

УДК 536.71; 537.5; 662.61

Многоочаговое инициирование и горение пропана в макете цилиндра ДВС*

В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: vteslenko@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов инициирования и горения стехиометрической пропан-кислородной смеси в замкнутом объеме в виде одного цилиндра ДВС с поршнем. Исследована динамика инициирования и горения газа в цилиндре диаметром $D = 72$ мм, высотой $h = 4$ мм в зависимости от пространственного расположения N искровых очагов инициирования ($N = 1 \div 9$) при одновременном их зажигании. Показано, что с увеличением числа очагов инициирования уменьшается период генерации силы на поршень и увеличивается амплитуда максимальных значений силы.

Ключевые слова: многоочаговое инициирование, искровой разряд, периоды генерации, горение, скорость, импульсы силы.

Введение

В настоящее время в соответствии с принципами экологической безопасности в мировой практике заметна тенденция к широкому использованию природного газа в автомобильном и водном транспорте [1, 2]. Наибольшее развитие это направление получило при разработке мини-электростанций с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Между производителями мини-электростанций наблюдается конкуренция за увеличение энергоэффективности ДВС (определение оптимальных параметров), в основу работы которых закладываются различные методы и принципы инициирования и сжигания углеводородов. При решении рассматриваемых задач осуществляются три подхода для управления процессами инициирования топлив в ДВС. Учитывая, что к настоящему времени в литературе и, в большей степени, в интернете присутствует путаница в понимании терминов multispark, multihearth и multipoint [3–5], для четкости определим их содержание и укажем используемые подходы:

- multispark (многоискровое) — инициирование зажигания серией высоковольтных искр на одном разрядном промежутке (на одной свече),
- multihearth или multipoint (многоочаговое) — инициирование на множественных очагах в виде N искр на заданных расстояниях друг от друга,
- совмещенное применение многоискрового и многоочагового инициирования, включая СВЧ-генерацию коронных разрядов.

* Работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (грант № 18-48-540011).

В первом случае заложена идея подачи цуга высоковольтных импульсов (~ 10) на один разрядный промежуток. Во втором случае под многоочаговым инициированием понимаются процессы инициирования топливной смеси множественными искрами, распределенными по сечению цилиндра. Первый подход важен в техническом смысле, т.к. обеспечивает надежность зажигания топливной смеси за счет подачи на одну свечу серии последовательных высоковольтных импульсов. Он уже широко используется в автомобильной промышленности. Второй и третий случаи находятся в стадии научных и технических разработок, включая СВЧ и коронные искровые разряды [6, 8]. При этом необходимо учитывать размеры искр и их геометрию, поэтому термин «multihearth» предполагает учет пространственных и временных параметров.

Теоретические аспекты темы представленной статьи частично рассматривались в работах [4, 7, 8]. В практическом двигателестроении в корейских мотоциклах и автомобилях уже используются две свечи. В работе [4] было теоретически показано, что наилучшие режимы работы ДВС могут обеспечиваться четырьмя свечами. Однако в ней не рассматривался аспект пространственного расположения свечей. Экспериментальных исследований на данную тему авторами не обнаружено, публикация [5] носит исключительно рекламный характер.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов многоочагового инициирования синхронными искровыми разрядами стехиометрической смеси пропана с кислородом в замкнутом объеме в виде цилиндра с поршнем, являющегося макетом одного цилиндра ДВС. Также авторами проведены комплексные исследования динамики инициирования и горения газа в цилиндре диаметром $D = 72$ мм, высотой $h = 4$ мм с помощью скоростной видеокамеры с синхронной регистрацией импульсов силы на поршень. В зависимости от пространственного расположения N искровых очагов инициирования и с их одновременным зажиганием измерялись параметры импульсов силы, воздействующих на поршень.

Постановка экспериментов

На рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. Было изготовлено устройство в виде стального цилиндра 1 с внутренним диаметром $D = 72$ мм, связанное с массивным основанием 2. Внутри цилиндра располагался подвижный поршень из капролона 3 с кольцевым уплотнением из резины. Поршень 3 с помощью штока 4 был соединен с пьезо-динамометром 5 с разрешающей способностью 26 мкс. Торец цилиндра герметично закрывался стеклянной пластиной 6. Рабочая камера 7 заполнялась

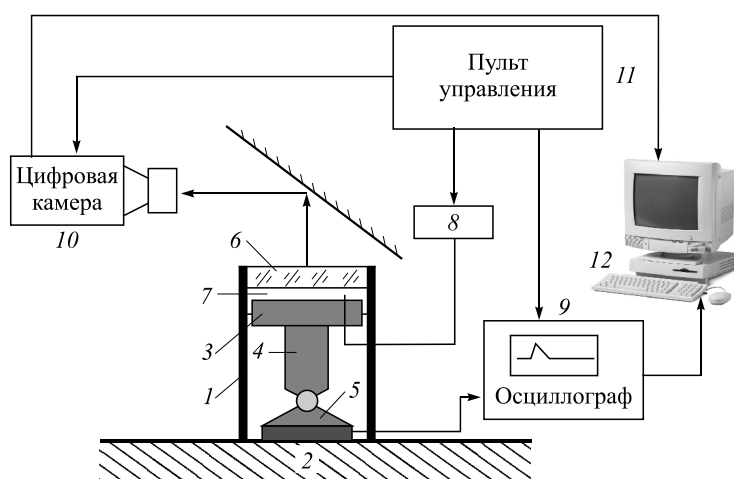


Рис. 1. Схема постановки экспериментов.

газом через боковое отверстие с огнепреградителем. Искровые промежутки (~ 1 мм) изготавливались для каждой серии экспериментов, монтировались непосредственно на торце поршня заподлицо с поверхностью и располагались на задаваемых расстояниях от оси ($r = 0 \div 33$ мм). Зажигание искровых промежутков осуществлялось синхронно с помощью высоковольтного блока 8 импульсами длительностью 50 мкс с суммарной энергией $0,7 \div 2$ Дж. Синхронизация разрядов на искровых промежутках осуществлялась по схеме последовательного подключения необходимого количества искровых промежутков.

Электрический сигнал от динамометра 5 записывался на цифровой осциллографе TDS-210 9. Киносъемка инициирования зажигания и горения газа выполнялась с помощью цифровой камеры MotionXtra HG-LE 10. Управление системой осуществлялось с пульта 11 с синхронной регистрацией результатов на компьютере 12.

В экспериментах использовалась заранее заготовленная стехиометрическая смесь пропана с кислородом ($C_3H_8 + 5 \cdot O_2$) при атмосферном давлении. Эксперименты проводились в камере сгорания высотой $h = 4$ мм. Из осциллограмм регистрируемых импульсов силы $F(t)$ извлекались следующие данные: периоды начала генерации силы на поршень (t_i), как периоды индукции горения; периоды генерации максимального значения силы (T) от момента зажигания искры до максимальной амплитуды силы; максимальные значения генерируемой силы, воздействующей на поршень.

Результаты экспериментов

На рис. 2 представлена одна из кинограмм зажигания, горения и затухания процессов в камере сгорания при инициировании газового заряда одной искрой в центре камеры, и соответствующие этому эксперименту осциллограммы импульса силы $F(t)$ для разных разверток.

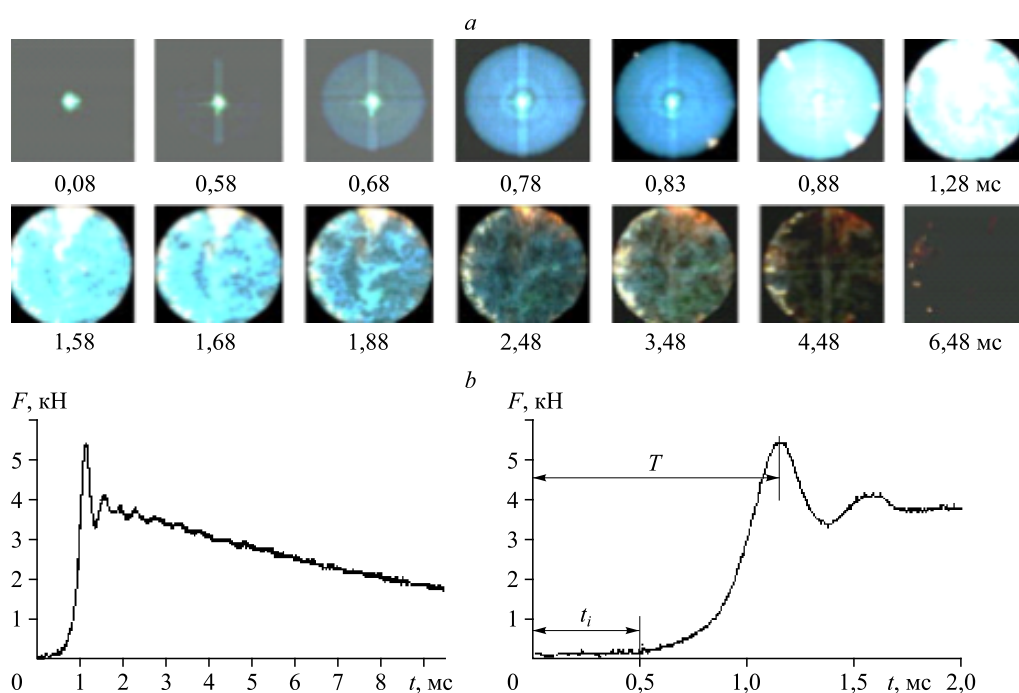


Рис. 2. Кинограмма инициирования горения пропан-кислородной смеси одной искрой и остывания продуктов сгорания в замкнутой камере (а) с соответствующими осциллограммами импульса силы $F(t)$, воздействующей на поршень (б).

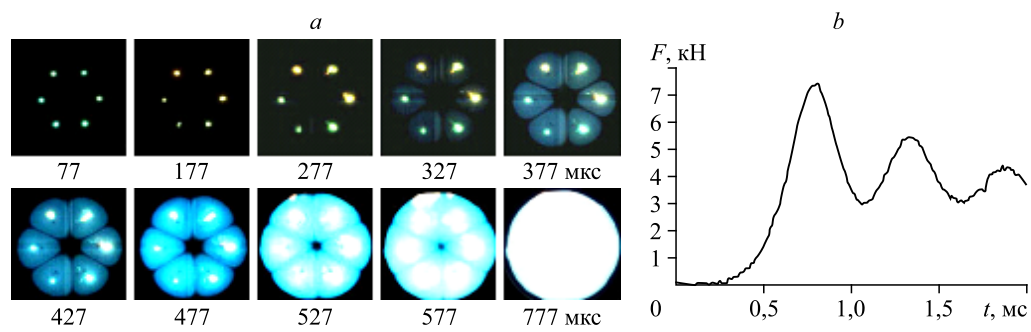


Рис. 3. Кинограмма инициирования и горения пропан-кислородной смеси для случая шести искровых разрядов, установленных на расстоянии $r = 18$ мм от оси цилиндра (а), с соответствующей осциллограммой импульса силы $F(t)$ (b).

На рис. 3 представлена кинограмма и соответствующая осциллограмма импульса силы $F(t)$ для случая шести очагов искрового инициирования газового заряда с расположением искровых инициаторов на окружности с радиусом от оси цилиндра $r = 18$ мм.

На рис. 4 представлена кинограмма инициирования горения четырьмя искровыми разрядами, расположенными на расстоянии $r = 7$ мм от оси камеры. На кинограмме отчетливо наблюдаются плазменные образования от искровых разрядов, которые отрываются от разрядных промежутков и перемещаются в радиальном направлении от оси цилиндра. Перемещающиеся плазменные образования от искровых разрядов для краткости определим как «плазмоиды». Динамика перемещения таких плазмоидов зависит от мест их образования. Так, в серии экспериментов, результаты которых изображены на рис. 4, скорость радиального разлета плазмоидов от оси цилиндра в среднем составляет 45 м/сек. Следует особо отметить, что плазмоиды разлетались от оси на расстояние до $r = 18$ мм, что совпадает с локализацией расположения очагов инициирования в серии экспериментов с шестью очагами инициирования (рис. 3). К этому моменту (352–402 мкс) видеокамерой регистрируется горение в виде сине-голубого свечения с возможностью измерения скорости фронта — $v \approx 65$ м/сек. Затем плазмоиды меняют направление движения в направлении к оси цилиндра. Это связано с тем, что к данному моменту фронт горения достигает стенки цилиндра, затем следует отражение газодинамического потока к оси цилиндра. Дополнительно в нескольких экспериментах осуществлялась регистрация динамики свечения инициируемого газа с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-35 через интерференционные фильтры IF-425 нм и IF-436 нм. Эти эксперименты

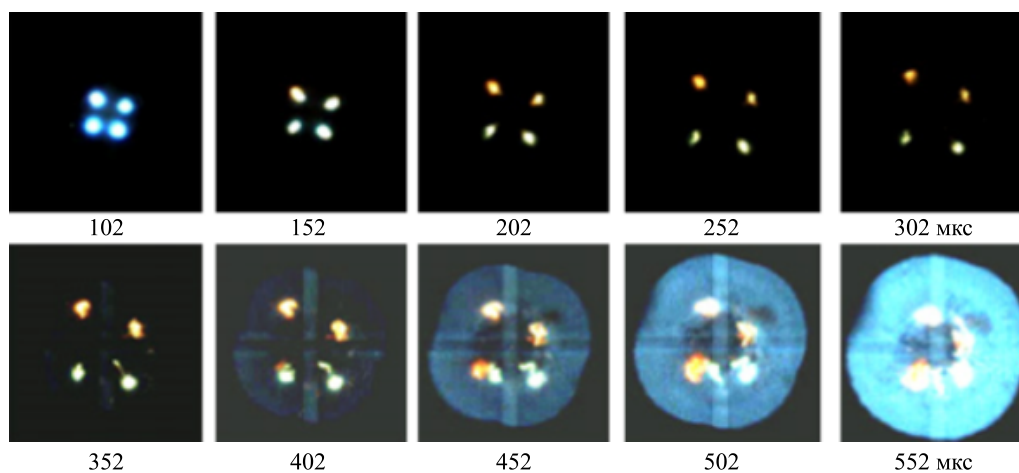


Рис. 4. Кинограмма инициирования горения смеси четырьмя искровыми разрядами, расположенными на расстоянии $r = 7$ мм от оси камеры.

показали, что начало сине-голубого свечения совпадает во времени с началом действия силы на поршень с точностью 50 мкс.

Для нахождения скоростных параметров распространения фронтов горения по сечению цилиндра были проведены эксперименты с иницированием зажигания газа одной искрой вблизи стенки цилиндра ($r = 33$ мм). На рис. 5 представлены отдельные кадры кинограммы горения и закон распространения фронта горения $R(t)$ в радиальном направлении от точки инициирования. Здесь наглядно видно, что фронт горения не является гладким и имеет разрывы в виде резного листа. Возможно, эти структуры аналогичны тем, которые были зарегистрированы с более высокой скоростью киносъемки в работе [9]. Кроме того, наблюдаются пульсирующие режимы скорости фронта горения. Это видно на графике $R(t)$. Скачки скорости фронтов горения в ряде экспериментов достигали 140 м/сек. Средняя скорость находилась в пределах 50–70 м/сек. Видеокамера начинает фиксировать процессы горения в моменты начала роста силы на поршень t_i (по осциллограммам), что соответствует началу подъема давления в камере и началу экспоненциальных химических процессов в достаточно большой области ($\sim 1/2$ площади поршня). Например, для данных, приведенных на рис. 2 и 5, это происходит на 0,4–0,5-ой миллисекунде. За данный период невидимая область (область индукции горения) расширилась до 30–40 мм от очага инициирования.

На рис. 6 представлены результаты измерений времени индукции силы t_i и периодов T генерации силы на поршень в зависимости от числа очагов инициирования N . Периоды t_i и T измерялись по осциллограммам (см. рис. 2) и сравнивались с моментами начала регистрации сине-голубого свечения на кинограммах. Отметим, что с точностью 50 мкс моменты задержек регистрации сине-голубого свечения совпадают с началом роста силы на поршень.

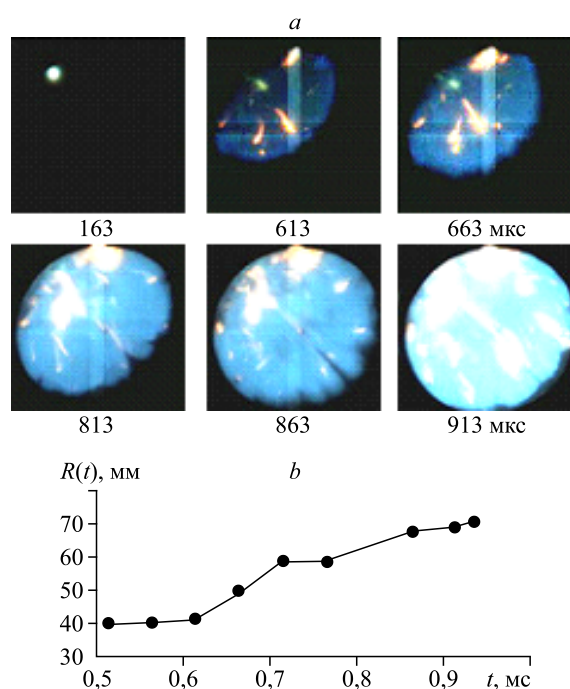


Рис. 5. Отдельные кадры кинограммы процессов инициирования и горения (а) и закон распространения фронта горения в направлении от точки инициирования (б).

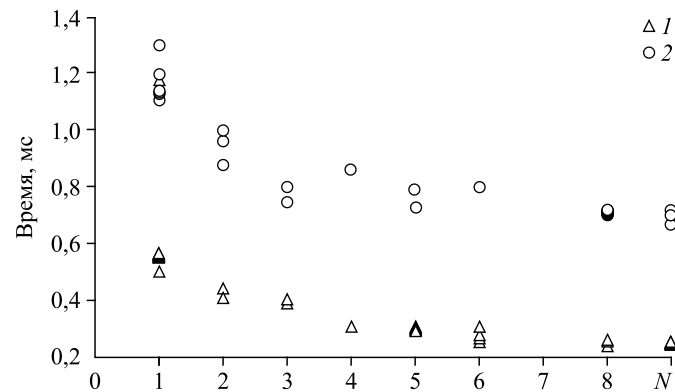


Рис. 6. Результаты измерений периодов начальной генерации силы, воздействующей на поршень, как периодов индукции силы t_i (1) и периодов генерации максимальных значений силы на поршень $T(2)$ в зависимости от числа очагов инициирования (N).

На рис. 7 представлены отдельные результаты измерений максимальных амплитуд действующей силы на поршень в зависимости от числа очагов инициирования N и расстояния от оси поршня r . Из представленных результатов следует, что увеличение числа очагов инициирования не приводит к результату с характерной функциональной зависимостью. Очевидно, это связано в первую очередь с тепловыми потерями, которые определяются местом расположения очагов инициирования. Потери увеличиваются с приближением очагов инициирования к стенке цилиндра ($r = 33$ мм).

Из данных, приведенных на рис. 7, следует, что наибольшие значения силы на поршень генерируются для четырех очагов инициирования, расположенных на расстоянии $r = 7$ мм от оси. Кроме этого, следует отметить, что в варианте $N = 1$ при локализации очага инициирования на расстоянии $r = 18$ мм амплитуда силы, действующей на поршень, возрастает по сравнению с $r = 0$. Это связано с развитием конвективных процессов, образованием кольцевых вихрей как в процессе инициирования газа, так и в последующих стадиях его горения. На рис. 8 представлена кинограмма такого процесса. За счет отражения от стенки цилиндра потока газа, генерируемого искровым разрядом,

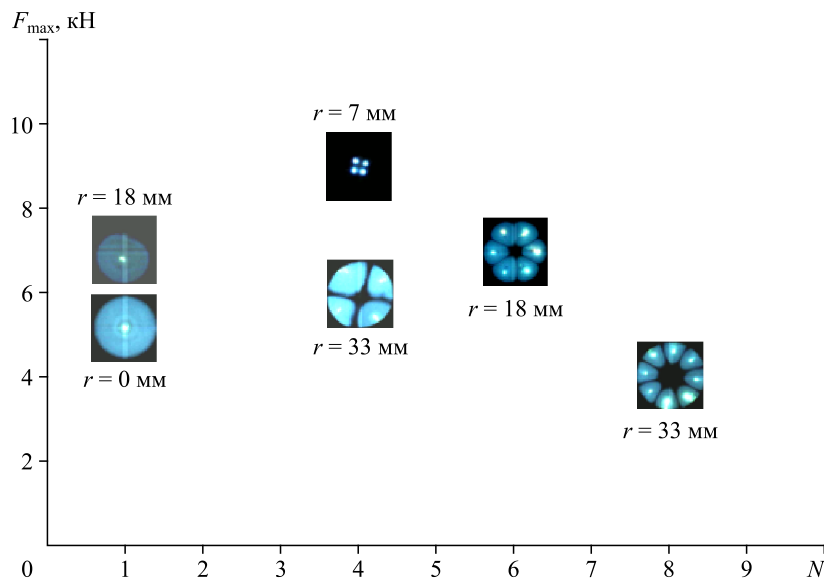


Рис. 7. Зависимость максимальных значений силы F_{max} на поршень от количества искровых очагов N и расстояния от оси цилиндра r .

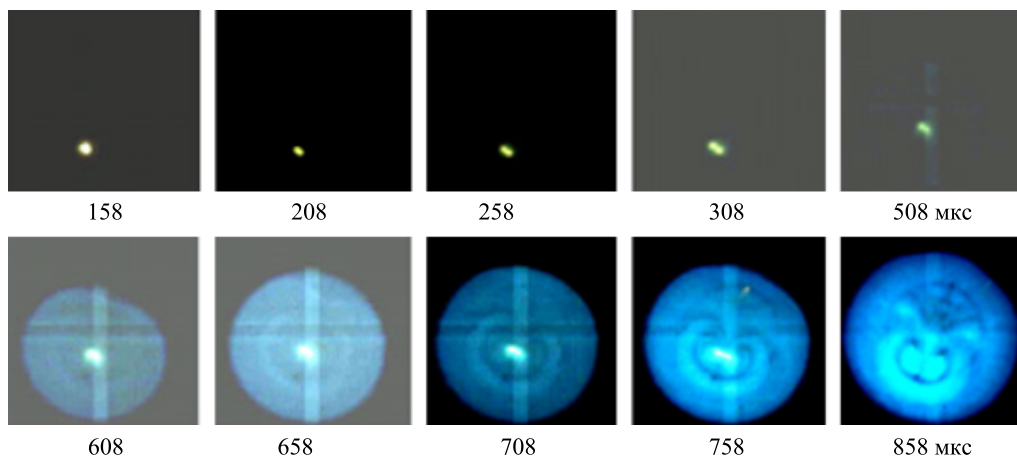


Рис. 8. Динамика развития конвективных процессов при одноочаговом инициировании на расстоянии $r = 18$ мм ($1/4D$) с образованием кольцевых вихрей.

плазма отрывается от электродов и движется к оси цилиндра в виде кольцевого вихря (58–508 мкс). Приблизившись к оси цилиндра (~ 600 мкс) плазмоид останавливается, к этому моменту волна горения достигает стенки цилиндра, возникает отраженный встречный поток, формируется встречный кольцевой вихрь (708–858 мкс), который движется в направлении к области искрового инициирования.

Таким образом, за счет развития вихревых процессов улучшается эффективность сжигания топлива. В вариантах $N = 1$, $r = 18$ мм и $N = 4$, $r = 7$ мм (см. рис. 4, 8) конвективные процессы являются существенными. А в варианте $N = 8$, $r = 33$ мм эти процессы тормозятся встречными потоками газа от каждого соседнего источника горения и потенциально за счет контакта со стенками цилиндра.

Краткий анализ и выводы

Из полученных экспериментальных результатов следует отметить следующие принципиальные особенности инициирования и горения пропан-кислородной смеси до момента времени T в замкнутом объеме.

С увеличением числа очагов инициирования уменьшается время генерации силы, действующей на поршень, на 20–30 % по сравнению с одноочаговым инициированием по центру камеры.

С уменьшением времени генерации силы T увеличивается амплитуда максимальных значений силы F_{\max} , действующей на поршень.

Начало роста силы, действующей на поршень, совпадает во времени с началом регистрации горения в камере с точностью ± 50 мкс, регистрируемого в виде сине-голубого свечения (рис. 2–5, 8). На основании данных результатов можно полагать, что период индукции горения совпадает с периодом начальной генерации силы, действующей на поршень.

Моменты максимальных значений генерируемой силы F_{\max} , действующей на поршень, совпадают с моментами заполнения горением всего сечения цилиндра. Можно полагать, что к этому моменту процесс горения завершается.

Показано, что горение в заданном объеме носит пульсирующий характер в продольном направлении с поперечными разрывами фронтов горения (рис. 5). Также показано, что при расположении очагов инициирования вблизи стенки цилиндра ($r = 33$ мм, $N = 4$, $N = 8$) амплитудные значения генерируемой силы уменьшаются (рис. 7). По мнению авторов, это связано с тепловыми потерями на стенку цилиндра и с торможением встречных фронтов горения от каждого очага инициирования.

Полученные экспериментальные данные подтверждают концептуальные теоретические результаты работы [7] о том, что с увеличением поверхности горения возрастает скорость сжигания топлива. В проведенных экспериментах именно за счет априорного увеличения поверхности пламени путем увеличения очагов инициирования обеспечиваются условия более быстрого увеличения поверхности горения, что приводит к ускоренному сжиганию топлива в заданном объеме и к уменьшению периодов T (рис. 6).

Таким образом, полученные результаты показывают, что применение многоочаговых источников зажигания позволят уменьшать время сжигания топлива. Этот факт обуславливает возможность уменьшения времени полного сжигания топлива в каждом цикле ДВС.

Авторы благодарят Ю.В. Анисичкина за помощь в подготовке экспериментального стенда.

Список литературы

1. Карпенко А.А., Коцева Е.П. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива // Транспортное дело России. 2017. № 3. С. 63–66.
2. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Генерация тяги при сжигании газа в воде на плоской стенке // Теплофизика и аэродинамика. 2019. Т. 26, № 4. С. 611–617.
3. Абрамчук Ф.И., Кабанов А.Н., Швыдкий Д.В. Анализ эффективности одноискровой и многоискровой системы зажигания газовых двигателей // Автомобильный транспорт. 2014. Вып. 34. С. 28–31.
4. Kociszewski A., Jamrozik A., Sosnowski M., Tutak W. Computational analysis and experimental research into lean mixture combustion in multi-spark plug SI engine // J. of KONES. 2006. Vol. 13, No. 3. P. 123–130.
5. Miyama MULTIsark multi-point ignition technology. Режим доступа: <http://multisark.net/> (2006–2015 гг).
6. Булат П.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Северинов Л.Г. Динамика горения пропан-воздушной газовой смеси при ее поджиге стримерным сверхвысокочастотным разрядом // Журн. технич. физики. 2019. Т. 89, вып. 10. С. 1529–1534.
7. Бабкин В.С., Сеначин П.К., Крахтинова Т.В. Особенности динамики сгорания газа в закрытых сосудах при разных законах изменения поверхности пламени // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 6. С. 14–20.
8. Filimonova E.A., Dobrovolskaya A.S., Bocharov 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 // Combustion and Flame. 2020. Vol. 215. P. 401–416.
9. Veiga-López F., Kuznetsov M., Martinez-Ruiz D., Fernandez-Tarrazo E., Grune J., Sanchez-Sanz M. Unexpected propagation of ultra-lean hydrogen flames in narrow gaps // Physical Review Letters. 2020. Vol. 124, Iss. 17. P. 174501.

*Статья поступила в редакцию 26 января 2021 г.,
после доработки — 25 мая 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.*