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (40)$$

$$\theta_{ewo} = 96 \text{ yr}. \quad (41)$$

Запасы ископаемого топлива и оставшаяся часть ископаемых ресурсов, добываемых ежегодно [9]:

$$R_{wo} = 5,99 \cdot 10^9 TJ, \quad (42)$$

$$\delta_w = 0,025 \text{ yr}^{-1}. \quad (43)$$

Соотношение объемов производства и коэффициентов использования водорода и ископаемого топлива [7]:

$$H_{wo} = 3,2 \cdot 6TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (44)$$

$$\eta = 1,35. \quad (45)$$

Стоимость жидкого ископаемого топлива и водорода [4]:

$$C_{fo} = \$4,57 GJ^{-1}, \quad (46)$$

$$C_{ho} = \$22,60 GJ^{-1}. \quad (47)$$

Мировой ВВП и компонент времени удвоения мирового ВВП за счет технологий [10]:

$$G_{wo} = \$31,5 \cdot 10^{12}, \quad (48)$$

$$\theta_{gwo} = 19 \text{ yr}. \quad (49)$$

Коэффициенты экологического загрязнения U и ε :

$$U_w = 5 \cdot 10^{-3} \text{ T } GJ^{-1} \text{ ископаемого топлива}, \quad (50)$$

$$\varepsilon = 0,04. \quad (51)$$

Экспоненты модификатора времени удвоения [9]:

$$u_w = w_w = x_w = y_w = z_w = 0,1. \quad (52)$$

3.2. Данные по Саудовской Аравии

Численность населения Саудовской Аравии и время двукратного демографического прироста:

$$Q_o = 2,07 \cdot 10^7, \quad (53)$$

$$\theta_{qo} = 28 \text{ yr}. \quad (54)$$

Потребление топлива и компонент времени удвоения потребления топлива за счет улучшения качества жизни:

$$E_o = 2,61 \cdot 10^6 TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (55)$$

$$\theta_{eo} = 96 \text{ yr}. \quad (56)$$

Запасы ископаемого топлива и оставшаяся часть ископаемых ресурсов, добываемых ежегодно:

$$R_o = 1,5 \cdot 10^9 TJ, \quad (57)$$

$$\delta = 0,012 \text{ yr}^{-1}. \quad (58)$$

Объем производства водорода:

$$H_o = 32 \cdot 10^3 TJ \text{ yr}^{-1}. \quad (59)$$

Следуя за Войтом (Voight) [11], допустим, что производство солнечного водорода началось в 2000 г. с мощностью, рассчитанной из уравнения (60).

Рассмотрим два сценария внедрения водорода, рассчитанных из значений времени удвоения внедрения водорода:

1-й сценарий:

$$\theta_h = 2 + 0,15(n-1) \text{ yr}; \quad (60)$$

2-й сценарий:

$$\theta_h = 4 + 0,15(n-1) \text{ yr}. \quad (61)$$

ВВП за счет естественного темпа роста и компонента времени удвоения ВВП за счет достижений технологии и повышения производительности:

$$G_o = \$16,83 \cdot 10^{10}, \quad (62)$$

$$\theta_{go} = 14,2 \text{ yr}. \quad (63)$$

Коэффициенты экологического загрязнения U и ε [9]:

$$U = 5 \cdot 10^{-3} \text{ T } GJ^{-1} \text{ ископаемого топлива}, \quad (64)$$

$$\varepsilon = 0,04. \quad (65)$$

Экспоненты модификатора времени удвоения:

$$u = w = x = y = z = 0,1. \quad (66)$$

3.3. Расчеты

Данные, представленные выше, использовались при расчетах в Фортране двух сценариев внедрения водорода с целью вычисления параметров солнечно-водородной энергетической системы для Саудовской



Аравии (и всего мира) за период времени с 2000 г. по 2120 г. Кроме того, был произведен ряд расчетов для сценария использования всех видов топлива, не предполагающего внедрение водорода.

4. Результаты и их обсуждение

Некоторые результаты представлены на рисунках вместе с другими прогнозами и оценками, сделанными в настоящей работе с целью проверки работоспособности модели.

На рис. 2 дан прогноз численности населения в Саудовской Аравии вместе с прогнозом Всемирного банка [10]. До 2035 г. они практически совпадают.

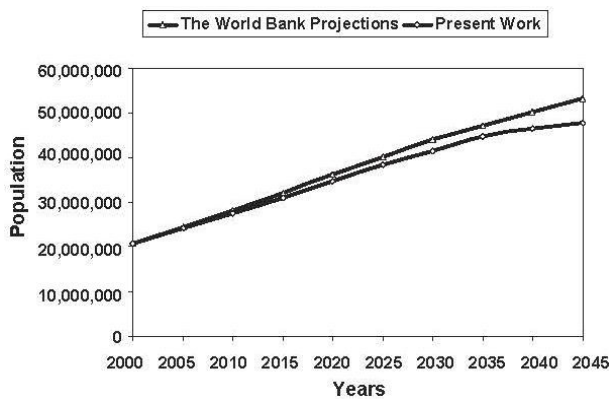


Рис. 2 – Прогноз численности населения Саудовской Аравии
Fig. 2 – Saudi Arabia population projections

На рис. 3 показано, что согласно прогнозам, численность населения Саудовской Аравии стабилизируется на уровне 49 млн человек. К этому приведет улучшение качества жизни.

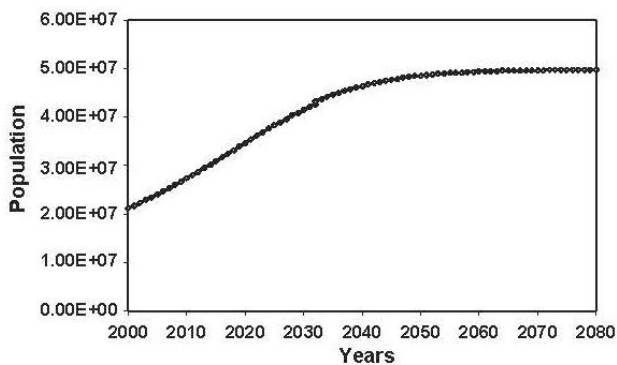


Рис. 3 – Прогноз численности населения Саудовской Аравии
Fig. 3 – Population projections for Saudi Arabia

На рис. 4 показан постепенный рост энергопотребления Саудовской Аравии в результате улучшения качества жизни и демографического роста.

На рис. 5 представлен прогноз энергопотребления и нефтедобычи в Саудовской Аравии до 2120 г. Следует отметить, что:

1) параллельно с численностью населения уровень энергопотребления стабилизируется на значении $7,9 \cdot 10^9 \text{ GJ yr}^{-1}$; 2) после 2067 г. объема добываемой нефти будет не хватать для удовлетворения своих внутренних потребностей, поэтому без внедрения солнечно-водородной энергетической системы страна может превратиться в чистого импортера энергии.

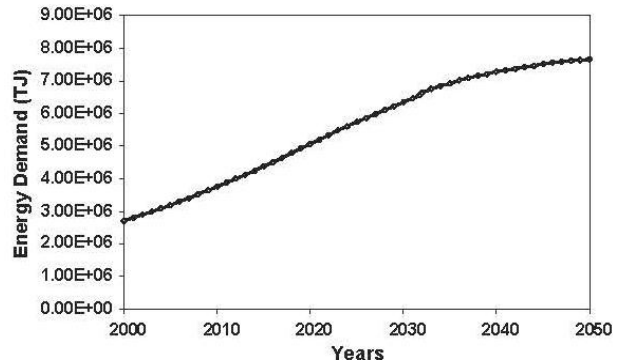


Рис. 4 – Прогноз энергопотребления Саудовской Аравии
Fig. 4 – Energy demand projections for Saudi Arabia

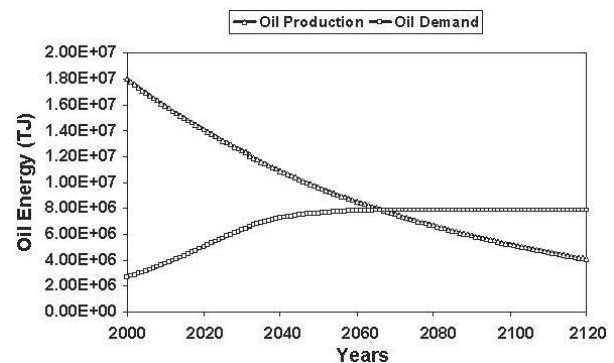


Рис. 5 – Спрос на нефть и ее производство в Саудовской Аравии
Fig. 5 – Oil energy demand and production for Saudi Arabia

Прогноз соотношения цен на нефть (рис. 6) говорит об их росте, что обусловлено повышением спроса на этот ресурс и сокращением его запасов.

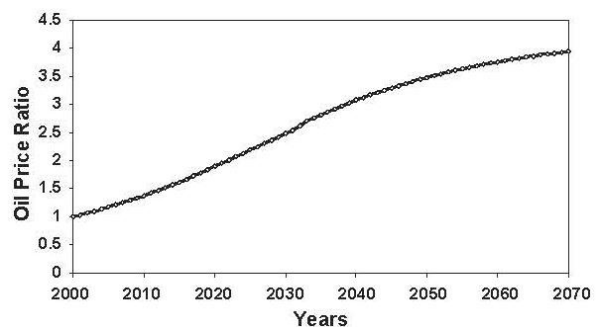


Рис. 6 – Прогноз стоимости нефти
Fig. 6 – Oil price projections



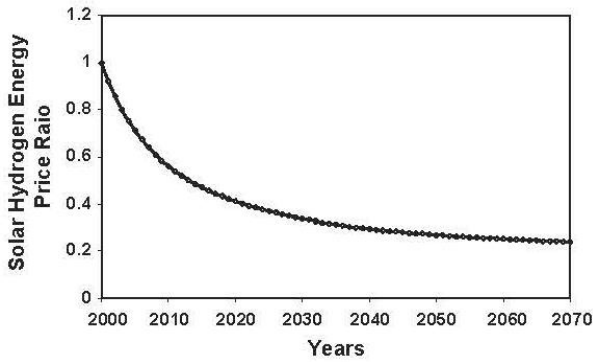


Рис. 7 – Прогноз стоимости солнечного водорода
Fig. 7 – Solar hydrogen price projections

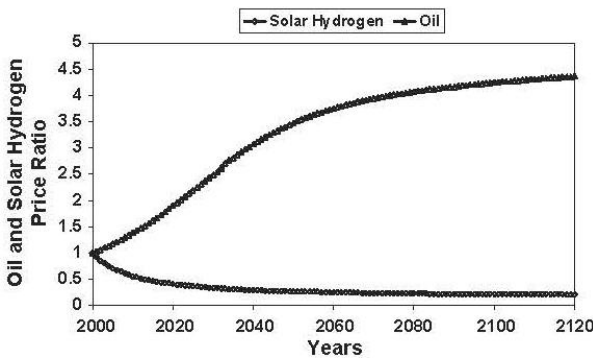


Рис. 8 – Прогноз стоимости нефти и солнечного водорода
Fig. 8 – Oil and solar hydrogen price projections

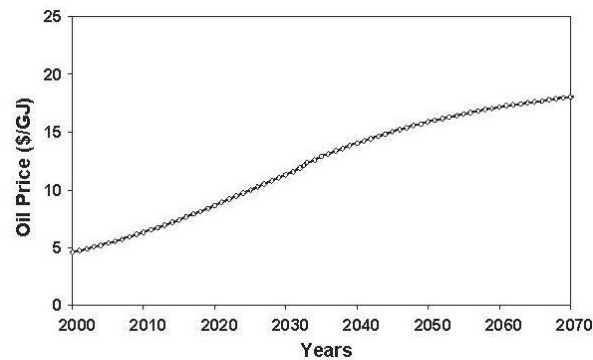


Рис. 9 – Прогноз цен на нефть
Fig. 9 – Oil price projections

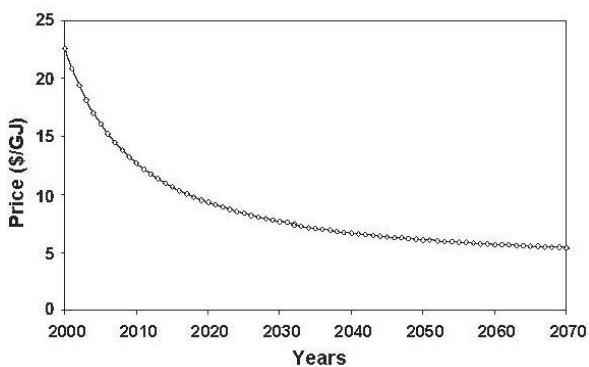


Рис. 10 – Прогноз стоимости солнечного водорода
Fig. 10 – Solar hydrogen price projections

Соотношение стоимости солнечного водорода демонстрирует обратную тенденцию в сторону понижения (рис. 7).

На рис. 8 показано соотношение цен на нефть и водород вплоть до 2120 г., а на рис. 9 и 10 эти цены представлены в долларах.

Можно отметить, что стоимость ископаемого топлива демонстрирует тенденцию к росту, в то время как цены на водород характеризуются снижением, и, как показано на рис. 11, в районе 2021 г. эти кривые пересекутся на уровне $9GJ^{-1}$. Но, поскольку водород обладает более высоким коэффициентом применимости ($\eta = 1,35$), в районе 2010 г. его стоимость сможет конкурировать со стоимостью ископаемого топлива.

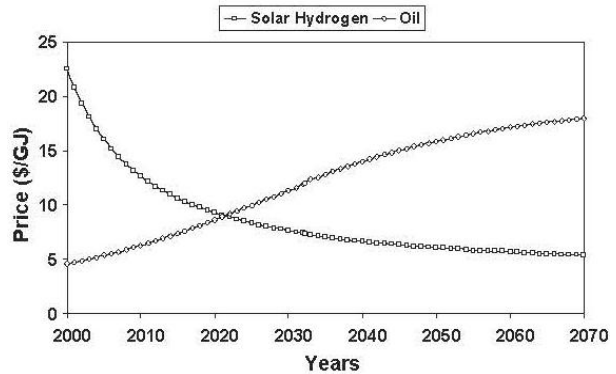


Рис. 11 – Прогноз цен на нефть и солнечный водород
Fig. 11 – Oil and Solar hydrogen price projections

На рис. 12 представлено соотношение ВВП, зависящего от экспорта неископаемого топлива, в расчете на душу населения (то есть показатель ВВП, зависящего от экспорта неископаемого топлива, в расчете на душу населения за определенный год, разделенный на аналогичный показатель 2000 г.) в зависимости от времени.

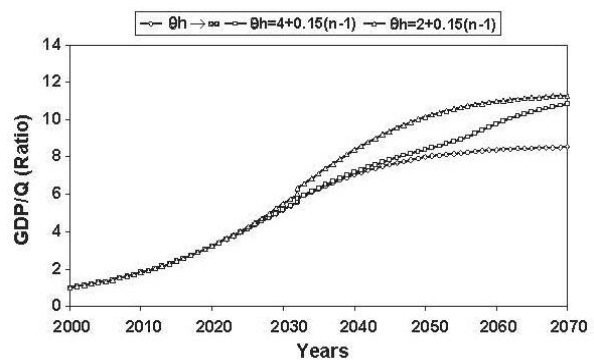


Рис. 12 – Соотношение ВВП Саудовской Аравии, зависящего от экспорта неископаемых видов топлива, в расчете на душу населения
Fig. 12 – Non oil export-dependent gross domestic product per capita ratio productions for Saudi Arabia

На рис. 12 видно, что при экономическом сценарии с использованием всех видов ископаемого топ-

лива (то есть $\theta_h = \infty$ без внедрения солнечно-водородной энергетической системы и с потребностью в импорте ископаемого топлива после 2067 г.) показатель ВВП на душу населения достигнет значения, в 8,5 раз превышающего тот же показатель в 2000 г, но с внедрением водородной технологии – в 11,3 раза.

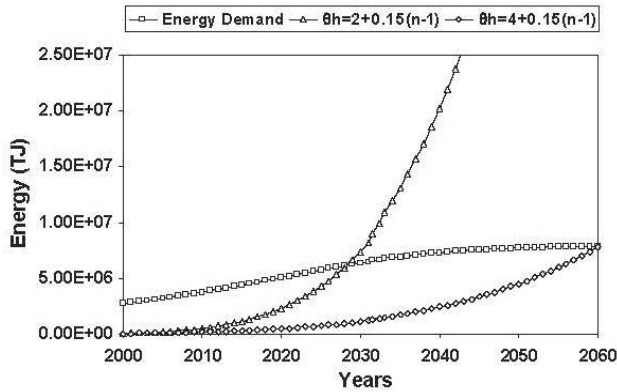


Рис. 13 – Прогноз энергопотребления и объемов производства солнечно-водородной энергии в Саудовской Аравии

Fig. 13 – Projections for Saudi Arabia energy demand and Solar hydrogen energy production

На рис. 13 представлен прогноз энергопотребления Саудовской Аравии и объем производства солнечно-водорода. При значениях объемов производства и энергопотребления, показанных на рис. 13, Саудовская Аравия сможет обеспечивать солнечно-водородной энергией свои внутренние энергетические потребности в 2028 г. при 1-ом сценарии: $\theta_h = 2 + 0,15(n - 1)$ уг и в 2060 г. при 2-ом сценарии: $\theta_h = 4 + 0,15(n - 1)$ уг. Кроме того, в определенный период времени после обеспечения внутренних энергетических потребностей у страны появится больше водорода на экспорт.

На рис. 14 представлено безразмерное соотношение экологического загрязнения ($P_n = P_o$) в качестве функции времени.

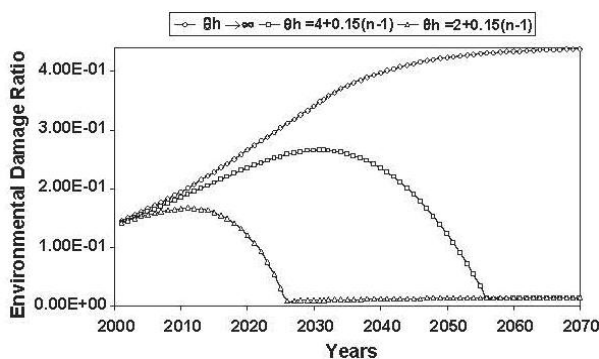


Рис. 14 – Прогноз соотношения экологического ущерба в Саудовской Аравии

Fig. 14 – Environmental damage ratio projections for Saudi Arabia

Видно, что без внедрения водорода показатель загрязнения воздуха будет повышаться и к 2070 г. достигнет уровня, в три раза превышающего показатель 2000 г. Внедрение водорода позволит сократить этот уровень в 0,1 раз по сравнению с 2000 г. Замедленный темп внедрения растянет этот процесс еще на 30 лет.

5. Заключение

Доходная часть бюджета Саудовской Аравии формируется преимущественно за счет экспорта ископаемого топлива, запасы которого ограничены и стремительно истощаются. В ближайшие шестьдесят лет Саудовская Аравия столкнется с энергетическим дефицитом. Поскольку солнечная энергия – наиболее распространенный природный ресурс, имеющийся в изобилии, для Саудовской Аравии крайне важно начать его использование. Для того чтобы решить эту задачу, можно наладить в стране производство солнечно-водорода с его дальнейшим использованием в качестве энергоносителя и предмета экспорта в другие страны.

Это решение обеспечит Саудовскую Аравию чистой и стабильной энергетической системой, а также позволит повысить уровень ВВП и качество жизни в целом.

Список литературы

- [1] CIA-The World Factbook 2002, Saudi Arabia.
- [2] Mohands, M. Use of the radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation [Text] / M. Mohands [et al.] // Solar Energy. – 2000. – Vol. 68. – No 2. – P. 161–168.
- [3] ElJrushi, G.S. Solar-hydrogen energy system for Libya [Text] / G.S. ElJrushi, T. Veziroglu // Int. J. Hydrogen Energy. – 1990. – Vol 15. – No 12. – P. 885–894.
- [4] Energy Information Administration (EIA). Saudi Arabia Country Analysis Brief. – November, 2002.
- [5] Huraib, F.S. Lessons learned from solar energy projects in Saudi Arabia [Text] / F.S. Huraib, S.M. Hasnain, S. Alawaji // Int. J. Renew. Energy. – 1996. – Vol. 9. – No 1–4. – P. 1144–1147.
- [6] Awad, A.H. Hydrogen versus synthetic fossil fuels [Text] / A.H. Awad, T. Vezirglu // Int. J. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – P. 355.
- [7] Edmonds, J. Global energy: assessing the future, institute for energy analysis [Text] / J. Edmonds, J.M. Reilly. – Oxford and New York: Oxford University Press; 1985.
- [8] ElJrushi G.S. Solar-hydrogen energy model for Libya: Ph.D. thesis. – University of Miami, Coral Gables, FL. – June, 1987.
- [9] Veziroglu, T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system [Text] / T. Veziroglu, O.T. Basar // THEME Conference Proceedings. New York. – NY: PlenumPress, 1975.



[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight, C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets [Text] / C. Voight // Int. J. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – P. 491.

References

[1] CIA-The World Factbook 2002, Saudi Arabia.

[2] Mohands M., Balghonaim A., Kassas M., Rehman S., Halawani T.O. Use of the radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. *Solar Energy*, 2000;68(2):161–8.

[3] ElJrushi G.S., Veziroğlu T. Solar-hydrogen energy system for Libya. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1990;15(12):885–94.

[4] Energy Information Administration (EIA). Saudi Arabia Country Analysis Brief, November, 2002.

[5] Huraib F.S., Hasnain S.M., Alawaji S. Lessons learned from solar energy projects in Saudi Arabia. *Int. J. Renew Energy*, 1996;9(1–4):1144–7.

[6] Awad A.H., Vezirgolu T. Hydrogen versus synthetic fossil fuels. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:355.

[7] Edmonds J., Reilly J.M. Global energy: assessing the future, institute for energy analysis. Oxford and New York: Oxford University Press; 1985.

[8] ElJrushi G.S. Solar-hydrogen energy model for Libya. Ph.D. thesis, University of Miami, Coral Gables, FL, June, 1987.

[9] Veziroğlu T., Basar O.T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system. *THEME Conference Proceedings*. New York, NY: Plenum Press; 1975.

[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:491.



ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

13–16 сентября 2018

О конференции

Конференция посвящена фундаментальным и прикладным научным проблемам, относящимся к динамично развивающемуся сегодня направлению науки и техники – энергетике, основанной на возобновляемых ресурсах. Тематика конференции включает научные проблемы разработки новых материалов и новых подходов для создания таких устройств, как фотовольтаические преобразователи, устройства накопления, хранения и преобразования электрической энергии.

Тематика конференции

В ходе работы Конференции будет обсуждаться широкий спектр вопросов по научно-техническим и практическим проблемам возобновляемой энергетике, в том числе:

Аккумуляторы и суперконденсаторы

- Металл-ионные аккумуляторы (МИА)
- Литий-ионные аккумуляторы
- Катодные материалы для МИА
- Анодные материалы для МИА
- Электролиты для МИА
- Суперконденсаторы

Фотовольтаика

- Кремниевые солнечные элементы
- Тонкопленочные солнечные элементы
- Концентраторные солнечные элементы
- Новые материалы и принципы для солнечной энергетике
- Прикладные аспекты, вопросы энергоэффективности солнечной энергетике

Топливные элементы

- Способы получения, очистки и хранения водорода
- Твердополимерные электролиты и мембраны
- Высокоэффективные катализаторы для топливных элементов
- Суперионные проводники и электродные материалы
- Редокс-батареи

Энергоустановки

- Разработки
- Тенденции развития
- Экономика

<http://re2018.lssi.su>