

## Обзор

Обзорная статья

УДК 542.943.7

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11807>

## Перспективы мембранного катализа в водородной энергетике. Мини-обзор

В. А. Шапошник✉

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

### Аннотация

Без сомнения, развитие водородной энергетики сегодня чрезвычайно актуально, поскольку она не только позволяет решить проблему выработки энергии из возобновляемого источника воды, но и может исключить образование парниковых газов. Говорят, что все новое – это хорошо забытое старое. Статья, в первую очередь, посвящена превосходной, но до сих пор не реализованной работе Сент-Клера Девиля, который получил водород из водяного пара, применяя мембранный метод. Он использовал глиняную трубку в качестве мембраны, избирательно пропускающей водород. Процесс происходил при нагревании до 950 °С. Сент-Клер Девилю удалось получить только смесь водорода и кислорода в соотношении 4:1, а затем применить химические реакции для очистки продукта от кислорода.

Современные мембранные катализаторы на основе палладия или его сплавов избирательно проницаемы исключительно для водорода. Это означает, что метод мембранного катализа с мембранами из палладия позволит более эффективно осуществлять процесс термической диссоциации воды и решить проблемы водородной энергетики, используя только возобновляемое сырье.

В этом обзоре также рассмотрена история открытия водорода и методов его получения. Дан анализ различных методов производства энергии – ископаемое сырье, ветродвигатели, солнечные батареи, гидроэнергетика, электролиз, атомная энергетика, на основе которых составляется прогноз. Обзор следует рассматривать как приглашение к дальнейшим дискуссиям на эту очень актуальную и важную тему.

**Ключевые слова:** энергия, водород, экология, экономика, устойчивое развитие, мембраны, палладий, катализ, водяной пар

**Для цитирования:** Шапошник В. А. Перспективы мембранного катализа в водородной энергетике. Мини-обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 37–44. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11807>

**For citation:** Shaposhnik V. A. Perspective of membrane catalysis in hydrogen energetics. Mini-review. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 37–44. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11807>

✉ Шапошник Владимир Алексеевич e-mail: [v.a.shaposhnik@gmail.com](mailto:v.a.shaposhnik@gmail.com)

© Шапошник В. А., 2024



## 1. Введение

### 1.1. Ранняя история водородной энергетики

Будущего еще нет. Настоящее является будущим, непрерывно перетекающим в прошлое. Следовательно, реальностью является только прошлое, и предвидение также является операцией над прошлым.

Предисловием к истории водородной энергетики является сам факт открытия водорода Генри Кавендишем в 1766 году [1], хотя автор открытия полагал, что открыл горючий газ флогистон, который искали его современники. Для получения водорода Кавендиш использовал реакцию серной или соляной кислоты с металлами цинком, железом или оловом. Он обнаружил, что водород горит на воздухе. Сейчас этот опыт используется в школах и на первом курсе обучения химиков в университете, но для промышленного производства он не применяется в связи с высокой стоимостью реагентов. Первая страница истории водородной энергетики была написана в 1800 году. Лондонский профессор медицины А. Карлайл, познакомившись с конструкцией элемента Вольта, бросил лекции, отложил операции, изготовил элемент из 17 серебряных полукрон и 17 цинковых пластин, опустил припаянные к крайним пластинам провода в воду и наблюдал выделение газов. У. Николсон помог ему определить, что на одном электроде выделялся водород, а на другом кислород. Объем выделенного водорода вдвое превышал объем выделенного кислорода. Удовлетворив свое чувство любознательности, Карлайл вернулся к прежней работе, а Николсон с Круикшенком, продолжили исследования электролиза растворов солей и опубликовали результаты [2].



Рис. 1. Сент-Клер Деви́ль (1818–1881)

Новый подход к проблеме водородной энергетике был предложен Анри Сент-Клер Деви́лем, рис. 1, [3–6]. Установка Деви́ля показана на рис. 2. Главным элементом является трубка из обожженной неглазированной белой глины (каолина). Каолин является алюмосиликатом  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , имеющим пористую структуру и свойства слабокислотного катионообменника. Трубка из каолина была помещена в центр печи и в неё через штуцер  $d$  подавался из колбы или реторты водяной пар. Каолиновая трубка вставлена в более широкую глазированную фарфоровую трубку, не пропускающую для газов. Края трубки замуровывали (закрепляли) глиняной замазкой. Трубки помещались в печь, которую топили мелкими кусками кокса. Было установлено, что для

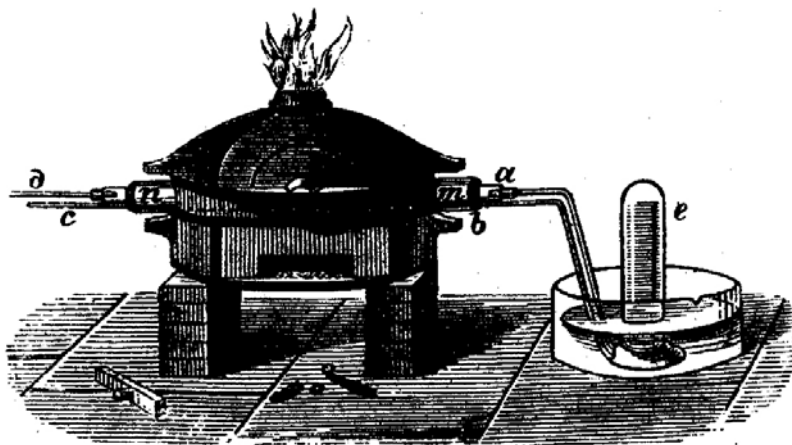


Рис. 2. Установка Сент-Клер Деви́ля для получения водорода

термической диссоциации молекул воды достаточно 950 °С.

Сент-Клер Девилль был знаком с трудами исследователя мембранных процессов и основателя коллоидной химии Томаса Грэма [7]. Т. Грэм показал, что потоки водорода через стеклянные мембраны или животный пузырь в 4 раза больше потоков кислорода. Результат, полученный Девиллем при диффузии через каолиновую мембрану, был близок к результату, полученному Грэмом при диффузии водорода и кислорода через мембраны другой природы. Таким образом, пространство между каолиновой и фарфоровой трубками обогащалось водородом, однако содержало кислород. Для предотвращения горения смеси водорода и кислорода Сент-Клер Девилль в кольцеобразное пространство между трубками пропускал углекислый газ через трубку *c*. Остаток кислорода реагировал с водородом с образованием воды. Углекислый газ, выходящий из трубки *b*, нейтрализовался щелочью. В результате Девилль получал на выходе из пространства между трубками чистый водород. Глиняная мембрана не является высокоселективной по отношению к водороду. В настоящее время известны мембраны, которые избирательно пропускают водород, что может принципиально усовершенствовать метод Сент-Клер Девилля. Отметим, что если при термической диссоциации отсутствует селективная мембрана, то даже при давлении 0.1 атм 40%-ная диссоциация может быть получена только при 3000 °С.

### **1.2. Анализ современных методов получения водорода**

В прошлые века было принято оценивать технологии только с точки зрения экономики. Вызов, брошенный нам природой в настоящее время, делает необходимой оценку технологий не только с экономической, но и с экологической точки зрения. Речь идет, в первую очередь, об отклонении изменения температуры поверхности земли от циклической зависимости [8] в сторону экспоненциального роста во времени [9]. Это оценивается как глобальное потепление. Его причиной является увеличение концентрации парниковых газов. Парниковые газы до определенной концентрации необходимы для сохранения тепла атмосферы, но их избыток приводит к глобальному потеплению, признаки которого уже очевид-

ны. В связи с этим оценка уже существующих и новых технологий должна учитывать генерацию парниковых газов и, в первую очередь, диоксида углерода.

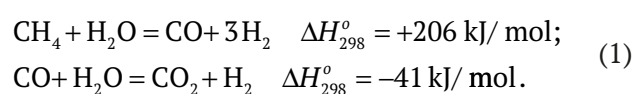
Термины экономика и экология имеют один и тот же корень. Греческое слово οίκος означает дом, то есть речь идет о нашем общем доме Земле. Но если экономика, несмотря на тенденцию к глобализации, носит преимущественно локальный характер, так как страны защищены своими границами от других стран, то экологическая обстановка принципиально глобальна, так как конвекция стремится уравнивать градиенты температур и концентраций. В связи с этим экологические проблемы не могут быть узко национальными и являются общемировыми.

Обсудим с этой точки зрения проблемы водородной энергетики. Прогресс промышленности начинается с науки. Ее идеи, попадая на благодатную почву, реализуются. При реализации возникают проблемы, требующие дополнительного исследования. Так образуется замкнутая связь между наукой и производством. Примером может служить открытие Ю. Либигом необратимого извлечения из почвы минеральных веществ при питании человека [10]. Он предложил для сохранения плодородия почв использовать минеральные удобрения, содержащие азот, калий и фосфор. Калий и фосфор можно внести в почву природными соединениями, но для получения аммиака для азотсодержащих удобрений необходим водород. Впервые проблема получения аммиака для использования в качестве удобрения была решена концерном BASF совместно с учеными, получившими за эти исследования Нобелевские премии (Ф. Габер, К. Бош) [11]. Эффективный и дешевый катализатор для синтеза аммиака из азота и водорода был найден А. Митташем [12]. Многотоннажное производство аммиака было впервые организовано на предприятии Лойна вблизи Мерзебурга в 1920 г. Для синтеза аммиака требуются азот и водород. Но если азот является главным компонентом атмосферного воздуха, то водород должен быть получен методами химической технологии. Так возникла впервые проблема крупномасштабного производства водорода.

Водород для синтеза аммиака в настоящее время получают реакцией метана с водяным паром [13]. Труба реактора является мембранным катализатором. Для её изготовления луч-



ше всего использовать металлы Pd, Pt, Ru, Rh, Ir [14], однако на практике используют значительно более дешевый катализатор из Ni. Реакционно более активные металлы Fe, Co не применяют вследствие их окисления в процессе проведения реакции. Типичный катализатор состоит из относительно больших частиц никеля, нанесенных на  $Al_2O_3$ . Процесс проводят при высоких температурах (до 1000 °C), однако при использовании мембран из сплавов палладия и серебра, температура может быть понижена до 500 °C. При проведении реакции получается смесь  $H_2$ , CO и  $CO_2$ . Реакция протекает по следующей схеме



Метод получения водорода для синтеза аммиака реакцией метана и водяного пара отличается от метода Сен-Клер Девилля, использовавшего в качестве реагента только водяной пар. Использование смеси метана и водяного пара экономически эффективно. Рентабельность использования метана для получения водорода привела к мысли исключить водяной пар из реагентов, но такой метод должен использовать невозновляемый источник энергии, который будет исчерпан уже в нашем столетии. Кроме того, повышенное содержание метана приводит к отложению на поверхности катализатора углерода в виде искривленных графитовых слоев [14]. Образование из них нитей родственно синтезу углеродных нанотрубок. Это приводит к забивке реактора и разрушению катализатора. Добавление в реакцию фазу водяного пара предотвращает отложение углерода на поверхности катализатора. Были проведены эксперименты с разными соотношениями водяного пара и метана и было установлено, что повышение доли водяного пара приводит к увеличению доли конвертируемого в процессе реакции метана [13]. Присутствующая в природном газе сера не только отравляет катализатор, но и препятствует использованию водорода в топливном элементе [14]. Реакции (1) показывают, что кроме водорода её продуктом является парниковый газ диоксид углерода, а промежуточным продуктом является отравляющий газ оксид углерода. Так как метан, являющийся главным компонентом природного газа, относится к невозновляемым источникам энергии, то совершенствование методов и технологии

получения водорода представляется в настоящее время актуальной задачей.

Метод получения водорода электролизом из воды или водных растворов солей известен давно [2], и он продолжает применяться в настоящее время [15–20]. Для электролиза необходима электроэнергия. В настоящее время 37 % электроэнергии получают сжиганием угля. Кажущаяся экологическая чистота производства электроэнергии, вырабатываемой тепловыми электростанциями, обманчива, если смотреть на неё только с позиций потребителя. При производстве 1 кВт часа электроэнергии сжиганием угля в атмосферу выбрасывается 0.5 моль-экв серной и азотной кислот, которые губят леса, разрушают памятники архитектуры и увеличивают коррозию металлов. Кроме того, в атмосферу выбрасываются 1 кг углекислого газа (парникового газа), 14 г шлака, а также радиоактивные изотопы [17–19]. Переход производства электроэнергии на природный газ принципиально улучшил экологическую обстановку. Доля электростанций, работающих на природном газе, 24 %, но нельзя забывать, что природный газ является невозновляемым источником энергии, и продукт его сгорания диоксид углерода – парниковый газ [20].

Использование энергии течения рек известно уже давно, и в настоящее время её доля в общем производстве электроэнергии составляет 16 %. Несмотря на то, что гидроэнергия является возобновляемым источником энергии, для прогресса этого метода существует ряд препятствий. Для возведения гидроэлектростанций необходимо строить плотины (дамбы), что приводит к изменению природных условий. Вода выше плотин затапливает земли, пригодные для сельского хозяйства. Это могут быть и живописные участки природы, и исторические места. Выше плотин накапливается ил, а ниже плотин уменьшается концентрация питательных веществ в воде. Плотины препятствуют миграции рыб и их нересту. В связи с этим строительство новых дамб в США не планируется, а одна из них в штате Мен уже снесена, и в штате Колумбия планируется снос еще двух дамб [8]. Эти аргументы не позволяют с оптимизмом смотреть на будущее гидроэнергетики.

В настоящее время доля электроэнергии, производимой атомными электростанция-

ми, составляет 10 %. В ряде стран (США, Россия, Франция, Япония и др.) атомные электростанции рассматривают в качестве самого перспективного источника энергии. Так как производство электроэнергии АЭС постоянно в течение суток, а многие предприятия не работают ночью, то предполагается использование их в это время для получения водорода электролизом. Современные реакторы на тепловых и медленных нейтронах работают на обогащенном уране-235, доля которого в природном уране составляет всего 0.7 %. «Быстрые» реакторы могут работать на уране-238, содержание которого 99.3 %, что позволяет использовать отвалы в качестве реакторного топлива. В России на Белоярской атомной станции энергоблок с реактором на быстрых нейтронах работает уже 30 лет. Если такую технологию нельзя назвать полностью возобновляемым источником энергии, то можно сказать, что она достаточно далеко по сравнению с природным газом и нефтью расширяет возможности получения долговременного источника энергии. Однако ряд стран (Германия, Италия, Испания, Бельгия, Швейцария, Австрия) прекращают работу АЭС. Причиной являются алармические настроения после аварий АЭС в Чернобыле и Фукусиме. А также возможно, что лидеры этих стран предусматривают их опасность во время войн, когда АЭС могут легко превратиться в источник катастроф. Будущее АЭС в настоящее время трудно однозначно оценивать.

Ветер является бесплатным, экологически чистым и возобновляемым источником энергии. Его энергию издавна использовали парусные суда и мельницы. Ветроэнергетика в настоящее время ограничена в мировом масштабе 5 %, но исследователи и инженеры Европы совершенствуют ветродвигатели и планируют к 2030 году достичь 20 % от общего производства энергии. Однако у ветроэнергетики есть свои проблемы. К ним, в первую очередь, относится прерывность процесса и передача энергии на расстояния. Есть трудности установки ветрогенераторов, причем зимой ветротурбины могут замерзать. Эти трудности не останавливают развитие ветроэнергетики, но очевидно, что она также не сможет стать доминирующим источником энергии.

Актуальной проблемой является повышение эффективности использования солнечной энер-

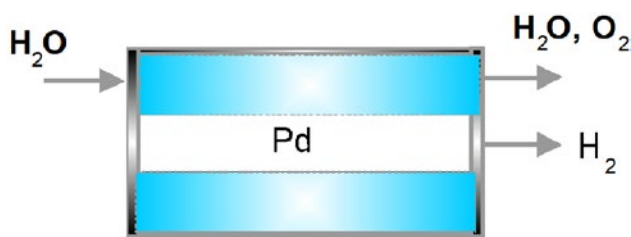
гии. В настоящее время её доля в мировом производстве электроэнергии мала (3 %) На этом пути есть успехи, есть и неудачи. Президент США Д. Картер был увлечен идеей использования солнечной энергии и на крыше Белого дома поставил солнечный нагреватель, который при работе дал течь и был в результате помещен в библиотеку-музей Картера [9]. Не все регионы эффективны для использования солнечной энергии, поэтому возник проект размещения фотоэлементов в пустыне Сахара и последующей передачи энергии в Европу.

В результате анализа можно сделать вывод о перспективности для энергетики получения водорода методом мембранного катализа водяных паров и использования энергии АЭС для электролиза воды или водных растворов солей с последующим применением топливных элементов для создания электростанций [20].

## 2. Метод мембранного катализа для получения водорода

Термин устойчивое развитие (sustainable development) был предложен в 1983 году, когда ООН создала Всемирную комиссию по окружающей среде и развитию. Концепция устойчивого развития стала парадигмой и её следует понимать, как развитие, отвечающее потребностям настоящего времени без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. С этой точки зрения интенсивное использование углеводородного топлива и угля в настоящее время лишает будущие поколения источников энергии. В связи с этим метод мембранного катализа, использующий пары воды в качестве реагента, имеет наибольшие перспективы, так как применяет возобновляемый источник и свободен уже в настоящее время от вредных выбросов в атмосферу и почву.

Для реализации метода мембранного катализа нет необходимости в создании принципиально новых аппаратов. Для его реализации в промышленности могут быть использованы установки для получения водорода при синтезе аммиака. Для перехода на новую технологию достаточно прекратить подачу метана в процессах риформинга и использовать в качестве мембран материалы, на поверхности которых будет нанесен нанодисперсный палладий. Катализатором в этом процессе будет палладий.



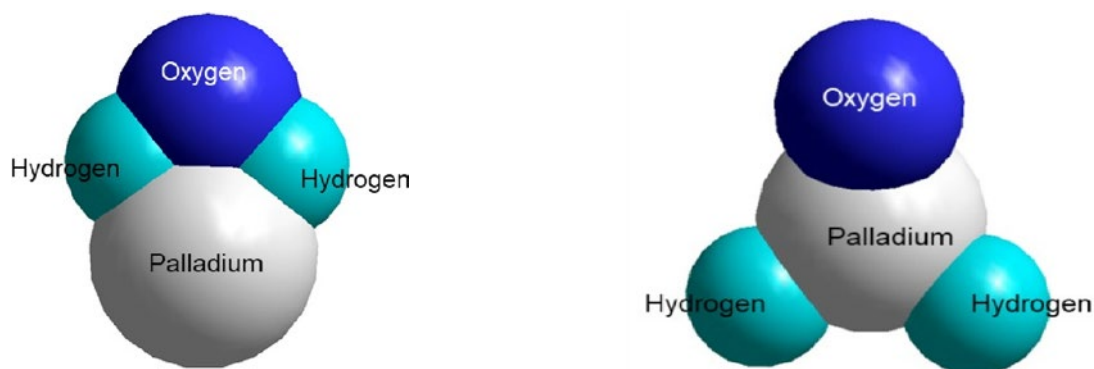
**Рис. 3.** Реактор для получения водорода из водяных паров

Электронная структура палладия в порядке увеличения энергии  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 4d^{10}$ . Это приводит к тому, что мембрана из палладия селективно пропускает исключительно водород, который может использоваться в качестве источника энергии или быть преобразован с помощью топливного элемента в электрическую энергию.

Причина исключительной избирательности палладиевой мембраны может быть объяснена с позиций электростатического взаимодействия её поверхности с молекулами воды. Рис. 4 показывает модель взаимодействия на примере атома палладия и молекулы воды. Слева - начальное состояние, в котором молекула воды находится на поверхности палладия. Молекула воды имеет постоянный электрический дипольный момент  $\mu = 1.84 (\pm 0.02) \cdot 10^{-18}$  эл. ед. см [19]. При определении величины дипольного момента условно вводится направление от отрицательного полюса диполя к положительному. Значения квадрупольного и октупольного моментов молекул воды дают полезные сведения о распределении заряда в молекуле. Каждый атом также является диполем, в котором ядро заряжено положительно, а подвижная электронная оболочка заряжена отрицательно. При этом ядра и электроны совершают колебания, в ре-

зультате которых потенциальная энергия обусловлена электростатическим взаимодействием диполей. Важно обратить внимание на то, что поверхность любого атома, а палладия, в связи с особенностью его электронного строения, особенно, заряжена отрицательно, что важно для понимания механизма любого каталитического процесса. Так как молекула воды является сильнополярной, то на поверхности палладия, заряженной отрицательно, она ориентируется к ней атомами водорода. Проведенный квантово-химический расчет показывает результат взаимодействия [21], при котором молекула воды была разорвана кулоновскими силами, и атомы водорода оказались внутри палладиевой мембраны, а атом кислорода остался на поверхности мембраны. Прошедшие под действием градиента химического потенциала через палладиевую мембраны атомы водорода рекомбинируют в молекулы на противоположной стороне мембраны. Мембранный катализ отличается от поверхностного тем, что реагенты адсорбируются на поверхности, а затем после реакции продукты отрываются от неё. Например, при синтезе аммиака на поверхности катализатора происходит разрыв прочной тройной связи в молекуле азота, а затем атомы азота реагируют с атомами водорода и при получении молекул аммиака отрываются от поверхности. При мембранном катализе также происходит адсорбция молекул реагента на поверхности катализатора, но затем один из продуктов диффундирует через мембрану. Это способствует более полному разделению продуктов и реагентов. В этом преимущество мембранного катализа.

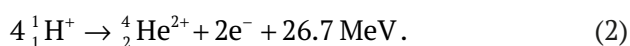
Представленный вариант получения водорода методом мембранного катализа для



**Рис. 4.** Модель взаимодействия молекулы воды и атома палладия. Слева – до начала каталитической реакции, справа – во время реакции

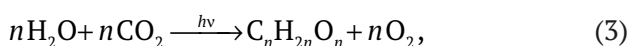


последующего применения его как горючего или в топливном элементе является частным случаем глобальных процессов, протекающих во Вселенной. Во-первых, мы используем прямо или косвенно энергию Солнца. На Солнце и других звездах при высоких температурах происходит ионизация атомов водорода, превращающая их в ядра (протоны). Источником энергии звезд является цепь реакций, из которых главная реакция между ядрами водорода, в результате которой получается гелий:

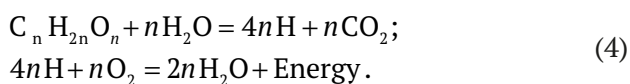


Всего на Солнце 75 % водорода и 24 % гелия. Межзвездная среда содержит 90 % водорода и 10 % гелия, что соответствует элементному составу молодых звезд. Продолжительность жизни нашей планеты оценивается приблизительно в 5 млрд лет, и мы находимся в середине её жизни.

Из всей солнечной энергии, доходящей до поверхности Земли, в процессе фотосинтеза улавливается в среднем только 0.3 %. Химики ставят задачи синтезировать супермолекулы, которые бы позволили принципиально увеличить поглощение солнечной энергии, однако в настоящее время значимых результатов не достигнуто [22]. Процесс фотосинтеза с точки зрения лауреата Нобелевской премии А. Szent-Györgyi является прежде всего реакцией, в которой солнечная энергия используется для диссоциации воды:



а полученные углеводы он рассматривал как «поставщика» водорода, основным назначением которого является настоящая энергоснабжающая реакция его сжигания [23]:



Он полагал, что в живых организмах есть только одно топливо – водород.

Фотосинтез производит большое количество биомассы, которая может быть использована в качестве возобновляемого источника энергии. В Бразилии 30–60 % автомобильного топлива составляет этанол, полученный из биомассы [9]. Если до сих человек извлекал углеводороды, которые были получены из продуктов фотосинтеза миллионы лет назад в недрах Земли, то теперь открывается воз-

можность превращать продукты фотосинтеза в источник энергии сразу и сейчас. Биоэнергетика имеет свои проблемы. В настоящее время этанол дороже бензина, но это не единственное препятствие на пути увеличения использования биомассы. Главным препятствием является необходимость расширения площадей для производства биомассы, которое вступает в конфликт с необходимостью увеличения площадей пищевых культур в связи с экспоненциальным ростом народонаселения. Перспективным является использование для этой цели водорослей, которые способны давать в три раза больше биомассы на единицу площади, чем пальмовые плантации, и в 6 раз больше, чем кукурузные плантации.

### 3. Заключение

Анализ способов получения энергии позволил определить наиболее перспективные методы для будущей водородной энергетике. Во-первых, это метод, использующий энергию атомных электростанций для получения водорода электролизом. Во-вторых, это использование этанола, полученного фотосинтезом из биомассы. В-третьих, как наиболее перспективный подход мы рассматриваем получение водорода методом мембранного катализа термической диссоциации водяного пара. В качестве мембраны может быть использован металл, на поверхность которого нанесен палладий, избирательно пропускающий водород. Водород может быть использован непосредственно в качестве топлива, не имеющего вредных выбросов. Однако водород также может быть направлен в топливный элемент для получения электроэнергии. Такими мы видим будущие электростанции. В некоторых случаях для нагрева мембранного реактора может быть использована энергия атомных электростанций.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Cavendish H. Three papers, containing experiments on factitious air. *Proceedings of the Royal Society of London, Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1766; 56: 141–184. / Three papers, containing experiments on factitious air. *The Scientific*

- Papers of the Honourable Henry Cavendish*. 77–101. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511722424.005>
2. Nicholson W., Carlisle A. V. Letter from Henry Moyes M. D. to Maxwell Garthshore M. D. containing an account of some interesting experiments in galvanic electricity. *The Philosophical Magazine*. 1800; 7(28), 347–350. <https://doi.org/10.1080/14786440008562594>
  3. Saint-Claire Deville H. Sur la phenomenes de dissociation. *Arch. Sci. Phys. Natur.* 1859;6: 266–275.
  4. Sainte-Claire Deville H. Recherches sur la decomposition. *Arch. Sci. Phys. Natur.* 1860;9: 51–68.
  5. Sainte-Claire Deville H. De la dissociation ou decomposition spontanee des corps sous l'influence de la chaleur. *Compt. Rend.* 1867;45: 857–861.
  6. Sainte-Claire Deville H. *Lecons sur la dissociation professees devant la Societe Chimique de Paris en 1864 et 1865*. Paris; 1866. p. 255–278.
  7. Graham T. LVIII. On the law of the diffusion of gases. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1833;2(11): 351–358. <https://doi.org/10.1080/14786443308648056>
  8. Girard J. *Principles of environmental chemistry*. Boston: Iones & Batrlett Publishers; 2005. 677 p.
  9. Yergin D. *The Quest. Energy, security, and the remarking of the modern world*. N.Y., London, Toronto, Sydney: Penguin Books; 2002. 832 p.
  10. Liebig J. *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*. Braunschweig, F. Vieweg; 1840. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.42117>
  11. Strube W. *Der historische Weg der Chemie Band 2*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie; 1976.
  12. Kesore K., Ringer N., Gebert S., Rice D. Iron catalyst stands the test of time. *Nitrogen+Syngas*. 2009;300.
  13. Delft van Y. V., Correia L. A., Overbeek J. P., ... Jansen D. *Hydrogen membrane reactor for industrial hydrogen*. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/265665851\\_Hydrogen\\_membrane\\_reactor\\_for\\_industrial\\_hydrogen\\_production\\_and\\_power\\_generation](https://www.researchgate.net/publication/265665851_Hydrogen_membrane_reactor_for_industrial_hydrogen_production_and_power_generation)
  14. Chorkendorf I., Niemantsverdriet J. W. *Concept of modern catalysis and kinetics*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2007. 457 p.
  15. Schmidt O., Gamphir A., Staffell I., Hawkes A., Nelson J., Few S. Future cost and performance of water electrolysis: An aspect elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(52), 30470–30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
  16. Shiva Kumar S., Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis - A review. *Material Science for Energy Technologies*. 2019;2(3): 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
  17. Шапошник В. А., Мазо А. А., Фрёлих П. Экологические аспекты глубокой очистки воды. *Успехи химии*. 1991;60(11): 2469–2483. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=wnrkwq>
  18. Stiles D. A., Wells P. H. The production of ultrapure hydrogen. *Platinum Metals Rev.* 1972; 16(4): 124–128. Режим доступа: <https://technology.matthey.com/documents/496120/626258/pmr-v16-i4-124-128.pdf/493ff7f4-d447-2b5b-52e2-800a3fa501bb?version=1.0&t=1656009920233>
  19. Eisenberg D., Kauzmann W. *The structure and properties of water*. Oxford New York, University Press; 1969. 300 p. / Eisenberg D., Kauzmann W. *The structure and properties of water*. 2005. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570264.001.0001>
  20. Maggio G., Nicita A., Squadrito G. How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A Review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44: 11371–11384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.121>
  21. Shaposhnik V. A. Ab initio calculation of catalytical atomization reaction of water molecules on the surface of palladium membrane. *Proceedings of the International Conference "Ion transport in organic and inorganic membranes"*. Sochi; 2015. p. 265–266.
  22. Lehn J.-M. *Supramolecular chemistry. Concepts and perspectives*. VCH: Weinheim, N.Y., Basel, Tokyo; 1995. 271 p.
  23. Szent-Györgyi A. *Oxidation, energy transfer and vitamin*. Режим доступа: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1937/szent-gyorgyi/lecture/>

#### Информация об авторе

Шапошник Владимир Алексеевич, д. х. н., профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация). e-mail: v.a.shaposhnik@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9555-4633>

Поступила в редакцию 16.06.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 16.10.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.