УДК 502.1

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

© И. Т. Абызов, аспирант

© П. А. Разумов, студент

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

E-mail: wolftier@mail.ru, svorobev@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-127-132

© S. A. Vorobyov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© I. T. Abyzov, post-graduate student

© P. A. Razumov, student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: wolftier@mail.ru, svorobev@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СПЕЦАВТОТРАНСПОРТА С ДИЗЕЛЬНЫМ ДВС

RESEARCH OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF SPECIAL PURPOSE VEHICLES WITH A DIESEL-POWERED INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Рассмотрена возможность применения водорода в качестве присадки к основному виду топлива на спецавтотранспорте с дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) для повышения экологической безопасности. Разработана математическая модель описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода. Приведены теоретические методы исследования технических параметров ДВС при использовании примесей водорода. На основании теоретических зависимостей и данных может быть улучшена экологическая безопасность спецавтотранспорта на территории Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: спецавтотранспорт, водород, дизельный двигатель внутреннего сгорания, математическая модель, применение водорода.

The paper considers the possibility of using hydrogen as an additive to the main type of fuel in special purpose vehicles with a diesel-powered internal combustion engine (ICE) in order to improve environmental safety. There has been developed a mathematical model for describing the processes of combined cycles of the internal combustion engine operating on diesel fuel and hydrogen additives. Theoretical methods for investigating the technical parameters of internal combustion engines at using hydrogen additives are presented. Based on theoretical relationships and data, the environmental safety of special purpose vehicles on the territory of St. Petersburg can be improved.

Keywords: special purpose vehicles, hydrogen, diesel-powered internal combustion engine, mathematical model, hydrogen application.

Объектом исследований является экологическая безопасность спецавтотранспорта с дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) Tector 4 мощностью 160, 180 л. с. и дизельным ДВС Tector 6 мощностью 220 и 280 л. с., установленными на спецавтотранспорте, используемом в Санкт-Петербурге, — автомобилях Iveco EuroCargo.

Исследование экологической безопасности спецавтотранспорта с дизельным ДВС направле-

но на обеспечение надлежащего уровня здоровья населения в условиях Санкт-Петербурга. Повышение экологической безопасности возможно с помощью применения водородной добавки или примесей водорода в дизельный ДВС спецавтотранспорта, что поможет снизить концентрацию вредных выбросов.

Экологическая безопасность спецавтотранспорта с ДВС, работающего по смешанному циклу дизеля и примесей водорода, может быть

обоснована при проведении теоретических исследований и оценена при выполнении экспериментальных исследований.

Методы повышения экологической безопасности спецавтотранспорта могут быть разделены на конструкционные и эксплуатационные.

Конструкционные методы используются на стадии проектирования спецавтотранспорта. При этом принимаются такие конструктивные характеристики ДВС спецавтотранспорта, которые отвечают определенным нормам экологической безопасности при определенных режимах эксплуатации.

Эксплуатационные методы, применяемые в ДВС спецавтотранспорта, направлены на всевозможную поддержку их технического состояния в соответствии с заданными уровнями экологических нормативов безопасности на основе постоянного ведения технического контроля технических и экологических параметров и проведения высококачественного обслуживания.

К конструкционно-технологическому методу можно отнести и использование в качестве топлива водорода, являющегося идеальным энергоносителем.

Совмещенный цикл ДВС с дизельным топливом и водородом, выполненный конструктивно-технологически правильно, может улучшить эксплуатационные характеристики ДВС спецавтотранспорта. Поскольку в водороде отсутствуют вредные примеси, а при его сгорании выделяется намного меньше углерода, чем при сгорании дизельного топлива, то экологическая безопасность при применении спецавтотранспорта повысится.

В итоге использование совмещенных циклов ДВС с дизельным топливом и водородом позволит значительно снизить влияние негативных воздействий на внешнюю окружающую среду вредных выбросов для разных режимов и условий эксплуатации. Особенно это важно в мегаполисах и городах.

На данный момент известны работы по применению водородной добавки для ДВС, работающих по циклу Дизеля [1, 2], что помогает снизить вредные выбросы автотранспорта с дизельными ДВС в условиях городов и мегаполисов.

Так, в работах [3, 4] водород, с точки зрения экологической безопасности, — идеаль-

ный энергоноситель, поскольку при сгорании водородно-воздушной смеси единственным токсичным компонентом могут быть оксиды азота (не считая продуктов сгорания моторных масел). Основные положительные свойства водорода в качестве моторного топлива — низкая энергия воспламенения смеси, высокая скорость ее горения, широкий диапазон воспламеняемости по составу смеси, что разрешает реализовать качественное регулирование ДВС с внешним смесеобразованием.

Анализ литературных источников показывает, что существуют разные данные о вредных выбросах при использовании водородной добавки для ДВС, работающих по циклу дизеля, особенно это касается оксидов азота NO_x [4–11].

Так, в [8, 11] утверждается об увеличении выбросов NO_x на более высоких нагрузках двигателя с воспламенением от сжатия с водородом, а в [12] отмечается, что добавление водорода к дизельному топливу снижает выбросы NO_x в условиях низкой нагрузки, но увеличивает при высокой нагрузке. Также в работах [4, 13] 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 [4], 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 рециркуляции отработавших газов выгодна для общего снижения выбросов.

В связи с вышеупомянутым рассмотрим конструкционно-технологический метод при совмещенном цикле ДВС с дизельным топливом и водородом.

Основными теоретическими методами при исследовании технических параметров ДВС спецавтотранспорта являются теория ДВС и следующее математическое моделирование.

Основная задача при математическом моделировании технических параметров ДВС спецавтотранспорта — исследование изменений, происходящих при рабочем цикле ДВС. Это применимо в случае совмещенного цикла ДВС

дизельного топлива и примесей водорода. При этом для выполнения моделирования необходимо применение теории ДВС, а также новейших разработок. Моделирование заключается в установлении связи между основными параметрами рабочего процесса ДВС и количеством примесей водорода, который подается при совмещенном цикле дизеля, а также во влиянии основного технического параметра на скорость тепловыделения и качество распыления топлива в цилиндре ДВС при совмещенном цикле.

Для математического описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода, будут использованы уравнения действительных физических явлений. Для этого действительный четырехтактный цикл условно разделяется на несколько участков, каждый из которых характеризуется определенными физическими явлениями и потому математически описывается соответствующими уравнениями. Эти участки отделяются фазами газораспределения, моментом зажигания рабочей смеси и продолжительностью ее горения. Для расчетов процессов на каждом из участков целесообразно использовать метод объемного баланса, который не противоречит физической природе процессов и дает наиболее точные результаты [14–21].

Метод расчетов рабочего процесса совмещенных циклов дизеля и газа, в основе которого лежат дифференциальные уравнения объемного баланса, нашел широкое применение в практике двигателестроения. Этот метод получил распространение в научно-исследовательской работе, а также в заводской практике. Он дает практически полную сходимость расчетных и исследовательских данных [22, 23].

Метод объемного баланса может быть использован в математической модели рабочего процесса спецавтотранспорта с ДВС, работающим на совмещенном цикле дизеля и примесей водорода. С помощью данной модели можно определить параметры и состав рабочего тела в цилиндре по углу поворота кривошипа, который позволяет рассчитать показатели рабочего процесса цилиндра, а также влияние изменения состава и параметров рабочего тела на показатели рабочего процесса [24, 25].

Алгоритм математического моделирования рабочего процесса ДВС, работающего на совмещенном цикле дизеля и примесей водорода методом объемного баланса, приведен на рис. 1.

Результатом математического моделирования является закон сгорания для ДВС, работающего по смешанному циклу дизеля и примеси водорода.

Во время сгорания меняется химический состав рабочего тела в цилиндре и соответственно массы компонентов рабочей смеси. Часть новообразовавшихся веществ определяет закон сгорания, который согласно [8, 26] имеет следующий вид:

$$E = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{нг}}{\varphi_z(\Delta p_k)} \right)^{m(\Delta p_k) + 1}},$$

где $m(\Delta p_k)$ — зависимость для определения показателя характера сгорания;

φ — угол поворота кривошипа;

$\varphi_{нг}$ — угол поворота кривошипа, который отвечает началу сгорания;

$\varphi_z(\Delta p_k)$ — зависимость для определения продолжительности сгорания.

Рис. 1. Алгоритм математического моделирования рабочего процесса ДВС, работающего на совмещенном цикле дизеля и примесей водорода методом объемного баланса

Показатель характера сгорания определяет продолжительность хода первой фазы сгорания. Для дизельных двигателей $m = 3-4$ [2]. Поскольку дизельное топливо с водородом образует более однородную смесь с воздухом, то время первой фазы сгорания сокращается и поэтому $m = 1-3$ (рис. 2).

Для определения зависимости изменения показателя сгорания m и продолжительности сгорания от режима работы двигателя проводилось индуцирование рабочего процесса ДВС, работающего по смешанному циклу дизеля и примесей водорода, эти зависимости получены при обработке индикаторных диаграмм [1–3]. Обработка последних осуществлялась сравнением экспериментальных диаграмм и диаграмм, рассчитанных с помощью математической модели рабочего процесса ДВС, работающего по смешанному циклу дизеля и примесей водорода. Выбор нужных значений показателя характера сгорания и продолжительности сгорания осуществлялся одновременно для конкретного режима работы двигателя.

На основании проведенных теоретических исследований был определен объект, которым является экологическая безопасность спецавтотранспорта с дизельным ДВС Tector 4 мощностью 160, 180 л. с. и дизельным ДВС Tector 6 мощностью 220 и 280 л. с., установленными на спецавтотранспорте, используемом в Санкт-Петербурге, в автомобилях Iveco EuroCargo.

В результате рассмотрения методов повышения экологической безопасности спецавтотранспорта установлено, что наиболее применим

в условиях Санкт-Петербурга конструкционно-технологический метод при совмещенном цикле ДВС с дизельным топливом и водородом.

Также приведены теоретические методы исследования технических параметров ДВС спецавтотранспорта при использовании примесей водорода.

Кроме того, была сформирована математическая модель описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода, основанная на уравнении действительных физических явлений, с помощью которой могут быть определены рациональные технические параметры ДВС и может быть дана последующая оценка вредных выбросов, которые будут характерны для ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода. Применение теоретических зависимостей и данных может улучшить экологическую безопасность спецавтотранспорта в условиях Санкт-Петербурга.

Библиографический список

1. 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.
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. Dimitriou P. and Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel // *Int J. Hydrogen Energ*. 2017. № 42. Pp. 24470–24486.
4. 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 // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2019. № 44 (23). Pp. 12163–12175. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120
5. 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. 13605–13617.
6. 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. 6516–6522.
7. 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

Рис. 2. Полученный закон сгорания для ДВС, работающего по смешанному циклу дизеля и примеси водорода

engines // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. № 8 (8). Pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814016664458.

8. Kotten H. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. 43. Pp. 10511–10519.

9. 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 Energy*. 2011. № 7. Pp. 341–353.

10. Sharma P. and Dhar A. Compression ratio influence on combustion and emissions characteristic of hydrogen diesel dual fuel CI engine: Numerical Study // *Fuel*. 2018. № 22. Pp. 852–858.

11. 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 // *Int. J. of Hydrogen Energy*, (29). 2018. № 43. Pp. 13583–13593.

12. Sharma P., Dhar A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. № 43. Pp. 75–70.

13. Resitoglu I. A., Keskin A. Hydrogen applications in selective catalytic reduction of NOx emissions from diesel engines // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017. Pp. 42. 23389–23394.

14. Addy J. M., Binnig A., Norton P., Peterson E., Campbell K. and Bevilacqua O. Demonstration of Caterpillar C10 Dual Fuel Natural Gas Engines in Commuter Buses, SAE Paper 2000-01-1386, 2000.

15. Baranescu R. Fumigation of Alcohol in a Diesel Engine, SAE Paper 1080, 1980.

16. Barbour T. R., Crouse M. E. and Lestz S. S. Gaseous Fuel Utilization in a Light Duty Diesel Engine, SAE Paper 860070, 1986.

17. Bechtold R. L. Alternative Fuels Guidebook, SAE Publishing, Warrendale, PA, 1997.

18. Beck N., Johnson W., George A., Peterson P., vander Lee B. and Klopp G. Electronic Fuel Injection for Dual Fuel Diesel Methane, SAE Paper 891652, 1989.

19. Beppu O., Fukuda T., Komoda T., Miyake S. and Tanaka T. Service Experience of Mitsui Gas Injection Diesel Engines, in Proceedings of CIMAC Congress. Copenhagen, 1998, Pp. 187–202.

20. Blizzard D., Schaub F.S. and Smith J. Development of the Cooper-Bessmer Clean Burn Gas-Diesel (Dual Fuel) Engine, in ASME-ICE Division. 1991. Vol. 15. Pp. 89–97.

21. Blyth N. Development of the Fairbanks Morse Enviro-Design Opposed Piston Dual Fuel Engine, paper presented at ASME-ICE Division, 1994. Paper 100375.

22. Challen B. and Barnescu R. Diesel Engine Handbook, 2nd ed., SAE, Warrendale, PA, 1999.

23. Checkel M., Newman P., van der Lee B. and Pollak I. Performance and Emissions of a Converted RABA 2356 Bus Engine in Diesel and Dual Fuel Diesel // Natural Gas Operation, SAE Paper 931823, 1993.

24. Harrington J., Munashi S., Nedelcu C., Ouellette P. Thompson J. and Whitfield S. Direct Injection of Natural Gas in a Heavy-Duty Engine, SAE Paper 2002-01-1630, 2002.

25. Hodgins K. B., Gunawan H. and Hill P. G. Intensifier-Injector for Natural Gas Fuelling Diesel Engines, SAE Paper 921553, 1992.

26. Гусаков С. В., Патрахальцев Н. Н. Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания. М.: Изд-во РУДН, 2004. 168 с.

References

1. 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.

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. Dimitriou P. and Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *Int J. Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 24470–24486.

4. 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. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2019, no. 44 (23), pp. 12163–12175. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120

5. 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, no. 43, pp. 13605–13617.

6. 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. 6516–6522.

7. Karagoz Y., et al. 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.

8. Kotten H. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 10511–10519.

9. 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.

10. 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. 22, pp. 852–858.

11. Yuan C., et al. Effect of hydrogen addition on the combustion and emission of a diesel free-piston engine. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 29, pp. 13583–13593.
12. Sharma P., Dhar A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, no. 43, pp. 75–70.
13. 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. 23389–23394.
14. Addy J. M., et al. *Demonstration of caterpillar C10 dual fuel natural gas engines in commuter buses*. SAE Paper 2000-01-1386, 2000.
15. Baranescu R. *Fumigation of alcohol in a diesel engine*. SAE Paper 1080, 1980.
16. Barbour T. R., Crouse M. E. and Lestz S. S. *Gaseous fuel utilization in a light duty diesel engine*. SAE Paper 860070, 1986.
17. Bechtold R. L. *Alternative fuels guidebook*. SAE Publishing, Warrendale, PA, 1997.
18. Beck N., et al. *Electronic Fuel Injection for Dual Fuel Diesel Methane*. SAE Paper 891652, 1989.
19. Beppu O., et al. *Service experience of Mitsui gas injection diesel engines*. In: *Proceedings of CIMAC Congress*, Copenhagen, 1998, pp. 187–202.
20. Blizzard D., Schaub F.S. and Smith. J. *Development of the Cooper-Bessmer Clean Burn Gas-Diesel (Dual Fuel) Engine*. In: *ASME-ICE Division*, 1991, vol. 15, pp. 89–97.
21. Blyth N. *Development of the Fairbanks Morse Enviro-Design Opposed Piston Dual Fuel Engine*. Paper presented at *ASME-ICE Division*, 1994, paper 100375.
22. Challen B. and Barnescu R. *Diesel engine handbook*. 2-nd ed., SAE, Warrendale, PA, 1999.
23. Checkel M., Newman P., van der Lee B. and Pollak I. Performance and emissions of a converted RABA 2356 bus engine in diesel and dual fuel diesel. *Natural Gas Operation*, SAE Paper 931823, 1993.
24. Harrington J., et al. *Direct injection of natural gas in a heavy-duty engine*. SAE Paper 2002-01-1630, 2002.
25. Hodgins K. B., Gunawan H. and Hill P. G. *Intensifier-injector for natural gas fuelling diesel engines*. SAE Paper 921553, 1992.
26. Gusakov S. V., Patrakhal'tsev N. N. *Planirovanie, provedenie i obrabotka dannykh eksperimental'nykh issledovaniy dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Planning, conducting and processing data of experimental studies of internal combustion engines]. Moscow, RUDN Publ., 2004, 168 p.