

## Краткие сообщения

03

### Об использовании водорода в качестве топлива для двигателей в энергетическом цикле удаленных производственных объектов

© М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, А.Е. Смыгалина, В.М. Зайченко

Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: alexeykiverin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 28 марта 2017 г.)

Представлен подход к использованию водорода в качестве топлива, обеспечивающего бесперебойную работу автономных энергетических систем, использующих возобновляемые энергоресурсы (ветряные или солнечные энергоустановки) со стохастическим режимом выработки электроэнергии. Методами математического моделирования показана принципиальная возможность реализации бездетонационного сжигания водорода путем добавления экологически чистых присадок или малого процентного содержания метана.

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45499.2271

Актуальной проблемой освоения природных ресурсов является организация работ в удаленных регионах, где в отличие от обжитых территорий не решены вопросы обеспечения жизнедеятельности и в первую очередь задача энергоснабжения. Недоступность получения энергии от глобальных электрических сетей в таких местностях делает наиболее эффективным, а иногда и единственно возможным использование возобновляемых источников энергии. Однако серьезным недостатком такого вида энергоисточников, как правило, является присущая им нестабильность выработки энергии во времени (ярким примером являются ветряные электростанции, функционирующие только при достаточном ветровом давлении). В связи с этим возникает необходимость включения в систему бесперебойного энергоснабжения эффективных накопителей выработанной ранее избыточной энергии. Традиционные подходы к накоплению энергии в мощных аккумуляторных батареях характеризуются относительно высокой ценой и малой для длительного накопления энергии емкостью. В связи с этим интерес представляет поиск альтернативных накопителей энергии, из числа которых наиболее перспективным в настоящее время представляется водород [1]. Анализ показывает, что разрабатываемые альтернативные подходы к аккумулированию энергии особенно существенны для мест, отдаленных от магистральных линий распределения энергии, причем в этом случае характерны ситуации, когда до востребования запасенной энергии проходит достаточно продолжительное время, и в таком случае аккумулирование энергии в виде запасов производимого водорода оказывается более предпочтительным по сравнению с сохранением ее в электротехнических аккумуляторах [2]. Один из подходов заключается в выработке водорода за счет электролиза воды, осуществляемого посредством энергии

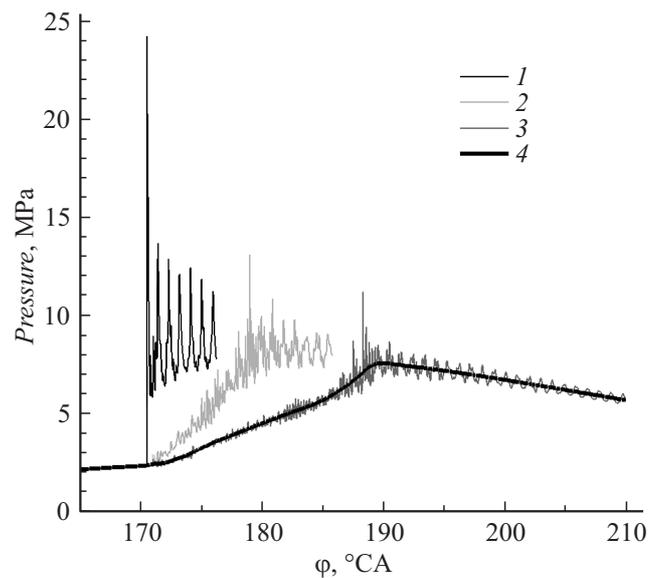
возобновляемых источников [3]. Далее водород можно хранить длительное время и использовать как топливо в двигателе с искровым зажиганием, который в свою очередь может служить приводом электрогенератора или другой технической системы. При этом вопрос о КПД предлагаемой энергетической системы в данном случае не является столь же актуальным, как для обжитых районов, так как задача оптимизации затрат на единицу выработанной электроэнергии в данном случае заменяется задачей обеспечения бесперебойного энергоснабжения. Заметим, с другой стороны, что в настоящей работе водород в системе выработки электроэнергии мы рассматриваем только как топливо двигателя для электрогенератора, не касаясь проблемы использования водорода в той же энергетической системе как наполнителя топливных элементов. Это объясняется меньшей актуальностью в настоящее время второго подхода как значительно более экономически затратного.

Водород как топливо обладает рядом преимуществ: он имеет большую удельную теплоту сгорания в воздухе по сравнению с другими существующими жидкими и газообразными топливами, его достаточно легко накапливать, хранить и транспортировать [4]. В то же время водород обладает малой детонационной стойкостью, что является существенным препятствием к его широкому использованию, так как детонация может приводить к быстрому износу и разрушению двигателя из-за возникновения больших скачков давления. Настоящая работа имеет своей целью рассмотреть подходы по предотвращению детонации и повышению детонационной стойкости водородно-воздушной топливной смеси при ее использовании в камерах сгорания газопоршневых двигателей. Особенность рассматриваемых подходов заключается в использовании только небольших добавок химически неактивных или слабоактивных компонент к

базовой водородно-воздушной смеси, что отличает эти подходы от широко обсуждаемых подходов к созданию эффективного топлива, в котором водород используется как малая добавка к традиционным углеводородным топливам. В качестве добавок рассмотрены: (1) метан, (2) водяной пар, (3) воздух. Метан является достаточно традиционной добавкой к топливным водородосодержащим смесям. Однако, поскольку идеальным в случае удаленных пользователей был бы полный отказ от привлечения сторонних (требующих специальной доставки к объекту) горючих компонент, исследуются также возможности использования в качестве добавки продуктов горения — водяного пара, или в качестве топлива — бедных водородно-воздушных смесей. Настоящая работа имеет своей целью определить минимальные добавки метана, пара либо воздуха, которые обеспечили бы бездетонационное горение. Также представляет интерес определить, могут ли альтернативные добавки обеспечить такие же режимы и характеристики сгорания, что и при сгорании метана. Кроме того, проводится сравнение использования трех выбранных видов добавок, взятых в больших количествах по сравнению с минимальными, обеспечивающими бездетонационное горение, по основным количественным характеристикам динамики работы двигателя.

Примем следующую постановку задачи. Будем рассматривать сжигание топливно-воздушной газообразной смеси заданного состава в цилиндрической камере с типичными для газопоршневого двигателя геометрическими размерами: высота цилиндра 0.14 м, радиус 0.065 м, объем цилиндра 1.86 л. Степень сжатия была выбрана равной 11.4, угловая скорость вращения коленчатого вала — 1500 rpm. Начальный момент времени в расчетах соответствовал углу поворота коленчатого вала  $0^\circ$ , верхняя мертвая точка (в.м.т.) —  $180^\circ$ , а конец фазы расширения —  $360^\circ$  (полный цикл). Зажигание смеси осуществлялось во всех расчетах при  $170^\circ$ . Мощность источника зажигания составляла 20 кДж/кг/с, длительность импульса зажигания — 12 мкс. Стенки камеры и поршня предполагались гладкими. Процесс рассчитывался без учета тепловых потерь на стенках камеры. Составы смесей задавались следующим образом:  $(29.5 - y)\% \text{ H}_2$ ;  $y\%$  добавки; 70.5% воздух (состав смесей здесь и далее задается в процентах от удельного объема). В качестве базовой смеси была выбрана стехиометрическая водородно-воздушная смесь. Значение процентного содержания добавки  $y$  варьировалось от 0 до 3.5–8% в зависимости от типа добавки.

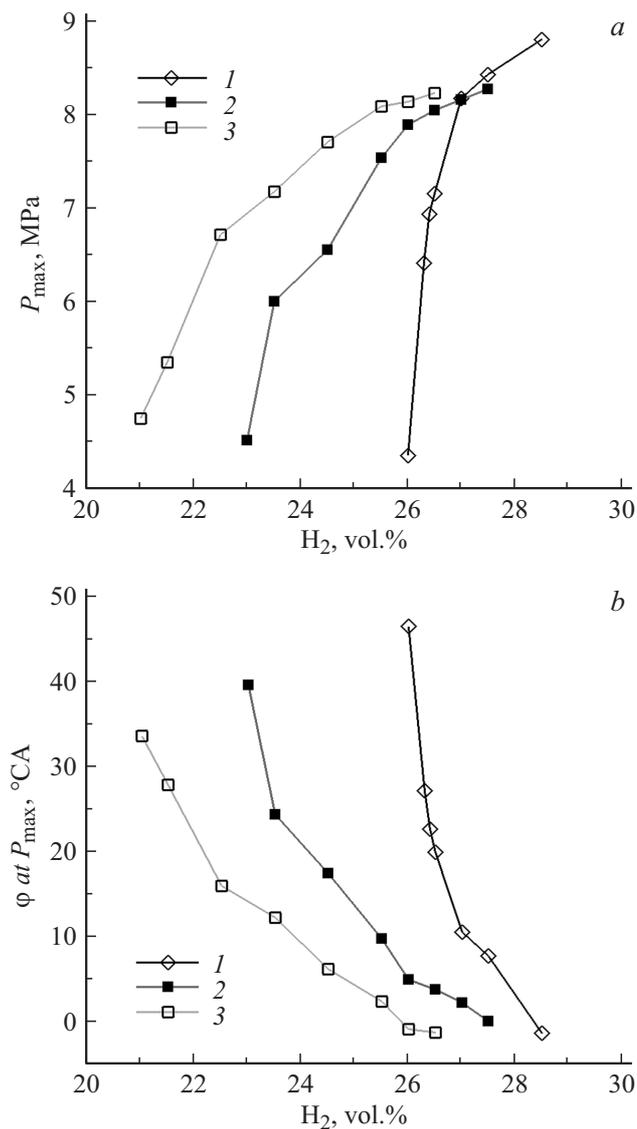
Газодинамика среды описывалась в рамках двумерной модели, построенной на основе системы уравнений Навье–Стокса для сжимаемой вязкой среды с учетом теплопроводности, многокомпонентной диффузии и энерговыделения за счет химических реакций. Численное моделирование реализовывалось с применением хорошо зарекомендовавшего себя при расчете многомерных реагирующих потоков модифицированного лагранжево-эйлерового метода, имеющего второй



**Рис. 1.** Индикаторные диаграммы для смесей с добавками пара 1.0 (1), 2.0 (2) и 4.0% (3). Для 4.0% приведена также усредненная по высокочастотным колебаниям давления кривая (4).

порядок точности по пространству и обеспечивающего устойчивое решение широкого класса задач воспламенения, горения и детонации [5], включая развитие горения и „стук“ в камерах двигателей внутреннего сгорания [6]. Для расчета кинетики горения водородно-воздушных смесей и смесей с добавлением метана использовалась редуцированная кинетическая схема NUI Galway [7], показавшая наилучшие результаты расчета горения в интересующем нас диапазоне составов и состояний смеси.

Результаты проведенного математического моделирования сжигания водородного топлива в камере сгорания поршневого двигателя рассмотрим с точки зрения принципиальной возможности использовать водород в качестве топлива для поддержания энергетического цикла электрогенератора или мини-электростанции в условиях отсутствия достаточного количества других видов топлива. На рис. 1 приведены индикаторные диаграммы для смесей с добавлением 1.0, 2.0 и 4.0% водяного пара. Расчеты показали, что смесь с добавлением 1.0% пара сгорает аналогично стехиометрической водородно-воздушной смеси в детонационном режиме, что характеризуется резким скачком давления до 24 МПа. Последующие пики давления отвечают отраженным ударным волнам, распространяющимся в объеме камеры после сгорания смеси. Анализ проведенных расчетов позволил определить, что при увеличении содержания пара в смеси до 2.0% режим сгорания перестает быть детонационным. Сгорание такой смеси происходит за 1.04 мс, а скачок давления близок к 13 МПа, что все еще превышает давление, обеспечивающее реализацию длительных циклов сгорания топлива в камере двигателя. Для смесей с метаном и бедных смесей аналогичным образом



**Рис. 2.** *a* — максимальное давление за цикл в зависимости от содержания водорода в смеси для трех типов смесей: с добавлением метана (1), водяного пара (2) и избытком воздуха (3); *b* — угол поворота коленчатого вала, соответствующий достижению максимального давления за цикл, в зависимости от содержания водорода в смеси для трех типов смесей. Угол поворота отсчитывается от положения верхней мертвой точки.

были определены следующие граничные содержания добавок, ниже которых детонация не наблюдается: 1.0%  $\text{CH}_4$  и 3.0% избытка воздуха соответственно. Последующее увеличение добавки пара приводит к уменьшению максимального давления за цикл и к увеличению угла поворота коленчатого вала, при котором это максимальное давление в камере сгорания достигается. Для количественного сопоставления рабочих характеристик смесей водорода с различными сортами добавок и их процентными соотношениями были выбраны следующие параметры: максимальное давление, достигаемое за цикл, и соответствующий его достижению угол поворота

Составы смесей, обеспечивающие максимальные давления, не превышающие рекомендуемых допустимых значений, и соответствующие им углы поворота коленчатого вала, отсчитываемые от положения верхней мертвой точки

	% $\text{CH}_4$ % $\text{H}_2$	$\varphi$	% $\text{H}_2\text{O}$ % $\text{H}_2$	$\varphi$	% избыточ- ного воздуха % $\text{H}_2$	$\varphi$
$P_{\max} < 8 \text{ MPa}$	2.7 26.8	12.4°	3.1 26.4	5°	4.2 25.3	4.5°
$P_{\max} < 6 \text{ MPa}$	3.2 26.3	25°	6 23.5	24°	7.5 22.0	22°
$P_{\max} < 5 \text{ MPa}$	3.4 26.1	40°	6.3 23.2	33°	8.3 21.2	31°
$\varphi(P_{\max}) < 20^\circ \text{CA}$	3.0 26.5		5.4 24.1		7.5 22.2	

коленчатого вала. Как известно из теории двигателей внутреннего сгорания, термодинамический цикл Отто обеспечивается, если нет преждевременного сгорания, т.е. максимальное давление приходится на угол поворота коленчатого вала после достижения верхней мертвой точки. С другой стороны, этот угол не должен превышать некоторых допустимых значений (примерно 20° CA от в.м.т.). В противном случае мощность двигателя снижается. Кроме того, в проведенном анализе учитывалось, что для надежного функционирования двигателя максимально достигаемое за цикл давление должно быть ограничено. В разных случаях за максимально допустимые значения давления принимаются значения от 5 до 8.6 МПа (в настоящей работе принято 8 МПа).

На рис. 2 представлены значения максимального давления и соответствующие углы поворота коленчатого вала, при которых достигаются максимальные давления, для смесей с различным содержанием водорода и добавок. Значения давления определялись исходя из индикаторных диаграмм, усредненных по высоким частотам колебаний давления, аналогичных представленной на рис. 1 для смеси с 4.0%  $\text{H}_2\text{O}$ . Рис. 2 показывает, что смеси, создающие при сжигании давления близкие к принятому предельному значению в 8 МПа, содержат добавки к водороду не менее 2.7%  $\text{CH}_4$  (смесь 1); 3.1%  $\text{H}_2\text{O}$  (смесь 2), 4.2% избытка воздуха (смесь 3). При этом углы поворота коленчатого вала, отсчитываемые от в.м.т., при которых в этих смесях достигаются максимумы давления соответственно равны: 12.4° — для смеси 1; 5° — для смеси 2; 4.5° — для смеси 3. Из приведенных результатов видно, что для всех рассмотренных перспективных смесей водорода максимальные давления, близкие к 8 МПа, достигаются в непосредственной близости от в.м.т. (угол отклонения от в.м.т. CA близок или меньше 10°), когда рабочий объем камеры еще весьма мал, и за короткое время создаются излишне большие локальные нагрузки на

стенки камеры, что может служить причиной более быстрого износа двигателя. Заметим, что выбранный в работе высокий уровень допустимого в камере сгорания давления соответствует наиболее экономичным с точки зрения использования низко активных добавок и в то же время наиболее жестким режимам сжигания топлива в поршневом двигателе. Снижение верхнего допустимого уровня давления в камере до 6–5 МПа (что принято в большинстве современных двигателей внутреннего сгорания) приводит, как показали расчеты, к более мягким режимам сжигания топлива. В то же время для всех рассмотренных вариантов максимальное давление, начиная с 6 МПа, достигается при повороте коленчатого вала более чем на 20° от в.м.т., что, как уже говорилось, снижает мощность двигателя. В таблице приведены составы смесей, обеспечивающие допустимые значения максимального давления и соответствующие им углы поворота коленчатого вала, отсчитываемые от в.м.т. В последней строке таблицы приведен состав смесей, гарантирующий достижение максимальных давлений в камере сгорания при угле поворота коленчатого вала от в.м.т. близкого, но не превышающего 20°. Интересно отметить, что проведенные расчеты указывают на высокую чувствительность параметров сгорания смеси в камере двигателя внутреннего сгорания к добавкам метана, что позволяет при сравнительно небольших изменениях в процентном содержании метана получать режимы сжигания топливно-воздушной смеси с требуемыми параметрами рабочего цикла.

В заключение сформулируем следующие основные результаты работы.

1. Показано, что в удаленных от любых достижимых видов топлива районах проведения инженерных или геологоразведочных работ бесперебойный цикл выработки электроэнергии, включающий нерегулярно функционирующие возобновляемые источники энергии (ветряные электростанции, солнечные батареи), может быть реализован путем накопления добываемого в период избыточного производства энергии водорода с последующим его бездетонационным сжиганием.

2. Бездетонационный режим сжигания при этом достигается путем малых в процентном отношении низкоэнергетических добавок к водороду, таких как метан, водяной пар, воздух. При этом если запасы метана, хотя и в меньших количествах, чем при выборе его за основное топливо, необходимо завозить в зону выполнения работ, то остальные два типа добавок являются естественными экологически чистыми компонентами, присущими процессу горения водорода. Причем, как показывают дополнительные оценки, в качестве добавки наиболее перспективным с экологической и с энергетической точек зрения, является водяной пар, являющийся в данном случае продуктом сгорания топлива.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 15-08-02860.

## Список литературы

- [1] *Marchenko O.V.* // Int. J. Low-Carbon Technol. 2010. Vol. 5. P. 250-5.
- [2] *Marchenko O.V., Solomin S.V.* // Renew Energ. 2004. Vol. 29. N 11. P. 1793–809.
- [3] *Da Rosa A.V.* Fundamentals of renewable energy processes. Oxford (UK): Academic Press, 2013. P. 389.
- [4] *Klell M., Eichseder H., Sartory M.* // Int. J. Hydrogen Energ. 2012. Vol. 37. P. 11531-40.
- [5] *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клумов Б.А., Формов В.Е.* // УФН. 2014. Т. 184. № 3. С. 247–264.
- [6] *Smygalina A.E., Zaitchenko V.M., Ivanov M.F., Kiverin A.D.* // Therm. Eng. 2015. Vol. 62. N 13. P. 981-7.
- [7] *Petersen E.L., Kalitan D.M., Simmons S., Bourque G., Curran H.J., Simmie J.M.* // Proc. Combust. Inst. 2007. Vol. 31. P. 447-54.