

УДК 504

Д.А. ФИЛИППОВА, студентка гр. Х-200008 (УрФУ)  
г. Екатеринбург

## ВОДОРΟΣЛИ КАК ИСТОЧНИК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ВОДОРОДА

Водород — перспективный энергоноситель будущего, являющийся экологически чистой альтернативой ископаемым видам топлива. Тем не менее, следует отметить, что он может быть получен из широкого спектра сырья. Как следствие, именно метод производства водорода определяет потенциальные опасные выбросы, к которым будет приводить его генерация. Цель производства водорода в «зелёной» форме состоит в том, чтобы снизить или нивелировать какое-либо пагубное влияние его производства на окружающую среду. Для этого при извлечении водорода из природных топлив необходимо удалить весь  $\text{CO}_2$  и другие вредные для экологической обстановки примеси. Осложняет получение водорода его взрывоопасность [1].

В настоящее время почти все методы получения водорода (конверсия метана, конверсия углеводородов, газификация угля, крекинг, риформинг) связаны с высоким выбросом  $\text{CO}_2$ , что влечет за собой загрязнение атмосферы и усиление парникового эффекта. Те способы, которые удовлетворяют критериям экологической безопасности, являются весьма финансово затратными [2]. В связи с этим перед учеными встает проблема получения водорода без губительного влияния на окружающую среду — и к тому же с минимальными денежными затратами.

За последние годы было исследовано множество альтернативных источников для получения водорода. Одним из таких ресурсов являются сине-зелёные водоросли, различные виды которых вполне можно приспособить для производства водорода в ходе процесса фотосинтеза. Напомним, что в современной физиологии растений под фотосинтезом понимается фотоавтотрофная функция — совокупность процессов поглощения, превращения и использования энергии квантов света в различных реакциях. В их числе — превращения углекислого газа в органические вещества при участии хлорофилла.

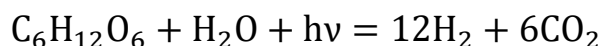
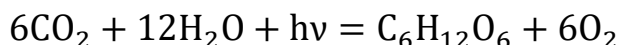
Среди механизмов образования водорода можно выделить следующие процессы:

- биофотоллиз воды зелёными микроводорослями (прямой) и цианобактериями (непрямой);
- фоторазложение органических веществ фотосинтезирующими бактериями;

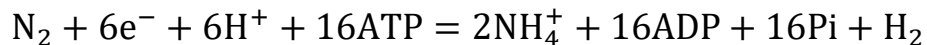
- темновая ферментация органических веществ анаэробными бактериями (брожение);
- гибридные системы, в которых используются фотосинтетические и анаэробные бактерии [3].

Прямой биофотолиз воды предстаёт очень привлекательным процессом для получения водорода. Зелёные водоросли и цианобактерии сине-зеленых водорослей могут выделять молекулярный водород в фотосинтетических реакциях, используя такие практически неистощимые и возобновляемые природные ресурсы, как вода (в качестве источника электронов) и солнечный свет (в качестве источника энергии) [3].

Непрямой биофотолиз представляет собой совокупность двух реакций, осуществляемых цианобактериями, у которых водород выделяется за счёт наличия гидрогеназы и нитрогеназы [3].



В этом процессе стадии выделения кислорода и водорода разделены в пространстве и во времени. На первом этапе углекислый газ в процессе фотосинтеза трансформируется в углеводы. Второй этап является сочетанием темнового брожения и фотоферментации. При темновом брожении происходит превращение углеводов в уксусную кислоту и диоксид углерода, что происходит в анаэробных условиях и в темноте. Далее уксусная кислота полностью разлагается на водород и углекислый газ в анаэробных условиях посредством фотоброжения. Нитрогеназа катализирует реакцию ассимиляции молекулярного азота из воздуха; азот восстанавливается до аммиачной формы — и при этом образуется водород [3].



Нитрогеназа также является ферментом, чувствительным к кислороду. У цианобактерий она преимущественно локализована в специализированных клетках гетероцистах, не имеющих ФС II; эта особенность делает их неспособными к выделению кислорода. Благодаря толстой оболочке гетероцистов, не пропускающей кислород, нитрогеназа не подвергается ингибированию им. Таким образом, цианобактерии — единственные организмы, которые могут выделять водород в воздушной атмосфере в присутствии кислорода. Скорость образования ими водорода в несколько раз выше, чем у зелёных микро-

водорослей, и составляет 10–40 мл/л·ч. К тому же они характеризуются минимальными требованиями к субстрату [3].

Учитывая вышеописанную информацию, можно собрать установку, которая будет использоваться для выделения водорода на промышленных предприятиях. Изобретение позволяет увеличить количество выделяемого водородом водорода и продолжительность этого процесса. Однако необходимо подобрать питательную среду, которая индуцирует непрерывное выделение водорода сине-зелеными водорослями в фотобиореакторе.

Получение водорода в биореакторе из водорослей, иммобилизованных на гидрофобных полых волокнах, возможно после замены воздуха в питательной среде (состоящей из воды, минеральных солей (среда Чу №10) и воздуха) на атмосферу инертного газа аргона. Этот процесс можно совершить путем продувания под давлением 500 торр, т.к. содержание в питательной среде воздуха (и, соответственно, его составных частей — молекулярного азота, углекислого газа и кислорода) ниже, чем в окружающей среде. В ходе исследований клетки сине-зеленых водорослей помещались в атмосферу аргона для того, чтобы удалить молекулярный азот из питательной среды. В атмосфере этой среды присутствует катализатор-фермент нитрогеназа, ответственный за выделение водорода и фиксацию молекулярного азота; однако в данных условиях он катализирует только выделение водорода. Количество выделяемого водорода зависит от давления воздуха в фотобиореакторе, а понижение давления ведет к повышению скорости выделения водорода. В результате водород отделялся от питательной среды/воды путем самопроизвольной диффузии [4].

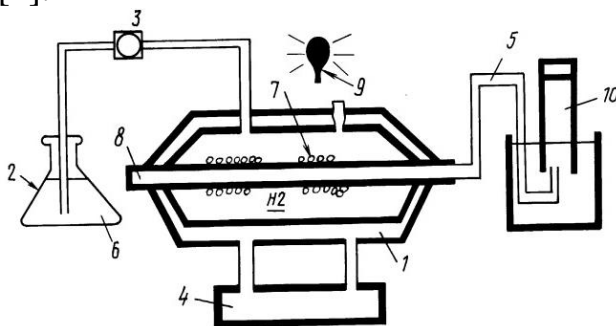


Рис.1. Схематичный эскиз фотобиореактора

В состав типового биореактора (см. рис. 1) входят следующие составные части: термостатируемая стеклянная колонка с полыми волокнами, соединенными вместе так, что внутреннее пространство волокон имеет общий выход (обозначена номером 1), емкость для питательной среды (2), насос для подачи питательной среды (3), термостат (4), соединительные шланги (5). Водоросли располагаются на полых волокнах (8) внутри биореактора, который

заполняется питательной средой, состоящей из воды, минеральных солей, катализатора и газа (в качестве него используют воздух под давлением 500 торр). После заполнения биореактора из питательной среды, впитавшей выделенный водорослями водород, отделяют последний — это производится нагреванием до температуры не более 80–90°C [4].

Получение водорода в фотобиореакторе осуществляется нижеописанным образом.

- 1) Предварительно готовится питательная среда Чу из минеральных солей и воды;
- 2) Питательную среду в биореакторе эвакуируют с помощью вакуумного насоса под давлением 500 торр (для лучшей эвакуации среда предварительно нагревается до 50°C);
- 3) В фотобиореактор вносят суспензию водорослей (на рис. 1 обозначена номером 7), которые иммобилизируются на внешней поверхности полых волокон (8);
- 4) С помощью насоса (3) в биореактор перекачивается питательная среда (6);
- 5) При освещении (9) в условиях сниженного содержания воздуха/молекулярного азота в питательной среде водоросли выделяют водород. Присутствие в среде молекулярного азота и углекислого газа позволяет водорослям расти и осуществлять свою жизнедеятельность, а также продолжительное время выделять водород;
- 6) Непрерывно выделяющийся водорослями газ, растворяясь в питательной среде, просачивается вместе с ней во внутреннюю часть полых волокон — и далее через шланг (5) в газожидкостный сепаратор (10);
- 7) В сепараторе, под нагреванием до 90°C, водород отделяется от питательной среды [4].

Выделение водорода в фотобиореакторе в условиях сниженного количества воздуха продолжается непрерывно, в течение 5–6 месяцев, со скоростью до 2 мл  $H_2$  на 1 мг сухого веса биомассы водорослей в час, что составляет приблизительно 40 кг  $H_2$  на га в час. Фотобиореактор полностью герметичен, что позволяет вести процесс с альгологически и бактериально чистой культурой [4]. Кроме этого, производство водорода в фотобиореакторе может размещаться на землях, непригодных для традиционного земледелия [4].

Таким образом, проведенные в последнее время исследования доказали, что микроводоросли — достойный кандидат для производства биотоплива. Им не требуются чистая вода и плодородная почва, но при этом они могут внести значительный вклад в уменьшение  $CO_2$  в атмосфере. Однако, к сожалению, внедрение в промышленном масштабе получения биоводорода буксует в свя-

зи с недостаточными данными исследований. В зависимости от ряда факторов (вида водоросли, условий, питательной среды) объем выделяемого водорода может значительно меняться, вследствие чего требуются дополнительные исследования в данном направлении. Ограничивающим фактором также является низкая заинтересованность предприятий в новых способах добычи водорода: привычные методы извлечения биотоплива внушают производителям гораздо большее доверие, нежели новые разработки ученых.

#### Список литературы:

1. Жакупов, М. А. Исследование методов получения водорода в соответствии с принципами «зелёной химии» / М. А. Жакупов, В. О. Лоджанская, И. А. Локисов, А. А. Поддубный. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 20 (154). — С. 118–123.
2. Савитенко, М. А. Водородные технологические решения / Рыбаков, Б. А. Вопросы экологии. — Текст: непосредственный // Аналитика обзоры. — 2021. — С. 10–16.
3. Цыганков, А. А. Получение водорода [Текст] / А. А. Цыганков // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева. — 2006. — Т. 50. — №. 6. — С. 26–33.
4. Марков, С. А. Использование водорослей для получения биотоплива и удаления избытка углекислого газа из атмосферы [Текст] / С. А. Марков //Альтернативная энергетика и экология. — 2009. — №. 2 (70). — С. 83–90.