

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК СЛЕДСТВИЕ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Шаповалов Александр Борисович¹,

e-mail: shapovalov-ab@yandex.ru,

¹Московский университет имени С.Ю. Витте, г. Москва, Россия

В статье исследуется инициация глобальной декарбонизации современных экономических систем сокращением выбросов CO₂ при экзотермическом окислении УСЭ. Формализация декарбонизации энергетики экономических систем функциональной схемой позволила раскрыть их трансформации. Отмечается, что инженерные решения энергетики современных экономических систем реализуют преимущественно газовые смеси. Констатируется, что насыщение водородом газоводородных смесей снижает объемную низшую теплоту сгорания при резком росте «парникового эффекта». Отмечается, что высокая температура сгорания водорода приводит к недопустимо высокой генерации NOx, обостряя вопрос о биологической безопасности водородной энергетики. Для исключения деградации конкретных экономических систем предложено эффективность их энергетики оценивать интегральным показателем EROI совместно с показателями энергонезависимости, энергобезопасности, доступности энергоресурсов и т.п. Предопределяется, что такой подход может составить основу научно-методического подхода оценки эффективности энергетики экономических систем, в том числе мультимодальной генетической оптимизацией.

Ключевые слова: декарбонизация, водородная энергетика, водород, углеродосодержащие энергоносители, экономические системы, выбросы, парниковый эффект

HYDROGEN ENERGY AS A CONSEQUENCE OF DECARBANIZATION OF ECONOMIC SYSTEMS

Shapovalov A.B.¹,

e-mail: shapovalov-ab@yandex.ru,

¹Moscow Witte University, Moscow, Russia

The article investigates the initiation of global decarbonization of modern economic systems by reducing CO₂ emissions during exothermic oxidation of CCE. The formalization of the decarbonization of the energy of economic systems by a functional scheme made it possible to reveal their transformations. It is noted that the engineer solutions of the energy sector of modern economic systems are implemented mainly by gas mixtures. It is stated that the saturation of hydrogen gas mixtures reduces the volumetric lower heat of combustion with a sharp increase in the “greenhouse effect”. It is noted that the high temperature of hydrogen combustion leads to an unacceptably high generation of NOx, exacerbating the issue of biological safety of hydrogen energy. In order to exclude the degradation of specific economic systems, it is proposed to assess the efficiency of their energy by the integral indicator EROI together with indicators of energy independence, energy security, availability of energy resources, etc. It is predetermined that such an approach can form the basis of a scientific and methodological approach to assessing the energy efficiency of economic systems, including multimodal genetic optimization.

Keywords: decarbonization, economic systems, hydrogen, hydrogen energy, carbon-containing energy carriers, emissions, greenhouse effect

DOI 10.21777/2587-554X-2023-2-59-66

Введение

Самоорганизация социума базируется на трансформации вовлекаемых ресурсов современными экономическими системами. Природа процесса трансформации ресурсов экономическими системами имманентно базируется на энергетике. Поэтому энергетика определяет состоятельность экономических систем.

Современная энергетика экономических систем [1] строится на экзотермическом окислении (более 85 %) углеродосодержащих энергоносителей (УСЭ). Процесс энергогенерации на основе УСЭ сопровождается [1] неизбежной природной генерацией продуктов экзотермического окисления УСЭ.

Очевидно, чем больше энергетика экономических систем, тем соответственно и больше продуктов экзотермического окисления УСЭ. Вполне естественно, что наиболее масштабным сопутствующим продуктом энергетики современных экономических систем является углекислый газ (CO₂). Поэтому именно неизбежные выбросы CO₂ стали [1] универсальной основой разнообразных стратегий конкуренции экономических систем.

Основу конкуренции современных экономических систем [2] составила реанимированная в XXI веке гипотеза Ж. Фурье и С. Аррениуса конца XVIII века о формировании «парникового эффекта» концентрацией CO₂ в атмосфере. Однако, увязка [2] промышленных выбросов CO₂ при сжигании УСЭ экономическими системами с «парниковым эффектом» провалилась.

Несмотря на очевидные противоречия, это не явилось препятствием опережающего старта глобальной декарбонизации экономических систем, т.е. переход в глобальном масштабе к «низкоуглеродной» экономике (LCE, НЭ). Неадекватная декарбонизация экономических систем инициировала их конкуренцию, как экономическую, так и политическую, сокращением выбросов CO₂.

Вполне естественно, что инициируемая декарбонизация современных экономических систем не отражает природные процессы в их энергетике. Более того, ограничения выбросов CO₂ экономическими системами [2] противоречит самой сути жизни.

Инициация декарбонизации девальвирует современную энергетику экономических систем на основе экзотермического окисления УСЭ. Сокращение выбросов в атмосферу CO₂ сводит развитие энергетики экономических систем к задаче превалирования водорода (H₂) в процессе экзотермического окисления УСЭ.

Экзотермическое окисление УСЭ в экономических системах

Современная энергетика экономических систем практически определяется [1] экзотермическим окислением УСЭ. Поэтому природа трансформации энергетики экономических систем декарбонизацией объективно формализуется функциональной схемой (рисунок 1).

Как следует из схемы (рисунок 1), доминирующий механизм [1] экзотермического окисления (горения) углеродосодержащей части УСЭ в общем виде представляется (1):



где n, m – число атомов углерода и водорода в молекуле;

Q_C – тепловой эффект реакции или теплота сгорания.

Суть процесса декарбонизации (рисунок 1) сводится к уменьшению содержания углерода в УСЭ (n → min). Вполне очевидно, что процесс декарбонизации в конечном итоге (рисунок 1) сводит механизм (1) к экзотермическому окислению (горению) водорода в (n = 0) кислородной среде (2):



где Q_H – тепловой эффект реакций или теплота сгорания.

При этом очевидная простота механизма (2) не отражает разветвлённые цепные реакции¹ в смесях водорода с кислородом или воздухом. В кислородной среде протекает более 20 цепных реакций.

¹ Нобелевская премия по химии 1956 г. «За исследования в области механизма химических реакций» Семенов Н.Н., Хиншелвуд С.Н. – URL: <https://multiurok.ru/files/laureaty-nobelevskoi-premii-n-n-semenov-s-n-khinsh.html> (дата обращения: 10.04.2023). – Текст: электронный.

При наличии в системе соединений азота и/или углерода число компонентов и элементарных реакций [1] стремительно возрастает на порядки.

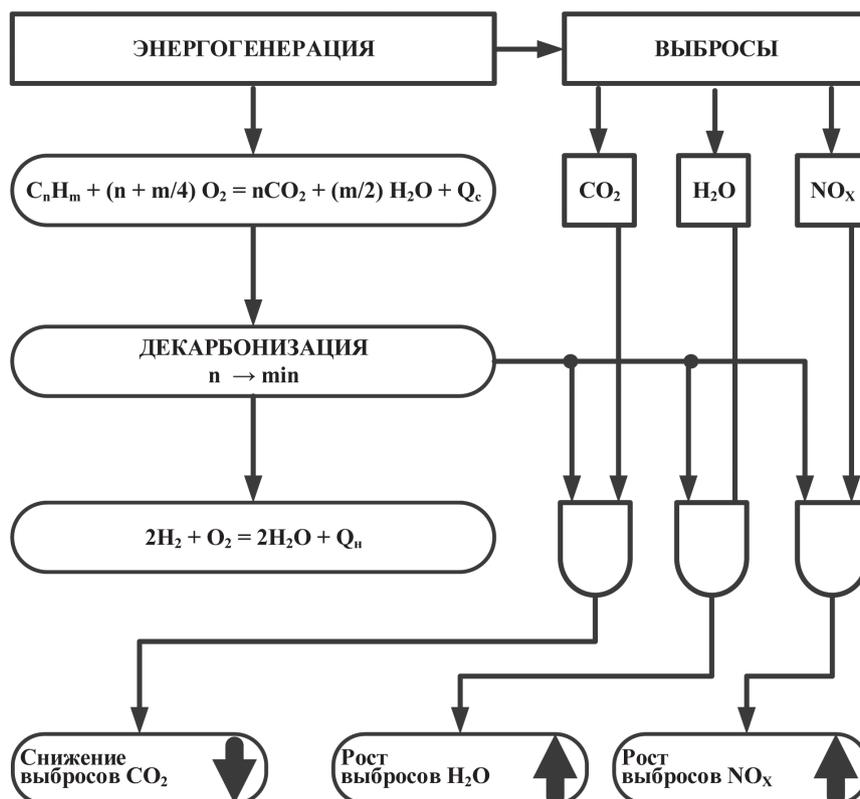


Рисунок 1 – Функциональная схема декарбонизации энергетики экономических систем²

На практике процесс декарбонизации (рисунок 1) осуществляется как деструктивной гидрогенизацией, так и формированием смесей УСЭ с водородом (газоводородные). В настоящее время деструктивной гидрогенизацией «бедные» водородом УСЭ (каменные угли, сланцы, мазуты и т.п.) обогащаются водородом. В результате образуются более «лёгкие» УСЭ, содержащие больше водорода, чем исходное сырьё.

Поскольку плотность водорода в 8,3 раза меньше плотности природного газа, при реализации инженерных решений различают объемную и массовую теплоту сгорания водорода. При использовании газовых смесей актуальна объемная теплота сгорания, а при плотной упаковке соответственно массовая.

Плотная упаковка водорода характерна для водородных топливных элементов³ и металл-водородных аккумуляторов⁴. Однако, для внедрения в энергетику экономических систем этих инженерных решений необходимо снижение их стоимости в десятки раз.

Современные инженерные решения энергетики экономических систем основаны на реализации газовых смесей. Поэтому эффективность современной энергетики экономических систем в подавляющем большинстве определяется [1] объемной низшей теплотой Q_i сгорания газородородных смесей.

Как известно [3], насыщение водородом газовой смеси (метан-водород) приводит к прямо пропорциональному снижению Q_i теплоты сгорания газородородной смеси. В итоге декарбонизации объ-

² Разработан автором.

³ Топливный элемент – гальваническая ячейка, непосредственно преобразующая химическую энергию топлива в электрическую энергию. Например, водородно-кислородный топливный элемент основан на протонообменной мембране, проводящей протоны.

⁴ Комбинация классического аккумулятора и регенеративного топливного элемента. Состоят из водородного и металл-оксидного электродов в растворе щелочи или кислоты. Исключительно отечественное изобретение.

емная низшая теплота сгорания Q_i водорода [3] в 3,4 раза меньше, чем объемная теплота сгорания природного газа.

Таким образом, целесообразность декарбонизации энергетики современных экономических систем (рисунок 1) при снижении объемной низшей теплоты Q_i энергоносителей просто абсурдна. Поэтому предположим существование положительного эффекта декарбонизации в положительных изменениях (рисунок 1) выбросов.

Для наглядности сравним выбросы CO_2 и водяного пара H_2O , сведённые в таблицу 1 по механизмам (1) и (2) при выработке одинакового количества энергии ($Q_c = Q_n$) при экзотермическом окислении УСЭ (метана) и водорода. В таблице 1 произведено сравнение на основе известных данных [3] выбросов CO_2 и H_2O при генерации одинакового количества энергии сжиганием CH_4 и H_2 при отсутствии иных примесей.

Таблица 1 – Выбросы при генерации одинакового количества энергии при сжигании метана и водорода в кислородной среде без примесей⁵

Механизм	Реагент	Выбросы CO_2	Выбросы H_2O
1	CH_4	6,6	5,4
2	H_2	0	9

Несложно видеть (таблица 1), что сжигание водорода сопровождается отсутствием выбросов CO_2 и на 40 % большими выбросами водяного пара. Однако, господствующий вклад H_2O в предполагаемый «парниковый эффект» более чем в 3 раза преобладает над вкладом CO_2 .

Совпадающие прозрачности⁶ H_2O и CO_2 пропускают [4] менее 7 % электромагнитного излучения Земли. Содержание [2] водяного пара в атмосфере (около 0,3 %) определяет 60 % «парникового эффекта» на фоне (0,03 %) CO_2 . Антропогенный же вклад [2] в концентрацию CO_2 (менее 5 %) в пределах статистической ошибки. Поэтому декарбонизация, с точки зрения предполагаемого «парникового эффекта», заменой выбросов CO_2 на H_2O практически ничего не даёт.

Поскольку вода в естественных условиях устойчива, ее выбросы при декарбонизации объективно приведут к увеличению ее концентрации в тропосфере. Поэтому рост выбросов воды при декарбонизации, очевидно, усугубит «парниковый эффект». Вода же из тропосферы поглощается фундаментальными [5, с. 260] механизмами фотосинтеза, в основе которых лежит CO_2 .

Сокращение концентрации CO_2 декарбонизацией в тропосфере неизбежно приводит к сокращению фотосинтеза первичного органического вещества, поглощающего воду из тропосферы, и повышению ее концентрации. На фоне уже существующего [2] дефицита CO_2 для фотосинтеза почти в 3 раза рост масштабных выбросов H_2O неизбежно приведет к климатическим и биологическим катаклизмам.

Таким образом, масштабные выбросы водородной энергетики неизбежно накапливают огромное количество водяного пара в тропосфере. Из чего логично предположить реальное усиление «парникового эффекта» при декарбонизации энергетики экономических систем за счет водородной энергетики. Вполне логично предположить, что именно масштабная декарбонизация сокращением выбросов CO_2 и приведет [2] к глобальной дестабилизации биосферы.

Выбросы (рисунок 1) оксидов азота (NO_x) обусловлены как окислением азота воздуха, так и присутствием азота в УСЭ в виде органических соединений. Концентрация выбросов NO_x определяется [1] температурой процессов окисления (сжигания) по трем механизмам.

Температура экзотермической реакции (1) сгорания УСЭ (бензин) около $800^\circ C$, в то время, как (2) сгорания H_2 в кислородной среде до $2800^\circ C$, а в воздухе около $2050^\circ C$. Поэтому сгорание водорода сопровождается стремительным ростом [1] выбросов NO_x (более 2000 мг/м^3 при ПДКм.р. $0,4 \text{ мг/м}^3$) по «термическому» механизму Зельдовича.

Антропогенное загрязнение биосферы NO_x , на фоне дефицита CO_2 , превысило его естественный оборот [1] еще в 80-м году прошлого столетия. Не секрет, что оксиды азота повреждают [6] как мембра-

⁵ Разработана автором.

⁶ Окно прозрачности H_2O – 3,5...4,5 мкм и 7,6...17 мкм. Окно прозрачности CO_2 – 13,7...16,7 мкм.

ны биологических клеток, так и непосредственно [1] биологические системы, приводят к деградации биосферы и разрушению озонового слоя. Поэтому масштабная генерация оксидов азота при декарбонизации предельно обостряет вопрос о безопасности водородной энергетики для биосферы.

Водородная энергетика в экономических системах

Многообразие экономических систем и разнообразность их целей [1] порождает еще большее множество критериев сравнения и оценки эффективности энергоресурсов для их достижения.

Итак, сомнительная декарбонизация энергетики экономических систем предполагает переход к энергоносителю водород. Менее энергозатратный нуклеосинтез атомных ядер [7] водорода (${}^1\text{H}$) привел к его доминированию (более 93 %) во Вселенной. Однако дегазация при формировании массы Земли [8] поставила содержание (15,52 %) водорода лишь на 3-е место.

Активность водорода обуславливает его существование практически только в связанном состоянии (вода, минералы, уголь, нефть, живые существа, органические вещества). Тогда в соответствии с Первым законом термодинамики (Ю.Р. Майер, Дж. Джоуль и Г. Гельмгольц) сохранения и превращения энергии в термодинамических системах, водород переносит исходную энергию за вычетом ее потерь при его производстве.

Несложные оценки на основе известных данных [9] позволяют ориентировочно оценить себестоимость получения водорода различными технологиями относительно себестоимости получения традиционных УСЭ (бензина) (3):

$$C_0 = C_{Hi} \div C_B, \quad (3)$$

где C_0 – ориентировочное соотношение себестоимостей получения водорода и бензина;

C_{Hi} – себестоимостей получения водорода i -технологией;

C_B – средняя себестоимостей получения бензина.

Ориентировочные оценки относительной себестоимости C_0 некоторых способов получения водорода к бензину приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношения себестоимостей получения водорода и бензина⁷

Технология получения H_2	C_0
Паровая конверсия метана	13,6–27,3
Газификация угля	18,1–22,73
Электролиз воды	> 36,4
Фото-электролиз воды	> 40,9
Из биомассы	45,5–63,6
Высокотемпературный электролиз воды (АЭС)	3,7

С очевидностью (таблица 1) полученные данные фиксируют, что современная себестоимость производства традиционных УСЭ (бензина) меньше современной себестоимости производства водорода от 4 до 50 раз. Поэтому, по факту, современные технологии получения H_2 объективно менее эффективны, чем традиционные производства УСЭ. Современное реальное промышленное производство водорода (85–95 %) [9] осуществляется паровой конверсией природного газа метана. В связи с этим объективная себестоимость производства водорода в 13,6–27,3 раза меньше, чем бензина.

Вполне логично, что актуальность использования конкретными экономическими системами водорода как энергоносителя должна предваряться объективной оценкой его эффективности, дабы исключить их деградацию.

Наиболее адекватную оценку энергетической рентабельности (окупаемости энергозатрат) дает [10] интегральный показатель экономической эффективности ресурса, своеобразный аналог КПД (4):

$$\text{EROI} = \text{Полученная полезная энергия} \div \text{Затраченная энергия на получение}$$

⁷ Разработана автором.

или

$$EROI = E_n \div (E_1 + E_2 + E_3 + E_4), \quad (4)$$

где E_n – энергия энергоресурса, произведенная за определенный период времени;

E_1 – энергия, затраченная на освоение энергоресурса, за определенный период времени;

E_2 – энергия, затраченная на операционные работы, связанные с непосредственной добычей, подготовкой и реализацией энергоресурса за определенный период времени;

E_3 – энергия, затраченная на ликвидационные работы, связанные с ликвидацией инфраструктур и рекультивации после завершения эксплуатации энергоресурса за определенный период времени;

E_4 – энергия, затраченная на реализацию энергоресурса за определенный период времени.

Из формулы (4) следует, что актуальность энергоресурса для конкретной экономической системы принципиально определяется тремя его значениями:

$EROI = 1$ – потребляемая энергия равна затраченной на ее получение. Энергоресурс с нулевым результатом, по сути, бессмыслица;

$EROI < 1$ – потребляемая энергия меньше затраченной на ее получение. Энергоресурс убыточен и потому неприемлем;

$EROI > 1$ – потребляемая энергия превосходит затраченную на ее получение. Энергоресурс рентабелен.

Определяющей особенностью [1] показателя EROI, как следует из формулы (4), является:

1) исключительная характеристика энергоресурса в рамках конкретной экономической системы;

2) учет всех затрат в цепи реализации энергии энергоресурса (принцип суперпозиции) конкретной экономической системой;

3) отражение природы производства энергоресурса и реализации его конкретной экономической системой;

4) независимость от финансово-экономической деятельности, экономических эквивалентов и идеологий конкретной экономической системы;

5) отражение динамики изменения реализации энергоресурса конкретной экономической системой.

Таким образом, актуальность EROI очевидна не только для текущей оценки, но и для выявления градиентов (тенденций и трендов). Однако, данный показатель не может быть определяющим в оценке энергоресурсов. Вполне логично, что целевые функции анализа [1] энергетики экономических систем требуют и других (энергонезависимость, энергобезопасность, доступность энергоресурсов и т.п.) целевых показателей.

Исходя из этого можно утверждать, что такой подход может составить основу научно-методического подхода к оценке эффективности энергетики экономических систем. Более того, при таком подходе механизмы мультимодальной генетической оптимизации экономических систем позволят предопределить наиболее эффективную энергетику для конкретных экономических систем. Так, $EROI > 1$ может выступать одним из критериев остановки итераций или же образования парето-оптимального фронта на основе самоадаптивного генетического алгоритма.

На сегодняшний день, по различным [1] оценкам, EROI с большим отрывом лидируют гидроэнергетика (100), уголь (80), нефть и газ (35). Из чего следует, что состоятельность вызванной декарбонизацией водородной энергетики сомнительна.

Заключение

Несмотря на провал увязки промышленных выбросов CO_2 при сжигании УСЭ экономическими системами с «парниковым эффектом», это стало основой разнообразных стратегий конкуренции современных экономических систем. Поэтому экономическая и политическая конкуренция современных экономических систем сокращением выбросов CO_2 вылилась в их глобальную декарбонизацию.

Инициация глобальной декарбонизации современных экономических систем не отражает природные процессы в энергетике. Девальвируя энергетику экономических систем на основе экзотермического окисления УСЭ, декарбонизация сводит ее развитие к задаче превалирования водорода в экзотермическом окислении.

Практически декарбонизация заключается в обогащении водородом УСЭ как деструктивной гидрогенизацией, так и формированием смесей.

Инженерные решения энергетики современных экономических систем реализуют преимущественно газовые смеси. Однако, насыщение водородом газовой смеси (метан-водород) приводит к прямо пропорциональному снижению теплоты сгорания газородной смеси (до 3,4 раза). Поэтому декарбонизация и переход к водородной энергетике, с точки зрения генерации энергии, просто абсурдны.

Сомнительна и эффективность водородной энергетики для биосферы.

Замена выбросов экономических систем CO_2 на масштабные H_2O с точки зрения предполагаемого «парникового эффекта» только усугубляет концентрацию наиболее агрессивного реагента. На фоне дефицита CO_2 в тропосфере (более 3 раз) водородная энергетика приводит к неизбежному снижению масштабной адсорбции H_2O фотосинтезом первичного органического вещества. И вот тут следует ожидать неизбежную дестабилизацию биосферы.

Высокая температура сгорания водорода неизбежно приводит к недопустимо высокой генерации NO_x . Загрязнение оксидами азота превысило их естественный оборот еще в 80-м году прошлого столетия. Выбросы оксидов азота приводят к фатальному повреждению мембран биологических клеток и деградации как биологических систем, так и озонового слоя. Это обостряет вопрос о биологической безопасности водородной энергетики.

Тем не менее, разнообразное целеполагание и многообразие современных экономических систем востребует объективную оценку их энергетики. Объективная оценка актуальности водородной энергетики для конкретных экономических систем предупредит их деградиацию.

Интегральным показателем эффективности энергетики конкретной экономической системы предлагается EROI. При этом необходима оценка энергетики и по дополнительным параметрам. Такой подход составляет основу научно-методического подхода оценки эффективности энергетики экономических систем, в том числе мультимодальной генетической оптимизацией.

Список литературы

1. Шаповалов А.Б. Основы энергогенерации: монография. – М.: МАКС Пресс, 2021. – 224 с.
2. Шаповалов А.Б. Декарбонизация экономических систем // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2022. – № 3 (42). – С. 40–47.
3. Савитенко М.А., Рыбаков Б.А. Применение водорода в энергетике: вопросы экологии // Турбины и дизели. – 2021. – № 1. – С. 10–16.
4. Шрайбер В.М. Из истории исследований парникового эффекта земной атмосферы // Биосфера. – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 37–46.
5. Семенов А.А. Очерк химии природных соединений. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 664 с.
6. Stamler J.S., Smgel D.J., Loscalzo J. Biochemistry of nitric oxide and its redox-activated forms // Science. – 1992. – Vol. 258. – P. 1898–1902.
7. Зельдович Я.Б. Происхождение элементов // Вестник АН СССР. – 1980. – № 3. – С. 12–21.
8. Ларин Н.В. Строение Земли и водородная энергетика // Окружающая среда и энерговедение. – 2021. – № 3 (11). – С. 43–61.
9. 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.
10. Hall C.A.S., Lambert J.G., Balogh S.B. EROI of different fuels and the implications for society // Energy Policy. – 2014. – Vol. 64. – P. 141–152.

References

1. Shapovalov A.B. Osnovy energogeneracii: monografiya. – M.: MAKS Press, 2021. – 224 s.
2. Shapovalov A.B. Dekarbonizaciya ekonomicheskikh sistem // Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S. Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. – 2022. – № 3 (42). – S. 40–47.

3. *Savitenko M.A., Rybakov B.A.* Primenenie vodoroda v energetike: voprosy ekologii // Turbiny i dizeli. – 2021. – № 1. – S. 10–16.
4. *Shrajber V.M.* Iz istorii issledovaniy parnikovogo effekta zemnoj atmosfery // Biosfera. – 2013. – Т. 5, № 1. – S. 37–46.
5. *Semenov A.A.* Ocherk himii prirodnyh soedinenij. – Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN, 2000. – 664 s.
6. *Stamler J.S., Sngel D.J., Loscalzo J.* Biochemistry of nitric oxide and its redox-activated forms // Science. – 1992. – Vol. 258. – P. 1898–1902.
7. *Zel'dovich Ya.B.* Proiskhozhdenie elementov // Vestnik AN SSSR. – 1980. – № 3. – S. 12–21.
8. *Larin N.V.* Stroenie Zemli i vodorodnaya energetika // Okruzhayushchaya sreda i energovedenie. – 2021. – № 3 (11). – S. 43–61.
9. *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 himicheskikh tekhnologiyah. – 2020. – Т. 34, № 12. – S. 53–57.
10. *Hall C.A.S., Lambert J.G., Balogh S.B.* EROI of different fuels and the implications for society // Energy Policy. – 2014. – Vol. 64. – P. 141–152.