

СОЛНЦЕ В ЗЕЛЕННОЙ ЯЧЕЙКЕ

В рамках «Российской энергетической недели» в Москве, ассоциация «Глобальная энергия» провела коллоквиум, на котором лауреаты премии 2021 рассказали о своих разработках. Среди них был Сулейман Аллахвердиев, ставший лауреатом в номинации «Нетрадиционная энергетика» за достижения в проектировании систем искусственного фотосинтеза: «Уголь, нефть и газ – продукты фотосинтеза. Наша с коллегами задача – моделировать и осуществлять фотосинтез в искусственных условиях более оптимально, нежели это происходит в природе», – пояснил свою исследовательскую задачу Аллахвердиев. По его мнению, эта технология выйдет за рамки лабораторных экспериментов через один-два десятка лет.

Точка зрения



Потребление электроэнергии в будущем будет не просто расти пропорционально увеличению численности населения. Оно будет видоизменяться в зависимости от внедрения на рынках новых видов энергоресурсов, таких как водород, малая атомная энергетика, перовскитовые солнечные панели и так далее. Однако, эти источники требуют дополнительных ресурсов полезных ископаемых и развитие

энергозатратного производства. В будущем, может появиться принципиально иной источник энергии, полученный на основе искусственного фотосинтеза. Искусственный фотосинтез является природоподобной технологией, что обеспечивает ее климатическую нейтральность и органическую эффективность. Сейчас процессы искусственного фотосинтеза обрабатываются во многих научно-технических лабо-

раториях мира. В России это направление развивает д.б.н, заведующий лабораторией управления фотобиосинтеза Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, лауреат премии «Глобальная энергия» Сулейман Аллахвердиев. В интервью «Глобальной энергии» ученый рассказал об основных направлениях работы по созданию эффективных процессов искусственного фотосинтеза.

– Можно ли сказать, что искусственный фотосинтез это реальность сегодняшнего дня, эти процессы уже хорошо изучены и понятны, и уже существуют технологии его практического применения в энергетике?

– К сожалению, в настоящий момент устройству искусственного фотосинтеза (ИФ), доведенных до состояния возможности их практического промышленного применения и приближенных к максимальной степени эффективности, которой характеризуется природный фотосинтез, не существует. Но с другой стороны, если говорить, обобщенно о моделировании отдельных реакций природного фотосинтеза (например, электролиза воды) или суммарного его результата, то есть создание органических веществ из воды и двуокиси углерода за счет внешней энергии (например, фотоиндуцированный синтез муравьиной кислоты из работы проф. Беркли Пэйдун Ян), то уже можно говорить о практическом применении или, с определенной степенью вероятности, о близком к промышленному воплощению состоянии после некоторых доработок.

На сегодняшний день в области альтернативной энергетики существуют определенные проблемы, препятствующие выходу систем искусственного фотосинтеза на мировой энергетический рынок. Несмотря на это, в России и за рубежом в последние годы достигнуты существенные успехи в этом направлении, что позволяет считать искусственный фотосинтез реальностью ближайшего будущего.

Солнечный свет используется в производстве биотоплива из биомассы, водорода в процессе жизнедеятельности микроводорослей и биотоплива с помощью фотокатализа, выполняемого искусственными устройствами. Каждый из этих способов обладает своими преимуществами и недостатками. Топливом будущего признан молекулярный водород, поскольку он представляет собой не содержащее углерода химическое соединение, обогащен-

ное энергией. Фотоводород можно получить в результате жизнедеятельности микроорганизмов или за счет фотокатализа. Наиболее привлекательными объектами для исследований и разработок в области солнечной энергии являются недорогие, стабильные, эффективные, экологичные, искусственные или полу-искусственные системы, основанные на естественном фотосинтезе, для производства водорода из воды. Для успешного развития этих методов и преодоления существующих недостатков потребуются дальнейшие исследования во всех перечисленных секторах.

– Какие методы и технологии искусственного фотосинтеза существуют на данный момент?

– Для начала попробуем определить с понятиями. Что можно обозначить как искусственный фотосинтез? Формально, системой ИФ можно считать фототроф, с направленным изменением, произведенным человеком, любой из его природных реакций фотосинтеза с целью получения дополнительных, не имевшихся до этого преимуществ. С другой стороны в качестве системы ИФ может выступать природоподобная система, полностью собранная из синтетических (не биологических) компонентов и отражающая суммарный общий результат природного фотосинтеза или отдельных его реакций, т.е. имитирующая естественные процессы.

В настоящее время ведутся многочисленные разработки систем ИФ во всех выше указанных направлениях, но здесь мы обсудим только системы ИФ для преобразования солнечной энергии в виде энергии, удобные для длительного хранения и применения в промышленности (т.е. в электричество и молекулярный водород). Следует отметить, что большая часть существующих методов и технологий ИФ находится на стадии лабораторных разработок или небольших экспериментальных промышленных установок.

Поскольку сразу создать систему искусственного фотосинтеза, полностью имитирующую природный фотосинтез, сложно, практичнее решать эту задачу поэтапно, создавая устройства ИФ, моделирующие лишь отдельные частные реакции природного фотосинтеза, но уже применимые для промышленного использования и дающие экономически и социально значимые результаты на каждом конкретном этапе.

ЦИТАТА

Большая часть существующих методов и технологий ИФ находится на стадии лабораторных разработок или небольших экспериментальных промышленных установок.



АЛЛАХВЕРДИЕВ Сулейман Ифхан-оглы

– д.б.н., заведующий лабораторией управляемого фотосинтеза, Институт физиологии растений Российской академии наук; профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, кафедра физиологии растений. В соответствии с рейтингом 2016 года агентства Thomson Reuters Аллаhverдиев С.И. признан самым высокоцитируемым ученым в России в номинации “Биология”. Член редколлегии 15 международных журналов, автор более 400 научных работ, в том числе 9 монографий и 6 патентов.

– Какие реакции природного фотосинтеза уже сейчас можно успешно использовать или уже используются в системах ИФ?

– Солнечные ячейки (СЯ) на основе компонентов фотосинтетического аппарата. Обоснованно предполагается, что такие СЯ будут обладать существенными преимуществами по сравнению с используемыми в настоящее время СЯ на основе кремния. Их разработка в настоящее время находится на стадии лабораторных исследований. Дешевое и экологичное электричество, получаемое при эксплуатации таких СЯ, может напрямую использоваться для хозяйственных нужд или для электрохимического окисления воды и последующего восстановления до молекулярного водорода. В качестве побочного продукта в этой реакции выделяется кислород, экологически безопасный продукт, причем крайне необходимый для существования всего живого на планете. При этом такой способ получения молекулярного финансово намного дешевле других существующих методов (например, путем электролиза воды). На первом этапе промышленная генерация молекулярного водорода уже сейчас могла бы осуществляться упрощенной системой ИФ, в которой источник высокоэнергетичных электронов внешний. На следующем этапе в аналогичной системе ИФ будет использоваться источник высокоэнергетичных электронов от СЯ на основе компонентов фотосинтетического аппарата (ФА). Здесь основными проблемами станут фиксация пигментно-белковых комплексов на неорганическом субстрате и низкая абсорбция сечения монослоя фотосистем. Зафиксировать пигментно-белковые комплексы можно либо за счет физической адсорбции без специальных нанопроводов, либо путем воссоздания нативной фотосистемы. Проблему низкой абсорбции сечения монослоя фотосистем можно решить с помощью наноструктурированного электрода или использовать многослойные комплексы фотосистемы 2, полученные путем сшивания органически функционализированными амфифильными наночастицами платины.

– В чем преимущество получения водорода на основе бактерий и искусственного фотосинтеза перед традиционными методами получения водорода?

– Стремительное развитие экономики и рост численности населения на планете особенно в последние годы требует

значительного увеличения производства энергии. Предполагается, что численность населения планеты будет увеличиваться на 0.9% ежегодно и достигнет по самым оптимистичным прогнозам более, чем 8 млрд человек, а реально около 9.5–10 млрд в 2040–2050 гг. Увеличение численности населения планеты, несомненно, повлечет за собой все возрастающий спрос на продукты питания, топливо, энергию необходимую для их производства. Уже в 2040 году, спрос на энергию увеличится более чем на 30% по сравнению с текущим уровнем.

В настоящее время основным источником энергии служат традиционные виды топлива (каменный уголь, нефть, природный газ, сланцы, древесина и т.д.). Энергия, получаемая из традиционного топлива (нефть, природный газ, каменный уголь) на 2017 год составляла около 80 % всей энергии, добываемой в мире. На долю ядерного топлива приходилось 2.2 %, а вклад возобновляемых источников энергии не превышал 7 % (Рис. 1).

Существенным недостатком всех видов ископаемого топлива является их ограниченное количество на планете. При текущем уровне потребления нефти осталось на 50–60 лет, а природного газа – на 40–55 лет. Более достоверные оценки свидетельствуют о том, что его запасы каменного угля полностью истощатся через 150–175 лет. Другим, не менее значимым для выживания человечества недостатком получения энергии из традиционных видов топлива, является негативное воздействие его использования на окружающую среду. Сжигание углеводородного топлива сопровождается значительным увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере планеты; вредными выбросами в атмосферу Земли, связанными не только с эмиссией двуоксида углерода, но и других парниковых газов; глобальным потеплением; подкислением океана; и в конечном итоге существенным изменением климата.

Раньше крайне перспективной представлялась атомная энергия, но после произошедших катастроф на атомных электростанциях данный вид энергии стал напрямую ассоциироваться с экологической катастрофой, тем более, что до сих пор не созданы эффективные технологии переработки и захоронения радиоактивных веществ.

Современные промышленные предприятия энергетики ежегодно выбрасыва-

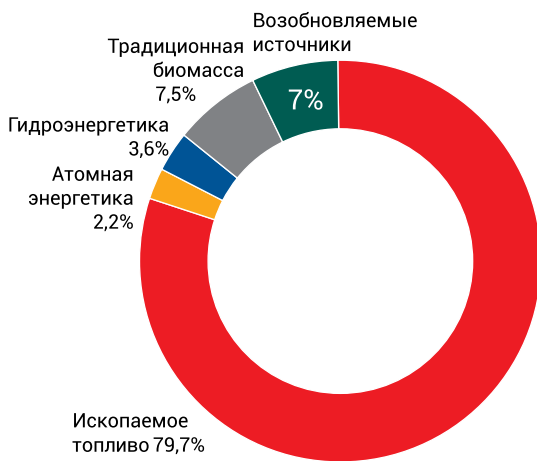


Рис. 1. Расчетная доля возобновляемых источников энергии в общем объеме конечного потребления энергии.

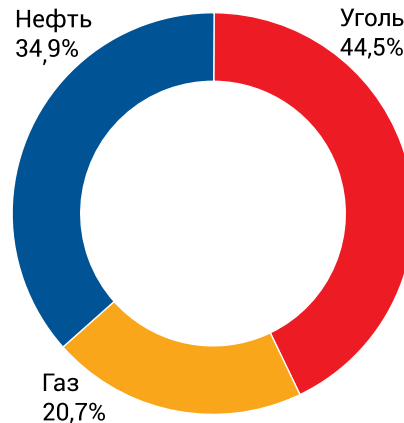


Рис. 2. Вклад в загрязнение окружающей среды от потребления различных видов ископаемого топлива.

ют на поверхность Земли около 1 млрд. тонн отходов. Неравномерное распределение энергетических ресурсов приводит к политической напряженности. В настоящее время продолжает увеличиваться количество крупных промышленных производств, и гигантских энерго-станций, использующих традиционные виды топлива в качестве источника энергии, растет число газо- и нефтепроводов, протяженность которых лишь в европейской части России превысила уже 300 тыс. км. Для каждой нитки нефтепровода необходимо выделять существенные территории для так называемых охранных зон, а также земельные участки, предназначенные для размещения наземных объектов системы нефтепроводов, нарушая биологическое равновесие природных комплексов (биогеоценозов). Если говорить о негативном воздействии на окружающую среду потребляемого ископаемого топлива, то вклад нефти в нарушение экологии составляет –34,9 %, угля – 44,5 % и газа – 20,7 % (Рис. 2). Из-за этого ежегодные потери в мире связанные с затратами на экологию составляют 7,5–8 триллионов долларов.

Таким образом, ограничения в запасах основного источника энергии, ископаемых видов топлива (которые, к сожалению, не возобновляемы), все возрастающие мировые потребности в энергии и климатические изменения на планете чрезвычайно повысили актуальность поиска альтернативных экологически чистых и возобновляемых источников энергии.

Кроме традиционной энергетики в мире развиваются альтернативные экологически чистые источники энергии. На-

ибольший интерес для нас представляет солнечная энергетика. Помимо солнечной существуют и другие виды альтернативной энергетики такие как: ядерная энергетика; термоядерная энергетика; ветряная энергетика; геотермальная; водородная энергетика и ряд других. Однако ветряная энергетика имеет определенные недостатки: шум, относительно большая занимаемая площадь, нестабильность работы. Недостатком интенсивно развивающейся на Сахалине и Курилах геотермальной энергетики является отсутствие парогидротермальных месторождений в других регионах планеты. Также интенсивно развивается производство биодизеля, который получают из масел, используя метанол или этанол. Для производства биоэтанола используют сахарный тростник, сахарную свеклу, кукурузу и т.д. Биоэтанол, который не повышает содержание двуоксида углерода в атмосфере при сжигании, может быть использован для замены газа.

Перечисленные виды альтернативной энергетики имеют ряд недостатков, в частности: нет стабильного источника энергии (солнечная энергия, ветер, приливы); удаленность от центров потребления; проблемы с доставкой и запасанием энергии (все, кроме ядерной). В связи с этим становится очевидным, что требуется какое-либо синтетическое топливо-посредник между альтернативными источниками энергии и их конечными потребителями.

Всех этих недостатков лишена водородная энергетика. Она обладает целым рядом преимуществ. Молекулярный водород (МВ) – самое экологически чистое

ЦИТАТА

Виды альтернативной энергетики имеют ряд недостатков, в частности: нет стабильного источника энергии (солнечная энергия, ветер, приливы); удаленность от центров потребления; проблемы с доставкой и запасанием энергии-мощностей промышленных установок.



топливо. Он не загрязняет окружающую среду, и это позволяет экономить до 7.5–8 триллиона долларов в год, которые планета ежегодно тратит на восстановление поврежденной экологии. MB – наиболее эффективное, энергоемкое и удобное топливо из всех видов топлива для крупномасштабной транспортировки энергии на большие расстояния и ее сохранения. При его сжигании образуется вода и не образуется разрушающих озоновый слой химических веществ и парниковых газов.

Из перечисленных выше альтернативных источников энергии наиболее перспективной представляется солнечная энергетика, поскольку энергия Солнца неисчерпаема. **Энергия солнечного света, падающая на нашу планету за 1 час, эквивалентна всей энергии, которую использует человечество за один год.** Для преобразования энергии солнечного излучения в энергию электричества используются гелиоконцентраторы, фотоэлементы на основе полупроводников (кремний, кадмий и пр.), фотоэлементы на основе органических полимеров, тонко-пленочные фотоэлементы. В настоящее время интенсивно развивается разработка СЯ на основе органических хромофоров (би-

ологические пигменты и пигмент/белковые комплексы).

Полупроводниковые фотоэлементы обладают на данный момент наибольшей эффективностью. В тоже время такие фотоэлементы обладают рядом недостатков, основными из которых являются их высокая стоимость и проблема утилизации вредных компонентов (кадмия). Наша научная работа сфокусирована на солнечной энергетике и целью нашей работы является создание солнечной ячейки на основе компонентов ФА. При этом важно повысить эффективность генерации фототока и стабильность работы такой ячейки. Для повышения эффективности работы мы используем различные искусственные соединения – биомиметики, заменяющие естественные компоненты ФА.

Очевидно, что энергию солнечного излучения можно использовать либо путем прямой конверсии солнечной энергии в электрическую энергию; либо для генерации молекулярного фотоводорода из воды. В зависимости от стоящей задачи могут быть созданы солнечные ячейки, которые или преобразуют энергию солнечного излучения в электроэнергию, или генерируют молекулярный водород. В настоящее время лабораторные солнечные

ЦИТАТА

Молекулярный водород – самое экологически чистое топливо. Он не загрязняет окружающую среду, и это позволяет экономить до 7.5–8 трлн дол. в год, которые планета ежегодно тратит на восстановление поврежденной экологии.

ячейки имеют эффективность около 40 %, тогда как эффективность промышленных солнечных ячеек на основе кремния составляет около 20 %. Очевидно, что для создания эффективных солнечных ячеек необходимо решить по крайней мере три задачи: детально выяснить механизмы преобразования энергии в природном фотосинтезе; разработать новый дизайн СЯ; синтезировать эффективные катализаторы для окисления воды и восстановления протона до водорода.

Использование биологических систем для преобразования солнечной энергии имеет целый ряд преимуществ. Квантовый выход первичных реакций разделения заряда в ходе фотосинтеза близок к 100%. Отдельные компоненты фотосинтетического аппарата крайне перспективны для их использования в составе солнечных ячеек. В тоже время все еще существуют проблемы, которые необходимо решить для использования компонентов ФА в солнечных ячейках на их основе: иммобилизация комплексов ФА на матрице, стабилизация системы и повышение эффективности. Эти задачи успешно решаются в нашей лаборатории.

Основываясь на современных научных данных, можно предложить обобщенную схему биомиметической системы (Рис. 3), которая имитирует работу ФС2 в процессе окисления воды, и способна к фотывыделению водорода. Основными компонентами такой ячейки являются: Светособиравший комплекс (Антенна); Фотосенсибилизатор (P); система разделения заряда – первичные донор и акцептор (D, A); Окислитель (Cat_{ox}), катализатор, расщепляющий воду на кислород и протоны; Восстановитель, катализатор, восстанавливающий протоны до водорода (Cat_{red}).

Хочу отметить, что и в России, и за рубежом в последние годы достигнуты существенные успехи в разработке искусственных фотосистем. Не только я, но и многие ученые во всем мире, верим, что фантастические идеи классика приключенческой литературы Жюль Верна, сказанные полтора столетия назад, являются пророческими и будут воплощены в жизнь: «...воду когда-нибудь будут употреблять как топливо, что водород и кислород, которые входят в ее состав, будут использованы вместе или поодиночке и явятся неисчерпаемым источником света и тепла, значительно более интенсивным, чем уголь».

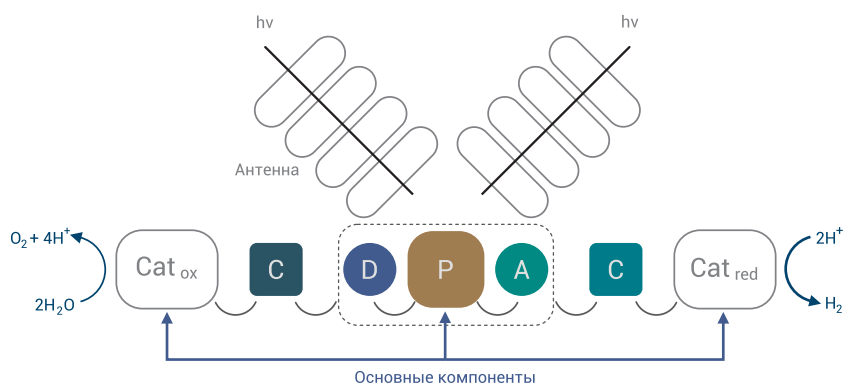


Рис. 3. Схематическое изображение системы искусственного фотосинтеза для производства водорода. P – фотосенсибилизатор; A – акцептор электронов; D – донор электронов; C – переносчик электронов; Cat_{ox} – катализатор окисления воды; Cat_{red} – катализатор восстановления H⁺.

– Возможно ли в России создание производства водорода на основе искусственного фотосинтеза? Проявляет ли бизнес интерес к этому производству?

Научное будущее России в области производства водорода на основе искусственного фотосинтеза, как и во всем мире, заключается в разработке систем ИФ, использующих солнечный свет, воду и эффективные катализаторы для получения дешевого, экологически чистого и энергоемкого топлива будущего, молекулярного водорода. Решение этих научных задач позволит выйти Российской науке в области альтернативной энергетики на конкурентоспособный уровень на мировой научной арене. Однако без существенной финансовой поддержки государства это весьма проблематично сделать, поскольку уже на этапе создания лабораторных систем ИФ ученые сталкиваются с большими трудностями, обусловленными отсутствием должного количества средств, необходимых для приобретения расходных материалов, реактивов.

К сожалению, большинство производств сейчас далеки от науки и скептически относятся к разработкам, направленным на более длительную перспективу. К тому же перестройка производств под нужды науки также требует финансовых затрат, а далеко не все представители бизнеса готовы пойти на такой риск. В этом и заключается одна из главных трудностей промышленного внедрения передовых технологий в области альтернативной энергетики.

Материал подготовлен Ассоциацией
«Глобальная энергия»
www.globalenergyprize.org