

УДК 620.92

© О. А. Никифоров, аспирант

© С. А. Воробьев, канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nikiforov.nauro@gmail.com, svorobev@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-110-115

© О. А. Nikiforov, post-graduate student

© S. A. Vorobyov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: nikiforov.nauro@gmail.com, svorobev@list.ru

СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ АММИАКА НА БОРТУ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

THE SYSTEM OF HYDROGEN PRODUCTION FROM AMMONIA ON BOARD A TRANSPORT VEHICLE

Рассматривается система для получения водорода из аммиака, хранящегося на борту дизельного грузового автомобиля, и дальнейшего его использования в качестве присадки к основному топливу. Предложена конструкция устройства для получения водорода с использованием технологий низкотемпературной плазмы и водородопроницаемых мембран. Представлена структурная схема системы управления, а также ее принципиальная электрическая схема.

Ключевые слова: аммиак, водород, плазма, дизель.

The article considers the system of hydrogen production from ammonia stored on board a diesel truck, and its further use as an additive to the main fuel. A design of a device for producing hydrogen using low-temperature plasma technologies and hydrogen-permeable membranes is proposed. The authors present a block diagram of the control system, as well as its circuit diagram.

Keywords: ammonia, hydrogen, plasma, diesel.

Введение

Дизельные двигатели являются основными силовыми установками для тяжелой транспортной техники, сельскохозяйственных и дорожно-строительных машин. Повышение их эксплуатационных, экономических характеристик, а также экологической безопасности по-прежнему является актуальной задачей для общества. Автомобиль является одним из основных потребителей углеводородных видов топлива, а также источником выбросов в окружающую среду. На сегодняшний день в сфере автомобилестроения представлен широкий спектр технологий, в том числе касающихся тяговых энергоустановок. Применение альтернативных видов топлив, электрической энергии, различных дополнительных систем обусловлено целью снижения токсичности отработавших га-

зов, улучшения топливной экономичности (преимущественно по отношению к углеводородным топливам).

Анализ проведенных научных исследований показывает, что достигнуты значительные результаты в области применения таких топлив, как природный газ (КПГ, СПГ), нефтяной газ (СНГ), биотопливо, водород и др. Применению водорода в двигателях внутреннего сгорания посвящено значительное количество исследований [1–5]. Использование данного газа в качестве присадки к основному топливу приводит к улучшению полноты сгорания топлива, что в свою очередь позволяет снизить расход, а также улучшить экологические характеристики транспортного средства [6, 7]. Однако несмотря на стремительное развитие технологий, существует ряд недостатков водородного то-

плива. В значительной степени они связаны с хранением, транспортировкой чистого водорода и вопросами безопасности в процессе эксплуатации.

В связи с этим предложено изучить возможность хранения водорода в виде других связанных химических соединений, молекулы которых содержат в своем составе атомы водорода. В качестве такого носителя был выбран аммиак (NH_3), поскольку он обладает рядом достоинств:

- 1) высокое процентное содержание водорода;
- 2) легкость транспортировки и хранения;
- 3) широкое применение и развитость инфраструктуры по производству и применению аммиака;
- 4) низкая пожаро- и взрывоопасность.

Однако для его применения на автомобиле требуется разработка специализированной системы, позволяющей получать водород из аммиака непосредственно на борту транспортного средства. Полученный газ может быть использован в качестве добавки к основному топливу, например дизелю. Также стоит заметить, что применение данной системы позволит ускорить развитие такой технологии, как топливные элементы, непосредственно использующие для работы водород.

Методы

Разработка системы получения водорода из аммиака требует решения комплекса задач, а именно:

- проработка общей структурной схемы;
- проектирование устройства для выделения водорода из аммиака;
- составление принципиальной электрической схемы системы управления;
- подбор комплектующих для сборки;
- изготовление опытного образца;
- проведение эксперимента и анализ его результатов.

В ходе анализа работ [8–15] было выявлено, что наиболее перспективными направле-

ниями для получения водорода из аммиака являются использование низкотемпературной (non-thermal) плазмы, а также комбинированных водородопроницаемых мембран. Комбинация данных технологий позволит получить наиболее эффективный результат в условиях применения на борту транспортного средства.

Разработка конструкторской документации проводилась в средствах автоматизированного проектирования SolidWorks, Autocad, Autocad Electrical.

Результаты исследования

На первоначальном этапе создания системы генерации водорода была предложена ее структурная схема (рис. 1).

Как видно на рис. 1, аммиак поступает из баллона в устройство, которое выделяет из него чистый водород, затем полученный газ используется в системе питания двигателя. Работа всей системы обеспечивается системой управления, включающей в себя датчики, электронный блок управления и исполнительные механизмы. Для удобства информация о параметрах работы системы выводится на графический интерфейс пользователя в кабине автомобиля.

Ключевым элементом системы является так называемый PMR — плазменный мембранный реактор [16]. Принцип работы дан-



Рис. 1. Структурная схема системы получения водорода из аммиака

ного устройства заключается в том, что под воздействием электрического тока аммиак разделяется на составляющие (азот и водород), затем специализированная сепарирующая мембрана отделяет водород от азота и незначительных остатков аммиака, получая на выходе водород высокой чистоты. Сборочный чертеж реактора представлен на рис. 2.

Образование плазмы в зазоре между электродами и расположенным между ними диэлектрическим материалом является результатом явления диэлектрического барьерного разряда (ДБР, DBD) [17]. Для работы данного устройства требуется переменный электрический ток с частотой около 10 кГц и напряжением от 3,5 до 15 кВ, что обеспечивается источником питания, преобразующим напряжение бортовой сети до вышеуказанных значений.

Для обеспечения безопасности разработана система управления, принципиальная схема которой представлена на рис. 3. Функционал составных элементов системы представлен в таблице.

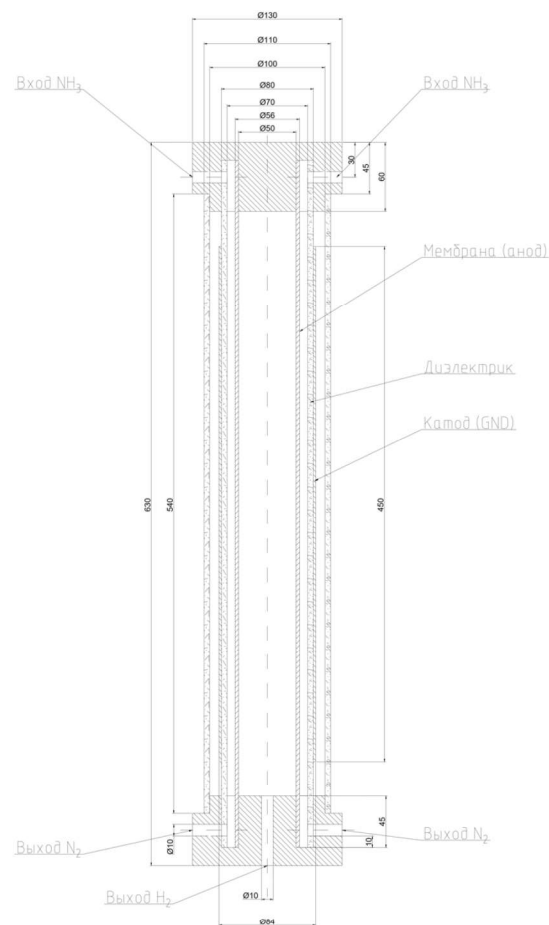
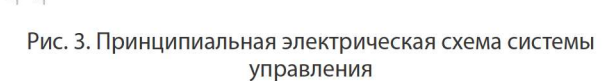


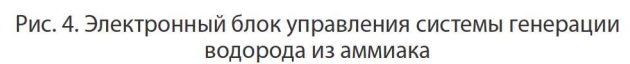
Рис. 2. Чертеж плазменного мембранного реактора

Функции основных элементов системы генерации водорода из аммиака

№	Наименование	Функции
1	Плазменный мембранный реактор	Выделение водорода из аммиака
2	Электронный блок управления	1. Анализ данных, получаемых от датчиков 2. Управление высоковольтным преобразователем напряжения 3. Обработка и передача данных блоку индикации 4. Диагностика системы для обеспечения безопасной эксплуатации 5. Аварийное отключение системы и перекрытие топливопроводов
3	Высоковольтный преобразователь напряжения	Преобразование напряжения бортовой сети автомобиля до параметров, необходимых для работы реактора
4	Блок индикации пользователя	1. Информирование об основных параметрах системы 2. Информирование о неисправностях и ошибках 3. Информирование об остатке топлива (аммиака)
5	Блок автоматического контроля сопротивления изоляции (БАКСИ)	Контроль за состоянием изоляции высоковольтных проводов, соединяющих высоковольтный преобразователь и реактор
6	Датчики	1. Контроль температуры на различных участках 2. Контроль давления на различных участках 3. Контроль расхода аммиака и полученного водорода 4. Контроль утечек аммиака
7	Электромагнитные клапаны	Автоматическое или принудительное перекрытие топливопроводов в случае аварийной ситуации



Графический блок индикации представляет собой цветной сенсорный дисплей (рис. 5). Получение данных от блока управ-



Таким образом, дальнейшая разработка данной системы позволит расширить возмож-

ности применения топлив, не содержащих в своем составе углерод, а также улучшить показатели работы дизельных двигателей.

Выводы

1. Предложена система генерации водорода на борту автомобиля из аммиака путем использования технологий низкотемпературной плазмы и сепарирующих водородопроницаемых мембран.

2. Сформирована структурная схема системы, принципиальная электрическая схема системы управления.

3. Разработаны реактор для выделения водорода из аммиака, электронный блок управления, графический блок индикации пользователя.

Библиографический список

1. Галышев Ю. В. Конвертирование рабочего процесса транспортных ДВС на природный газ и водород: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02. СПб., 2010. 365 с.
2. Смыгалина А. Е. Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы воспламенения и горения: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. М., 2019. 120 с.
3. Левин Ю. В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Волгоград, 2016. 128 с.
4. Al-Asadi W. A Study on the Effects of Combined Diesel-Hydrogen Combustion on Diesel Engines Using Experimental and Simulation Techniques: PhD thesis. - Brunel University London, 2018. 153 p.
5. Мисбахов Р. III. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Казань, 2010. 165 с.
6. Неген Тхин Куин. Улучшение показателей рабочего процесса дизеля применением водородосодержащего топлива и сверхвысокого давления в аккумуляторе топливной системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. М., 2021. 180 с.
7. Kambara S. Hydrogen production from ammonia using plasma membrane reactor // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2016. № 2. Pp. 193–202.
8. Kawaoka T., Inoue Y., Kambara S. Reaction mechanism of hydrogen generation from ammonia by

DBD pulsed plasma // Bulletin of the American Physical Society. 2015. № 4. Pp. 78–80.

9. Goto Y., Hayakawa Y., Kambara S. Reaction mechanism of ammonia decomposition by atmospheric plasma // Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference. 2017. № 1. Pp. 1–4.

10. Alagharu V., Palanki S., West K. N. Analysis of ammonia decomposition reactor to generate hydrogen for fuel cell applications // Journal of Power Sources. 2010. № 3. Pp. 83–89.

11. Chiuta S. Reactor technology options for distributed hydrogen generation via ammonia decomposition: A review // International journal of hydrogen energy. 2013. № 35. Pp. 168–191.

12. El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. Hydrogen production technologies overview // International journal of hydrogen energy. 2019. № 4. Pp. 45–70.

13. Lin Q. F. Instantaneous hydrogen production from ammonia by non-thermal arc plasma combining with catalyst // Energy Reports. 2021. № 7. Pp. 64–70.

14. El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 57. Pp. 261–275.

15. Akiyama M. Ammonia decomposition to clean hydrogen using non-thermal atmospheric-pressure plasma // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. № 31. Pp. 193–197.

16. Kikuchi E. Membrane reactor application to hydrogen production // Catalysis Today. 2020. № 1. Pp. 97–101.

17. Акишев Ю. С. Низкотемпературная плазма при атмосферном давлении и ее возможности для приложений // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2019. № 8. С. 26–60.

References

1. Galyshev Yu. V. *Konvertirovanie rabocheho protsessa transportnykh DVS na prirodniy gaz i vodorod*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Conversion of transport internal combustion engines to natural gas and hydrogen. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2010, 365 p.
2. Smygalina A. E. *Vliyanie sostava goryuchikh smesey na osnove vodoroda na rezhimy vosplameneniya i goreniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Influence of hydrogen-based combustible mixtures composition on ignition and combustion modes. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2019, 120 p.
3. Levin Yu. V. *Uluchshenie toplivnoy ekonomichnosti i ekologichnosti rotorno-porshnevoogo dvigatelya za schet dobavok svobodnogo vodoroda k osnovnomu toplivu*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of fuel efficiency and

environmental friendliness of a rotary piston engine by adding free hydrogen to the main fuel. PhD in Sci. Tech. diss.]. Volgograd, 2016, 128 p.

4. Al-Asadi W. A Study on the Effects of Combined diesel-hydrogen combustion on diesel engines using experimental and simulation techniques. PhD thesis. London, Brunel University Publ., 2018, 153 p.

5. Misbakhov R. Sh. *Vliyanie dobavok vodoroda na tekhniko-ekonomicheskie i ekologicheskie pokazateli gazovykh i dizel'nykh dvigateley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Effect of hydrogen additives on the technical, economic and environmental performance of gas and diesel engines. PhD in Sci. Tech. diss.]. Kazan', 2010, 165 p.

6. Nguen Tkhin Kuin. *Uluchshenie pokazateley rabocheho protsessa dizelya primeneniem vodorodosoderzhashchego topliva i sverkhvysokogo davleniya v akkumulyatore toplivnoy sistemy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of diesel engine performance using hydrogen-containing fuel and ultra-high pressure in the fuel system accumulator. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2021, 180 p.

7. Kambara S. Hydrogen production from ammonia using plasma membrane reactor. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2016, no. 2, pp. 193–202.

8. Kawaoka T., Inoue Y., Kambara S. Reaction mechanism of hydrogen generation from ammonia by DBD pulsed plasma. *Bulletin of the American Physical Society*, 2015, no. 4, pp. 78–80.

9. Goto Y., Hayakawa Y., Kambara S. Reaction mechanism of ammonia decomposition by atmospheric plasma. *Proceedings of the 9-th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 2017, no. 1, pp. 1–4.

10. Alagharu V., Palanki S., West K. N. Analysis of ammonia decomposition reactor to generate hydrogen for fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 2010, no. 3, pp. 83–89.

11. Chiuta S. Reactor technology options for distributed hydrogen generation via ammonia decomposition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, no. 35, pp. 168–191.

12. El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. Hydrogen production technologies overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, no. 4, pp. 45–70.

13. Lin Q. F. Instantaneous hydrogen production from ammonia by non-thermal arc plasma combining with catalyst. *Energy Reports*, 2021, no. 7, pp. 64–70.

14. El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y. Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, no. 57, pp. 261–275.

15. Akiyama M. Ammonia decomposition to clean hydrogen using non-thermal atmospheric-pressure plasma. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, no. 31, pp. 193–197.

16. Kikuchi E. Membrane reactor application to hydrogen production. *Catalysis Today*, 2020, no. 1, pp. 97–101.

17. Akishev Yu. S. *Nizkotemperaturnaya plazma pri atmosfernom davlenii i ee vozmozhnosti dlya prilozheniy* [Low-temperature plasma at atmospheric pressure and possibilities for its applications]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Proceedings of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*, 2019, no. 8, pp. 26–60.