

гностическую составляющую, например, в отношении частоты аномальных атмосферных явлений.

При учете этих требований можно создать технику для решения региональных задач. Бессмысленно мониторить реки, дороги, если оборудование БЛА не приспособлено к работе в тумане или при наличии мелких осадков. Учитывая быструю изменчивость климата целых регионов стандарты должны быть построены на определенное время действия.

### Литература

1. Абрамович, А. А. Прогнозирование воздушных потоков: руководство по прогнозированию метеорологических условий / А. А. Абрамович. – Ленинград: Лен. типография, 1985. – С. 49–50.
2. Баранов, А. М. Авиационная метеорология и метеорологическое обеспечение полетов / А. М. Баранов, Г. П. Лещенко, Л. Ю. Белоусова. – Москва: Транспорт, 1993. – 567 с.
3. Карлин, Л. Н. Влияние ветра на боевое применение авиации / Л. Н. Карлин, В. И. Акселевич // Авиационная метеорология. – 2006. № 3. – С. 5–10.
4. Кирилин, А. Перспективы развития дирижаблестроения / А. Кирилин // Воздухоплаватель. – 1999. – №3 (17). – С. 32–37.

УДК 662.769.21

### Источники водорода для водородной энергетики

Кириленко А. И., Бурдин И. Л.  
Белорусская государственная академия авиации  
Минск, Республика Беларусь

*В работе рассмотрены основные и перспективные направления получения водорода. Рассматривается общая классификация этих направлений по степени воздействия на окружающую среду. Отмечаются современные тенденции по удешевлению производства. Среди них - совмещение функций технологий, когда наряду с водородом получают ценные побочные продукты, попытки попутного решения других экологических проблем и разработка процессов прямого превращения энергии солнечных квантов в химический продукт. Подчеркивается доступность сырьевой базы.*

С течением времени экологические проблемы, стоящие перед человечеством, только обостряются. На данном этапе первопричина видится в

использовании ископаемых горючих материалов, что способствует развитию эффекта глобального потепления и к тому же эти энергетические ресурсы (горючее) близки к истощению. Перевод городского транспорта на электротягу решает проблему локально, поскольку основная часть электроэнергии в мире производится из ископаемых топлив и только в отдельных странах доля альтернативных источников в этом производстве близка к половине. В этой ситуации внимание энергетиков и экологов привлекает водород, и прежде всего в транспортной отрасли. Производство водорода в мире хорошо налажено, прежде всего, для химической промышленности. Уже в 1980 г. в мире было произведено 30 млн. тонн водорода. Понятно, что перевод транспорта на водород многократно увеличивает эту цифру. Если исходить из того, что выбросы  $\text{CO}_2$  в 2022 г. от автотранспорта, водного и авиатранспорта составили 20,35 Гтонн, то производство водорода только на нужды транспорта надо увеличить не менее, чем в 100 раз. Откуда же черпать это экологически более чистое горючее? Еще один аспект проблемы состоит в том, что не любой водород нужен, а лишь тот, который получен с минимальным углеродным следом [1, с. 650]. Целью работы является рассмотрение возможных методов и источников получения водорода, с учётом его очистки, транспортировки и хранения (накопления). Актуальность вопроса состоит в том, что во всём мире развитие водородной энергетики – приоритетная задача в числе мероприятий по сокращению выбросов углерода. Концепция водородной энергетики зародилась в мире в середине 70-х гг. 20 века, а в 1974 г. была создана Международная ассоциация по водородной энергетике. Теперь более чем в 40 странах мира ведутся научно-исследовательские работы по водородной энергетике. Теперь многие государства разработали программы перехода к водородной экономике. В 2021г. программу развития водородной энергетики до 2050г. приняла Россия, в 2023г. – Беларусь.

С развитием производительных сил актуализируется проблема поиска более выгодных ресурсов. Ранее используемые методы их получения устаревали, демонстрируя неэффективность, некоторые же не находили практического применения в связи с недостаточным уровнем развития технологий. Так произошло и с водородом. Как источник энергии, то есть топливо, он просто не рассматривался. Экология заставила искать альтернативу и внимание переключилось на водород как энергоэффективный, экологичный и в общем-то широко распространенный ресурс. Остро стал вопрос источников водорода. Старые методы его получения, основанные на конверсии метана, не годились, поскольку оставляли большой углеродный след. Тем не менее, современные установки по производству водорода достаточно эффективны. Они обладают производительностью от 300 тыс.  $\text{м}^3$  до 3 млн.  $\text{м}^3$  водорода в сутки; для них характерны рабочие давления в

интервале 2–3 МПа. Чистота получаемого на них водорода достигает – 99,9995 % по объему [2]. С такими показателями трудно конкурировать.

Электролиз воды дает чистый водород, но электроэнергия вырабатывалась из углеводородных источников, что тоже оставляло глубокий углеродный след. В 21-ом веке внимание энергетиков переключилось на альтернативные источники, прежде всего на энергию ветра и солнца. Существенное усовершенствование ветрогенераторов и солнечных батарей, наряду с использованием геотермального тепла и энергии приливов, позволило резко нарастить производство альтернативной электроэнергии, образовались ее избытки и здесь опять обратились к водороду, но теперь рассматриваемому как аккумулятор энергии.

Водород можно получить различными способами, применяя преобразования разных видов энергии: электроэнергии, ядерной, солнечной, энергии ветра, геотермальной, гидроэнергии, термальной энергии океана, приливной, помимо химической энергии сжигания ископаемого топлива [1]. Не представляется возможным оценить дальнюю перспективность того или иного способа, поскольку большинство новых способов не вышло из стадии исследовательских или опытно-конструкторских работ. Например, еще совсем недавно никто не предполагал, что электролиз займет такое обширное место в получении водорода за счет использования энергии ветра и солнца.

Итак, приходится разделять способы получения водорода по степени их воздействия на окружающую среду. Предложена следующая классификация технологий (впрочем, она не является универсальной). Итак, выделяют следующие виды водорода: зеленый – водород, получаемый способом электролиза воды с использованием возобновляемой энергии (этот способ один из самых экологичных), бирюзовый – метод разложения метана на водород и твердый углерод пиролизом, желтый – получение с помощью электролиза, но с использованием энергии от АЭС, изумрудный – разложение биометана и природного газа методом термоплазменного электролиза, серый – водород, получаемый способом паровой конверсии метана, голубой – тот же серый, но с улавливанием углерода. Рассмотрим эти технологии детальнее.

Белый водород (природный, золотой, геологический) - естественным образом вырабатывается или присутствует в земной коре [3, с. 74]. Он есть, его не нужно производить, но нужно добывать, что тоже способствует косвенно выбросам углерода. Газообразный водород естественным образом образуется в земной коре в результате реакций вода - горная порода. Этот процесс включает взаимодействие между молекулами воды и богатыми железом минералами, такими как оливин, при высоких температурах и давлениях. При реакции воды с этими минералами по реакции

$3Fe+4H_2O\rightarrow Fe_3O_4+4H_2$  при  $T < 400 K$  выделяется газообразный водород, Этот водород проникает через земную кору и может накапливаться в подземных ловушках. Белый водород был впервые обнаружен в Мали в 1987 г. Всего обнаружено около 100 точек выхода водорода из недр. Вопрос лишь в том, можно ли рассматривать этот водород в качестве устойчивого источника энергии.

Зеленый водород является самым экологичным из производимых, т. к. получают его с помощью электролиза [3, с. 74]. Если электричество поступает от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), то выбросы  $CO_2$  отсутствуют.

Желтый (оранжевый) водород как и зеленый получают путем электролиза. Однако источником энергии являются атомные электростанции (АЭС). Выбросы  $CO_2$  отсутствуют, но метод не является абсолютно экологичным.

Серый водород [3, с. 74] производится путем паровой конверсии метана. В настоящее время это основная технология производства дает более 70% водорода, Исходным сырьем для такой реакции служит природный газ. Этот процесс легко осуществим с практической стороны, однако в ходе химической реакции выделяется углекислота, причем в тех же объемах, что и при сгорании природного газа (плюс также расходуется энергия на конверсию). Впрочем, этот метод представит интерес в том случае, если эффективно улавливать выделяющийся при реакции  $CO_2$  и закачивать его обратно в нефтегазоносный пласт для повышения нефтеотдачи.

Бирюзовый водород получают разложением метана на водород и твердый углерод путем пиролиза. Производство бирюзового водорода дает относительно низкий уровень выброса углерода, который может быть либо захоронен, либо использован в промышленности, например, в производстве стали или электробатарей. Таким образом, он не попадает в атмосферу.

Изумрудный водород получают разложением биометана и природного газа с помощью термоплазменного электролиза.

Голубой водород - это водород, полученный путем паровой конверсии метана, но при условии улавливания и хранения углерода, что дает сокращение выбросов углерода примерно в 2 раза. Однако такой метод получения водорода является весьма дорогостоящим.

Коричневый (бурый) водород. Для его получения в качестве исходного сырья используется бурый уголь. Далее с помощью газификации бурого угля образуется синтез-газ (сингаз): смесь углекислого газа ( $CO_2$ ), окиси углерода (CO), водорода, метана и этилена, а также небольшое количество других газов. Первые два из этих газов бесполезны в производстве элек-

троэнергии. Это делает процесс очень неэкологичным по сравнению с другими методами.

Как отмечалось, предложенная классификация не является общепринятой. По мнению иных специалистов, при электролизе с использованием электроэнергии от атомной электростанции также получается зеленый водород. Другие выделяют его в отдельную категорию как розовый водород или фиолетовый водород. Водород, полученный путем электролиза с использованием электроэнергии из сети, часто называют желтым водородом. Также часто происходит разделение голубого водорода на бирюзовый водород. Разница здесь заключается в том, что вместо паровой конверсии проводится пиролиз метана. В качестве побочного продукта выделяется твердый углерод, который считается ценным сырьем. Некоторые классификации дополнительно разделяют серый водород на бурый водород и черный водород в зависимости от типа используемого угля. Кроме того, в литературе по рассматриваемому вопросу встречаются белый, аква и другие виды водорода.

В настоящее время большое внимание уделяется получению синтез-газа и выделению из нее водорода. В качестве сырья рассматриваются несортированный мусор, обработанный паром с температурой 2 000 °С без доступа кислорода при обычном давлении. Методом паровой термической конверсии кроме синтез-газа получают углеродную крошку, которая используется как дорожное покрытие, а также в качестве фильтра в системах дополнительной очистки. Перспективен также плазменный пиролиз метана, при котором на выходе исключается углекислый газ, а получается только водород и сажа – ценнейшее сырье. В этом несомненное преимущество метода перед паровым реформингом метана. Как видим, для удешевления производства водорода стремятся из бросового сырья получить еще какие-либо ценные продукты.

Представляют интерес и биологические методы. Известно, что некоторые одноклеточные зеленые водоросли и некоторые бактерии продуцируют водород. Удалось заставить их работать совместно и это увеличило производство водорода на 60 %.. Есть надежда, что методами генной инженерии можно добиться более высоких результатов, используя фотосинтез микроскопических водорослей. Получаемый таким методом водород должен относиться к категории белого. Единственным просматриваемым на сегодня экологическим недостатком этого метода является необходимость занимать большие площади под пруды-реакторы.

Определенные надежды связывают с так называемыми квантовыми (наноразмерными) точками. Одно из развивающихся направлений использования их – фотокаталитическое разложение воды с образованием газообразного водорода. Энергия фотонов направляется непосредственно на

химические реакции – аналоги искусственного фотосинтеза. Пока эффективность процесса на уровне 1 %. Экономический интерес он будет представлять при КПД 10 %.

Трудно предвидеть, но возможно в будущем представит интерес процесс радиолиза воды. Уже используется гидролиз воды для получения водорода в богатой электроэнергией Исландии. Избыток электроэнергии получается за счет использования геотермальной и гидроэнергии

Как видим, стремление получить водород экологически чистыми методами приводит к его удорожанию. При этом четко прослеживаются определенные тенденции. Во-первых, пытаются совместить функции технологий – наряду с получением водорода получить другие ценные продукты, например, сажу. Во-вторых, пытаются решить еще другие экологические проблемы, например, избавиться от мусора. Налицо также тенденция освоить процессы типа фотосинтеза. Сырья для получения водорода достаточно. Особое внимание следует обратить на переработку отходов. Например, из алюминиевой пищевой фольги легко получить водород  $2NaOH + 2H_2O + 2Al = 2NaAlO_2 + 3H_2$ . В этой реакции выделяется много тепла и образующийся алюминат натрия является ценным сырьем. Дело за сортировкой мусора.

### Литература

1. Materials for Hydrogen Production, Conversion, and Storage / F. Petermann [et al.]. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. – 746 p.

2. Солодова, Н. Л. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода / Н. Л. Солодова, Р. Р. Минигулов, Е. А. Емельяничева // Вестн. Каз. технол. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 137–140.

3. Романов, А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода / А. С. Романов // Науч. зап. молодых исследователей. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 73–80.

УДК 004.942

### Компьютерное моделирование лазерной сварки

Афанасьев С. А., Кондратьева Н. А., Кухновец Д. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Компьютерное моделирование лазерной сварки является актуальной и перспективной задачей в современной промышленности. Был исследован*