

УДК 534.222.2

## МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СЖИГАНИИ ВОДОРОДА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ДВС

© 2022 г. А. Д. Киверин\*, А. Е. Смыгалина

*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия*

*\*E-mail: alexeykiverin@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.10.2021 г.

После доработки 24.11.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Проанализированы режимы горения водорода при его использовании в качестве топлива в камере двигателя внутреннего сгорания. Особенности развития пламени, формирование газодинамических течений и связанных с ними колебаний давления в камере сгорания проанализированы на основе результатов численного моделирования. Продемонстрировано, что использование околостехиометрических составов водородно-воздушных смесей ограничено возникновением режимов быстрого горения, характеризующихся генерацией интенсивных ударных волн в результате нестационарного сгорания смеси и развития термоакустической неустойчивости. Полученный результат указывает на альтернативный механизм генерации интенсивных колебаний давления при использовании водородно-воздушных смесей, в которых очаговое самовоспламенение в области перед фронтом пламени и возникновение детонации оценивается как маловероятное.

DOI: 10.31857/S0040364422010197

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных технологических методов преобразования химической энергии горения топливно-воздушных смесей в механическую работу является сжигание смесей в камерах двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Вместе с тем эффективность использования органического топлива в ДВС остается относительно низкой. Одним из очевидных путей повышения энергоэффективности работы ДВС может быть техническая модификация камеры сгорания, обеспечивающая большую степень сжатия, меньшие потери энергии и изменение других факторов, определяющих оптимальные режимы горения. Наравне с техническими решениями ([1, 2] и др.) в настоящее время широко распространена идея использования газообразного водорода как добавки к традиционным [3, 4] или альтернативным [5] топливам. Отдельным направлением является использование водорода как основного топлива [6]. При этом сжигание водорода в камере сгорания ДВС может стать одной из составных частей цикла энергетического обеспечения удаленных производственных объектов [7], а экологические характеристики процесса генерации энергии могут быть существенно улучшены благодаря исключению углерода из цикла.

Для обоснования эффективности и безопасности предлагаемых подходов необходимо все-

стороннее понимание фундаментальных механизмов развития нестационарных высокотемпературных явлений, имеющих место в рабочем цикле камеры сгорания ДВС. В частности, важным аспектом является оценка пределов устойчивого горения топлива. Одним из наиболее ярких и опасных проявлений неустойчивости горения является стук в двигателе [8]. При использовании углеводородных топлив это явление связано с преждевременным воспламенением горючей смеси в области перед фронтом горения [9]. При этом воспламенение имеет очаговый характер и ведет к генерации ударных волн. Как это было неоднократно продемонстрировано экспериментально, в результате очагового воспламенения в области между фронтом пламени и боковой стенкой цилиндра формируется детонационная волна, во фронте которой происходит догорание смеси [9]. В отличие от смесей на основе углеводородных топлив, в водороде очаговое воспламенение может реализоваться в относительно узком диапазоне режимных параметров: только в смесях околостехиометрического состава и только при экстремально высоких степенях сжатия [10]. Как правило, о стуке в водородном двигателе говорят при организации сжигания в режиме компрессионного воспламенения. В таких условиях температура сжатой смеси перед фронтом пламени достигает величины порядка 1000–1100 К, что обеспечивает короткую задерж-

ку воспламенения, и смесь воспламеняется быстрее, чем успевает сгореть во фронте пламени. В случае сжигания водорода в ДВС с искровым зажиганием при наблюдении стука, как правило, также говорят о самовоспламенении, приводящем к детонации [11], однако наглядных тому экспериментальных свидетельств в литературе нет. В то же время кинетика окисления водорода лишена особенностей, таких как “отрицательный температурный коэффициент”, ответственных за преждевременное самовоспламенение и стук при сжигании углеводородных топлив [12]. Оценка на основе данных о задержке воспламенения водорода для параметров, реализуемых в верхней мертвой точке, указывает на низкую вероятность самовоспламенения даже при высоких степенях сжатия (выше 11). Тем не менее, сценарии генерации ударных волн при сжигании топливно-воздушной смеси в замкнутом объеме [13, 14] вероятны и являются принципиальными для обеспечения безопасной работы системы, а их прогнозирование и подготовка путей предотвращения без заметной потери мощности двигателя являются одними из важнейших задач при разработке систем сжигания водородно-воздушных смесей. Среди эффективных методик борьбы с нештатными режимами горения, включая детонационноподобные, следует отметить ингибирование горения путем разбавления водородно-воздушной смеси воздухом, природным газом, водяным паром (в рамках подхода рециркуляции выхлопных газов) [7, 15, 16].

Целью настоящего исследования являются всесторонний анализ развития нестационарного горения водородно-воздушных смесей, включая режимы детонационноподобного горения, в условиях работы камеры сгорания ДВС с искровым зажиганием и выделение возможных сценариев с появлением стука и сопутствующих значительных тепловых и динамических нагрузок на стенки цилиндра.

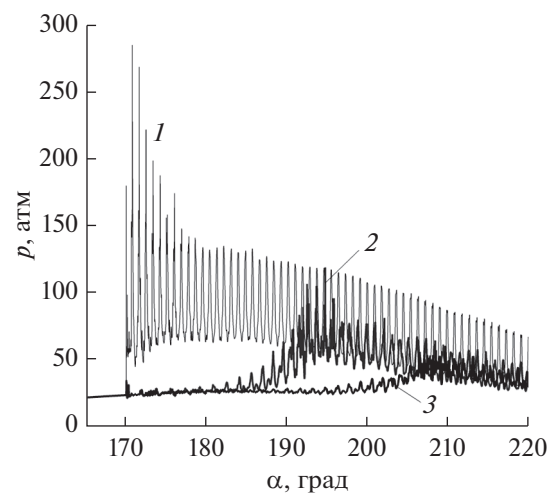
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим различные режимы сжигания водорода в камере сгорания ДВС с искровым зажиганием. В качестве параметров рабочего цикла взяты параметры установки, использованной ранее в работе [7] (степень сжатия – 11.4, угловая скорость вращения коленчатого вала – 1500 об/мин, энергия в искре – 17 мДж, угол опережения зажигания –  $10^\circ$  до верхней мертвой точки). Геометрические параметры цилиндра следующие: ход поршня – 128 мм, диаметр цилиндра – 130 мм, поверхность поршня – плоская. По аналогии с подходом к определению детонационной стойкости топливной смеси октановым числом, использующимся в моторном методе, состав водородно-воздушной смеси варьируется от стехиометрического в направлении обедненных составов. Расчеты проводятся соглас-

но традиционной модели газодинамики реагирующей газообразной смеси [17] с учетом сжимаемости, вязкости, теплопроводности, многокомпонентной диффузии и химической кинетики окисления водорода по детальному кинетическому механизму [18]. В качестве расчетной методики предлагается использовать эйлерово-лагранжев метод “крупных частиц”, показавший ранее хорошую точность в воспроизведении режимов горения газообразных топлив в камерах сгорания ДВС с искровым зажиганием [7, 9, 15].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Индикаторные диаграммы для трех рассмотренных характерных режимов сгорания водорода представлены на рис. 1. В случае стехиометрической смеси (случай 1) имеет место формирование детонационной волны, которая распространяется от источника воспламенения по предварительно сжатой смеси со скоростью 1821 м/с (давление и температура стехиометрической смеси достигают при  $\alpha = 170^\circ$  величины 23 атм и 686 К). После отражения от стенок камеры сгорания детонационная волна вырождается в ударную волну, распространение которой по продуктам горения внутри камеры сгорания определяет высокочастотные и высокоамплитудные колебания давления на стенки камеры. Частота колебаний составляет 10.2 кГц (рис. 2а), что существенно превышает наибольшую частоту  $f_0$ , характеризующую камеру сгорания, которую можно оценить как отношение скорости звука в продуктах горения к диаметру цилиндра –  $f_0 \sim 7.7$  кГц. Амплитуда колебаний



**Рис. 1.** Индикаторные диаграммы в координатах  $\alpha$ – $p$ , показывающие характерные темпы нарастания давления и амплитуды волн сжатия и ударных волн в камере ДВС в окрестности верхней мертвой точки ( $\alpha = 180^\circ$ ): 1 – детонация в стехиометрической смеси (29.5% водорода); 2, 3 – горение в обедненных смесях с 26 и 18% водорода соответственно.

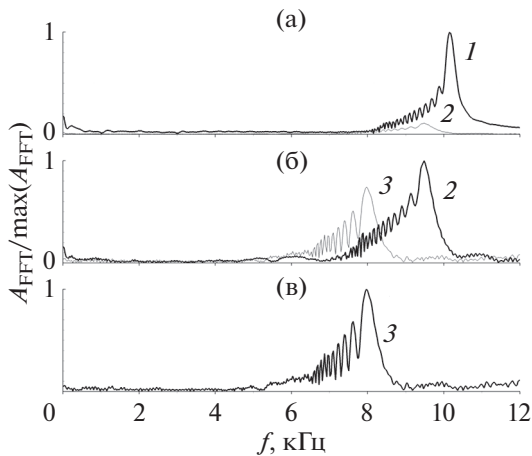


Рис. 2. Спектры пульсаций давления, построенные на основе трех индикаторных диаграмм рис. 1; амплитуда нормирована на максимальное значение амплитуды для каждого из трех случаев: (а) – 1, (б) – 2, (в) – 3.

давления в случае 1 достигает более 100 атм, что в купе с высокой частотой процесса соответствует явлению “сверхстука” [9]. Это естественно, так как явление “сверхстука”, согласно доступной экспериментальной информации, всегда определяется формированием детонационной волны, и этот случай следует рассматривать как референтный при анализе режимов горения водорода в ДВС.

Противоположный случай реализуется в обедненной смеси, содержащей 18% водорода (случай 3 на рис. 1, 2). В этом случае реализуется режим дефлаграционного горения, и в направлении от источника воспламенения по смеси распространяется волна горения. Нестационарный характер развития многомерного фронта пламени от локализованного очага в замкнутом объеме сопровождается генерацией волн сжатия с их последующим взаимодействием со стенками камеры сгорания и фронтом пламени. Так, на индикаторной диаграмме можно наблюдать низкоамплитудные колебания давления с частотой  $\sim 4.4$  кГц, что соответствует распространению акустических возмущений в сечении камеры сгорания со скоростью 572 м/с, т.е. со скоростью звука в сжатой под поршнем водородно-воздушной смеси. Далее в процессе горения амплитуда волн и частота колебаний растут и достигают соответственно  $\sim 10$  атм и  $\sim 8$  кГц. По амплитуде возникающие в случае 3 колебания давления более чем на порядок ниже, чем в случае 1, а частота близка к  $f_0$ . В связи с этим, в данном случае можно говорить фактически о штатном режиме горения.

Промежуточный режим наблюдается в смеси, содержащей 26% водорода (случай 2 на рис. 1, 2). Амплитуда колебаний давления в пике достигает  $\sim 30$ – $40$  атм, и выделяется высокочастотная составляющая, что указывает на генерацию удар-

ных волн в объеме камеры сгорания. Режим с такими параметрами сопоставим с явлением стука в ДВС при использовании углеводородных топлив, но при этом очагов самовоспламенения и формирования детонационной волны внутри камеры сгорания не наблюдается. В связи с этим крайне важно определить механизмы генерации и усиления ударных волн при реализации такого режима сгорания водорода в камере сгорания ДВС. Для этого следует подробно рассмотреть эволюцию структуры течения в процессе сгорания смеси. На рис. 3 представлены картины течения в три последовательных момента времени. На рассмотренной стадии фронт пламени имеет сложную изрезанную форму, при этом локальное ускорение участков фронта сопровождается излучением волн сжатия, распространяющихся в объеме и взаимодействующих с соседними участками фронта пламени. Природа деформации фронта пламени в первую очередь связана с развитием гидродинамической неустойчивости [19]. Дополнительным фактором деформации фронта и интенсификации роста неустойчивости является взаимодействие пламени с волнами сжатия, отраженными от стенок камеры сгорания. Интенсивный рост вновь рожденных на поверхности фронта пламени возмущений и связанное с ним локальное ускорение отдельных участков фронта определяет генерацию волн сжатия, расходящихся от каждого из таких источников на фронте пламени, аналогично тому, как это показано в работе [20].

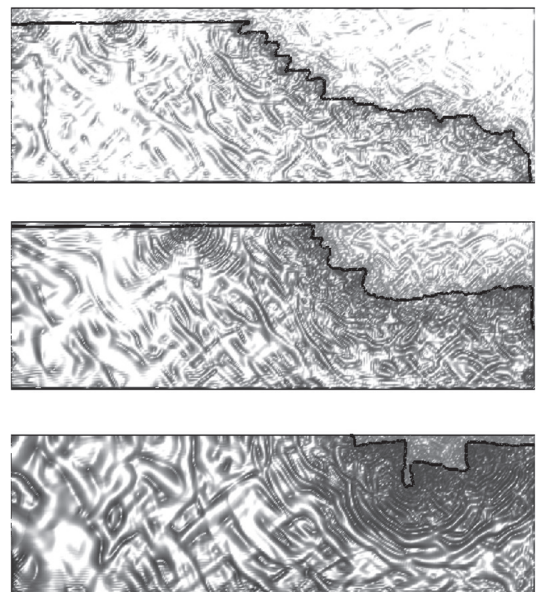


Рис. 3. Характерная картина течения вблизи фронта пламени (черные кривые) при приближении к точке полного сгорания в режиме 2 (рис. 1); показано поле градиента плотности в срезе цилиндрической камеры сгорания; левая граница – ось цилиндра, правая – боковая стенка, верхняя – поверхность поршня.

В процессе распространения в объеме волны сжатия взаимодействуют с областями экзотермической реакции во фронте пламени и усиливаются по механизму термоакустической неустойчивости [21]. (Подобный механизм усиления волн сжатия при стуке также рассматривался ранее в [22], однако в качестве источника волн сжатия предполагалось очаговое самовоспламенение перед основным фронтом горения.) Описанная последовательность развития процесса и составляет механизм генерации и усиления ударных волн в камере сгорания. При этом сгорание смеси происходит за времена намного короче, чем характерное время самовоспламенения смеси в зазоре между фронтом пламени и стенкой цилиндра. Так, например, в момент времени за 0.1 мс до сгорания всей смеси, когда фронт пламени располагается в непосредственной близости от боковой стенки цилиндра, температура и давление смеси в зазоре между фронтом пламени и стенкой достигают своих пиковых значений, равных 900 К и 74.6 атм, что определяет задержку воспламенения 26%-й смеси водорода с воздухом в 24.6 мс. Таким образом, самовоспламенения смеси перед фронтом пламени не происходит, а “детонационноподобное” поведение системы, регистрируемое с помощью индикаторных диаграмм, определяется исключительно механизмом, предложенным выше. Данный результат имеет важное значение для корректной оценки сценариев развития нештатных режимов горения водорода с целью их прогнозирования и предотвращения.

Результаты численного моделирования указывают на то, что в области реализации режима быстрого горения (20–26% водорода в смеси) наблюдается высокая степень полноты сгорания в сравнении как с детонационным режимом, так и с режимом медленного горения. Этот факт может быть использован для обоснования поиска новых путей оптимизации процесса сжигания водорода в камерах сгорания ДВС. При этом следует учитывать потенциальную опасность интенсивных колебаний давления, генерируемых по представленному выше механизму, равно как и другие аномальные явления, такие как “обратная вспышка”, наблюдаемые в близких условиях [15] при содержании водорода в смеси более 23%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного в работе анализа выделены три основных сценария развития горения водорода в камерах двигателей внутреннего сгорания: детонационное горение, дефлаграционное горение и режим быстрого горения с генерацией ударных волн. Последний сценарий представлен впервые и является базовым для описания нештатных режимов горения водорода в камере сгорания ДВС с искровым зажиганием, тогда как фор-

мирование детонации в результате самовоспламенения в водороде следует ожидать исключительно при реализации режима гомогенного компрессионного воспламенения. Развитие процесса в режиме быстрого горения определяется особенностями нестационарного горения газа в ограниченном объеме. Генерация волн сжатия связана с развитием гидродинамической неустойчивости фронта пламени, а их усиление и формирование ударных волн с эффектом термоакустической неустойчивости при взаимодействии с фронтом пламени. Описанный эффект существенно ограничивает возможность использования водорода в качестве топлива для ДВС с искровым зажиганием. С учетом этого при разработке реальных технических решений рекомендуется проводить дополнительное количественное (экспериментальное и/или численное) определение концентрационных пределов реализации описанного режима быстрого горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29 сентября 2020 г.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С.* Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // ТВТ. 2014. Т. 52. № 2 С. 294.
2. *Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С., Панкратов С.А.* Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию // ТВТ. 2016. Т. 54. № 1. С. 99.
3. *Jamrozik A., Grab-Rogaliński K., Tutak W.* Hydrogen Effects on Combustion Stability, Performance and Emission of Diesel Engine // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 38. P. 19936.
4. *Zhang R., Chen L., Pan J., Wei H., Zhou L., Liu C.* Effects of Direct-injected Hydrogen Addition on Methane Combustion Performance in an Optical SI Engine with High Compression-Ratio // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 4. P. 3284.
5. *Ayad S.M.M.E., Belchior C.R.P., da Silva G.L.R., Lucena R.S., Carreira E.S., de Miranda P.E.V.* Analysis of Performance Parameters of an Ethanol Fueled Spark Ignition Engine Operating with Hydrogen Enrichment // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 8. P. 5588.
6. *Balat M.* Potential Importance of Hydrogen as a Future Solution to Environmental and Transportation Problems // Int. J. Hydrogen Energy. 2008. V. 33. № 15. P. 4013.
7. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Зайченко В.М.* Об использовании водорода в качестве топлива для двигателей в энергетическом цикле удаленных производственных объектов // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 1. С. 147.

8. *Liberman M.A., Ivanov M.F., Peil O.E., Valiev D.M., Eriksson L.-E.* Numerical Modeling of a Propagating Flame and Knock Occurrence in Spark-ignition Engines // *Combust. Sci. Technol.* 2005. V. 177. № 1. P. 151.
9. *Qi Y., Wang Z., Wang J., He X.* Effects of Thermodynamic Conditions on the End Gas Combustion Mode Associated with Engine Knock // *Combust. Flame.* 2015. V. 162. № 11. P. 4119.
10. *Gao Y., Dai P., Chen Z.* Numerical Studies on Autoignition and Detonation Development from a Hot Spot in Hydrogen/Air Mixtures // *Combust. Theory Modell.* 2020. V. 24. № 2. P. 245.
11. *Szwaja S., Naber J.D.* Dual Nature of Hydrogen Combustion Knock // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2013. V. 38. № 28. P. 12489.
12. *Filimonova E.A., Dobrovolskaya A.S., Vocharov A.N., Bityurin V.A., Naidis G.V.* Formation of Combustion Wave in Lean Propane-Air Mixture with a Non-uniform Chemical Reactivity Initiated by Nanosecond Streamer Discharges in the HCCI Engine // *Combust. Flame.* 2020. V. 215. P. 401.
13. *Голуб В.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В., Иванов К.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Володин В.В.* Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию // *ТВТ.* 2010. Т. 48. № 6. С. 901.
14. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д.* О генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударными волнами // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 5. С. 703.
15. *Зайченко В.М., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Цып-лаков А.И.* Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием // *Изв. РАН. Энергетика.* 2018. № 4. С. 87.
16. *Niculae A.L., Miron L., Chiriac R.* On the Possibility to Simulate the Operation of a SI Engine Using Alternative Gaseous Fuels // *Energy Reports.* 2020. V. 6. Suppl. 3. P. 167.
17. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* *Combustion.* 3rd ed. N.Y.: Springer, 2006.
18. *Ó Conaire M., Curran H.J., Simmie J.M., Pitz W.J., Westbrook C.K.* A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation // *Int. J. Chem. Kinet.* 2004. V. 36. № 11. P. 603.
19. *Гостинцев Ю.А., Истратов А.Г., Кидин Н.И., Форттов В.Е.* Автотурбулизация газовых пламен. Анализ экспериментальных результатов // *ТВТ.* 1999. Т. 37. № 2. С. 306.
20. *Киверин А.Д., Яковенко И.С., Форттов В.Е.* Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве // *ДАН.* 2019. Т. 489. № 5. С. 461.
21. *Kiverin A., Yakovenko I.* Thermo-acoustic Instability in the Process of Flame Propagation and Transition to Detonation // *Acta Astronaut.* 2021. V. 181. P. 649.
22. *Yang F., Zhang H., Chen Z., Kong W.* Interaction of Pressure Wave and Propagating Flame During Knock // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2013. V. 38. № 35. P. 15510.