

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВАНКЕЛЯ С ДОБАВКАМИ ВОДОРОДА

*Е.А. Федянов, д.т.н., проф., Ю.В. Левин, аспирант,
Е.А. Захаров, к.т.н., Е.М. Иткис к.т.н.,
Волгоградский государственный технический университет*

Выполнено математическое моделирование процесса распространения пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя Ванкеля. Проведено теоретическое исследование влияния добавок водорода на процесс сгорания топлива в двигателе ВАЗ-311. На основе полученных результатов показана возможность повышения полноты сгорания основной бензовоздушной смеси в РГД Ванкеля за счет добавок водорода.

Роторно-поршневые двигатели (РПД) Ванкеля обладают по сравнению с обычными поршневыми двигателями внутреннего сгорания лучшими массогабаритными показателями, уравновешенностью и металлоемкостью, однако им свойственны несколько больший эксплуатационный расход топлива и повышенное содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах. Одна из основных причин указанных недостатков состоит в неполном выгорании топливовоздушной смеси вблизи задней по ходу вращения вершины ротора. Распространению фронта пламени в эту периферийную область камеры сгорания препятствует однонаправленное движение заряда, обусловленное вращением ротора [1]. Установка двух свечей зажигания позволяет снизить неполноту сгорания топлива, но на всех режимах работы двигателя полностью ее не устраняет.

Можно предполагать, что неполнота сгорания топлива уменьшится, если повысить скорость распространения фронта пламени в камере сгорания РПД. Одним из способов повышения скорости распространения фронта пламени в бензовоздушных смесях является, как показывают исследования [2, 3], добавка к этим смесям водорода. Представляет интерес оценить возможность применения названного способа для решения проблемы недогорания бензовоздушной смеси в камере сгорания РПД Ванкеля.

Теоретическое исследование влияния добавок водорода на скорость и полноту сгорания топлива в РПД было выполнено на основе математического моделирования процесса распространения пламени. Скорость распространения турбулентного



пламени определялась на основе так называемой модели «погружения», в которой предполагается, что движение передней границы зоны горения полностью определяется характеристиками турбулентности в набегающем потоке свежей смеси, а сгорание в охваченном пламенем объеме свежей смеси происходит в многочисленных ламинарных фронтах по поверхностному механизму. Рассматривалось движение фронтов пламени от двух свечей зажигания как в продольном относительно ротора, так и в поперечном направлениях. При моделировании пространство камеры РПД разделялось на пять зон: три зоны исходной топливовоздушной смеси и две зоны продуктов сгорания. Уравнения сохранения энергии и уравнения состояния для каждой из зон решались совместно с уравнением сохранения массы и уравнением объемов. Кроме того, система уравнений включала формулы для вычисления текущей геометрии камеры сгорания, теплофизических свойств рабочего тела, параметров турбулентности и длительности выгорания топлива в турбулентных зонах, «погруженных» во фронт пламени. Достаточно подробное описание разработанной в

Волгоградском ГТУ математической модели процесса распространения пламени в камере сгорания РПД Ванкеля дано в работах [4, 5].

Для того чтобы учесть влияние добавок водорода, в математическую модель были внесены изменения в формулы для определения теплофизических характеристик топливоздушной смеси и продуктов сгорания. Были использованы экспериментальные данные [6, 7] о значениях нормальной скорости распространения ламинарного пламени в бензовоздушных и водородовоздушных смесях. Для определения нормальной скорости распространения ламинарного пламени w_{nm} в бензовоздушной смеси с различными по массе добавками водорода использовался принцип аддитивности:

$$w_{nm} = w_{нСН} \cdot (1 - g_{H_2}) + w_{нH_2} \cdot g_{H_2},$$

где $w_{нСН}$, $w_{нH_2}$ — нормальные скорости пламени для бензина и чистого водорода; g_{H_2} — величина добавки водорода (по массе).

Возможность применения принципа аддитивности доказана результатами экспериментов, приведенных в работе [7].

Проведенные расчеты [8] показали, что за счет добавок водорода можно существенно снизить, а в отдельных случаях полностью исключить недогорание топливоздушной смеси вблизи задней вершины ротора. При этом полное выгорание топлива удастся обеспечить не только в смесях стехиометрического состава, но и в обедненных смесях. В подтверждение этого тезиса на рис. 1 показано, как в зависимости от количества добавленного водорода распространяются по отношению к передней и задней вершинам ротора фронты пламени, инициированные двумя свечами зажигания. Расчет выполнен применительно к двигателю ВАЗ-311 со степенью сжатия 9. Режим работы соответствовал полному открытию дроссельной заслонки ($\varphi_{др} = 100\%$) при частоте

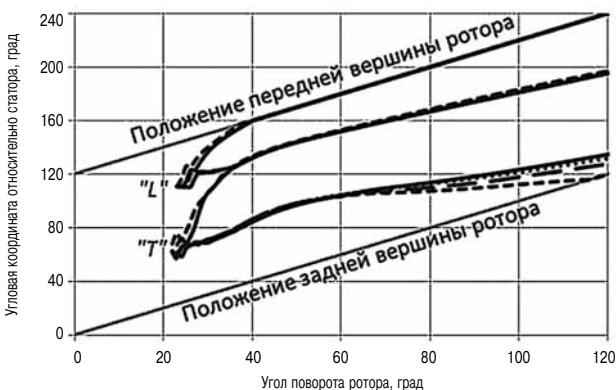


Рис. 1. Распространение фронтов пламени от двух свечей зажигания в зависимости от добавки водорода ($\alpha = 1,1$, $n = 2000$ об/мин, $\varphi_{др} = 100\%$):
— 0 %;10 %; — — —20 %; - - - - -30 %

вращения эксцентрикового вала $n = 2000$ об/мин. Коэффициент избытка воздуха равен 1,1. Угол опережения зажигания для свечи «L» $\theta_L = 26$ град поворота эксцентрикового вала (ПЭВ) до ВМТ, угол опережения зажигания для свечи «T» $\theta_T = 30$ град ПЭВ до ВМТ.

Как видно из рис. 1, при добавке 20 % водорода (по массе) наблюдается заметное уменьшение неполноты сгорания топлива вблизи задней вершины ротора, а при добавке 30 % водорода и более фронт пламени достигает задней вершины ротора до завершения рабочего такта. При этом добавка водорода почти не сказывается на скорости распространения пламени в направлении передней вершины ротора. Это обусловлено тем, что в направлении передней вершины ротора скорость распространения пламени определяется, главным образом, скоростью направленного движения заряда в камере сгорания.

Результаты расчетов показывают, что влияние добавки водорода на полноту сгорания топлива вблизи задней вершины ротора зависит от величины коэффициента избытка воздуха в бензовоздушной смеси. На рис. 2 для режима работы РПД с частотой вращения эксцентрикового вала $n = 2000$ об/мин показано изменение в зависимости от величины добавки водорода продолжительности процесса распространения пламени от свечи зажигания «T» до задней вершины ротора при разных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Максимальное значение интервала времени, за которое фронт пламени достигает задней вершины ротора до конца рабочего такта, составляет 25 мс. Крайние левые точки кривых на рис. 2 показывают (для разных значений α) количество необходимой добавки водорода, при которой достигается полное сгорание топлива. Так, например, для полного сгорания бензовоздушной смеси стехиометрического состава ($\alpha = 1$) необходима добавка водорода в 23 %, а для полного сгорания обедненной смеси с $\alpha = 1,2$ — добавка в 30 %.

Анализ результатов моделирования, выполненного в пределах изменения частоты вращения экс-

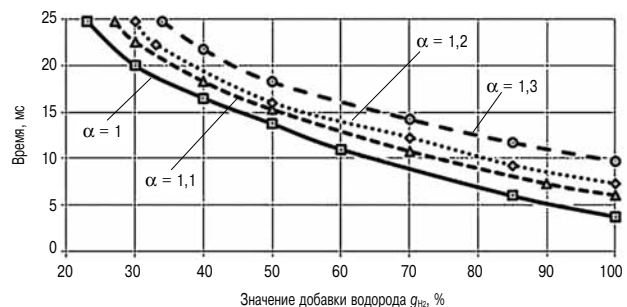


Рис. 2. Время прохождения фронта пламени до задней вершины ротора ($n = 2000$ об/мин) при различных значениях α

центрикового вала от 2000 до 5000 об/мин и в диапазоне изменения степени открытия дроссельной заслонки от 10 до 100 %, показывает, что оба указанных режимных фактора влияют на величину необходимой добавки водорода для полного сгорания топлива в РПД.

Влияние частоты вращения на величину добавки водорода для полного сгорания топливовоздушной смеси в РПД показано на рис. 3. Как видно, величина добавки водорода линейно увеличивается с ростом частоты вращения эксцентрикового вала. Например, для смеси стехиометрического состава при $n = 5000$ об/мин величина добавки водорода в 3 раза больше, чем при $n = 2000$ об/мин. Это можно объяснить тем, что при повышении частоты вращения увеличивается скорость движения заряда в камере сгорания относительно статора, препятствующая распространению фронта пламени в сторону задней вершины ротора.

При работе двигателя по нагрузочной характеристике (рис. 4) наибольшее значение минимально необходимой добавки водорода наблюдается на режиме максимальной нагрузки. Так, например, для смеси стехиометрического состава при $\varphi_{др} = 10\%$ величина добавки водорода в 1,5 раза меньше, чем при $\varphi_{др} = 100\%$. На малых нагрузках из-за повышенной доли остаточных газов снижается ламинарная скорость горения. Добавка водорода позволяет в значительной мере повысить

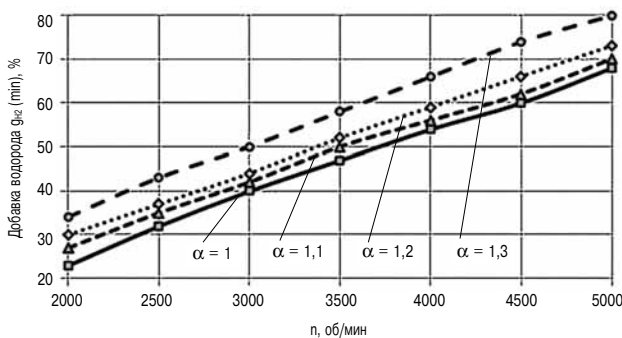


Рис. 3. Зависимость добавки водорода от частоты вращения эксцентрикового вала двигателя ($\varphi_{др} = 100\%$)

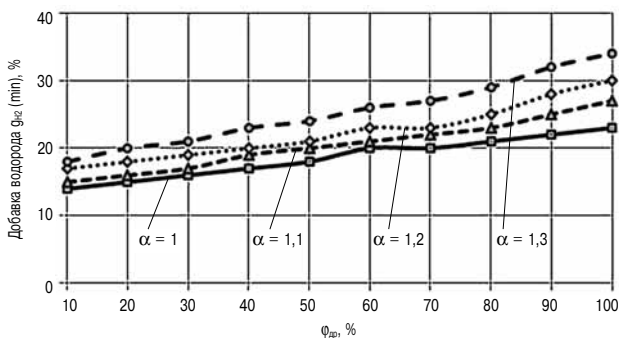


Рис. 4. Зависимость добавки водорода от положения дроссельной заслонки ($n = 2000$ об/мин)

ламинарную скорость распространения пламени в топливовоздушной смеси. Однако при больших степенях открытия дроссельной заслонки начинает сказываться снижение скорости распространения ламинарного пламени вследствие роста среднего давления в ходе процесса сгорания. На режиме максимальной нагрузки влияние коэффициента избытка воздуха на величину добавки водорода усиливается.

Таким образом, величина минимально необходимой добавки водорода меняется в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов, причем скоростной режим оказывает существенно большее влияние.

Полученные результаты моделирования процесса распространения пламени показали, что за счет добавки водорода к основной бензовоздушной смеси можно устранить неполноту сгорания топлива в камере сгорания РПД и улучшить топливно-экономические и экологические характеристики этих двигателей.

Литература

1. Зиновьев И.В. Особенности процесса сгорания и организация расслоения заряда в роторно-поршневых двигателях / И.В. Зиновьев, Е.В. Шатров // Автомобильная промышленность. — 1980. — № 12. — С. 7–10.
2. Фомин В.М. Автомобильный двигатель, работающий на смешанном топливе бензин-водород / В.М. Фомин, В.Ф. Каменев, Н.А. Хрипач // АГЗК + Альтернативные топлива. — 2006. — № 1. — С. 72–77.
3. Злотин Г.Н. Влияние добавок водорода в бензовоздушную смесь на формирование начального очага горения в ДВС с искровым зажиганием / Г.Н. Злотин // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 1 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2008. — № 6 (44). — С. 77–80.
4. Моделирование индикаторного процесса роторно-поршневого двигателя с фазированным впрыском топлива / Г.Н. Злотин, Е.М. Иткис, Е.А. Федянов, С.Г. Черноусов // Двигателестроение. — 2002. — № 3. — С. 24–26.
5. Злотин Г.Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля: монография / Г.Н. Злотин, Е.А. Федянов; ВолгГТУ. — Волгоград, 2010. — 119 с.
6. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд./Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1989. — 672 с.
7. Экспериментальные исследования процесса сгорания пропан-бутановоздушных смесей с добавками водорода / Е.А. Федянов, Е.А. Захаров, Ю.В. Левин, Д.С. Гаврилов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2013. — № 2. Вып. 2. — С. 111–116.
8. Левин Ю.В. Влияние добавки водорода на процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля / Ю.В. Левин, Е.А. Захаров, Е.А. Федянов // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2013. — № 12 (115). — С. 35–36.