УДК 669.85/86

© А. А. Кондратюк, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: sanytch2@ya.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-183-190

© А. А. Kondratiuk, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: sanytch2@ya.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, РАБОТАЮЩИХ ПО ЦИКЛУ ДИЗЕЛЯ

PROSPECTS FOR USING HYDROGEN ADDITIVE FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES RUNNING ON THE DIESEL CYCLE

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований экологических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) коммерческого и коммунального автотранспорта, работающих по циклу Дизеля с применением водородной добавки. Выполненный анализ литературных источников подтвердил, что существуют разные данные о вредных выбросах при применении водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля. При этом существенно разнятся данные по вредным выбросам оксидов азота NO_x . Результаты теоретических и экспериментальных исследований экологических характеристик ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающего по циклу Дизеля с применением водородной добавки, позволяют утверждать об адекватности построенной модели, поскольку погрешность между теоретическими и экспериментальными данными не превышала 14,5 %. Установлено, что концентрация выбросов NO_x в ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, снизилась на 52 %. Приведенные результаты исследований подтверждают перспективы применения водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля, что впервые применено для коммерческого и коммунального автотранспорта. Это гарантирует повышение экологической безопасности в городских агломерациях.

Ключевые слова: водородная добавка, двигатели внутреннего сгорания (ДВС), вредные выбросы, городская агломерация, коммерческий и коммунальный автотранспорт, экологическая безопасность.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the environmental characteristics of internal combustion engines of commercial and municipal vehicles operating on the Diesel cycle using a hydrogen additive. The analysis of literature sources has confirmed that there are different data regarding harmful emissions when using hydrogen additives for internal combustion engines running on the Diesel cycle. Therewith, data on harmful emissions of nitrogen oxides NO_x differ significantly. The results of theoretical and experimental studies of the environmental characteristics of internal combustion engines of commercial and municipal vehicles operating on a Diesel cycle using a hydrogen additive, allow to assert the adequacy of the model, since the error between the theoretical and experimental data did not exceed 14,5 %. It has been found out that the concentration of NO_x emissions in an internal combustion engine using a hydrogen additive, working on a Diesel cycle, has decreased by 52 %. The research results confirm the prospects of using a hydrogen additive, which is done for the first time for internal combustion engines running on the Diesel cycle in commercial and municipal vehicles. This guarantees increased environmental safety in urban agglomerations.

Keywords: hydrogen additive, internal combustion engines, harmful emissions, urban agglomeration, commercial and municipal vehicles, environmental safety.

Введение

Использование на транспорте двигателей внутреннего сгорания (ДВС), особенно в условиях городской агломерации, приводит к антропо-

генному воздействию человека на природу в связи со значительным повышением насыщенности вредных веществ в выхлопных газах, пагубно влияющих на окружающую среду и отрицатель-

но сказывающихся на качестве жизни людей. Согласно предоставленным данным [1] ухудшение состава воздуха в крупных городах Российской Федерации связано с концентрацией большого количества промышленных производств, являющихся регулярными источниками выбросов в атмосферу различными химическими примесями, а также значительно большая часть (более 60 %) от суммарных объемов негативного воздействия на природу выпадает на отработавшие газы транспортных средств, на которых установлены как бензиновые, так и дизельные ДВС. Данная проблема — одна из важных составляющих экологической безопасности Российской Федерации и многих других стран мира.

В настоящее время для повышения уровня экологической обстановки и выполнения необходимого качества жизни и уровня здоровья людей, проживающих в крупных городах, обеспечения нормативных показателей окружающей среды и снижения количества выбрасываемых опасных химических элементов, необходимо использовать водородный катализатор горения в определенных тактах работы двигателей, работающих по циклу Дизеля [2, 3]. Последнее поможет снизить вредные выбросы коммерческого и коммунального автотранспорта с дизельными ДВС в условиях городской агломерации.

Кислородно-водородная смесь необходима для снижения пагубных воздействий на природу и является лучшим носителем энергии, поскольку при интенсивном окислении водородно-воздушного соединения в результате химической реакции из токсичных компонентов остаются лишь только оксиды азота (без учета угара масел систем смазки ДВС) [4, 5]. Однако, помимо этого, благоприятные качества водорода как катализатора горения топлива содержатся в незначительной активности воспламенения смеси, высоком темпе ее окисления, большом интервале воспламеняемости по структуре смеси, что позволяет осуществить более эффективное управление подачи топлива и работой ДВС с внешним смесеобразованием.

Анализ литературных источников показал, что существуют разные данные о вредных выбросах при применении водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля, особенно это касается оксидов азота NO_x [5–12].

Так, в [9, 10] утверждается увеличение выбросов NO_x на более высоких нагрузках двигателя с воспламенением от сжатия с водородом, а в [13] — добавление водорода к дизельному топливу снижает выбросы NO_x в условиях низкой нагрузки, но отмечается их увеличение при высокой нагрузке. В работах [5, 14] приведены результаты о высоких выбросах NO_x с применением водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля, однако делается вывод, что с применением рециркуляции отработавших газов снижаются все выбросы.

В приведенных результатах для ДВС, работающих по циклу Дизеля с применением водородной добавки [5], получено снижение выбросов NO_x на 38,4 %, CO_2 — на 27,4 %, CO — на 33,4 %, из которых сделаны выводы о том, что комбинация добавления водорода и рециркуляция отработавших газов является выгодной для общего снижения выбросов.

В [6] отмечается о возможности снижения выбросов NO_x в двигателе, работающем с добавлением водорода, более чем на 90 % с одновременным уменьшением выброса сажи за счет увеличения добавления водорода [6–8].

В публикациях [11, 15–17] приведены результаты добавления водорода в дизельный ДВС, в которых отмечается небольшое увеличение выбросов NO_x и повышение эффективности, все остальные вредные выбросы имели резкое снижение.

В работах [13, 18, 19] говорится об удельном снижении выбросов CO , CO_2 и дымности с увеличением добавки водорода.

Эффективность сгорания топливной смеси увеличивается с добавлением водорода из-за избытка воздуха, и если нет избытка воздуха, то выбросы NO_x могут уменьшиться [18].

Снижение выбросов NO_x с добавкой водорода к воздуху для пуска дизельного ДВС было отмечено при всех частичных нагрузках, а при полной нагрузке получено увеличение на 51,3 % [20].

Результаты экспериментов [21] показывают, что увеличение количества водорода в двигателе сокращает задержку зажигания, что также влияет на основную фазу сгорания. При этом тенденция к выбросам сажи неуклонно уменьшалась с увеличением количества водорода.

Для уменьшения выбросов NO_x в работах [22, 23] упоминается о впрыске воды в камеру сгорания, что помогает предотвратить детонацию и предварительное воспламенение во время сгорания водорода. При этом вода охлаждает заряд и снижает скорость сгорания. Однако вода, впрыскиваемая во впускной коллектор, снижает объемную эффективность.

Как видим из приведенного анализа, в мире существуют разноплановые мнения о применении водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля, которые касаются вредных выбросов. Поэтому в работе приводятся теоретические и экспериментальные исследования экологических характеристик ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающего по циклу Дизеля с применением водородной добавки.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований экологических характеристик ДВС, работающих по циклу Дизеля с применением водородной добавки

Теоретические исследования экологических характеристик ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающих по циклу Дизеля с применением водородной добавки, выполнялись при моделировании с помощью современных CAD/CAE-систем, таких как ANSYS, которые выступают в виде эффективных инструментов и обеспечивающих наименьшие за-

траты различных материальных средств, а также минимальное время при проектировании ДВС. Первый этап проектирования ДВС заключался в построении проточной части, а именно самой головки блока цилиндров, включающая впускные и выпускные каналы. Для этого был применен графический редактор Solid Works. Затем выполнялся экспорт построенной модели непосредственно в ANSYS и, используя булевые операции, выполнялось создание модели головки блока цилиндров ДВС, которая включала впускные и выпускные каналы с вырезанными каналами.

Экспериментальные исследования экологических характеристик ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающих по циклу Дизеля с применением водородной добавки, выполняли на стенде, аналогичном приведенному в [23].

Количество вредных выбросов CO для базового двигателя и ДВС с применением водородной добавки, работающих по циклу Дизеля, значительно изменилось. На рис. 1, 2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости выбросов CO для базового двигателя и ДВС с применением водородной добавки, работающих по циклу Дизеля в зависимости от оборотов коленчатого вала.

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что концентрация выбросов CO в ДВС

Рис. 1. Выбросы CO для базового дизеля в зависимости от оборотов коленчатого вала:
1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

Рис. 2. Выбросы CO для ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, в зависимости от оборотов коленчатого вала: 1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, снизилась на 18,7–20 % в зависимости от оборотов коленчатого вала по сравнению с базовым дизелем.

Приведенные теоретические и экспериментальные кривые концентраций CO (рис. 1, 2) имеют погрешность, не превышающую 12,5 %, что не выходит за гранично-установленные 15 %. Поэтому результаты теоретических и экс-

периментальных исследований можно считать удовлетворительными и хорошо согласовывающимися.

На рис. 3, 4 также показаны теоретические и экспериментальные зависимости концентраций NO_x для базового двигателя и ДВС с применением водородной добавки, работающих по циклу Дизеля. Отметим, что и в этом случае количество вредных выбросов NO_x было большим

Рис. 3. Выбросы NO_x для базового дизеля в зависимости от оборотов коленчатого вала: 1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

Рис. 4. Выбросы NO_x для ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, в зависимости от оборотов коленчатого вала: 1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

для базового двигателя в сравнении с ДВС с применением водородной добавки.

Приведенные на рис. 3, 4 теоретические и экспериментальные кривые концентраций NO_x имеют расхождение в 2,5–14,5 %, что не выходит за гранично-установленные 15 %. Поэтому результаты теоретических и экспериментальных исследований для концентраций NO_x считаем хорошо согласовывающимися. При этом концентрации

NO_x в ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, по сравнению с базовым снизилась на 49–52 % в зависимости от оборотов коленчатого вала.

На рис. 5 и 6 приведены теоретические и экспериментальные зависимости концентраций НС для базового двигателя и ДВС с применением водородной добавки, работающих по циклу Дизеля. При этом количество вредных выбросов

Рис. 5. Выбросы НС для базового дизеля в зависимости от оборотов коленчатого вала: 1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

Рис. 6. Выбросы НС для ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, в зависимости от оборотов коленчатого вала: 1 — теоретические данные; 2 — экспериментальные данные

НС для базового двигателя в сравнении с ДВС с применением водородной добавки практически не изменилось.

Видно, что концентрации НС до 12 % ниже в ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, по сравнению с базовым дизелем в зависимости от оборотов коленчатого вала. Разброс теоретических и экспериментальных значений для концентраций НС не превышал 9 %.

Наряду с другими параметрами, имеются выбросы вредных веществ, таких как CO_2 , SO_2 , которые не имели значительных отличий между базовым двигателем и ДВС с применением водородной добавки, работающих по циклу Дизеля. Поэтому целесообразность представления данных зависимостей отсутствует.

Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования экологических характеристик ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающего по циклу Дизеля с применением водородной добавки, позволили выявить расхождения между полученными данными, которые не выходили за уровень погрешности в 15 %.

Установлено, что концентрация выбросов в зависимости от оборотов коленчатого вала в

ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля, снизилась по сравнению с базовым ДВС:

- CO на 18,7–20 %;
- NO_x на 49–52 %;
- НС до 12 %.

Остальные концентрации вредных веществ не имели значительных отличий между базовым ДВС и ДВС с применением водородной добавки, работающего по циклу Дизеля.

Приведенные результаты исследований подтверждают перспективы применения водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля, что впервые применено для коммерческого и коммунального автотранспорта. В этом случае можно гарантировать повышение экологической безопасности в городских агломерациях через снижение вредных выбросов ДВС коммерческого и коммунального автотранспорта, работающих по циклу Дизеля.

Библиографический список

1. Хачиян А. С. Сравнительная оценка выбросов двуокиси углерода различными двигателями // Перспективы развития энергетических установок для автотранспортного комплекса: сб. науч. тр. МАДИ (ТУ). М.: ТехПолиграфЦентр. 2016. С. 4–9.

2. Wu H. W. and Wu Z. Y. Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel / hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine // *Appl Therm Eng.* 2012. № 42. Pp. 154–162.
3. Kumar M., Tsujimura T., and Suzuki Y. NO_x model development and validation with diesel and hydrogen/ diesel dual-fuel system on diesel engine // *Energy.* 2018. № 145. Pp. 496–506.
4. Dimitriou P. and Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel // *Int J Hydrogen Energ.* 2017. № 42. Pp. 470–486.
5. Nag S., Sharma P., Gupta A., Dhar A. Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation // *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019. № 44 (23). Pp. 163–175. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120.
6. Dimitriou P., Kumar M., Tsujimura T., and Suzuki Y. Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine // *International Journal of Hydrogen Energy.* (29) 2018. № 43. Pp. 605–617.
7. Yuan C., Han C., Liu Y., He Y., Shao Y., and Jian X. Effect of hydrogen addition on the combustion and emission of a diesel free-piston engine // *International Journal of Hydrogen Energy.* (29) 2018. № 43. Pp. 583–593.
8. Gomes-Antunes J. M., Mikalsen R. and Roskilly A. P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine // *Int J Hydrogen Energ.* 2009. № 34. Pp. 16–22.
9. Sharma P. and Dhar A. Compression ratio influence on combustion and emissions characteristic of hydrogen diesel dual fuel CI engine: Numerical Study // *Fuel.* 2018. № 222. Pp. 52–58.
10. Kotten H. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions // *Int J Hydrogen Energ.* 2018. № 43. Pp. 511–519.
11. Karagoz Y., Sandalci T., Yuksek L., Dalkilic A.S. and Wongwises S. Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines // *Advances in Mechanical Engineering.* 2016. № 8(8). Pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814016664458.
12. Miyamoto T., Hasegawa H., Mikami M., et al. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine // *Int J Hydrogen Energ.* 2011. № 7. Pp. 341–353.
13. Sharma P., Dhar A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions // *Int J Hydrogen Energy.* 2018. № 43. Pp. 75–70.
14. Resitoglu I. A., Keskin A. Hydrogen applications in selective catalytic reduction of NO_x emissions from diesel engines // *Int J Hydrogen Energy.* 2017. № 42. Pp. 389–394.
15. Herna'ndez J. J., Lapuerta M. and Barba J. Separate effect of H₂, CH₄ and CO on diesel engine performance and demission's under partial diesel fuel replacement // *Fuel.* 2016. № 165. Pp. 173–184.
16. Herna'ndez J. J., Salvador J. B. and Cova-Bonillo A. Autoignition of diesel-like fuels under dual operation with H₂ // *Advances in Mechanical Engineering.* 2019. № 11(6). Pp. 1–8. DOI: 10.1177/1687814019856781.
17. Talibi M., Hellier P., Morgan R., et al. Hydrogen-dieselfuel co-combustion strategies in light duty and heavy duty CI engines // *Int J Hydrogen Energ.* 2018. № 343. Pp. 46–58.
18. Juknelevicius R., Rimkus A., Pukalskas S., Matijosius J. Research of performance and emission indicators of the compression-ignition engine powered by hydrogen - Diesel mixtures // *International Journal of Hydrogen Energy.* 2018. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.185.
19. Hamdan M. O., Selim M. Y. E., Al-Omari S.-A. B., and Elnajjar E. Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine // *Renewable Energy.* 2015. № 82. Pp. 54–60.
20. Karagoz Y., Sandalci T., Yuksek L., Dalkilic A. S. Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads // *Int J Hydrogen Energy.* 2015. № 40. Pp. 702–713.
21. Tsujimura T., Suzuki Y. The utilization of hydrogen in hydrogen / diesel dual fuel engine // *Int J Hydrogen Energy.* 2017. № 42. Pp. 19–29.
22. Ciniviz M., Köse H. Hydrogen Use in Internal Combustion Engine: A Review / *International Journal of Automotive Engineering and Technologies.* 2012. № 1. Pp. 1–15.
23. Putrasari Y. et al. Thermal efficiency and emission characteristics of a diesel-hydrogen dual fuel CI engine at various loads condition // *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology.* 2018. № 9. Pp. 49–56.

References

1. Khachiyani A. S. *Sravnitel'naya otsenka vybrosov dvuokisi ugleroda razlichnymi dvigatelyami* [Comparative assessment of carbon dioxide emissions by various engines]. *Sb. nauch. tr. MADI (TU) «Perspektivy razvitiya energeticheskikh ustanovok dlya avtotransportnogo kompleksa»* [Coll. works MADI (TU) "Prospects for the development of power plants for the automotive complex"]. Moscow, TekhPoligrafTsentr Publ., 2016, pp. 4–9.
2. Wu H.W. and Wu Z. Y. Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel / hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine. *Appl Therm Eng.* 2012, no. 42, pp. 154–162.
3. Kumar M., Tsujimura T., and Suzuki Y. NO_x model development and validation with diesel and hydrogen/

diesel dual-fuel system on diesel engine. *Energy*, 2018, no. 145, pp. 496–506.

4. Dimitriou P. and Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 470–486.

5. Nag S., Sharma P., Gupta A., Dhar A. Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, no. 44(23), pp. 163–175. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120.

6. Dimitriou P., Kumar M., Tsujimura T., and Suzuki Y. Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 605–617.

7. Yuan C., Han C., Liu Y., He Y., Shao Y., and Jian X. Effect of hydrogen addition on the combustion and emission of a diesel free-piston engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 583–593.

8. Gomes-Antunes J. M., Mikalsen R. and Roskilly A. P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *Int J Hydrogen Energy*, 2009, no. 34, pp. 16–22.

9. Sharma P. and Dhar A. Compression ratio influence on combustion and emissions characteristic of hydrogen diesel dual fuel CI engine: Numerical Study. *Fuel*, 2018, no. 222, pp. 852–858.

10. Kotten H. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions. *Int J Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 511–519.

11. Karagoz Y., Sandalci T., Yuksek L., Dalkilic A. S. and Wongwises S. Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, no. 8(8), pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814016664458.

12. Miyamoto T., et al. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 2011, no. 7, pp. 341–353.

13. Sharma P., Dhar A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions. *Int J Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 75–70.

14. Resitoglu I. A., Keskin A. Hydrogen applications in selective catalytic reduction of NOx emissions from diesel engines. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 389–394.

15. Herná'ndez J. J., Lapuerta M. and Barba J. Separate effect of H₂, CH₄ and CO on diesel engine performance and emissions under partial diesel fuel replacement. *Fuel*, 2016, no. 165, pp. 173–184.

16. Herná'ndez J. J., Salvador J. B. and Cova-Bonillo A. Auto ignition of diesel-like fuels under dual operation with H₂. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, no. 11(6), pp. 1–8. DOI: 10.1177/1687814019856781.

17. Talibi M., et al. Hydrogen-dieselfuel co-combustion strategies in light duty and heavy duty CI engines. *Int J Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 46–58.

18. Juknelevicius R., Rimkus A., Pukalskas S., Matijosius J. Research of performance and emission indicators of the compression-ignition engine powered by hydrogen-diesel mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.185.

19. Hamdan M. O., Selim M. Y. E., Al-Omari S.-A. B., and Elnajjar E. Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine. *Renewable Energy*, 2015, no. 82, pp. 54–60.

20. Karagoz Y., Sandalci T., Yuksek L., Dalkilic A. S. Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads. *Int J Hydrogen Energy*, 2015, no. 40, pp. 702–713.

21. Tsujimura T., Suzuki Y. The utilization of hydrogen in hydrogen / diesel dual fuel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 19–29.

22. Ciniviz M., Köse H. Hydrogen Use in Internal Combustion Engine: A Review. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 1–15.

23. Putrasari Y., et al. Thermal efficiency and emission characteristics of a diesel-hydrogen dual fuel CI engine at various loads condition. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 2018, no. 9, pp. 49–56.