

УДК 621.433.2

В.Д. Савицкий, инж.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ НАРУШЕНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВОДОРОДНОГО ДВС

Реальной альтернативой традиционно применяемым моторным топливам является водород, использование которого позволяет одновременно решить как энергетическую, так и экологическую проблемы автомобильного транспорта. Водород, как топливо для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), обладает рядом особенностей, обусловленных его физико-химическими свойствами. Широкие концентрационные пределы и низкая энергия воспламенения, высокая скорость сгорания позволяют по-новому подойти к организации рабочего процесса ДВС, существенно улучшив топливную экономичность и снизив токсичность отработавших газов. В то же время эти свойства водорода ставят создателей водородных двигателей перед необходимостью решения проблемы нарушений рабочего процесса. Стабильность протекания рабочего процесса двигателя, питающегося водородом, нарушают два, как будет показано ниже, взаимосвязанных явления:

- воспламенение свежего заряда на такте впуска, именуемое специалистами обратной вспышкой;
- преждевременное воспламенение топливовоздушной смеси в процессе сжатия, или калильное зажигание.

Обратная вспышка проявляется в виде хорошо прослушиваемых хлопков во впускном коллекторе и практически всегда приводит к остановке двигателя. Исследователи, занятые вопросами создания водородного двигателя, единодушно указывают на то, что это нарушение рабочего процесса является следствием очень низкой энергии воспламенения водородовоздушной смеси, близкой по составу к стехиометрическому [1-4]. Различные гипотезы об источниках воспламенения свежего заряда, такие как наличие в камере сгорания перегретых конструктивных элементов и частиц нагара, пиролиз смазочного масла и другие, не получили убедительного экспериментального подтверждения.

Для выяснения причин обратной вспышки в ИПМаш НАН Украины были проведены экспериментальные исследования этого явления на полно-размерном двигателе ВАЗ и его одноцилиндровом модуле [5]. Оснащение двигателя индикаторами давления во впускном тракте, лепестковыми датчиками для регистрации направления распространения волны давления и датчиками угла поворота коленчатого вала позволило зафиксировать момент обратной вспышки, характер ее распространения во впускном коллекторе, выявить зависимость от скоростного

режима двигателя. Проведенные исследования дали возможность сделать вывод о том, что причиной обратной вспышки является воспламенение водородовоздушной смеси от горячих остаточных газов в период перекрытия впускного и выпускного клапанов. С экспериментальными исследованиями достаточно хорошо согласуются результаты теоретического расчета по математической модели, базирующейся на кинетическом механизме теплового взрыва водорода в воздухе [5].

Полученные результаты дали основания предполагать, что предупреждение обратной вспышки может быть осуществлено путем предварительного охлаждения остаточных газов, либо путем охлаждения водородовоздушной смеси в процессе впуска, или снижением ее реакционной способности. Практическая реализация этих путей осуществляется одним из следующих способов: рециркуляция отработавших газов, впрыск воды в цилиндр или во впускной коллектор, подача водорода при низких температурах и цикловая подача топлива с запаздыванием относительно момента открытия впускного клапана. Перечисленные способы, оцененные экспериментально, оказались либо малоэффективными, либо требующими для своей реализации применения сложных технических устройств [5].

В качестве альтернативы перечисленным методам предотвращения обратной вспышки был предложен способ работы ДВС [6], при котором водород под давлением, регулируемым в зависимости от режима работы двигателя, подается по трубке во впускной коллектор в зону впускного клапана на некотором расстоянии от него. При закрытом впускном клапане приток воздуха во впускной коллектор отсутствует, а оставшийся в коллекторе воздух вытесняется поступающим под давлением водородом. Тем самым обеспечивается образование в районе впускного клапана со стороны коллектора зоны со смесью, в которой содержание водорода превышает верхний предел (более 74% по объему) воспламенения водородовоздушных смесей. В результате этого, в начале впуска в цилиндр поступает только богатая водородом невоспламеняющаяся смесь, которая снижает температуру остаточных газов. Последующее заполнение цилиндра и формирование топливовоздушной смеси происходит при температуре газа в цилиндре, не превышающей температуру воспламенения водородовоздушной смеси.

Такой способ борьбы с обратной вспышкой не ухудшает технико-экономические показатели водо-

родного двигателя и не требует для своей реализации сложных технических устройств. Работа конвертированного двигателя по описанному способу обеспечивается заменой штатного впускного коллектора на специальный, основные конструктивные параметры которого могут быть получены из полуэмпирических зависимостей [7]:

$$L = 1,273 \frac{(0,491 \dots 0,631) \cdot V_{hc} (1 - \frac{\varphi_{en}}{720}) (\frac{2}{3} + \frac{1}{3}i) - V_{en, гол.}}{D^2}; \quad (1)$$

где L – минимально необходимая длина воздушного патрубка, м;

V_{hc} – рабочий объем цилиндра, м³;

φ_{en} – продолжительность фазы впуска, град. п.к.в.;

i – число воздушных патрубков, объединенных в один коллектор;

$V_{en, гол.}$ – объем впускного тракта в головке цилиндра, м³;

D – диаметр воздушного патрубка, м;

$$l = \frac{L}{(10 \dots 13)}, \quad (2)$$

где l – расстояние от выходного торца водородоподводящей трубки до присоединительного фланца, м;

$$\frac{D^2}{D_1^2} = 3 \dots 4, \quad (3)$$

где D_1 – диаметр водородоподводящей трубки, м.

Подсчитанные по выражениям (1), (2), (3) и уточненные экспериментально параметры специальных впускных коллекторов для двух типов двигателей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Определяющие конструктивные параметры специальных впускных коллекторов

Двигатель	L, мм	l, мм	D ₁ , мм
ВАЗ – 2106	300	26	17
УМЗ – 417	320	27,8	19

Эти двигатели и их модификации (ВАЗ-2101, УМЗ-451МП и ЗМЗ – 402) работали на водороде устойчиво, причем во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала и коэффициента избытка воздуха.

В процессе работы по поиску альтернативных способов подавления обратной вспышки была предпринята попытка существенного снижения температуры остаточных газов путем изменения параметров номинального режима водородного двигателя. Для этого были проведены теоретические исследования влияния соотношения между степенью сжатия (ϵ) и коэффициентом избытка воздуха (α) на основные индикаторные показатели водородного ДВС [8]. Цикл расчетов рабочего процесса предусматривал изменение ϵ от 6,7 до 15 и α от 1,0 до 1,7. Как пока-

зали расчеты для двигателя ВАЗ-2106 (с учетом экспериментальных данных по обратной вспышке), при одновременном повышении степени сжатия и коэффициента избытка воздуха до величин $\epsilon=11,35$ и $\alpha=1,217$ среднее индикаторное давление остается таким же, как у исходного варианта (при $\epsilon=8,5$, $\alpha=1,0$). При этом несколько возрастает максимальное давление цикла, но зато повышается индикаторный КПД, снижаются максимальная температура цикла и температура продуктов сгорания. Причем последняя – до величины, при которой обратная вспышка не возникает. Такой подход дает еще один [10], наряду с описанным выше, способ решения проблемы возникновения обратной вспышки в водородном ДВС.

Следует отметить, что существенное увеличение степени сжатия (до $\epsilon=11,0$ и выше) приводит к необходимости разработки специальной головки цилиндров для водородного двигателя. Но и небольшое увеличение ϵ , достигнутое доработкой (фрезерованием) штатной головки, приводит к снижению температуры продуктов сгорания и в сочетании с описанным выше способом [6] существенно упрощает задачу подавления обратной вспышки при одновременном улучшении показателей водородного ДВС.

При увеличении степени сжатия приобретает актуальность вопрос о детонационной стойкости водородовоздушных смесей. Допустимая степень сжатия при работе двигателя на смеси водорода с воздухом стехиометрического состава, оцененная разными исследователями, находится в пределах от 4 до 14. Такой разброс результатов можно объяснить отсутствием единой методики оценки этого показателя и попыткой использовать для определения детонационной стойкости водорода шкалу октановых чисел. Так, некоторые исследователи считали началом детонации появление высокочастотных колебаний давления с минимальной амплитудой при отсутствии характерного стука. Мы же за отправную точку при фиксировании детонации взяли начало акустических явлений, которые, в отличие от бензинового двигателя, ощущаются на слух не как звон, а в виде треска, т.е. являются более низкочастотными. При этом, исходя из частоты распространения волны давления в камере сгорания, проявляющейся в виде зубцов на линии давления индикаторной диаграммы, была подсчитана скорость распространения ударной волны, которая составила около 680 м/с. Эта величина значительно ниже скорости ударной волны при детонации, которая, как известно, оценивается величиной 2000...4000 м/с. Таким образом, принимать сгорание водородовоздушной смеси, сопровождающееся колебаниями на линии давления индикаторной диаграммы, за сгорание с детонацией, нет достаточных оснований. Подобное сгорание, вероятно, следу-

ет рассматривать как результат высокой скорости распространения фронта пламени. Очевидно, что для получения полной информации о детонационной стойкости водородовоздушных смесей, необходимо провести более глубокие исследования. Нам же удалось обеспечить длительную работу (не менее 10 мин) без слышимых проявлений детонационноподобного сгорания при стехиометрическом соотношении водорода и воздуха в двигателе с достаточно большим диаметром цилиндра (ЗМЗ-402) при степени сжатия, равной 9.

Как отмечалось выше, еще одним серьезным нарушением стабильности протекания рабочего процесса водородного двигателя является преждевременное воспламенение топливовоздушной смеси в процессе сжатия, или калильное зажигание. Это нарушение проявляется при работе двигателя на водородовоздушных смесях, близких по составу к стехиометрическому, и приводит к резкому падению мощности. Затем уже через самое непродолжительное время (не более 1с) во впускном коллекторе появляются обратные вспышки, что является причиной остановки двигателя. Такая взаимосвязь двух нарушений рабочего процесса водородного ДВС объясняется увеличением температуры продуктов сгорания при калильном зажигании, что приводит к воспламенению свежей смеси в период перекрытия клапанов.

Как уже отмечалось, повышение степени сжатия значительно упрощает подавление обратной вспышки из-за снижения температуры продуктов сгорания. Но одновременно с этим растет максимальная температура цикла, вследствие чего в камере сгорания появляются высокотемпературные источники со среднецикловой температурой выше 650...700 °С, способные воспламенить водородовоздушную смесь на линии сжатия. С этим явлением мы столкнулись при первых же попытках увеличения степени сжатия двигателя и, в качестве средства борьбы с ним вначале была выбрана тщательная подготовка камеры сгорания, а именно: устранение царапин, острых кромок и снятие нагара (если двигатель до конвертирования работал на бензине). Эти мероприятия, как и применение холодных свечей, практически не дали положительного эффекта. Первые обнадеживающие результаты были получены при замене свечей зажигания с длиной резьбовой части 19 мм на укороченные (14 мм). В этом случае свеча, находясь в нише, меньше разогревалась в процессе выгорания рабочей смеси, а благодаря низкой энергии и широким концентрационным пределам воспламенения обеспечивалось надежное сгорание бедной водородовоздушной смеси. И уже следующим шагом, который позволил полностью устранить калильное зажигание, явилось использование свечей со стандартной длиной резьбовой части, в которых боковым электродом является корпус свечи при от-

сутствии конструктивных элементов, выступающих над поверхностью камеры сгорания. В качестве примера можно привести свечи ВU8Н фирмы NGK, которые мы использовали при конвертировании на питание водородом двигателя ЗМЗ-402.

Таким образом, разработанным комплексом мероприятий по предотвращению нарушений рабочего процесса водородного ДВС предусматривается:

- установка на конвертируемый двигатель специального впускного коллектора, обеспечивающего подавление обратной вспышки;
- увеличение степени сжатия, снижающее требования, предъявляемые к подбору параметров впускного коллектора, и улучшающее эффективность рабочего процесса на номинальном и других режимах эксплуатации двигателя;
- использование свечей зажигания, в которых отсутствуют конструктивные элементы, выступающие над поверхностью камеры сгорания, благодаря чему устраняется калильное зажигание.

Список литературы:

1. Watson H.C., Milkins E.E., Deslandes J.V. *Efficiency and emission of a hydrogen or methane fuelled spark-ignition engine* // 15th FISITA Congress, Paris, 1974. – paper B.1.9. 2. Furuhashi S., Yamane K. *Combustion characteristics of hydrogen-fuelled spark ignition engine* // *Bul. ISAE*. – 1974. – №6. – P. 1-10. 3. Escher W.J.D. *Survey and assessment of contemporary US hydrogen – fuelled internal combustion engine projects* // 10th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf. – New-York. – 1975. – P. 1143-1155. 4. Furuhashi S., Hiruma M., Enomoto Y. *Development of a liquid hydrogen car* // 1st World Hydrogen Energy Conf. Proc. – 1976. Vol.3. – P. 6c-27-6c-58. 5. Мищенко А.И., Савицкий В.Д., Байков В.А. *Новый способ работы поршневого двигателя с искровым зажиганием на водороде* // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология*. – 1987. – Вып.3. – С. 33-37. 6. А.с. 1206458 СССР, МКИ F 02 В 43/08. *Способ работы двигателя внутреннего сгорания* / Мищенко А.И., Куценко А.С., Савицкий В.Д., Байков В.А., Тихоненко Н.С. – №3772572/25-06; Заявл. 18.07.84; Опубл. 23.01.86, Бюл. №3. – 2с. 7. А.с. 1401958 СССР, МКИ F 02 В 43/08. *Четырехтактный двигатель внутреннего сгорания* / Мищенко А.И., Байков В.А., Савицкий В.Д. – №4107036/25-06; Заявл. 18.08.86; Опубл. 17.01.88, Бюл. №2. – 3с. 8. Куценко А.С., Савицкий В.Д., Байков В.А. *Применение водорода в качестве топлива для поршневых двигателей с искровым зажиганием* // *Проблемы машиностроения*. – 1998. – Т.1. – №3-4. – С. 141-145. 9. Пат. 2006607 Российской Федерации, МКИ F 02 В 43/08. *Способ конвертирования двигателя внутреннего сгорания* / Савицкий В.Д., Куценко А.С., Байков В.А., Тихоненко Н.С. – 4707389/06; Заявл. 20.07.89; Опубл. 30.01.94, Бюл. №2. – 3с.