УДК 330/620.9/502/504

# УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ГЛОБАЛИЗАЦИИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Шаповалов Александр Борисович[1],**
*e-mail: shapovalov-ab@yandex.ru,*
*[1]Московский университет имени С.Ю. Витте, Москва, Россия*

*В статье исследуется влияние глобализации водородной энергетики экономических систем на биогеосферы нашей планеты. Уже на стадии производства водорода отмечается противоречие водородной энергетики её экологическим целям. Выявлена перспектива производства водорода из низкомолекулярных сернистых соединений, реабилитирующая экологию замкнутых водоёмов. В основу исследования положена блок-схема, раскрывающая доминанты взаимодействия в биогеосфере планеты при глобализации водородной энергетики экономических систем. Раскрыто взаимодействие 2 глобальных природных механизмов генерации воды и её адсорбции. Отмечается, что при глобализации водородной энергетики экономических систем недопустимо высокая генерация NOx и замена выбросов $CO_2$ на $H_2O$ приводит к неустойчивости биосистем и соответственно феномена жизни. Поэтому глобальный тренд по сомнительной декарбонизации экономических систем актуализирует оценку его влияния на устойчивость экономических систем как носителей феномена жизни. Для этого предложен путь формализации для создания основ научно-методического подхода по оценке состоятельности и устойчивости экономических систем при глобализации водородной энергетики.*

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, водородная энергетика, декарбонизация, экономические системы, выбросы, парниковый эффект, биосистемы, биогеосфера

# SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ECONOMIC SYSTEMS UNDER THE GLOBALIZATION OF HYDROGEN ENERGY

**Shapovalov A.B.[1],**
*e-mail: shapovalov-ab@yandex.ru,*
*[1]Moscow Witte University, Moscow, Russia*

*The article studies the impact of the globalization of hydrogen energy of economic systems on the bio-geospheres of our planet. Contradiction between hydrogen energy and its environmental goals occurs already at the stage of hydrogen production. The prospect of hydrogen production from low-molecular sulfur compounds, which rehabilitates the ecology of enclosed water bodies, has been revealed. The study is based on a block diagram that reveals the dominants of interaction in the bio-geosphere of the planet during the globalization of hydrogen energy of economic systems. The interaction of 2 global natural mechanisms of water generation and its adsorption is revealed. It is noted that with the globalization of hydrogen energy of economic systems, unacceptably high generation of NOx and the replacement of $CO_2$ emissions with $H_2O$ leads to the instability of biosystems and, thus, the phenomenon of life. Therefore, the global trend of dubious decarbonization of economic systems actualizes the assessment of its impact on the sustainability of economic systems as carriers of the phenomenon of life. For this purpose, a way of formalization is proposed to create the foundations of a scientific and methodological approach to assess the consistency and sustainability of economic systems in the globalization of hydrogen energy.*

**Keywords:** sustainable development, hydrogen energy, decarbonization, economic systems, emissions, greenhouse effect, biosystems, bio-geosphere

**DOI 10.21777/2587-554X-2024-2-61-70**

## Введение

Растущие природные колебания различных факторов (температуры, давления, геомагнитного поля и т.п.) становятся более заметными из-за их локализации, что приводит к природным аномалиям[1]. Неустойчивость природных факторов усугубляется [1] и прогрессирующими антропогенными возмущениями: выбросами, генерацией схоластических инициаций и многим другим.

Антропогенные возмущения локализованы по своей природе и усугубляют локальные колебания [1] природных факторов, а, соответственно, природные аномалии. Дестабилизация природных факторов приводит к неустойчивости биосистем и, как следствие, феномена жизни.

Поэтому вполне логично, что социум, как носитель феномена жизни, инициирует повышение своей устойчивости адаптацией к дестабилизирующим природным факторам. Гиперчувствительность к возмущениям современных экономических систем[2] социума обусловливает и их безотлагательную реакцию, а, соответственно, адаптацию.

Энергогенерация экономических систем по своей природе локальна. Поэтому и генерируемые ей возмущения локально влияют на локальные же природные факторы.

Один из путей адаптации [2] экономических систем – сокращение выбросов $CO_2$ путём декарбонизации их энергогенерации. В основе инженерных решений по декарбонизации [2] лежат как деструктивная гидрогенизация, так и насыщение углеродосодержащих энергоносителей (УСЭ) водородом (угли, сланцы, мазуты и т.п.).

Безусловно, что разнообразие экономических систем и их задач предопределяют целесообразность их декарбонизации и/или переход к водородной энергетике. Однако, глобальный тренд по сомнительной декарбонизации экономических систем актуализирует рассмотрение его влияния на устойчивость их развития как носителей феномена жизни.

Таким образом, задача настоящего исследования заключается в *поиске научно-методического подхода для оценки устойчивости экономических систем при глобализации водородной энергетики как носителей феномена жизни.*

## Водород для экономических систем

Несмотря на дегазацию при аккреции вещества нашей планеты, содержание водорода (15,52 %) в природе занимает уверенное 3-е место.

Активность атомарного водорода определяет его исключительно связанное природное состояние (вода, минералы, УСЭ, органические вещества и т.п.). Поэтому множество природных соединений водорода порождает еще большее множество методов и способов его выделения. Исходя из этого устойчивость экономических систем при глобализации водородной энергетики определяется уже на стадии получения водорода.

Современное производство водорода осуществляется открытыми термохимическими циклами: паровой конверсией [3] *очищенного* природного газа (до 85 %):

$$\begin{aligned} CH_4+H_2O &\leftrightarrow CO+3H_2\uparrow \\ CO+H_2O &\leftrightarrow CO_2+H_2\uparrow, \end{aligned} \qquad (1)$$

либо угля:

$$\begin{aligned} C+O_2 &\leftrightarrow CO_2 \\ C+2H_2O &\leftrightarrow CO_2+2H_2\uparrow \\ C+H_2O &\leftrightarrow CO+H_2\uparrow \\ C+CO_2 &\leftrightarrow 2CO. \end{aligned} \qquad (2)$$

[1] Основные погодно-климатические особенности на северном полушарии Земли в декабре 2023 г. – URL: https://meteoinfo.ru/categ-articles/146-climate-cat/clim-var/severnoe-polusharie/severnoe-polusharie-2023 (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

[2] Реализуется интеллектуальными системами (CIM, FMS, AGV и т.п.).

Из чего вытекает (1), (2), что производству открытыми термохимическими циклами одной тонны $H_2$ сопутствует выброс в атмосферу до 50 т $CO_2$, что априори доводит до абсурда экологические цели декарбонизации и водородной энергетики.

Возлагаются большие надежды на энергоёмкий[3] электролиз воды на основе использования ресурсов гидроэнергетики и атомной генерации. Общая электрохимическая реакция, протекающая на электродах, представляется:

$$2OH^- \rightarrow 0{,}5O_2 + H_2O + 2e^- \text{ катод};$$
$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^- \text{ анод};$$
$$H_2O \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2\uparrow \text{ суммарная реакция.} \quad (3)$$

Из чего следует (3), что производство электролизом из *дистиллированной воды* 1 т $H_2$ сопровождается выбросом 8 т окислителя в атмосферу. Этот выброс $O_2$ усугубляет [4] кислородную катастрофу на планете и соответственно экологические проблемы, если не будет его промышленного использования.

Несомненный интерес представляет [5] получение водорода из воды в присутствии фотокатализаторов. Высокогигроскопичный (аморфная субстанция) полупроводник MoSx (x = 32/3) впитывает водяной пар из воздуха, а под воздействием энергии электромагнитного излучения E(*hv*) (света) разлагает ее на свободные водород и кислород.

Водород производят и [6] биопродуценты, содержащие ферменты гидрогеназы. Ферменты катализируют взаимное превращение водорода в протоны и электроны. Различают гидрогеназы по содержанию металлов в их активном центре: NiFe-гидрогеназа, FeFe-гидрогеназа и Fe-гидрогеназа. Механизм распространен среди бактерий, архей и некоторых эукариот. Реакция восстановления водорода протекает совместно с окислением доноров электронов (D) (4):

$$2H^+ + D_{red} \rightarrow H_2\uparrow + D_{ox}. \quad (4)$$

В качестве непосредственных окислителей или восстановителей водорода могут выступать растворимые белки [7], ферредоксин (FNR) и низкомолекулярные соединения (FNR) цитохром $\boldsymbol{c}_3$ и цитохром $\boldsymbol{c}_6$. Например, производство водорода возможно биохимическим способом, группой зелёных водорослей *Chlamydomonas reinhardtii* или бактериями *Rodobacter speriodes.*

Безусловно перспективны металлоферменты в биоинженерных стратегиях разработки синтетических метаболических путей генерации водорода. Однако, надежды на создание уникальных катализаторов и высокопроизводительных биологических продуцентов, выделяющих водород в промышленных объёмах, пока призрачны.

Некоторый оптимизм внушает «Микробная электролизная ячейка на обратном электродиализе» (*microbial reverse-electrodialysis electrolysis cell – MREC*). Выполнена из пяти пар отсеков с солёной и пресной водой и электродов. В область анода помещены бактерии. Метаболические реакции бактерий (окисления ацетатов) генерируют электроны. Производительность [8] опытного аппарата MREC до 1,6 м$^3$ $H_2$ на 1 м$^3$ анолита в сутки при расходе морской и пресной воды в количестве от 0,1 до 0,8 мл/мин. Насосные затраты около 1 % от вырабатываемой (в виде водорода) энергии, а КПД – до 64 %.

Более перспективна [1] генерация водорода из агрессивных низкомолекулярных сернистых соединений[4] (сероводорода, меркаптанов и т.п.). Например, использование сероводорода замкнутых водоёмов (Чёрного моря[5], Каспия и др.). Процесс может быть представлен:

$$H_2S + Q_S = H_2\uparrow + S, \quad (5.1)$$
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + 14Q_S. \quad (5.2)$$

При разложении сероводорода (5.1) и последующем сжигании водорода (5.2) получается 14-кратный энергетический выигрыш.

---

[3] Процессы электролиза потребляют в среднем 50 МВт электрической энергии на 1 т водорода.

[4] В сравнении с водой ($H_2O$) = –57.80 ккал/моль, водород слабо связан в молекуле сероводорода ($H_2S$) = –4.82 ккал/моль. Поэтому энергозатраты на деструкцию молекулы сероводорода ($H_2S$) в *12* раз меньшие, чем воды.

[5] Оценки запасов сероводорода в Черном море отличаются более чем в 10 раз. Поэтому водородная энергогенерация оценивается от 0,1 до 1 трлн кВт•ч , что соизмеримо с производством электроэнергии в России за 2023 г. – 1,121 трлн кВт•ч // Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году. АО «Системный оператор Единой энергетической системы». – URL: http://so-ups.ru (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

Внушают надежды и разработка методов выделения водорода из сернистых соединений низкотемпературным катализом [9] и плазмохимией [10], снижающей стоимость водорода относительно электролизного почти в 15 раз.

Переработка агрессивных сернистых соединений способствует экологической реабилитации биогеосферы, при условии использования выделяемой серы. Поэтому очевидно, что получение водорода из низкомолекулярных сернистых соединений может повышать устойчивость экономических систем.

### Выбросы водородной энергетики и биогеосфера

Экзотермическое окисление (горение) водорода возможно либо в кислородной среде, либо в атмосферном воздухе.

Современное окисление водорода в кислородной среде практически используется для генерации высокотемпературного пара, для энергогенерации с выбросом в атмосферу воды и агрессивного гидроксида (OH). Последнее время получают распространение топливные элементы, разлагающие $H_2$ на аноде ($2H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$) и ионизирующие его на катоде ($O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$), в итоге: $H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O$, то есть генерирующие воду.

Экзотермическое окисление в атмосферном воздухе [1] сопровождается выбросами оксидов азота. Водородную энергетику отличает высокая температура экзотермического окисления водорода 2048 °С для смеси с 19,6 % $H_2$, а в кислородной среде (для других концентраций $H_2$) до 2800 °С. Температура окисления (сгорания) водорода в 3,5 раза больше, чем у бензина (около 800 °С).

Образование оксидов азота [1] в процессах экзотермического окисления (сжигания) УСЭ от температуры иллюстрирует рисунок 1.

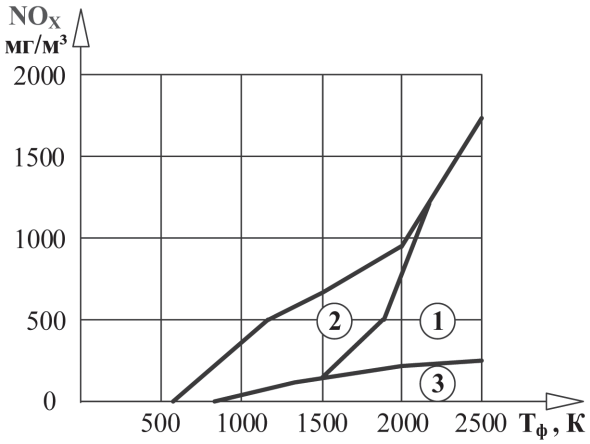


Рисунок 1 – Образование оксидов азота при окислении УСЭ:1 – термические оксиды; 2 – топливные оксиды; 3 – быстрые оксиды [1]

Высокая температура экзотермической реакции окисления $H_2$ приводит [1] к недопустимо высокой генерации NOx преимущественно по (2) «термическому» (высокотемпературный) механизму Зельдовича. Как следует из рисунка 1, росту температуры в зоне горения от 1500 °С сопутствует резкий рост выбросов $NO_X$ (до 2000 мг/м³ при ПДКм.р. 0,4 мг/м³).

В биогеосфере оксиды азота, формируя [1] вторичные токсичные соединения азота, 17 процессами деградируют её. По этой причине отмечено [11] локальное снижение биоразнообразия на 20–50 % и разрушение на огромных площадях экосистем и устойчивых сообществ организмов. Интенсивность повреждения биоты диоксидом азота высока в агломерациях, где средняя концентрация $NO_2$ составляет 0,2–0,3 мг/м³.

В отличие от $CO_2$, антропогенные выбросы оксидов азота в биогеосферу превысили их естественный оборот [1] еще в 80 г. прошлого столетия. Деградация биогеосферы оксидами азота происходит как

на локальном, так и на глобальном уровне. Оксиды азота [1] разрушают как мембраны биологических клеток, так и непосредственно биологические системы, фатально девальвируют феномен жизни.

Сомнительны и утверждения о сокращении выбросов [2] «парниковых газов» водородной энергетикой. Как показали [12] исследования, выбросы «парниковых газов» при сжигании «синего водорода» на 60 % больше, чем при сжигании дизельного топлива, и на 20 % больше, чем при сжигании природного газа. Такие выбросы «парниковых газов» при сжигании «синего водорода» дискредитируют предполагаемую экобезопасность водородной энергетики.

Исходя из этого реальная польза для экономических систем, с точки зрения экобезопасности, сокращением выбросов «парниковых газов», при освоении водородного энергоносителя крайне сомнительна.

Ещё более сомнительна [2] схоластическая инициация уменьшения оборота $CO_2$ в биогеосферах водородной энергетикой экономических систем. В конечном же итоге эта инициация сводится к замене выбросов $CO_2$ на $H_2O$ с целью уменьшения предполагаемого «парникового эффекта».

Вклад же $H_2O$ в «парниковый эффект» более чем в 3 раза преобладает над вкладом $CO_2$, а вклад остальных парниковых газов[6] не более $3 \cdot 10^{-4}$%. Как было показано [2], глобальная замена выбросов экономических систем $CO_2$ на $H_2O$ приводит к увеличению концентрации $H_2O$ в тропосфере и реально усугубляет «парниковый эффект».

Водяной пар как эффективный теплоноситель[7] глобально переносит тепловую энергию от экватора к полюсам. Именно это определяет термодинамику биогеосферы и её локализации, приводящие к природным аномалиям.

Содержание и локализация в тропосфере водяного пара определяется его парциальным давлением, что иллюстрирует рисунок 2.

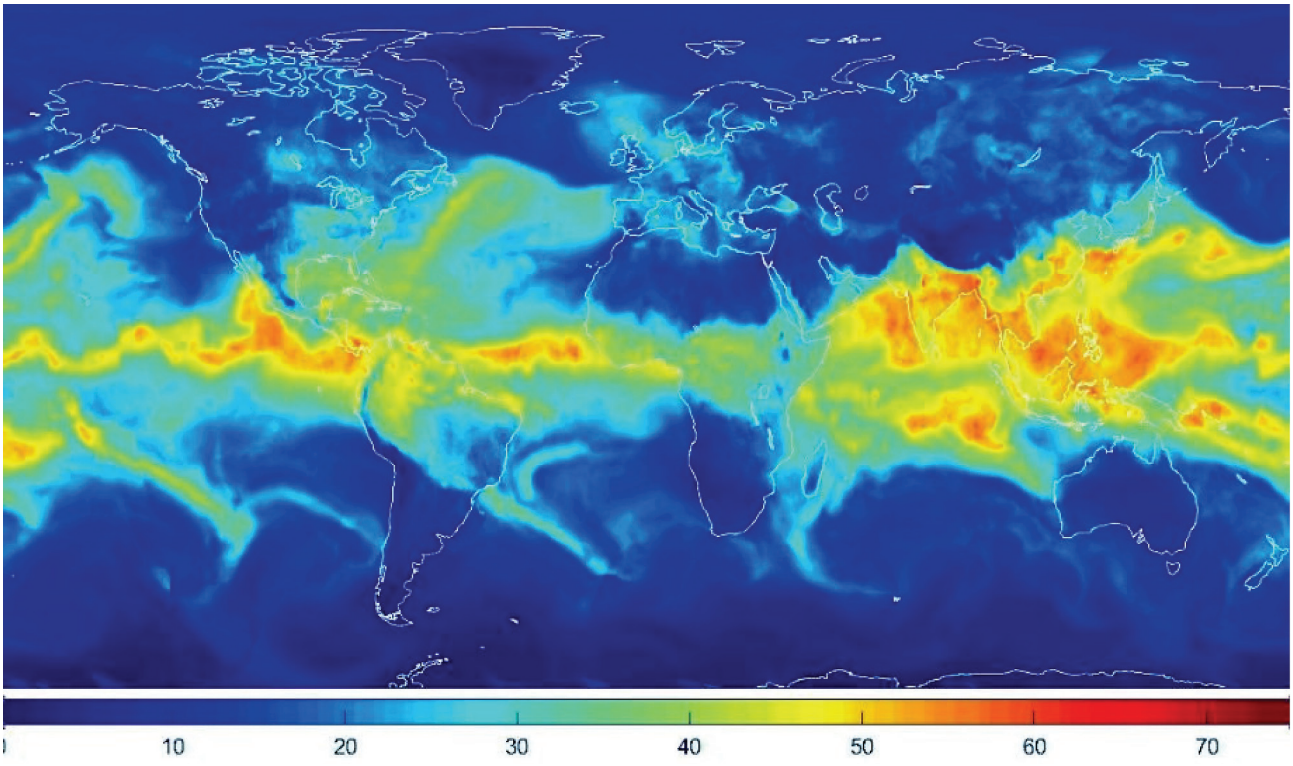


Рисунок 2 – Парциальное давление водяного пара[8]

[6] Перечень парниковых газов IPCC – list of greenhouse gases.

[7] Удельная теплоемкость водяного пара в ~ 2, 5 раза выше $CO_2$, а воды (с учётом фазового перехода) в ~5 раз.

[8] Цветовая шкала водяного пара представлена в мм рт. ст. Водяной пар в атмосфере по данным российского радиометра МТВЗА-ГЯ. – URL: https://iki.cosmos.ru/news/vodyanoy-par-v-atmosfere-zemli-vid-iz-kosmosa (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

Поскольку вода в естественных условиях не разлагается, она депонируется в тропосфере, что реально изменяет термодинамику биогеосферы и усиливает «парниковый эффект». Формализация этих процессов представлена на блок-схеме (рисунок 3).

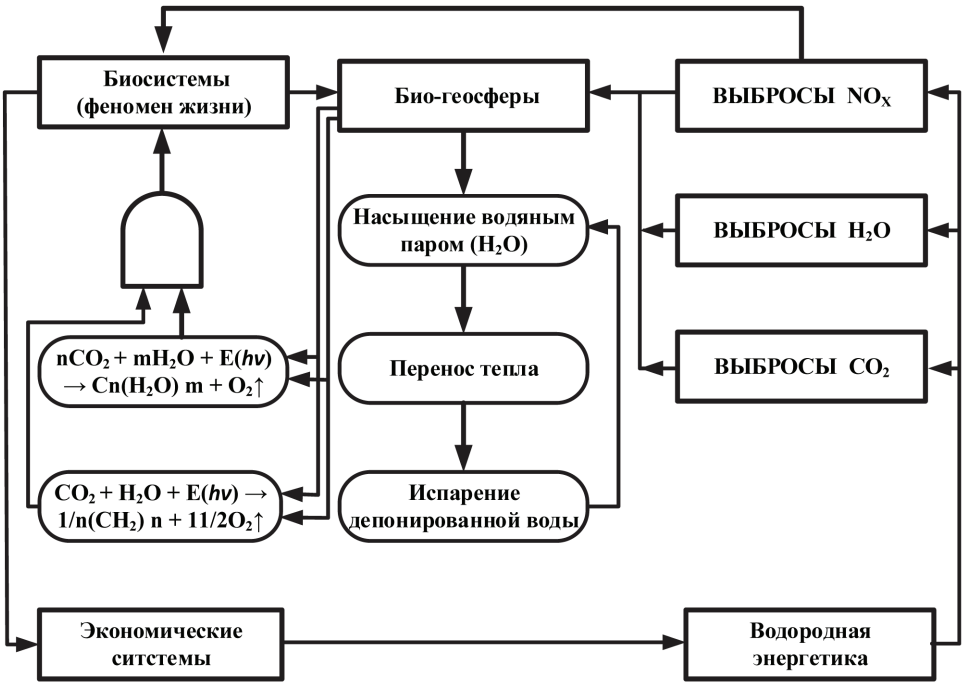


Рисунок 3 – Функциональная блок-схема взаимодействий с биогеосферой планеты при глобализации водородной энергетики экономических систем[9]

Многочисленные исследования фиксируют объективное увеличение водяного пара в верхней тропосфере. Поэтому вполне очевиден запуск естественного механизма[10] «положительной обратной связи» (рисунок 3): с ростом температуры увеличивается концентрация водяного пара[11].

Насыщение воздуха водяным паром от роста его температуры иллюстрирует рисунок 4. Нелинейность процесса насыщения приводит к его резкому усилению при росте температуры. Даже малый вклад экономических систем будет сильно масштабироваться (усилен). Поэтому нелинейность процесса насыщения предопределяет и локализацию (рисунок 2), и фрагментацию термодинамических параметров биогеосферы, и последующие природные аномалии.

Насыщение тропосферы водяным паром (рисунок 3) усиливает перенос тепла в полярные области, активируя депонированную там воду. Именно это усиливает положительную «обратную связь», а, соответственно, и «парниковый эффект».

Компенсатором «положительной обратной связи» выступает «отрицательная обратная связь» в виде природных механизмов адсорбции воды синтезом органического вещества (рисунок 3) основы феномена жизни. Наиболее масштабен механизм [13] первичного фотосинтеза органического вещества, формирующего феномен жизни (рисунок 3):

$$nCO_2 + mH_2O + E(h\nu) \rightarrow Cn(H_2O)\ m + O_2\uparrow \quad (6)$$

$$CO_2 + H_2O + E(h\nu) \rightarrow 1/n(CH_2)\ n + 11/2O_2\uparrow, \quad (7)$$

при замене выбросов $CO_2$ на $H_2O$ снижается адсорбция воды (6) образованием $Cn(H_2O)m$ – углеводов, где n и m ≥ 3, и (7) фрагментов липидов. В среднем организмы растений и животных содержат более

[9] Разработана автором.

[10] New study confirms water vapor as global warming amplifier. – URL: https://www.eurekalert.org/news-releases/890992 (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

[11] Содержание водяного пара в тропосфере у полюсов – 0,2 %, у экватора – до 2,5–4 %. – URL: https://iki.cosmos.ru/news/vodyanoy-par-v-atmosfere-zemli-vid-iz-kosmosa (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

50 % воды. Из чего следует, что с ростом биомассы биоценозов будет расти и адсорбция воды, а, следовательно, и уменьшаться «парниковый эффект».

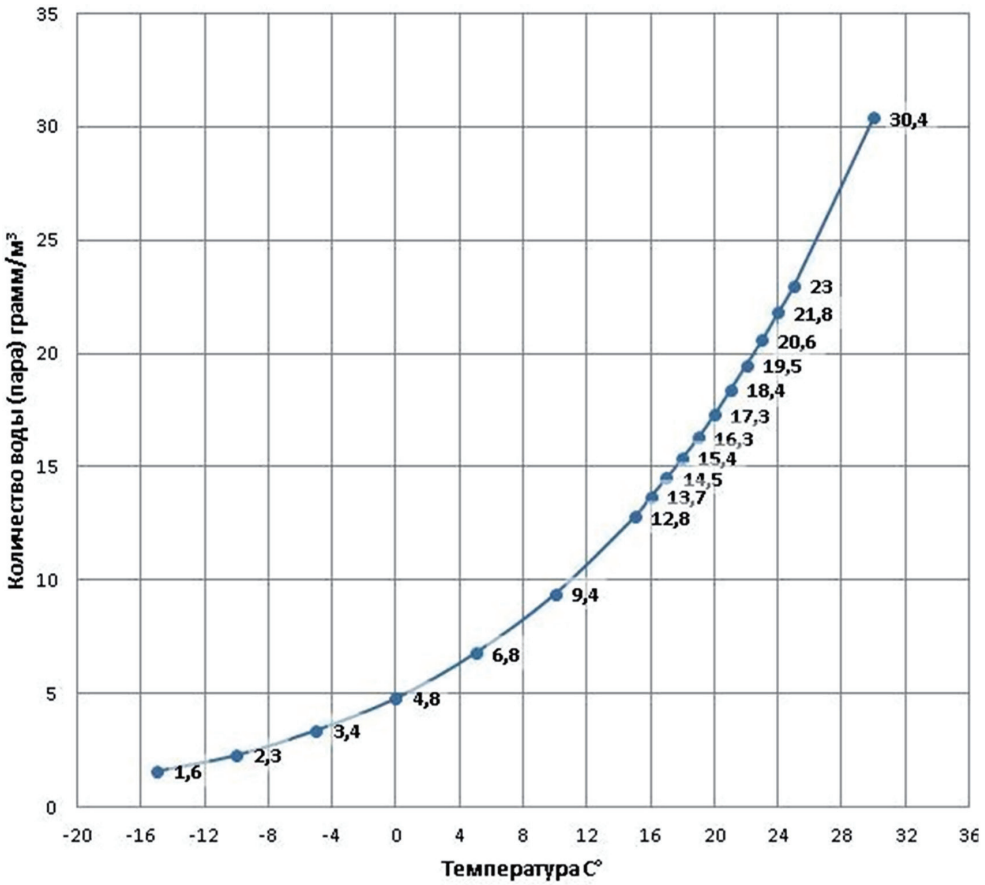


Рисунок 4 – Насыщение водяным паром воздуха в зависимости от его температуры[12]

Поэтому диоксид углерода, являясь природным источником построения феномена жизни и регенерации его функций, выступает неотъемлемой основой (рисунок 3) механизмов адсорбции воды в природе. Многочисленные исследования [2] показали, что текущий уровень $CO_2$ в тропосфере для растений в разы (до 3 раз) ниже оптимального. А дефицит $CO_2$ уменьшает растительную биомассу, которая и адсорбирует $H_2O$, наиболее масштабный и агрессивный реагент в «парниковом эффекте».

Следует отметить и тропосферную сепарацию выбросов $H_2O$ и $CO_2$. Поскольку молярная масса водяного пара (18 г/моль) существенно ниже молярной массы воздуха (29 г/моль). Поэтому водяной пар поднимается вверх, пока не конденсируется и образует осадки. Это неизбежно способствует (рисунок 3) усилению механизма «положительной обратной связи». Углекислый газ (44,01 г/моль) намного тяжелее воздуха и, попадая в атмосферу, опускается на поверхность Земли (воды). Это в свою очередь способствует (рисунок 3) усилению «отрицательной обратной связи», компенсирующей возмущающие воздействия.

Глобальному переходу к водородной энергетике экономических систем сопутствует (рисунок 3) генерация огромного количества водяного пара в биогеосферу. С большой вероятностью именно колоссальное увеличение выбросов воды в атмосферу и её стабильность в естественных условиях и приведет к глобальным климатическим и природным катаклизмам.

В то же время, актуальность вопроса о водных ресурсах в наше время может предполагать инженерные решения по аккумуляции выбросов воды. Полученный водный ресурс может быть использован

[12] Связь между влажностью воздуха и температурой. – URL: https://www-h2.com/services/the-relationship-between-air-humidity-and-temperature/ (дата обращения: 08.04.2024). – Текст: электронный.

традиционным способом или как оборотное сырье (дистиллированная вода) для производства водорода. Это позволит минимизировать неизбежные выбросы водяного пара в атмосферу, что снизит их негативное влияние.

### Устойчивость экономических систем при глобализации водородной энергетики

Исходя из данного рассмотрения, устойчивость, состоятельность и экобезопасность современных экономических систем при глобализации водородной энергетики сомнительны и требуют фундаментальных комплексных исследований.

Предварять глобальный переход к водородной энергетике экономических систем должна объективная оценка его состоятельности. Дабы предотвратить деградацию экономических систем, оценка их энергетики должна проводиться с учетом всей цепи энергогенерации от производства энергоносителя (водорода) до конечной реализации и реакции биогеосферы.

Элементы разработанной функциональной блок-схемы (рисунок 3) взаимодействий с биогеосферой планеты при глобализации водородной энергетики экономических систем могут быть формализованы математическими образами. Причём природная многомерность пространства протекающих процессов предопределяет формализацию элементов и их взаимодействий (рисунок 3) в рамках тензорного аппарата[13].

Формализация элементов и взаимодействий блок-схемы (рисунок 3) в рамках тензорного аппарата позволит свести анализ глобального перехода к водородной энергетике экономических систем к решениям в рамках теории сложных систем. Исходя из этого представляется возможность определения граничных условий и критериев устойчивости[14] экономических систем.

Переход к водородной энергетике конкретной экономической системы, наиболее [2] объективно представляет EROI = Полученная полезная энергия ÷ Затраченная энергия на получение, как своеобразный аналог КПД энергоресурса. Условие энергетической рентабельности ресурса выражается EROI > 1 – потребляемая энергия превосходит затраченную на ее получение.

Энергетическая рентабельность (EROI) водорода заведомо меньше[15], чем при использовании традиционных УСЭ. Поэтому концепции водородной энергетики предполагают его не как источник первичной энергии, а в качестве универсального транзитного или специализированного энергоносителя.

При этом дополнительно необходима, как минимум, оценка [1] водородной энергетики и по параметрам «Доступность» и «Безопасность». Однако ни методики, ни тем более такие оценки для водородной энергетики не известны.

Составить основу научно-методического подхода оценки состоятельности и эффективности изменений энергетики экономических систем могут [14] механизмы мультимодальной генетической оптимизации. Одним из критериев остановки итераций мультимодальной генетической оптимизации можно определить EROI > R, где R – заданная рентабельность водородной энергетики конкретной экономической системы. Одновременно необходимо разработать методики и критерии остановки итераций по параметрам «Экобезопасность» и «Доступность».

Поддержание современного уровня и развитие биосистем требует не просто избыток энергии, а избыток в большом объеме. Поэтому глобальный переход на водородную энергетику ограничивает итерации мультимодальной генетической оптимизации глобальной оценкой [15] интегральной эффективности экономических систем EROI не менее 15.

Таким образом, разработанная блок-схема (рисунок 3) с формализацией её элементов и взаимодействий в рамках тензорного аппарата открывает путь к основам научно-методического подхода *для*

---

[13] Тензоры аналитически задают непрерывные функции от координат, являясь непрерывными функциями точки пространства.
[14] Устойчивость функционалов представляется: 1. Устойчивость системы в рамках принципа Ле Шателье: упругость, как возврат в исходное состояние при действии малого параметра по Ляпунову (Красовскому, Разумихину); пластичность по Лагранжу (ограничение на решение дифференциальных уравнений поведения системы сверху и снизу). 2. Неустойчивость системы по Пригожину (Гленсдорфу, Стенгерсу) вблизи точки бифуркации при «выборе» дальнейшего пути своего развития.
[15] Энергетическая рентабельность водорода менее 0,7, что меньше рентабельности природного газа почти в 45 раз.

*оценки состоятельности и устойчивости экономических систем при глобализации водородной энергетики как носителей феномена жизни планеты* в условиях растущих флуктуаций природных факторов.

## Заключение

Сомнительные инициации глобализации водородной энергетики экономических систем актуализируют оценку их состоятельности и устойчивости.

Связанность водорода в природе предопределяет влияние водородной энергетики на биогеосферы начиная с его выделения. Промышленное же его производство открытыми термохимическими циклами доводит до абсурда экологические цели водородной энергетики. Иные способы получения водорода призрачны и порой сопровождаются усугублением кислородной катастрофы на планете.

Перспективно производство водорода из низкомолекулярных сернистых соединений. Такой подход позволит, например, реабилитировать экологию замкнутых водоёмов.

Высокая температура сгорания водорода неизбежно приводит к недопустимо высокой генерации NOx и «парниковых газов», чем при сжигании УСЭ. Глобальная замена выбросов экономических систем $CO_2$ на $H_2O$ усугубляет «парниковый эффект», увеличивая концентрацию водяного пара в тропосфере, в том числе активацией депонированной воды.

Глобализация водородной энергетики усугубляет локализацию и фрагментацию параметров биогеосфер, приводя к природным аномалиям и, как следствие, к неустойчивости биосистем и, соответственно, феномена жизни.

Снижение выбросов $CO_2$ ослабляет природный механизм адсорбции воды синтезом органического вещества. При этом глобализация водородной энергетики ещё более нивелирует адсорбцию воды.

Таким образом, состоятельность и экобезопасность водородной энергетики современных экономических систем сомнительна и требует фундаментальных комплексных исследований. Предложенная же формализация природных процессов открывает путь к основам научно-методического подхода оценки состоятельности и устойчивости экономических систем при глобализации водородной энергетики как носителей феномена жизни планеты.

## Список литературы

1. *Шаповалов А.Б.* Основы энергогенерации: монография. – Москва: МАКС Пресс, 2021.– 224 с.
2. *Шаповалов А.Б.* Водородная энергетика как следствие декарбонизации экономических систем // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2023. – № 2 (45). – С. 59–66.
3. *Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н., Хохонов А.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Субчева Е.Н.* Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ // Успехи в химии и химических технологиях. – 2020. – Т. 34, № 12. – С. 53–57.
4. *Klatt J.M., Chennu A., Arbic B.K., Biddanda B.A., Dick G.J.* Possible link between Earth's rotation rate and oxygenation // Nature Geoscience. – 2021. – Vol. 14. – P. 564–570.
5. *Daeneke T., Dahr N., Atkin P. and other authors*. Surface Water Dependent Properties of Sulfur-Rich Molybdenum Sulfides: Electrolyteless Gas Phase Water Splitting // ACS Nano. – 2017. – № 11 (7). – P. 6782–6794.
6. *Пиневич А.В.* Водородная хемолитотрофия // Микробиология. Биология прокариотов. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2007. – Т. 2. – 331 с. – С. 153–157.
7. *Vignais P.M., Billoud B., Meyer J.* Classification and phylogeny of hydrogenases // FEMS Microbiology Reviews. – 2001. – Vol. 25, No. 4. – P. 455–501.
8. *Younggy K., Bruce E.* Hydrogen production from inexhaustible supplies of fresh and salt water using microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011. – P. 16176–16181.
9. *Startsev A.N.* Shift of the $H_2S$ paradigm // Journal of Sulfur Chemistry. – 2022. – Vol. 43, No. 6. – P. 671–684.
10. *Животов В.К.* Плазменные методы производства водорода // Инновации. – 2006. – № 11. – С. 112–113.

11. *Vitousek P.M.* Beyond global warming: ecology and global change // Tcology. – 1994. – No. 7. – P. 1861–1876.
12. *Howarth R.W., Jacobson M.Z.* How green is blue hydrogen? // Energy Science & Engineering. – 2021. – No. 9 (10). – P. 1–12.
13. *Singhal G.S. and others*. Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis. – Springer Science & Business Media, 1999. – 1019 p. – P. 13.
14. *Шаповалов А.Б.* Мультимодальная генетическая оптимизация экономических систем // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2022. – № 4 (43). – С. 55–61.
15. *Lambert J.G., Hall C.A.S., Balogh S.B., Poisson A., and Gupta A.* EROI of global energy resources preliminary status and trends // Technical report. – State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. Report 1 – Revised, 2012. – P. 41.

**References**

1. *Shapovalov A.B.* Osnovy energogeneracii: monografiya. – Moskva: MAKS Press, 2021.– 224 s.
2. *Shapovalov A.B.* Vodorodnaya energetika kak sledstvie dekarbonizacii ekonomicheskih sistem // Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S.Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. – 2023. – № 2 (45). – S. 59–66.
3. *Shafiev D.R., Trapeznikov A.N., Hohonov A.A., Agarkov D.A., Bredihin S.I., Chichirov A.A., Subcheva E.N.* Metody polucheniya vodoroda v promyshlennom masshtabe. Sravnitel'nyj analiz // Uspekhi v himii i himicheskih tekhnologiyah. – 2020. – T. 34, № 12. – S. 53–57.
4. *Klatt J.M., Chennu A., Arbic B.K., Biddanda B.A., Dick G.J.* Possible link between Earth's rotation rate and oxygenation // Nature Geoscience. – 2021. – Vol. 14. – P. 564–570.
5. *Daeneke T., Dahr N., Atkin P. and other authors*. Surface Water Dependent Properties of Sulfur-Rich Molybdenum Sulfides: Electrolyteless Gas Phase Water Splitting // ACS Nano. – 2017. – № 11 (7). – P. 6782–6794.
6. *Pinevich A.V.* Vodorodnaya hemolitotrofiya // Mikrobiologiya. Biologiya prokariotov. – Sankt-Peterburg: SPbGU, 2007. – T. 2. – 331 s. – S. 153–157.
7. *Vignais P.M., Billoud B., Meyer J.* Classification and phylogeny of hydrogenases // FEMS Microbiology Reviews. – 2001. – Vol. 25, No. 4. – P. 455–501.
8. *Younggy K., Bruce E.* Hydrogen production from inexhaustible supplies of fresh and salt water using microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011. – P. 16176–16181.
9. *Startsev A.N.* Shift of the H2S paradigm // Journal of Sulfur Chemistry. – 2022. – Vol. 43, No. 6. – P. 671–684.
10. *Zhivotov V.K.* Plazmennye metody proizvodstva vodoroda // Innovacii. – 2006. – № 11. – S. 112–113.
11. *Vitousek P.M.* Beyond global warming: ecology and global change // Tcology. – 1994. – No. 7. – P. 1861–1876.
12. *Howarth R.W., Jacobson M.Z.* How green is blue hydrogen? // Energy Science & Engineering. – 2021. – No. 9 (10). – P. 1–12.
13. *Singhal G.S. and others*. Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis. – Springer Science & Business Media, 1999. – 1019 p. – P. 13.
14. *Shapovalov A.B.* Mul'timodal'naya geneticheskaya optimizaciya ekonomicheskih sistem // Vestnik Moskovskogo universiteta im. S.Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. – 2022. – № 4 (43). – S. 55–61.
15. *Lambert J.G., Hall C.A.S., Balogh S.B., Poisson A., and Gupta A.* EROI of global energy resources preliminary status and trends // Technical report. – State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. Report 1 – Revised, 2012. – P. 41.