

### **Разработка водородной энергоустановки новой генерации**

к.т.н. доц. Хрипач Н.А., к.т.н. Лежнев Л.Ю., к.т.н. Папкин Б.А., Шустров Ф.А., Иванов Д.А.,  
Татарников А.П., Сонкин В.И.  
МГТУ «МАМИ», ФГУП «НАМИ»  
8 (495) 223-05-23 доб. 1029, borispapkin@yandex.ru  
8 (495) 456-70-03, val.sonkin2010@yandex.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрена возможность применения альтернативных видов топлив на базе водорода. Проведен анализ преимуществ использования водородсодержащего топлива, проблемы, возникающие при использовании водородного топлива, а так же рассмотрена концепция двигателя с непосредственным впрыском водорода в цилиндр, экономичность и экологичность.

*Ключевые слова:* водородное топливо, непосредственный впрыск, автомобильный транспорт, топливная экономичность, выбросы оксидов азота.

#### **Введение**

В настоящее время в Европе приняты стандарты [1], устанавливающие для изготовителя АТС обязательные требования к средним (по парку автомобилей, выпущенных корпорацией за год) выбросам  $\text{CO}_2$ , а в США, кроме того, к расходу топлива. Эти стандарты вводятся поэтапно с 2012 г. и предусматривают снижение выбросов  $\text{CO}_2$  и соответственно расхода топлива к 2016 г. в США почти на 40% по сравнению с уровнем 2007 г., а в Европе на 25% к 2015 г. и на 40% к 2020 г.

Европейские стандарты требуют уменьшить к 2015 г. выбросы  $\text{CO}_2$  до 130 г/км за счет совершенствования конструкции автомобиля и дополнительно на 10 г  $\text{CO}_2$ /км (т.е. до 120 г/км) за счет других мер, например, применения биотоплива. С 2020 г. выбросы  $\text{CO}_2$  в Европе не должны превышать 95 г/км. Одновременно ужесточаются экологические требования к выбросам  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$  и вредных частиц [2]. Эти проблемы стоят и перед Россией, присоединившейся к экологическим требованиям Евросоюза [3].

Одним из актуальных направлений снижения вредного воздействия отработавших газов ДВС на окружающую среду и здоровье человека, выполнения перспективных норм по выбросам вредных веществ автомобильным транспортом, экономии ресурсов нефтяного топлива является применение водородсодержащего топлива (водорода, синтез-газа и др.), которое часто называют энергоносителем будущего.

#### **Преимущества использования водородсодержащего топлива**

Благодаря тому, что водородное топливо не содержит углерод, продукты его сгорания в воздухе теоретически не могут содержать парниковый газ  $\text{CO}_2$ , оксид углерода  $\text{CO}$ , несгоревшие углеводороды  $\text{CH}$  и сажу. На практике, при сгорании водорода в двигателе внутреннего сгорания выбросы этих компонентов присутствуют в очень небольшом количестве, это связано в основном со сгоранием моторного масла в камере сгорания, расход которого не превышает в современных двигателях 0,01-0,05 л/100 км [4].

Основными токсичными компонентами, образующимися при сгорании водорода в двигателе являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ). В двигателе с искровым зажиганием при сгорании водорода на полной нагрузке максимальные выбросы  $\text{NO}_x$  почти в два раза выше, чем при сгорании углеводородных топлив из-за повышенной температуры горения водорода. Однако на частичных нагрузках, выбросы  $\text{NO}_x$  с ОГ можно поддерживать на низком уровне, работая на очень бедных смесях. По данным [5] на двигателе гибридного автомобиля, (степень сжатия 14), работающем на бедной смеси водорода и воздуха ( $\alpha \geq 2,5$ ), удалось обеспечить выполнение экологических норм EZEV (на порядок более жестких, чем нормы ULEV (США) и Евро-4) по выбросам  $\text{NO}_x$  без каталитической обработки ОГ.

Преимуществом водорода как энергоносителя является возможность экологически чистого использования. Это связано с замкнутостью жизненного цикла преобразования его энергии или вещества, особенно если для производства водорода использовать солнечную энергию. Кроме того, работа на водороде обеспечивает повышение эффективности двигателя

внутреннего сгорания [4-10]. В большинстве реализованных до сих пор концепций используется сочетание системы искрового зажигания и внешнего смесеобразования (впрыска водорода во впускные каналы) [11-14].

Применение водорода в качестве моторного топлива позволяет также повысить КПД и топливную экономичность двигателя с искровым зажиганием за счет более совершенного протекания рабочего процесса. Благодаря экстремально широким пределам обеднения и повышенной скорости сгорания водорода (и водородсодержащих топлив) двигатель может устойчиво работать на очень бедных смесях, в том числе с качественным регулированием нагрузки. В целом за счет более быстрого сгорания и качественного регулирования можно повысить индикаторный КПД двигателя до 52%, существенно улучшить топливную экономичность [15].

### **Проблемы, связанные с работой двигателя на водородсодержащем топливе**

Проблемы использования водородсодержащего топлива, связанные с организацией рабочего процесса:

#### **Детонация**

Детонация является наиболее критическим явлением аномального сгорания. Когда пламя распространяется по камере сгорания и несгоревшая смесь перед пламенем, называемая энд-газом, сжимается, что вызывает повышение его температуры, давления и химической активности, в связи с чем возникает, по-видимому, двух-стадийный термокинетический процесс, в котором относительно медленные холодно-пламенные реакции завершаются быстрым самовоспламенением. При этом происходит экстремально быстрое (взрывное) выделение большей части энергии содержащейся в энд-газе, ведущее к локальному повышению давления, которое возбуждает распространение волн давления по камере сгорания с частотами, совпадающими с частотами собственных колебаний камеры (5-10 кГц) [16-18].

#### **Калильное зажигание**

Калильное (поверхностное) зажигание, т.е. воспламенение топливовоздушной смеси перегретыми клапаном или свечей зажигания, раскаленным нагаром или другими горячими частями камеры сгорания, любым способом за исключением обычного искрового разряда. Любой процесс, который приводит к опережению начала сгорания по сравнению с оптимальным углом опережения зажигания (обеспечивающим максимальный крутящий момент), будет приводить к повышенному отводу тепла из-за увеличения давления и температуры сгоревшего газа.

#### **Обратные вспышки**

При разработке водородных двигателей с внешним смесеобразованием, наиболее часто упоминаемой проблемой являются обратные вспышки. В лучшем случае, они вызывают резкий хлопок и остановку двигателя из-за взрывного сгорания смеси во впускной системе до завершения наполнения и совершения полезной работы, в худшем случае - приводят к разрушению впускной системы. Влияние степени сжатия на возникновение обратной вспышки неоднозначно. С одной стороны, уменьшение степени сжатия увеличивает противодействие обратной вспышке благодаря понижению температуры камеры сгорания, с другой - увеличение степени сжатия ведет к росту отношения площади камеры сгорания к ее объему, увеличивая теплоотдачу и охлаждая остаточные газы. Кроме того, увеличение степени сжатия уменьшает количество остаточных газов. По-видимому, существует оптимальная степень сжатия, которая обеспечивает повышение мощности и КПД.

Причинами обратных вспышек обычно называют [19]:

- горячие точки в камере сгорания: нагар и частицы, свечу зажигания, остаточные газы, выпускные клапаны и т.п.
- остаточную энергию в цепи зажигания
- индукцию в проводах системы зажигания: в многоцилиндровых двигателях контролируемое зажигание в одном цилиндре может индуцировать зажигание в другом цилиндре, если индивидуальные провода системы зажигания расположены близко друг к другу;

- позднее сгорание в зазорах жарового пояса поршня, которое продолжается до момента открытия впускного клапана и воспламеняет свежий заряд.
- калильное зажигание: калильное зажигание часто происходит в водородных двигателях вследствие низкой энергии воспламенения и широких пределов воспламенения водорода.

#### **ДВС с внешним смесеобразованием**

Водород часто называют энергоносителем будущего. Идея использования его в чистом виде или в виде водородсодержащего топлива для двигателей внутреннего сгорания почти также стара, как сам двигатель [20].

Мощность двигателя с искровым зажиганием при работе на водороде зависит от способа смесеобразования. При более распространенном в автомобильных двигателях с искровым зажиганием внешнем смесеобразовании, когда топливо и воздух смешивают перед цилиндром во впускной системе, энергетические показатели значительно снижаются (до 40% и более) из-за уменьшения наполнения и пониженной объемной теплоты сгорания водородо-воздушной смеси. Системы сгорания, использующие внутреннее смесеобразование (впрыск водорода непосредственно в цилиндры двигателя) позволяют устранить этот недостаток внешнего смесеобразования [19,21].

#### **Непосредственный впрыск водородсодержащего топлива**

При внутреннем смесеобразовании, когда водород смешивают с воздухом прямо в цилиндре, можно существенно повысить мощность за счет улучшения процесса сгорания и повышения калорийности заряда [22].

Внутреннее смесеобразование обеспечивает лучшие энергетические показатели, полностью устраняет обратные вспышки и имеет высокий потенциал для обеспечения низких выбросов  $\text{NO}_x$  (особенно в диапазоне средних и больших нагрузок), устранения детонации и калильного зажигания.

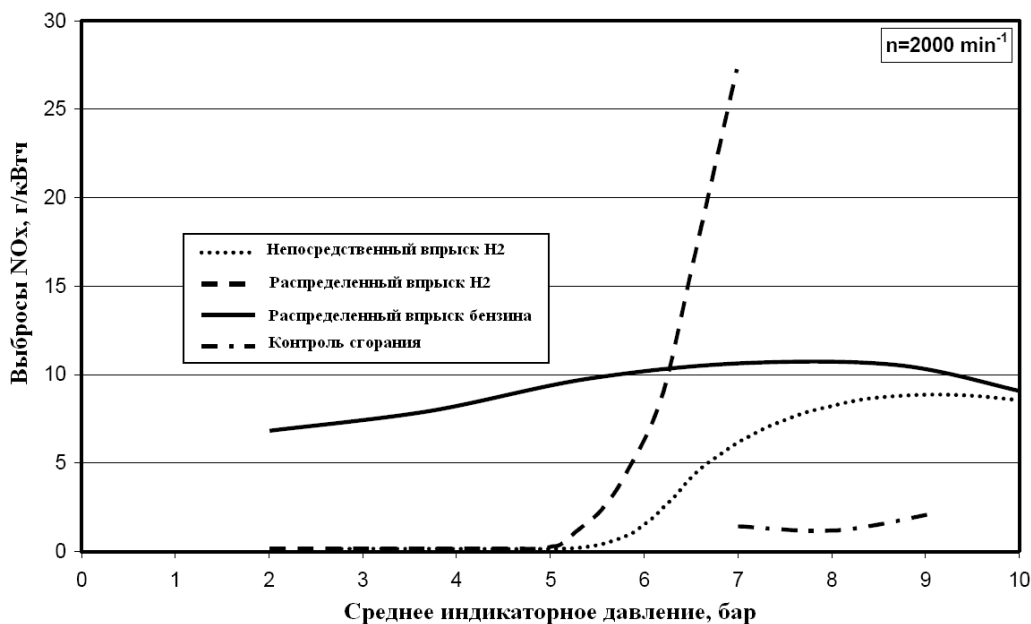
Для организации внутреннего смесеобразования, позволяющего достичь низкого уровня выбросов  $\text{NO}_x$ , устранить калильное зажигание и повысить энергетические показатели двигателя, представляется целесообразным использовать систему питания, обеспечивающую непосредственное впрыскивание водородсодержащего топлива с гибким контролем смесеобразования и сгорания путем регулирования момента и продолжительности впрыска топлива, чтобы обеспечить работу двигателя, как минимум, в двух основных операционных модах – со сгоранием гомогенной смеси и сгоранием расслоенной смеси. Для этого должны быть предусмотрены:

- на режиме холостого хода и очень малых нагрузок: работа на бедных гомогенных смесях водородсодержащего топлива и воздуха с  $\alpha \sim 3-5$  и дросселированием впуска для увеличения стабильности сгорания и уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$  и несгоревшего водорода (с количественным регулированием нагрузки);
- на режиме малых нагрузок: работа с полностью открытым дросселем на бедных гомогенных смесях с изменением  $\alpha$  в диапазоне от  $\sim 3-5$  до 1,8-2,2 (с качественным регулированием нагрузки) для уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$  и повышения индикаторного КПД;
- на режимах средних - больших нагрузок: работа на расслоенных смесях стехиометрического состава с дросселированием впуска (с количественным регулированием нагрузки) для обеспечения низких выбросов  $\text{NO}_x$  за счет эффективной работы нейтрализатора;
- на полной нагрузке: работа с полностью открытым дросселем на богатой расслоенной смеси с  $\alpha = 0,97$  для обеспечения высоких энергетических показателей.

При работе с непосредственным впрыском водорода начало впрыска оказывает доминирующее влияние на формирование смеси, процесс сгорания и, в конечном счете, на эффективность и вредные выбросы.

Непосредственный впрыск водородного топлива позволяет реализовать стратегию задержки начала впрыска для контроля выбросов  $\text{NO}_x$ . Использование на каждой нагрузке УНВ с наименьшим значением  $\text{NO}_x$  приводит к заметному снижению уровня вредных выбросов из двигателя, по сравнению с распределенным впрыском водорода во впускные каналы, или при работе на бензине, рисунок 1.

Более эффективная стратегия снижения выбросов  $\text{NO}_x$  на средних и больших нагрузках связана с контролем сгорания с помощью двойного впрыска топлива, когда первая доза водородного топлива подается рано на такте сжатия, а вторая доза впрыскивается во время процесса сгорания [23].

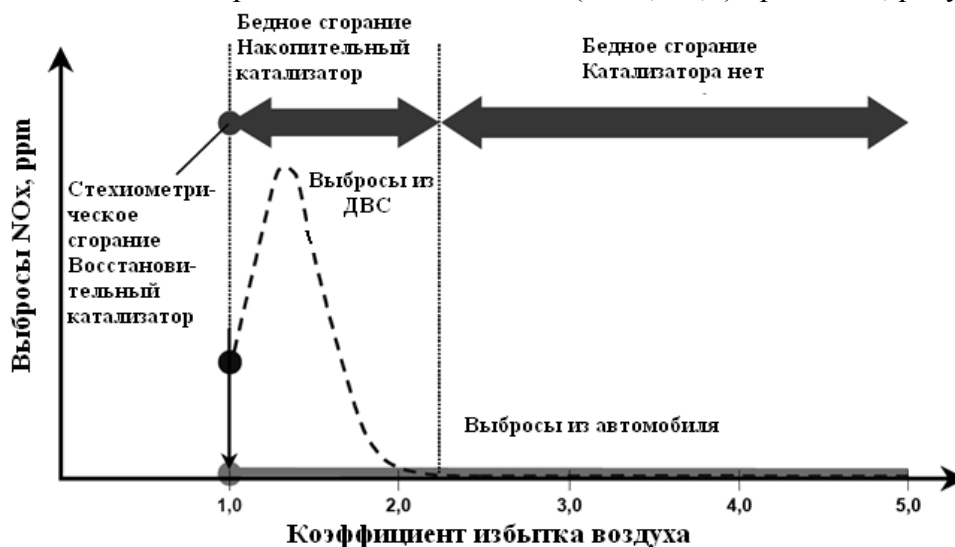


**Рисунок 1 – Выбросы  $\text{NO}_x$  с различными стратегиями контроля**

Первый впрыск приводит к формированию бедной хорошо гомогенизированной смеси, которая горит с пренебрежимо малым формированием  $\text{NO}_x$ . Оставшееся количество водорода, которое необходимо для достижения заданной нагрузки, подается непосредственно в течение фазы сгорания. Так как время для гомогенизации отсутствует, водородо-воздушная смесь сгорает на пределе обогащения с низкой температурой и медленным формированием оксидов азота. Как показано на рисунке 1, концепция двойного впрыска приводит к дальнейшему значительному снижению выбросов  $\text{NO}_x$  из двигателя.

Каталитической обработкой ОГ позволяет получить почти нулевые вредные выбросы.

Возможно также использовать накопительный катализатор в сочетании с работой двигателя на бедной смеси в полном диапазоне нагрузок. Другим возможным вариантом является восстановительный катализатор, который используется в сочетании со стехиометрическим сгоранием, когда заданный предельный состав смеси ( $\alpha = 1,8-2,2$ ) превышен, рисунок 2.



**Рисунок 2 – Операционные стратегии для достижения почти нулевых выбросов оксидов азота**

Решение в пользу одной из этих двух операционных стратегий требует проведения дальнейших исследований и будет зависеть от доступности соответствующей системы каталитической нейтрализации ОГ, от общей эффективности, которая может быть достигнута соответствующим вариантом стратегии, а также от технических характеристик системы непосредственного впрыскивания водородного топлива.

#### **Заключение**

Обзор и анализ современных отечественных и зарубежных исследований рабочих процессов и конструкций двигателей внутреннего сгорания с непосредственным впрыскиванием в цилиндр водородсодержащего топлива, сравнительная оценка вариантов возможных решений по таким двигателям, аналитические и патентные исследования, проведенные в ходе выполнения данной научно-исследовательской работы, показали, что наибольшим потенциалом улучшения экономических, экологических и энергетических показателей поршневых двигателей внутреннего сгорания, предназначенных для работы на автомобильном транспорте и в стационарных условиях, по сравнению с другими водородсодержащими топливами обладает водород.

Основные показатели двигателя, работающего на водородсодержащем топливе, существенно зависят от способа смесеобразования. Внутреннее смесеобразование обеспечивает лучшие энергетические показатели, полностью устраняет аномальное сгорание (обратные вспышки, калильное зажигание, детонацию) и имеет высокий потенциал для обеспечения низких выбросов  $\text{NO}_x$ , высокого индикаторного КПД.

Для организации внутреннего смесеобразования и сгорания в 4-тактном двигателе с искровым зажиганием, позволяющих достичь низкого уровня вредных выбросов с отработавшими газами, в том числе:

- снижения выбросов CO и CH с ОГ не менее 15%;
- сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  с ОГ не менее 20%;
- снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ ниже уровня базового двигателя, а также улучшения мощностных характеристик двигателя не менее чем на 25% по сравнению с внешним смесеобразованием и высокого уровня индикаторного КПД, необходимо использовать систему питания, обеспечивающую гибкий контроль смесеобразования и сгорания путем непосредственного впрыскивания водородсодержащего топлива.

Работа по созданию двигателя с непосредственным впрыском водородсодержащего топлива проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### **Литература**

1. Regulation (EC) № 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce  $\text{CO}_2$  emissions from light-duty vehicles, Official Journal of the European Union, L 140/1, 5.6.2009.
2. Regulation (EC) № 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. Official Journal of the European Union, L 171/1, 29.6.2007.
3. Кутенев В.Ф., Каменев В.Ф. «Вредные выбросы автомобильных двигателей, нормирование и методы измерений», М., 1999.
4. F. Shafer, R. van Basshuysen «Reduced Emission and Fuel Consumption in Automobile Engines», Springer – Verlag/ Wien, 1995.
5. Blarigan P.V. “Development of a Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine Designed for Single Speed/power Operation”, SAE Paper, № 961690, 1996.
6. Gallopoulos N.E. «Alternative Fuels for Reciprocating Internal Combustion Engines», материалы General Motors, 1977.
7. Мищенко А.М. «Применение водорода для автомобильных двигателей», Киев, 1984.
8. Хрипач Н.А. Лежнев Л.Ю. Сонкин В.И. Папкин Б.А. Шустров Ф.А. Иванов Д.А. Татар-

- ников А.П. "Создание двигателя с непосредственным впрыском водородсодержащего топлива" Современные проблемы науки и образования - 2011. -№6. (приложение "Технические науки"). (Электронный журнал) URL: <http://online.rae.ru/888> (дата обращения: 19.01.2012 г.).
9. Ипатов А.А., Кутенёв В.Ф., Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю., Артёмов А.А. "Разработка автомобилей с гибридной силовой установкой, работающей на водородных видах топлива" Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – Вып. №242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: сб. научн. ст. – М., 2009. – с. 26 – 66.
  10. Ипатов А.А., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю., Кириллов В.А., Папкин Б.А." Автономные системы выработки тепловой и электрической энергии на биотопливе " Энергия: экономика, техника, экология. - 2010. - № 3. - с. 6-12.
  11. Шатров Е.В., Раменский А.Ю., Кузнецов В.М. «Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензиноводородных смесях», Автомобильная промышленность, № 11, 1979.
  12. Каменев В.Ф., Корнилов Г.С., Хрипач Н.А. «Гибридное автотранспортное средство с энергетической установкой, работающей на водородном топливе», Альтернативная энергетика и экология, №2, 2004.
  13. G. Kiesgen, M. Klütting, C. Bock, H. Fischer «The New 12-Cylinder Hydrogen Engine in the 7 Series: The H<sub>2</sub> ICE Age Has Begun», SAE Paper, № 2006-01-0431, 2006.
  14. Jaura A. K., Ortmann W., Stuntz R., Natkin B., Grabowski T. «Ford's H<sub>2</sub>RV: An Industry First HEV Propelled with a H<sub>2</sub> Fueled Engine - A Fuel Efficient and Clean Solution for Sustainable Mobility», SAE Paper, № 2004-01- 0058, 2004.
  15. Tang X., Kabat D.M., Natkin R.J., Stockhausen W.F., Heffel J. «Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development», SAE Paper, № 2002-01- 0242, 2002.
  16. Воинов А.Н. «Сгорание в быстроходных поршневых двигателях» М. "Машиностроение", 1977.
  17. Ozdor N., Dulger M., Sher E. «Cyclic Variability in Spark Ignition Engines: A Literature Survey», SAE Techn.Pap. Ser., № 940987, 1994.
  18. Heywood J.B., «Internal Combustion Engine Fundamentals», McGraw-Hill, Inc., 1988.
  19. Verhelst S., Sierens R., Verstraeten S. «A Critical Review of Experimental Research on Hydrogen Fueled SI Engines», SAE Paper, № 2006-01-0430, 2006.
  20. Erren R.A. «Der Erren-Wasserstoffmotor», Automobiltechnische Zeitschrift 41, Heft 19, 1939.
  21. Messner D., Wimmer A., Gerke U., Gerbig F. « Application and Validation of the 3D CFD Method for a Hydrogen Fueled IC Engine with Internal Mixture Formation», SAE Paper, № 2006-01-0431, 2006.
  22. Kim J.I.M., Kim Y.T., Lee J.T., Lee S.Y. «Performance Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System», SAE Paper, № 952498, 1995.
  23. Wimmer A., Wallner T., Ringler J., Gerbig F. « H<sub>2</sub>-Direct Injection – A Highly Promising Combustion Concept», SAE Paper, № 2005-01- 0108, 2005.

**Системы электроснабжения АТС с интеллектуальными алгоритмами, обеспечивающие повышение экологических и энергетических показателей**

к.т.н. Чернов А.Е., к.т.н. доц. Акимов А.В.  
МГТУ «МАМИ»

(495) 365-54-98, alexzander\_66@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрены "интеллектуальные" системы электроснабжения автотранспортных средств, использующие оптимальные алгоритмы работы, обеспечивающие снижение токсичности отработавших газов двигателя и расхода топлива двигателем на привод генераторной установки, стабильность напряжения в бортовой сети и заданное зарядное состояние аккумуляторной бата-