

УДК 66.098:546.11

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА
ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ H₂S
В ГЛУБИННЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ******А.Н. Мидилли^{1*}, М. Ай¹, А. Кейл², Т.Н. Везироглу²***¹Отдел энергетики, кафедра машиностроения Университета Нигде
г. Нигде, 51200, Турция

тел.: +90 (388) 225-22-55, факс: +90 (388) 225-01-12; e-mail: midilli@nigde.edu.tr

²Институт чистой энергии, Университет Майями

Корал-Гейблс, Флорида, 33124, США

mrt_ay@yahoo.com, veziroglu@unido-ichet.org

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.113-121

Заключение совета рецензентов: 28.06.17 Заключение совета экспертов: 12.10.17 Принято к публикации: 21.12.17

В данной работе проведено параметрическое исследование для оценки потенциала водородной энергетики в зависимости от количества H₂S в глубинных водах Черного моря. Необходимые данные по H₂S в глубинных водах Черного моря взяты из литературы. В данном исследовании учитывалась концентрация H₂S и глубина водного слоя, при этом КПД преобразования предполагалось равным 100 процентам. Следовательно, общий потенциал водородной энергетики оценивался примерно в 270 млн тонн, произведенных из 4,587 млрд тонн H₂S в глубинных водах Черного моря. С таким количеством водорода можно будет произвести 38,3 млн ТДж тепловой энергии, или 8,97 млн ГВтч электроэнергии. Кроме того, установлено, что суммарный водородный потенциал глубинных вод Черного моря равен почти 808 млн тонн бензина, или 766 млн тонн ПГ (природного газа), или 841 млн тонн дизельного топлива, или 851 млн тонн нефти. Эти величины показывают, что водородный потенциал сероводорода в глубинных водах Черного моря будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона. Таким образом, можно сказать, что энергетический запас водорода в Черном море является важным кандидатом для будущих водородных энергетических систем.

Ключевые слова: водород; сероводород; глубинные воды Черного моря; возобновляемые источники энергии.

**A PARAMETRIC INVESTIGATION OF HYDROGEN ENERGY POTENTIAL
BASED ON H₂S IN BLACK SEA DEEP WATERS*****Adnan Midilli^{1*}, Murat Ay¹, Ayfer Kale², T. Nejat Veziroglu²***¹Energy Division, Mechanical Engineering Department Nigde University
Nigde, 51200, Turkey

tel.: +90 388 2252255, fax: +90 388 2250112; e-mail: midilli@nigde.edu.tr

²Clean Energy Research Institute, Miami University,

Coral Gables, Miami, FL 33124, USA

e-mail: mrt_ay@yahoo.com, veziroglu@unido-ichet.org

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.113-121

Referred 28 June 2017 Received in revised form 12 October 2017 Accepted 21 December 2017

*Мидилли А.Н., Ай М., Кейл А., Везироглу Т.Н. Параметрическое исследование потенциала водородной энергетики на основе H₂S в глубинных водах Черного моря // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):113-121.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2007;32:117-124. ©2006 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.



In this study, a parametric investigation is carried out to estimate the hydrogen energy potential depending on the quantities of H₂S in Black Sea deep waters. The required data for H₂S in Black Sea deep waters are taken from the literature. For this investigation, the H₂S concentration and water layer depth are taken into account, and 100% of conversion efficiency is assumed. Consequently, it is estimated that total hydrogen energy potential is approximately 270 million tons produced from 4.587 billion tons of H₂S in Black Sea deep waters. Using this amount of hydrogen, it will be possible to produce 38.3 million TJ of thermal energy or 8.97 million GWh of electricity energy. Moreover, it is determined that total hydrogen potential in Black Sea deep waters is almost equal to 808 million tons of gasoline or 766 million tons of NG (natural gas) or 841 million tons of fuel oil or 851 million tons of natural petroleum. These values show that the hydrogen potential from hydrogen sulphur in Black Sea deep water will play an important role to supply energy demands of the regional countries. Thus, it can be said that hydrogen energy reserve in Black Sea is an important candidate for the future hydrogen energy systems.

Keywords: hydrogen; hydrogen sulphur; Black Sea deep waters; renewable energy.



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» (ISJAEE).

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, 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 (ISJAEE).

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

Энергия является ключевым фактором в обсуждении экономических, социальных и экологических аспектов устойчивого развития [1]. Увеличение потребления энергии в стране оказывает положительное влияние как на экономическое, так и социальное развитие, кроме того, поставка и использование доступного и чистого топлива особенно значимо для «чистого» мира, поскольку энергия играет жизненно

важную роль в промышленном и технологическом развитии всего мира [2]. По всему миру потребность в энергии возрастает в связи с увеличением численности населения Земли, техническим развитием и повышением уровня жизни. Другой тип энергии – это энергия, базирующаяся на ископаемом топливе, которое, как правило, включает уголь, нефть, природный газ (ПГ) и др. Как известно, ископаемые источники энергии не возобновляются.

Для того чтобы объяснить и выяснить потребности в водородной энергетике и технологиях для снабжения экологически чистой энергией и прогресса, сначала необходимо представить основные негативные последствия использования ископаемых видов топлива. Ископаемые виды топлива, которые в течение длительного времени широко применялись в промышленности и быту, создают следующие проблемы:

- дефицит энергии, дефицит ископаемого топлива, спрос на энергию и т.д.;
- технологические разработки на основе ископаемых ресурсов;
- загрязнение окружающей среды: воздуха, водных ресурсов, моря; загрязнение пищевых продуктов; энергетическое загрязнение; вибрационное и шумовое загрязнение; загрязнение твердыми отходами; качество окружающего воздуха и т.д.;
- кислотные дожди, истощение озонового слоя, глобальное изменение климата (глобальное потепление) и т.д.;
- рост населения земли, переезды, миграция и т.д.;
- крупные экологические катастрофы, ликвидация твердых отходов, радиация и радиоактивность, землепользование и размещение объектов воздействия и т.д.;
- засуха, бедность, здоровье и болезни, питание и голод, снижение уровня жизни и т.д.;
- локальные, региональные и глобальные конфликты и войны.

Эти проблемы являются серьёзными последствиями для мира и живых существ, и особенно тревожными для будущего мира. Для того чтобы частично уменьшить или полностью устранить проблемы, следует рассмотреть возможность практического применения нового источника энергии, который является чистым и широко распространенным по всему миру. Основная задача исследователей, ученых и экспертов в области энергетики заключается в изучении эффективных практически неисчерпаемых источников чистой энергии и технологий для чистого мира. Соответственно, исследования альтернативных источников и технологий чистой энергии станут важны, особенно для будущей мировой стабильности. Существенным свойством альтернативных источников энергии является их экологическая совместимость. Согласно данной характеристике, водород, вероятно, станет одним из наиболее привлекательных энергоносителей в ближайшем будущем. Как известно, водород является превосходным энергоносителем и его можно получить из любого источника, используя солнечную энергию, гидроэлектроэнергию, энергетическое сырьё из биомассы, энергию ветра, геотермальную энергию, соединения бора и т.д. Другим важным источником водорода является сероводород, который в изобилии содержится в глу-

бинных водах Черного моря. Черное море – это бассейн эллиптической формы площадью 423 000 км². Средняя глубина составляет 1 263 м, общий объем – предположительно 534 000 км³ [3]. Черное море уникально, потому что 90 % морской воды являются анаэробными. Эта анаэробная морская вода содержит сероводород, который производят сероредуцирующие бактерии. Граница между анаэробной и аэробной морской водой лежит на глубине около 140 м вдоль оси Черного моря и около 250 м по краям. Содержание сероводорода постепенно увеличивается с глубиной до концентрации 8 мл/л морской воды на глубине в 1 000 м, далее незначительно увеличивается до 8,5 мл/л морской воды на глубине в 2 000 м. В районе дна содержание сероводорода достигает 13,5 мл/л морской воды [3]. В связи с этим сероводород Черного моря может стать будущей энергетической системой.

Для оценки потенциала сероводорода Черного моря проводится множество исследований [4–11], а для оценки потенциала водорода в глубинных водах Черного моря ведется ограниченная работа. Например, Петров [3] исследовал Черное море и водородную энергетику. Мидилли и др. [12, 13], Байкара и др. [14] и Туре [15] провели теоретические исследования потенциала водородной энергетики глубинных вод Черного моря.

В отличие от вышеприведенных исследований, в данной работе предпринята попытка параметрически изучить потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря на основе сероводорода и обсудить важность потенциала водородной энергетики для стран региона. Если водород будет производиться из глубинных вод Черного моря, то энергетические потребности стран черноморского побережья могут быть удовлетворены, и водород можно будет экспортировать в европейские страны.

2. Потенциал водородной энергетики Черного моря

Общеизвестно, что Черное море является крупнейшим аноксигенным бассейном в мире, а общий сульфидный бассейн современного Черного моря составляет около 4 600 Тг, причем основная часть находится между 500 м и 2 000 м. Пространственное распределение кислородно-бескислородного перехода в море характеризуется наличием двух куполообразных структур, расположенных в восточной и западной центральной частях бассейна между 90 м и 100 м.

Производство сероводорода в толще воды Черного моря является основным источником сульфида, а бескислородные донные отложения вносят лишь незначительный вклад в слой воды с H₂S [7].



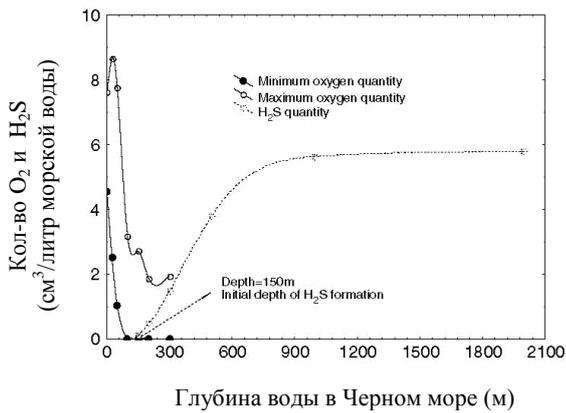


Рис. 1 – Изменение количества кислорода и сероводорода с глубиной Черного моря [16]
Fig. 1 – Variation of oxygen and hydrogen sulphur quantities with depth of Black Sea [16]

На рис. 1 представлены изменения количества кислорода и сероводорода в зависимости от глубины Черного моря по литературным данным [16].

Как показано на рис. 1, притом что количество кислорода в поверхностных водах Черного моря составляет $5 \div 6$ см³/л морской воды, оно достигает максимального значения (8,64 см³/л морской воды) на 20 ÷ 30 м глубины. Однако количество кислорода на 125 ÷ 150 м глубины почти равно нулю. Ниже глубины в 125 ÷ 150 м черноморская вода содержит сероводород, а количество сероводорода достигает максимального значения (5,796 см³/л морской воды на 2 000 м) около дна Черного моря из-за неорганического бактериального разложения. Согласно такому объяснению, в будущем черноморская вода, содержащая сероводород, могла бы использоваться в качестве источника энергии для производства водорода.

Таким образом, распределение сероводорода в Черном море [17] можно проиллюстрировать рис. 2.

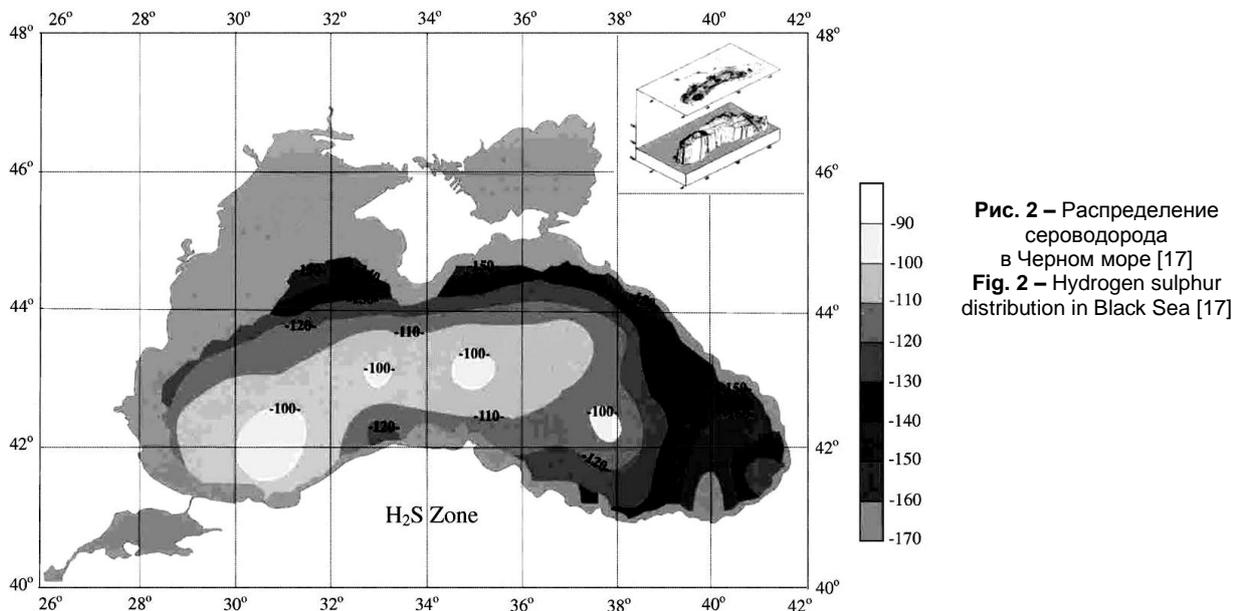


Рис. 2 – Распределение сероводорода в Черном море [17]
Fig. 2 – Hydrogen sulphur distribution in Black Sea [17]

Как показано на рис. 2, можно добраться до сероводорода в центральных областях Черного моря ниже глубины 100 м. В прибрежных районах Черного моря это можно сделать на глубине 125 ÷ 150 м. Эти значения показывают, что производство водорода из H₂S можно осуществлять посредством подходящих для производства водорода платформ как в срединной, так и в прибрежной части Черного моря. Так, производство водорода из H₂S в срединной части Черного моря снизит затраты на производство водорода и добычу H₂S из глубинных вод Черного моря благодаря легкодоступному H₂S.

Концентрация сероводорода должна быть известна для определения водородного потенциала в зависимости от глубины и потенциала сероводорода в глубин-

ных водах Черного моря. Обзор литературы показал, что некоторые данные, включающие количество сероводорода, представлены с учетом зависимости от глубины Черного моря. Например, Неретин и др. [9] определили концентрацию сероводорода в слое воды между 100 м и 2 000 м глубины Черного моря с помощью метода моделирования.

Кроме того, Димитров и др. [18] вычислили концентрацию сероводорода на 150 ÷ 2 000 м глубины Черного моря. Эти данные в литературе играют важную роль для оценки водородного потенциала H₂S в глубинных водах Черного моря. С помощью этих данных [9, 18] были получены следующие варианты.

На рис. 3 видно, что концентрация H₂S растёт с увеличением глубины Черного моря. По литературным



данным [9], представляющим исследования аноксигенной зоны Черного моря, максимальная концентрация H_2S составляет приблизительно 13,798 мг H_2S /л морской воды на глубине 2 000 м в аноксигенной зоне Черного моря. Однако, по данным [18], которые представляют собой региональные исследования, концентрация H_2S составляет приблизительно 9,6 мг H_2S /л морской воды на той же глубине.

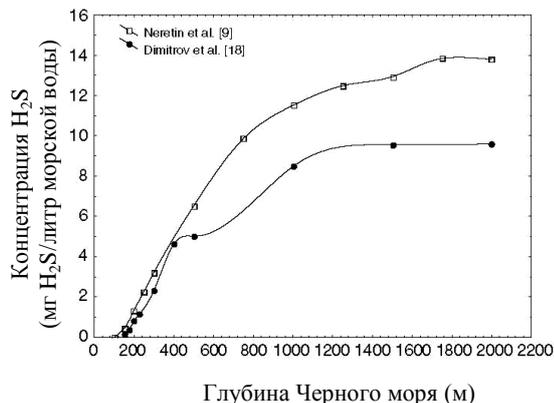


Рис. 3 – Изменение концентрации H_2S в зависимости от глубины Черного моря (по литературным данным [9])
 Fig. 3 – Variation of H_2S concentration as a function of water depth in Black Sea (based on literature data [9])

Это означает, что концентрация H_2S в глубинных водах Черного моря может отличаться в зависимости от регионов Черного моря и не является однородной в различных водных слоях Черного моря. Полезные данные для оценки потенциала H_2S в слоях морской воды на основе глубины, которые были представлены Неретиным и др. [9], можно также использовать для определения водородного потенциала в различных слоях вод Черного моря. В табл. 1 и на рис. 4 указан потенциал H_2S в водных слоях в зависимости от глубины Черного моря

Таблица 1
 Ресурсы H_2S в водных слоях Черного моря [9]
 Table 1
 H_2S potential in Black Sea water layers [9]

Слой (м)	ΣH_2S (моль/л)	ΣH_2S (моль/м ²)
100–200	21 ^a	2,0
200–300	66	6,5
300–500	140	28,1
500–1 000	274	132,1
1 000–1 500	339	159,1
1 500–2 000	368	150,7
2 000–2 200	368 ^b	40,7
Всего		519,2

^a 150–200 м.
^b 1500–2000 м.

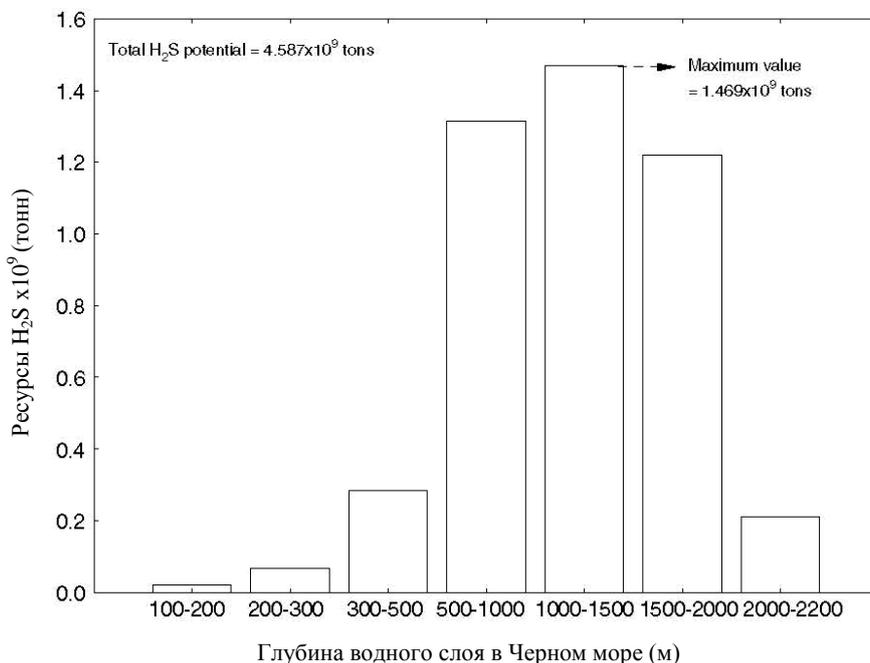


Рис. 4 – Изменение ресурсов H_2S в зависимости от глубины водного слоя Черного моря [9]
 Fig. 4 – Variation of H_2S potential as a function of depth of water layer in Black Sea [9]

Согласно табл. 1, максимальный потенциал сероводорода на единицу площади составляет 159,1 моль/м² между 1 000 м и 1 500 м. Согласно рис. 4, в том же слое максимальный потенциал сероводорода равен 1 469 млн тонн. Эти величины показывают, что производить водород из H_2S было бы возможно в вод-

ных слоях от 100 м до 2 000 м, применяя соответствующую технику и технологии производства.

Учитывая изложенное выше, взаимосвязь между H_2S и водородом можно проиллюстрировать с помощью рис. 5.

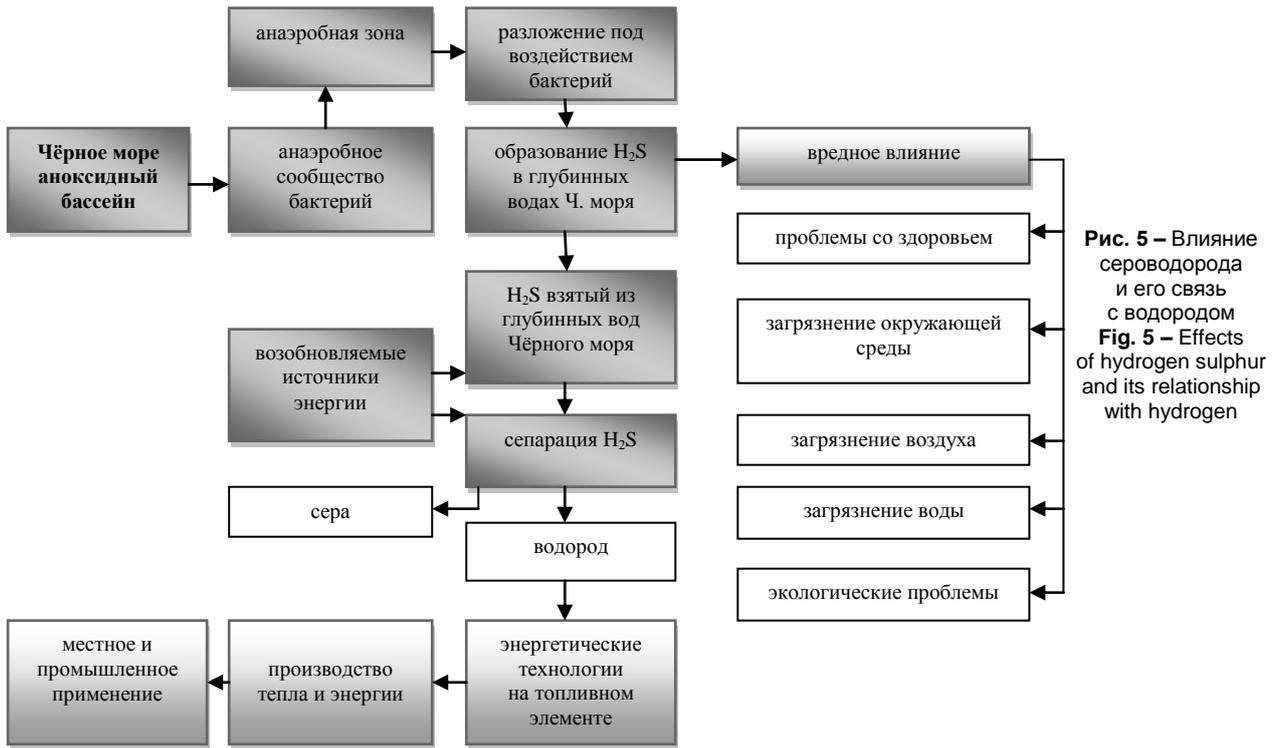
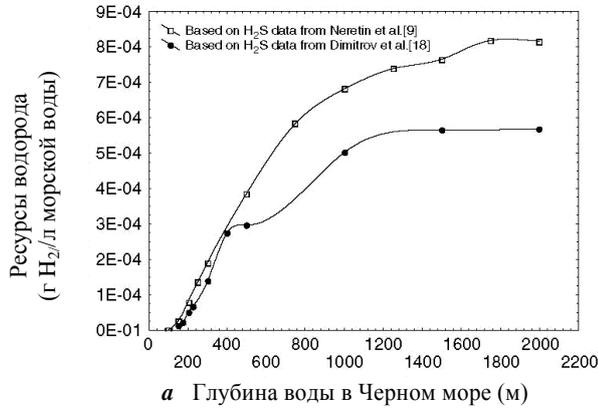


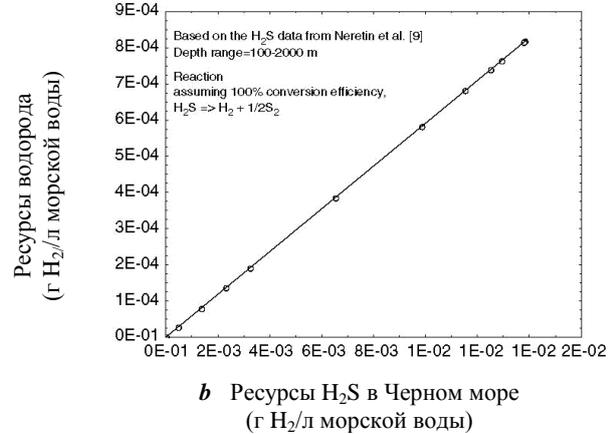
Рис. 5 – Влияние сероводорода и его связь с водородом
Fig. 5 – Effects of hydrogen sulphur and its relationship with hydrogen

3. Результаты и обсуждение

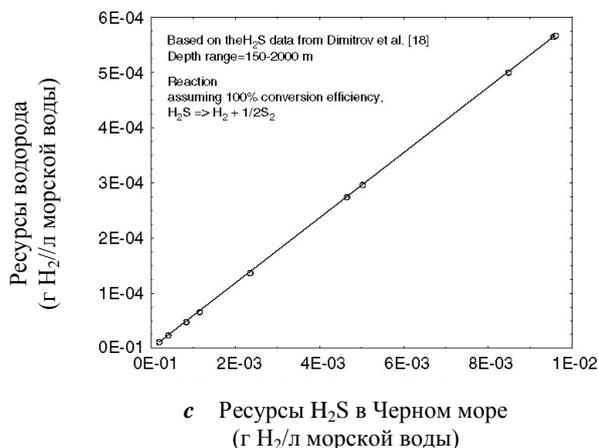
В данной работе проведено исследование потенциала водородной энергетики глубинных вод Черного моря на основе H_2S и значения для региона.



а Глубина воды в Черном море (м)



б Ресурсы H_2S в Черном море (г H_2S /л морской воды)



с Ресурсы H_2S в Черном море (г H_2S /л морской воды)

Рис. 6 – а) изменение ресурсов водорода в зависимости от глубины Черного моря; б) изменение водородного потенциала в зависимости от потенциала H_2S в Черном море и от данных о H_2S из литературы [9]; в) изменение водородного потенциала в зависимости от потенциала H_2S в Черном море и от данных о H_2S из литературы [18]
Fig. 6 – (a) Variation of hydrogen potential as a function of water depth in Black Sea. (b) Variation of hydrogen potential as a function of H_2S potential in Black Sea depending on the H_2S data from literature [9]. (c) Variation of hydrogen potential as a function of H_2S potential in Black Sea depending on the H_2S data from literature [18]

С этой целью были предприняты следующие шаги: 1) определен потенциал водородной энергетики, который получен на основании количества H_2S на различных глубинах Черного моря при условии стопроцентной эффективности преобразования реакции разложения H_2S ; 2) определен потенциал водородной энергетики на основании количества H_2S в различных слоях вод Черного моря; 3) обсуждалась важность водородного потенциала для стран региона. С учетом данных шагов подробно анализируются и обсуждаются рис. 6 и 7 и табл. 2.

На рисунках 6a–c представлены вариации водородного потенциала в зависимости от глубины и потенциала H_2S в Черном море в зависимости от литературных данных [9] и [18] соответственно.

На рис. 6b потенциал H_2S на глубине Черного моря 100 ÷ 2 000 м используется для оценки водородного потенциала, а глубина Черного моря 150 ÷ 2 000 м рассматривается на рис. 6c. Как показано на рис. 6a и 6b, предполагая стопроцентную эффективность преобразования при реакции разложения H_2S , количество газообразного водорода, синтезированного из H_2S , определяется в зависимости от H_2S на определенных глубинах Черного моря. Судя по рис. 6a и 6b можно сказать, что на основании количества H_2S на глубине Черного моря 100 м водородный потенциал почти равен нулю. Однако теоретически возможно получить $0,00266 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0,045 \times 10^{-2}$ г H_2S /л

морской воды с глубины 150 м, и $0,082 \times 10^{-2}$ г H_2 из $1,38 \times 10^{-2}$ г H_2S /л морской воды с глубины 2 000 м при условии стопроцентной эффективности преобразования при реакции разложения H_2S . По данным рис. 6a и 6c с условием стопроцентной эффективности преобразования при реакции разложения H_2S можно получить $0,00112 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0,019 \times 10^{-2}$ г H_2S /л морской воды с глубины 150 м, и $0,0568 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0,96 \times 10^{-2}$ г H_2S /л морской воды с глубины 2 000 м. Соответственно, эти данные показывают, что производство водорода может осуществляться за счёт потенциала сероводорода на различных глубинах Черного моря.

Рис. 7 иллюстрирует вариации водородного потенциала в глубинных водах Черного моря в зависимости от водных слоев Черного моря.

Как показано на рис. 7, максимальный водородный потенциал оценивается как 86,41 млн тонн из 1 469 млн тонн H_2S на глубине 1 000 ÷ 1 500 м. Однако минимальный водородный потенциал определен в 1,294 млн тонн из 0,022 млн тонн H_2S на глубине 100 ÷ 200 м. Кроме того, общий объем водородного потенциала может быть рассчитан как 270 млн тонн с учетом всех водных слоев Черного моря (рис. 7). Следовательно, Черное море обладает большим водородным потенциалом для обеспечения энергетических затрат всех стран региона, а также многих европейских стран.

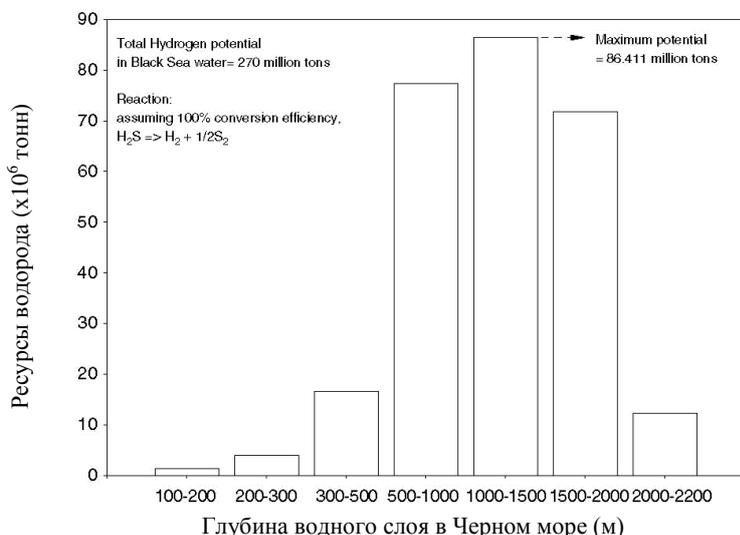


Рис. 7 – Изменение ресурсов водорода глубинных вод Черного моря в зависимости от водного слоя Черного моря [9]
 Fig. 7 – Variation of hydrogen potential in Black Sea deep water as a function of water layer of Black Sea [9]

В табл. 2 водородный потенциал сравнивается с другими видами топлива в практическом применении, а также теоретическая выработка электроэнергии из водородного потенциала с различных слоев глубинных вод Черного моря. Для оценки водородного потенциала в зависимости от глубины принимаются во внимание данные [9], представленные в табл. 1.

Как показано в табл. 2, общий водородный потенциал оценивается в 270 млн тонн на основе общего потенциала сероводорода. Теоретически из этого

количества водорода можно получить 38,3 млн ТДж тепловой энергии или 8,97 млн. Гвт·ч электроэнергии. Фактически, 38,3 млн ТДж тепловой энергии из водорода почти равноценно использованию 808 млн тонн бензина, 766 млн тонн ПГ, 841 млн тонн мазута, 851 млн тонн природной нефти. Следовательно, эти значения показывают, что водородный потенциал сероводорода в глубинных водах Черного моря будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона.

Таблица 2

Сравнение ресурсов водорода с другими видами топлива в практическом применении и теоретическая выработка электроэнергии из водородных ресурсов с различных слоев глубинных вод Черного моря

Table 2

Comparison of hydrogen potential with other fuels in practical application, and theoretical electricity generation quantity from the hydrogen potential at different layers of Black Sea deep water

Глубина (м)	100–200	200–300	300–500	500–1000	1000–1500	1500–2000	2000–2200	Всего
M_{H_2} (Т)	1,3e + 6	4e + 6	16,65e + 6	77,35e + 6	86,41e + 6	71,76e + 6	12,35e + 6	270e
E_{H_2} (ТДж)	0,18e + 6	0,57e + 6	2,36e + 6	11e + 6	12,3e + 6	10,2e + 6	1,75e + 6	38,3e + 6
$M_{бензин}$ (Т)	3,87e + 6	12e + 6	49,8e + 6	232e + 6	259e + 6	215e + 6	37e + 6	808e + 6
M_{NG} (Т)	3,67e + 6	11,4e + 6	47,2e + 6	220e + 6	245e + 6	204e + 6	35,1e + 6	766e + 6
$M_{древ.уголь}$ (Т)	6,12e + 6	18,9e + 6	78,7e + 6	366e + 6	409e + 6	339e + 6	58,4e + 6	1280e + 6
$M_{мазут}$ (Т)	4,04e + 6	12,5e + 6	51,9e + 6	241e + 6	269e + 6	224e + 6	38,5e + 6	841e + 6
$M_{СНГ}$ (Т)	3,75e + 6	11,6e + 6	48,3e + 6	224e + 6	251e + 6	208e + 6	35,8e + 6	783e + 6
$M_{биоизель}$ (Т)	4,96e + 6	15,3e + 6	63,8e + 6	297e + 6	331e + 6	275e + 6	47,4e + 6	1030e + 6
$M_{метанол}$ (Т)	8,23e + 6	25,5e + 6	106e + 6	492e + 6	550e + 6	457e + 6	78,6e + 6	1720e + 6
$M_{hazelnut}$ (Т)	10,6e + 6	32,7e + 6	136e + 6	632e + 6	706e + 6	587e + 6	101e + 6	2210e + 6
$M_{осадок}$ (Т)	10,7e + 6	33,1e + 6	138e + 6	640e + 6	715e + 6	594e + 6	102e + 6	2230e + 6
$M_{нефть}$ (Т)	4,08e + 6	12,6e + 6	52,5e + 6	244e + 6	273e + 6	226e + 6	39e + 6	851e + 6
ЕЕЕ ^a (ГВт·ч)	0,04e + 6	0,133e + 6	0,554e + 6	2,57e + 6	2,87e + 6	2,39e + 6	0,411e + 6	8,97e + 6

^a Эквивалентность электрической энергии 1 кг H₂ = 33,26 кВт·ч = 119,6 кДж.

Таким образом, предлагается, чтобы все страны у Черного моря поддерживали и инвестировали производство водородной энергии с использованием глубинных вод Черного моря.

Принимая во внимание общее количество водородной энергии, которую можно получить из сероводорода в глубинных водах Черного моря, водородная энергия играет очень важную роль в обеспечении энергетических потребностей стран региона. Например, если предположить стопроцентную эффективность реакции разложения сероводорода, то из 4 587 млн тонн H₂S получится 270 млн тонн водорода. Кроме того, на Черноморском побережье живут почти 10 млн семей, и годовая потребность в электроэнергии составляет почти 3 600 кВт/ч. Таким образом, ежегодный спрос на электроэнергию почти 10 млн семей на Черноморском побережье можно оценить в 36 млрд кВт/ч.

Если общий потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря будет полностью использован для обеспечения всех энергетических потребностей этих семей, то этого потенциала хватит примерно на 250 лет.

Аналогичным образом рассмотрим потребление энергии природных источников и потребление нефти странами региона в зависимости от данных ВР за 2003 г. [19]. Общее потребление нефти странами региона, за исключением России и Грузии (необходимые данные не найдены) составляет 60,3 млн тонн, а потребление энергии природных источников – 266,8 млн тонн в нефтяном эквиваленте. Помимо этого, с учетом общего количества водорода (270 млн тонн) из глубинных слоев Черного моря, равно 851 млн тонн нефти, потребность в нефти в ближайшие 15 лет и потребность стран региона в энергии природных

источников в ближайшие 4 года теоретически могут быть компенсированы только за счет водородной энергии из глубинных слоев Черного моря.

С другой стороны, напомним, что теоретически требуется 0,021 кВт/ч энергии на 1 моль производства H₂ из 1 моля H₂S. Требуемая энергия для производства общего количества водорода (270 млн тонн) из глубинных слоев Черного моря теоретически оценивается в 2,74 млн Гвт/ч. Если страны региона будут получать такое количество энергии из возобновляемых источников энергии, таких как гидроэнергетика, ядерная энергия, солнечная энергия, энергетическое сырьё из биомассы, энергия ветра и т.д., теоретический чистый прирост энергии стран региона составит 6,2 млн ГВт/ч.

Необходимо помнить, что в этой оценке учитывается только потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря.

4. Заключение

В данном исследовании изучался потенциал энергии водорода глубинных вод Черного моря, включая сероводород с учетом данных о потенциале H₂S, приведенных в литературе. По итогам этого исследования можно сделать следующие важные выводы.

- Энергию из водорода (почти 1,3 млн тонн = 0,184 млн ТДж) можно получать из слоя сероводорода на глубине 100 ÷ 200 м в прибрежных областях Черного моря с помощью соответствующих технологий и возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и/или гидроэнергетика. Однако максимальный потенциал водорода можно оценить в 86,411 млн тонн из 1 469 млн тонн H₂S в слое 1 000 ÷ 1 500 м. Можно рассчитать, что общий по-



тенциал водородной энергетики составит 270 млн тонн с учетом всех водных слоев Черного моря. Если эти возобновляемые источники энергии используются для извлечения и разложения сероводорода из глубинных вод Черного моря, затраты на производство водорода могут быть снижены. Следовательно, Черное море обладает большим потенциалом водородной энергетики для компенсации энергетических затрат всех стран региона, а также многих европейских стран.

• Производство 38,3 млн ТДж тепловой энергии или 8,97 млн ГВт электроэнергии станет возможным с помощью 270 млн тонн от общего объема потенциала водородной энергетики на основе общего потенциала сероводорода. Это количество водорода практически равноценно использованию 808 млн тонн бензина, 766 млн тонн природного газа, 841 млн тонн мазута, 851 млн тонн нефти. Соответственно, потенциал водородной энергетики, получаемый из сероводорода глубинных вод Черного моря, будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона. Итак, предлагается, чтобы все страны Черного моря поддерживали и инвестировали производство водородной энергии с использованием глубинных вод Черного моря.

Таким образом, если водородная энергия получена из сероводорода глубинных вод Черного моря, то можно частично компенсировать энергетические потребности стран региона, а водородная энергия может быть транспортирована в европейские страны. Поэтому предлагается, чтобы такие страны региона, как Турция, Болгария, Украина, Россия, Грузия и Румыния поддерживали и инвестировали активизацию этого водородного энергетического резерва в рамках программы «Энергетическое сотрудничество на Черном море». В дальнейшем следует изучить воздействие на окружающую среду и целесообразность производства водорода из глубинных вод Черного моря.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить UNIDO-ICHET (Турция) за научную поддержку.

Acknowledgment

The authors would like to thank the UNIDO-ICHET in Turkey for their scientific supports.

References

[1] Dincer I. Environmental impacts of energy. *Energy Policy*, 1999; 27: 845–854.
 [2] Midilli A., Ay M., Dincer I., Rosen M.A. On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2005; 9(3): 255–71.

[3] Petrov K. The Black Sea and hydrogen energy. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1991; 16(12): 805–8.
 [4] Deuser W.G. Organic carbon budget of the Black Sea. *Deep Sea-Res.*, 1971; 18: 995–1004.
 [5] Ayzatullin T.A., Skopintsev B.A. Investigation of hydrogen sulfide oxidation in the Black Sea water. *Okeanologiya*, 1974; 14: 403–20.
 [6] Millero F.J. The oxidation of H₂ S in Black Sea waters. *Deep-Sea Res.*, 1991; 38: 1139–50.
 [7] Neretin L.N., Volkov I.I. On the vertical distribution of hydrogen sulfide in deep waters of the Black Sea. *Okeanologiya*, 1995; 35: 60–5.
 [8] Belyaev V.I., Sovga E.E., Lyubartseva S.P. Modeling the hydrogen sulphide zone of the Black Sea. *Ecol. Modeling*, 1997; 96: 51–9.
 [9] Neretin L.N., Volkov I.I., Bottcher M.E., Grinenko V.A. A sulphur budget for the Black Sea anoxic zone. *Deep-Sea Res.*, 2001; 8: 2569–93.
 [10] Akcil A., Ciftci H. A study of the selective leaching of complex sulphides from the eastern Black Sea region. Turkey. *Miner Eng.*, 2002; 15: 457–9.
 [11] Neretin LN, Bottcher MA, Grinenko VA. Sulfur isotope geochemistry of the Black Sea water column. *Chem Geol* 2003; 200: 59–69.
 [12] Midilli A., Ay M., Kale A., Veziroglu T.N. Karadeniz dip sularýnýn hidrojen enerjisi potansiyeli. *Proceedings of fifth national clean energy symposium*, vol. 2, Turkey; 2004, p. 711–31.
 [13] Midilli A., Ay M., Kale A., Veziroglu T.N. Hydrogen energy potential of Black Sea deep water based on H₂ S and importance for the region. *Proceedings of international hydrogen energy congress and exhibition*, Istanbul, Turkey; 13–15 July 2005.
 [14] Baykara S., Kale A., Veziroglu T.N. Possibilities for hydrogen production from H₂ S in Black Sea. *Proceedings of international hydrogen energy congress and exhibition*, Istanbul, Turkey; 13–15 July 2005.
 [15] Ture E. Hydrogen energy potential of Black Sea. *Proceedings of 15th World hydrogen energy conference*, Yokohama, Japan; 2004.
 [16] Karababa I. Karadeniz'den metan gazı arastirması. Ankara, Turkey: MTA; 1964.
 [17] Ustun Y. Karadeniz Havzasi ve Turk Bogazlari Sistemi. Available from: http://www.dogailebaris.org.tr_.
 [18] Dimitrov D., Genov I., Kozhuharov E. Alternative resources and energetic sources from Black Sea bottom 2003, vol. 4, Varna: Publications of Institute of Oceanology, Bulgarian Academy of Science; 2003. http://www.io-bas-bg/products/volume4.htm_.
 [19] Statistical Review of World Energy 2003. Primary energy: consumption by fuel type Mtoe; June 2003. Available from: http://www.bp.com/centres/energy_.

