

УДК 536.71; 537.5; 662.61  
DOI: 10.63430/TIA2025020010

## **Торможение и ускорение фронтов горения газа при двухочаговом инициировании**

**В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Ю.В. Анисичкин**

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

E-mail: vteslenko@mail.ru

Представлены экспериментальные результаты исследования процессов горения при одноочаговом и двухочаговом искровом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси в трубках длиной 170–860 мм с внутренним диаметром 5 мм. Обнаружено, что в области между двумя очагами инициирования происходит вначале торможение встречных фронтов горения, а затем их ускорение. Эти процессы развиваются за счет генерации встречных газодинамических потоков и сопровождаются взаимным разгоном очагов в виде «искровых плазмOIDов», активизирующих горение. Экспериментально показано, что электроразрядные искровые плазмOIDы являются определяющими физическими элементами в процессах инициирования и горения пропан-кислородной смеси в трубках.

**Ключевые слова:** инициирование горения, торможение горения, ускорение горения, искровые плазмOIDы, газодинамические потоки.

### **Введение**

Увеличение скорости сжигания топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) на протяжении многих лет, особенно в последнее десятилетие, является актуальной задачей в связи с использованием газовых топлив. Существует на первый взгляд очевидное предположение, что с ростом общей площади фронтов горения увеличится полнота сгорания топливной смеси. Такой подход, теоретически рассмотренный в работах [1–3] и, возможно, реализуемый при помощи многоочагового инициирования горения смеси, позволил бы сократить время цикла работы ДВС, повысить его мощность и снизить количество вредных выбросов в атмосферу. Предпринимались многочисленные попытки сократить время сжигания топлива в ДВС различными методами, например, с использованием цуга многоочаговых искр, лазерных, барьерных и СВЧ разрядов [4–6]. Однако проекты в этом направлении пока не реализованы в рамках промышленного двигателестроения. Это связано в первую очередь с тем, что процессы инициирования и горения при многоочаговом и «объемном» инициировании экспериментально изучены недостаточно.

В работе [7] было показано, что с увеличением числа очагов инициирования наблюдается уменьшение времени сжигания пропан-кислородной смеси на 20–30 %. Однако в работах [8, 9] было показано, что амплитудные значения импульса тяги ( $F$ ) при увеличении количества искровых инициаторов зависят от расположения очагов в камере сгорания. Например, для 4-очагового инициирования в макете ДВС амплитуда импульса отличается на 28 % при различных локализациях разрядов. Полученные результаты могут быть обусловлены процессами торможения и деформации встречных фронтов горения. Так, в работе [8] представлены видеокadres процесса торможения фронтов горения внутри кольцевого пузыря при синхронном инициировании шестью искровыми разрядами, а в работах [7, 9] показаны видеокadres торможения и деформации шести встречных фронтов горения в камере макета ДВС диаметром 72 мм и высотой 4 мм. Таким образом, время полного сжигания газовой смеси в камере не является достаточным параметром для оптимизации сжигания газов в ДВС.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование механизмов торможения и ускорения фронтов горения газа при одноочаговом и двухочаговом искровом инициировании с учетом расстояния между искровыми очагами и особенностями динамики «долгоживущих плазмоедов», возникающих в горючих газах при электрических и оптических пробоях [10, 11]. В этих работах было показано, что плазма от электрического и лазерного пробоев наблюдается до десятка миллисекунд. Предполагается, что «...эффект объясняется компенсацией радиационных энергетических потерь приходящим извне в плазму потоком химически реагирующих молекул. Поддерживаемый химически активной средой плазмоед, в свою очередь, воздействует на горючую смесь, активизируя ее и способствуя ее поджигу» [11]. Детальные физико-химические механизмы этого эффекта еще предстоит изучить. В представленной работе сделаны первые шаги в этом направлении. Авторы экспериментально исследуют процессы инициирования и горения пропан-кислородной смеси от одной и от двух близко расположенных искр.

### Постановка экспериментов

На рисунке 1 приведена схема постановки экспериментов, которые проводились в полиуретановой трубке — камере 1 — с внутренним диаметром  $d = 5$  мм и варьируемой длиной  $L = 170–860$  мм. В эксперименте использовались длинные трубки для исключения рассмотрения отраженных волн от торцов трубки за период первых стадий горения. Иницирование горения газа осуществлялось в различных частях трубки одним или двумя искровыми разрядами с межэлектродными зазорами  $\delta \approx 1–4$  мм. Игольчатые электроды 2 и 3 искровых инициаторов горения устанавливались на расстояниях  $L_1$  и  $L_2$

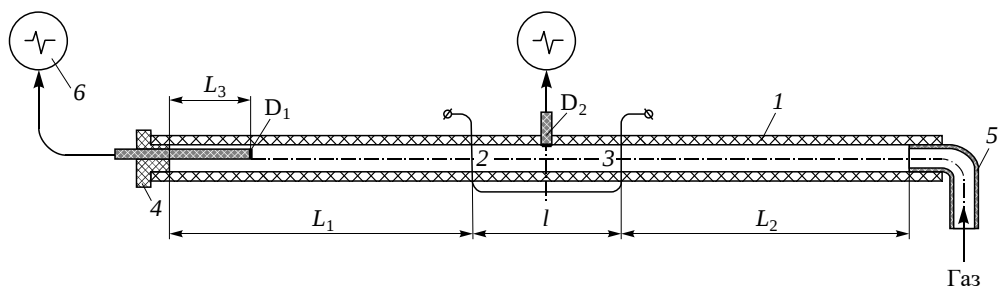


Рис. 1. Схема постановки экспериментов.

1 — полиуретановая трубка, 2 и 3 — искровые электроды-инициаторы горения, 4 — стальная пробка, 5 — трубка подвода газа, 6 — осциллограф,  $D_1$ ,  $D_2$  — датчики давления.

соответственно. Левый конец трубки закрывался стальной пробкой с плоским торцом 4. Правая часть трубки была подключена к газовакуумной системе через штуцер 5 из латунной трубки с внешним диаметром  $D = 6$  мм и внутренним —  $d = 3$  мм. Полиуретановая трубка-камера заполнялась стехиометрической пропан-кислородной смесью до давлений  $P_0 = 0,5 - 1,0$  атм. Все эксперименты выполнялись для одной стехиометрической пропан-кислородной смеси, которая была приготовлена заранее в специальном баллоне.

Зажигание горючей смеси осуществлялось с помощью одного или двух синхронных искровых инициаторов. При двухочаговом иницировании искровые промежутки подключались к высоковольтному блоку последовательно. Расстояния между искрами варьировались и составляли  $l = 7, 14, 60, 160$  мм. Длительность искровых разрядов находилась в пределах 50 нс. Энергия искрового иницирования варьировалась от 0,08 до 2 Дж. Искровые электроды были выполнены из нержавеющей стали диаметром 0,6–0,8 мм с игольчатым обострением. Система запуска синхронизировала работу скоростной камеры MotionXtra HG-LE, осциллографа и высоковольтного блока.

Измерение импульсов давлений осуществлялось турмалиновыми пьезоэлектрическими датчиками  $D_1$  и  $D_2$ , изготовленными по методике, описанной в работе [12]. Кристалл турмалина размером  $1 \times 1 \times 0,2$  мм фиксировался клеем на конический стержень, который размещался в латунной трубке диаметром 3 мм, и заливался эпоксидной смолой. Кристалл располагался на уровне среза трубки. Тарировка датчиков проводилась методом импульсной гидродинамической разгрузки. Чувствительность датчика  $D_1$  составляла 1,6 мВ/атм, а  $D_2$  — 1,0 мВ/атм. При тарировке и измерениях импульсов давления регистрация электрических импульсов осуществлялась на осциллографе TDS-210 и записывалась на компьютер.

Было выполнено две основных серии экспериментов: с одним искровым инициатором горения (I) и с двумя инициаторами (II). Регистрация давления осуществлялась одновременно с видеосъемкой процессов горения смеси. В серии I датчик  $D_1$  вставлялся со стороны пробки 4. В этом случае газодинамический поток натекал на торец датчика. В серии II параметры давления регистрировались в проходящем потоке датчиком  $D_2$ . При этом датчик размещался в стенке трубки посередине между искрами. Он имел выход на внутреннюю стенку трубки с выступом  $\sim 0,5$  мм.

Видеокадры скоростной киносъемки обрабатывались на компьютере и оформлялись в виде фоторегистрограмм. Для всех представленных в данной статье фоторегистрограмм скорость съемки составляла  $5 \cdot 10^4$  к/с. Первые кадры соответствуют моменту искровой вспышки ( $0 \pm 10$  мкс).

### Результаты экспериментов с одноочаговым иницированием

На рисунке 2 представлены примеры типичных фоторегистрограмм начальных стадий горения пропан-кислородной смеси ( $P_0 = 1$  атм) для одноочагового иницирования в трубках длиной  $L_1 = 270$  мм и  $L_2 = 420$  мм для энергий иницирования  $Q = 0,1 - 1,3$  Дж (рис. 2a) и  $Q = 2 - 3$  Дж (рис. 2b).

На фоторегистрограммах одноочагового иницирования прослеживается динамика горения с уменьшением скорости фронтов. Отметим, что с увеличением энергии иницирования возрастает светимость газа за фронтом горения. Начало самостоятельного горения в трубке в виде голубого свечения регистрируется на 60–80-й микросекундах. Торможение этого фронта горения возникает на 240–300-й микросекундах и обуславливается развитием встречных очагов горения в виде желто-красного свечения. Горение, возникающее на 300-й мкс в направлении, противоположном первому фронту голубого горения,

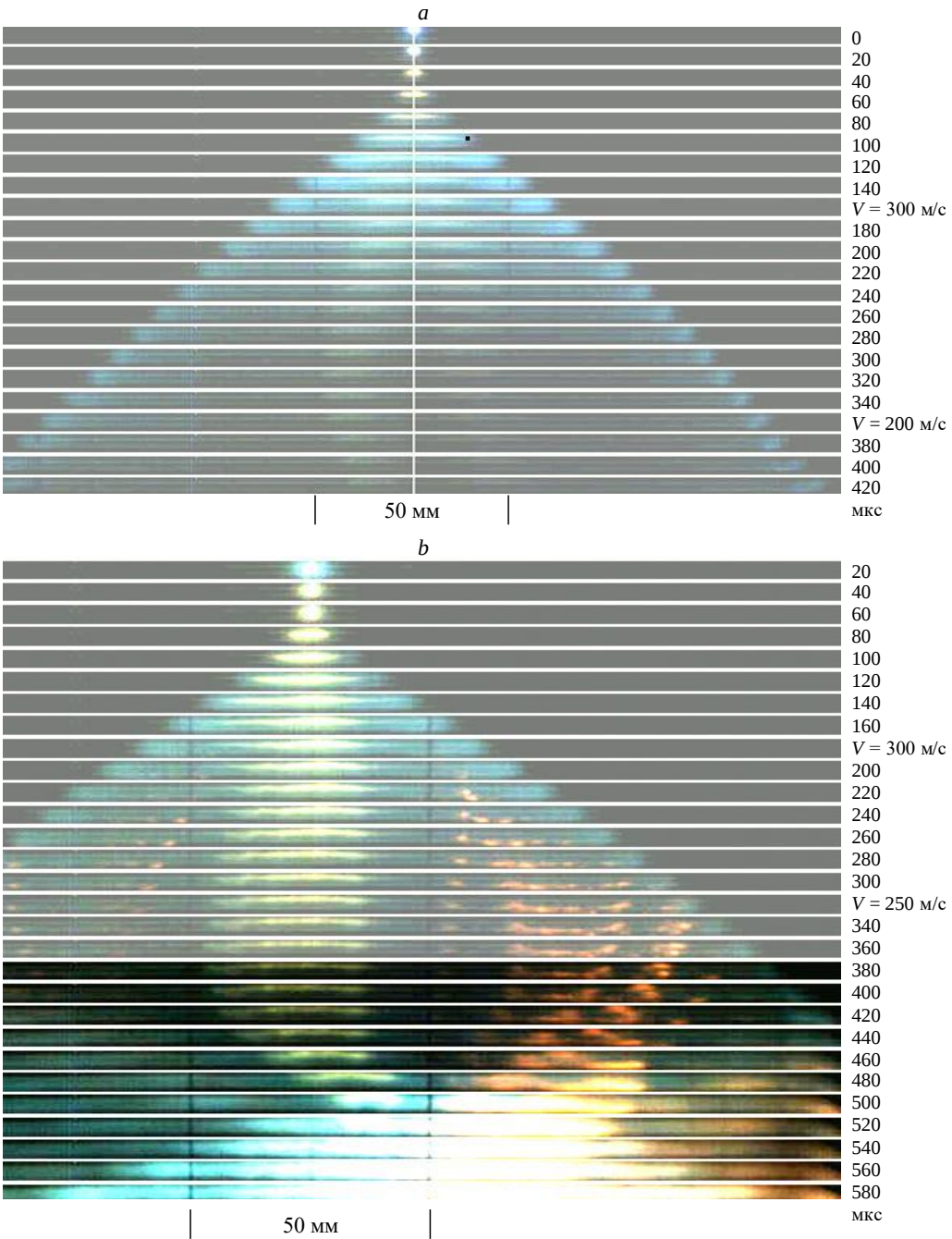


Рис. 2. Фоторегистрограммы динамики развития процессов горения при одноискровом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси.  
 $a$  —  $P_0 = 1$  атм,  $L_1 = 270$  мм,  $L_2 = 420$  мм,  $Q = 1,3$  Дж;  $b$  —  $P_0 = 1$  атм,  $L_1 = 270$  мм,  $L_2 = 420$  мм,  $Q = 2$  Дж;  
 $V$  — скорость голубого фронта горения.

и ускоряющееся до  $V_f \approx 500-800$  м/с, будем называть реверсным, так как оно не является результатом воздействия отраженных акустических или ударных волн от торцов трубки. Реверсный процесс горения аналогичен волнам ретонации [12, 13], но качественно отличается. В нашем случае наблюдаемый встречный газодинамический поток с желто-красным свечением имеет ускорение, что косвенно свидетельствует о выделении энергии

в указанных волнах. Соответственно, это является показателем того, что в первой (голубой) волне горения топливо сгорает только частично.

Средняя скорость наблюдаемого фронта голубого свечения при различных энергиях инициирования ( $Q = 0,3 - 2$  Дж) лежала в пределах  $V_1 \approx 300 - 350$  м/с, что находится в окрестности скорости звука. К моментам 500–800-й мкс регистрировались волновые процессы горения с белым свечением, что свидетельствует о повышении температуры. Так, для фоторегистрограммы, представленной на рис. 2, время прихода ударной волны от торца трубки справа составляет  $t \approx 2L_2/C \approx 1$  мс ( $C \approx 400$  м/с — скорость ударной волны).

Предполагается, что реверсное горение развивается из «горячих» точек, которые можно видеть на фоторегистрограммах. В качестве инициаторов горячих точек могут выступать нано- и микрочастицы углерода или атмосферной пыли. Вторая гипотеза подтверждается уменьшением количества горячих точек с увеличением числа экспериментов по сжиганию смеси без контакта с атмосферой при перезарядке камеры-трубки.

На 480–500-й мкс реверсный фронт горения встречается с плазмоидом. При этом происходит дополнительное выделение энергии с генерацией фронтов горения, распространяющихся влево и вправо со скоростями  $V_r \approx 500 - 800$  м/с. Затем горение переходит в третью стадию, характеризующуюся участием встречных потоков, отражаемых от торцов трубки, и наличием турбулентности. Отметим, что последовательность кинетики химических реакций горения экспериментально до сих пор не выявлена. Можно только предполагать, что в первой стадии образуются продукты CO, которые сгорают до CO<sub>2</sub> во второй и третьей стадиях, и при этом дополнительно выделяется энергия.

Следует указать на важную особенность одноочагового инициирования газа: при увеличении энергии инициирования размер генерируемого плазмоида увеличивается в размерах почти симметрично вдоль оси, что отчетливо видно на фоторегистрограмме (см. рис. 2), и не перемещается до моментов возникновения реверсных волн горения или отраженных от торцов трубки газодинамических потоков. Для малых энергий искрового пробоя (менее 0,3 Дж) определение времени свечения плазмоида затруднительно, т.к. яркость его после 80–100-й мкс близка к яркости первоначального фронта горения.

**Примечание.** Для сравнения в рассматриваемой постановке была выполнена скоростная киносъемка искровых пробоев в трубке с воздухом при  $P_0 = 1$  атм. Свечение плазмы от электрического пробоя в воздухе увеличивается до диаметра трубки и затем радиально гаснет. Время свечения искровой плазмы составляло в пределах 80–100 мкс и дополнительно контролировалось с помощью фотоэлектронного умножителя. Электрогидродинамического взаимодействия в виде относительного перемещения очагов свечения между двумя искрами ( $l = 7$  мм) обнаружено не было как при последовательном, так и при параллельном подключении разрядных промежутков.

На рисунке 3 представлены осциллограммы давлений, зарегистрированных датчиком давления  $D_1$  в трубке длиной  $L_0 = 180$  мм, установленным на расстоянии  $L = 145$  мм от искрового инициатора для различных значений начальных давлений  $P_0$  газовой смеси. Искровой промежуток располагался на расстоянии 5 мм от торца штуцера. Для всей серии экспериментов по измерениям  $P(t)$  проводилась синхронная скоростная киносъемка. Это позволяло отождествлять газодинамические процессы в корреляции с осциллографическими измерениями  $P(t)$ . В таблице приведены основные численные данные, полученные на основании регистрации параметров  $P(t)$ .

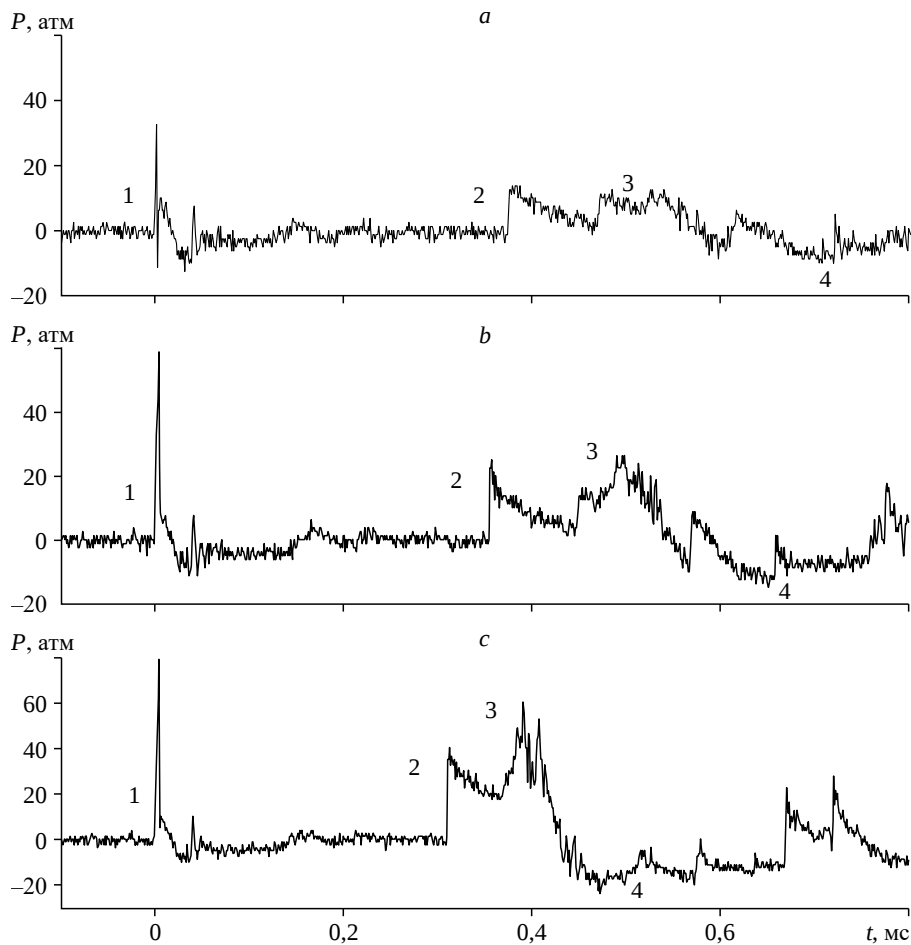


Рис. 3. Осциллограммы  $P(t)$ , зарегистрированные датчиком  $D_1$  на расстоянии  $L_0 = 145$  мм от искры.

$P_0 = 0,5$  (a),  $0,6$  (b),  $0,75$  (c) атм;  
характерные моменты осциллограмм давления: 1 — наводка от искрового разряда,  
2 — профиль ударной волны, 3 — профиль волны горения,  
4 — волна разрежения за фронтом горения.

Статистику измерений импульсов давлений собрать не удалось, т.к. датчик разрушился при  $P_0 = 1,0$  атм. Однако из полученных результатов наглядно следует, что во всех вариантах заполняемой газовой смеси и интервале давлений  $P_0 = 0,5–1,0$  атм в трубке развивались сверхзвуковые газодинамические процессы с генерацией ударной волны перед фронтом горения. При этом были обнаружены следующие особенности горения: давление во фронтальной зоне горения имело два амплитудных пика с интервалами  $T_3$ ;

Таблица

| № экспери-мента | $P_0$ , атм | $T_1$ , мкс | $T_2$ , мкс | $T_3$ , мкс | $L_0/T_1$ , м/с | $P_1$ , атм | $P_2$ , атм |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| 7               | 0,5         | 375         | 96          | 60          | 387             | 14          | 13          |
| 9               | 0,6         | 355         | 100         | 60          | 408             | 25          | 26          |
| 10              | 0,6         | 350         | 100         | 50          | 414             | 22          | 26          |
| 11              | 0,75        | 312         | 77          | 30          | 465             | 38          | 60          |
| 13              | 0,9         | 327         | 79          | 30          | 443             | 50–70       | 185         |
| 16              | 1,0         | 315         | 60          | 25          | 460             | –           | –           |
| 17              | 1,0         | 320         | 62          | 25          | 453             | –           | –           |

второй пик давления с увеличением  $P_0$  нелинейно возрастал, а интервал времени  $T_3$  уменьшался. Предположительно, второй пик давления в зоне  $T_3$  обусловлен натеканием плазмоида на датчик давления.

### Результаты экспериментов с двухочаговым инициированием

На рисунке 4 представлена цветовая фоторегистрограмма двухочагового инициирования и горения пропан-кислородной смеси для случая расстояния между искрами  $l = 7$  мм,  $L_1 = L_2 = 270$  мм,  $P_0 = 1$  атм. Суммарная энергия инициирования двух искр  $Q = 0,3$  Дж.

На фоторегистрограмме рис. 4 можно видеть основные характерные процессы. Так, в начальной стадии наблюдается симметрично ускоряющийся газодинамический разлет плазмоидов, которые принудительно ведут фронты горения газовой смеси влево и вправо в виде голубого свечения. Затем плазмоиды тормозятся и фронты горения отрываются от плазмоидов. Далее в зоне первой стадии горения в обратном направлении развиваются волны второй стадии реверсного горения ( $V_r$ ) с желто-белым свечением, отличающиеся явным ускорением по сравнению с первым голубым фронтом горения.

Для выявления механизмов торможения и ускорения горения при двухочаговом инициировании были поставлены эксперименты с увеличенными расстояниями между двумя искрами. На рис. 5 представлена одна из фоторегистрограмм процессов горения для случая двухочагового инициирования с расстоянием между искровыми очагами  $l = 60$  мм. На фоторегистрограмме прослеживаются основные особенности газодинамических процессов: торможение встречных фронтов горения до их остановки и газодинамический разлет искровых плазмоидов, ускоряющих горение.

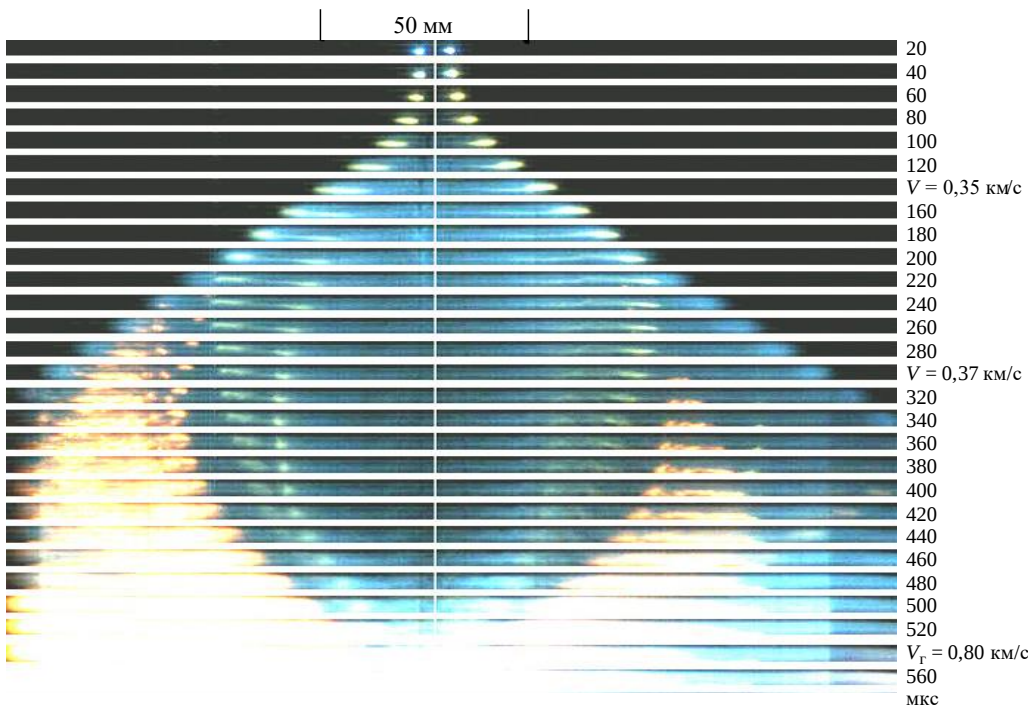


Рис. 4. Фоторегистрограмма динамики процессов горения при двухочаговом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси при  $l = 7$  мм,  $L_1 = L_2 = 270$  мм,  $P_0 = 1$  атм,  $Q = 0,3$  Дж.

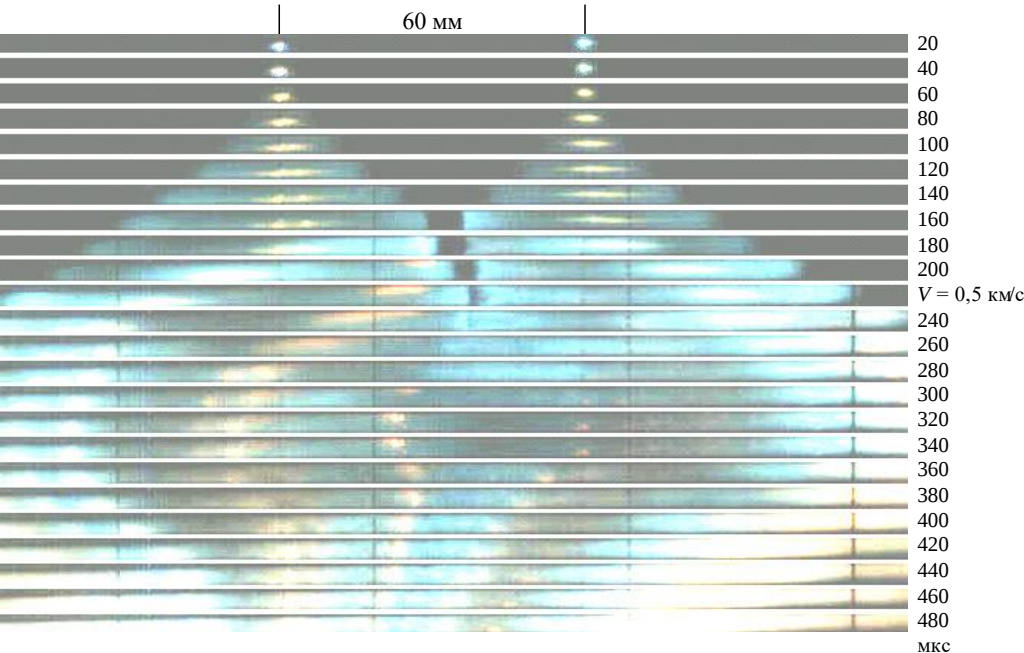


Рис. 5. Фоторегистрограмма динамики развития процессов горения при двухискровом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси при  $l = 60 \text{ мм}$ ,  $P_0 = 0,75 \text{ атм}$ ,  $Q = 0,5 \text{ Дж}$ .

Для указанной постановки инициирования были выполнены эксперименты с одновременной регистрацией давления в зоне между очагами инициирования с помощью датчика  $D_2$ . Датчик устанавливался на равном расстоянии между искровыми источниками ( $l/2 = 30 \text{ мм}$ ). Менялось только количество подключенных искровых источников. На рис. 6 представлены результаты регистрации импульсов давлений при следующих условиях эксперимента:  $P_0 = 0,75 \text{ атм}$ , общая энергия инициирования  $Q = 0,5 \text{ Дж}$ ,  $L_1 = 420 \text{ мм}$ ,  $L_2 = 360 \text{ мм}$ .

На рис. 6а приведена осциллограмма  $P(t)$ , полученная при инициировании горения двумя очагами инициирования, а на рис. 6б показана осциллограмма  $P(t)$  при отключении левого искрового очага инициирования.

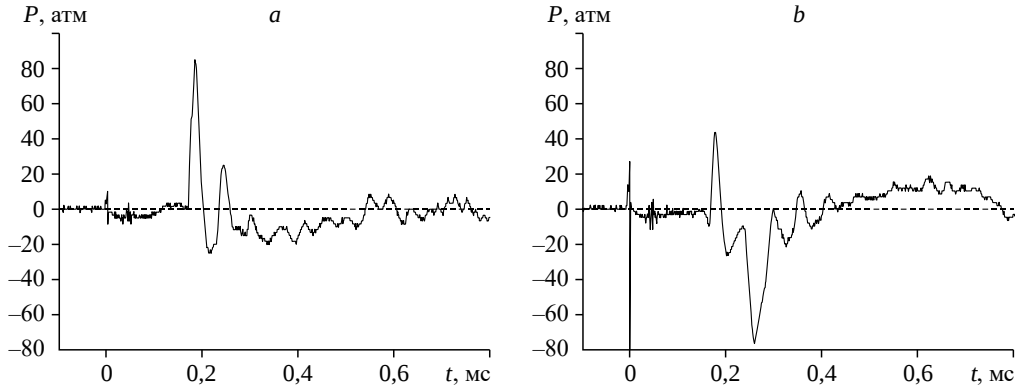


Рис. 6. Осциллограммы давления  $P(t)$ , полученные с помощью датчика  $D_2$  при  $P_0 = 0,75 \text{ атм}$  в случае двухочагового инициирования (а) и при том же положении датчика, но с отключенным левым искровым очагом (б).

На рисунке 5 хорошо прослеживается динамика встречных газодинамических потоков. Видно, что в районе значения 160 мкс происходит торможение голубых фронтов горения вплоть до их остановки, а с момента 180 мкс оба плазмоида начинают движение в противоположных направлениях, догоняют и ускоряют фронты горения. Подобные взаимодействия фронтов горения и плазмоидов качественно наблюдалось в двумерной постановке экспериментов [7–9], однако в указанных публикациях эти процессы не были отмечены.

Из проведенной серии экспериментов следует, что амплитуда давления для встречных волн сжатия в зоне их встречи в два раза больше (рис. 6а), чем от одного источника (рис. 6б). Этот факт свидетельствует о том, что при встрече двух ударных волн обеспечиваются условия повышения температуры исходного газа. Встречные ударные волны тормозят встречные фронты горения, при этом они разгоняют плазмоиды в зоне голубого горения газа до скоростей 1,5 км/с. Плазмоиды могут догонять фронты голубого горения, в результате фронты горения увеличивают скорость.

Особо следует отметить, что для экспериментов с двухочаговым инициированием при энергиях инициирования  $Q > 0,3$  Дж наблюдалось возвратное движение плазмоидов в зоне первой стадии горения. В целом это выглядит аналогично пульсациям при сферических взрывах в неограниченном пространстве и свидетельствует о том, что плазмоиды проявляют функции поршней при сгорании газа между двумя очагами инициирования. Наиболее наглядно это видно на рис. 4. Исходя из вышеописанного, оценку периода пульсации  $T$  можно выполнить по закону Виллиса [14] с точностью до определения плотности газа  $\rho$  в зоне голубого свечения и максимального разлета плазмоидов  $D$ :  $T \approx 0,9 \cdot D \cdot (\rho/P)^{0,5}$ . Так, для  $D \approx 100$  мм,  $\rho = 1$  кг/м<sup>3</sup>,  $P = 10^5$  Па имеем  $T \sim 400 - 500$  мкс.

Эксперименты показали, что при расстоянии между очагами инициирования менее 14 мм и электрической энергии инициирования менее 0,3 Дж может почти сразу развиваться одностадийный, высокотемпературный процесс горения. На рис. 7 и 8 представлены фоторегистрограммы для такого случая при  $Q = 0,08$  Дж. Контрастирование фоторегистрограммы рис. 7 позволило обнаружить эффект турбулентности плазмоидов. На рис. 8 представлена такая фоторегистрограмма.

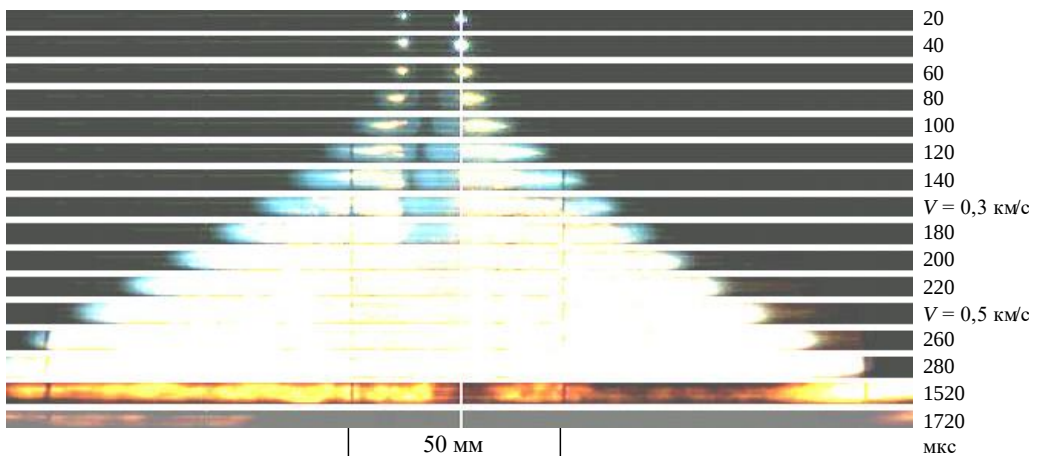


Рис. 7. Фоторегистрограмма динамики развития процессов горения при двухисковом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси при  $l = 14$  мм,  $P_0 = 1$  атм,  $Q = 0,08$  Дж.

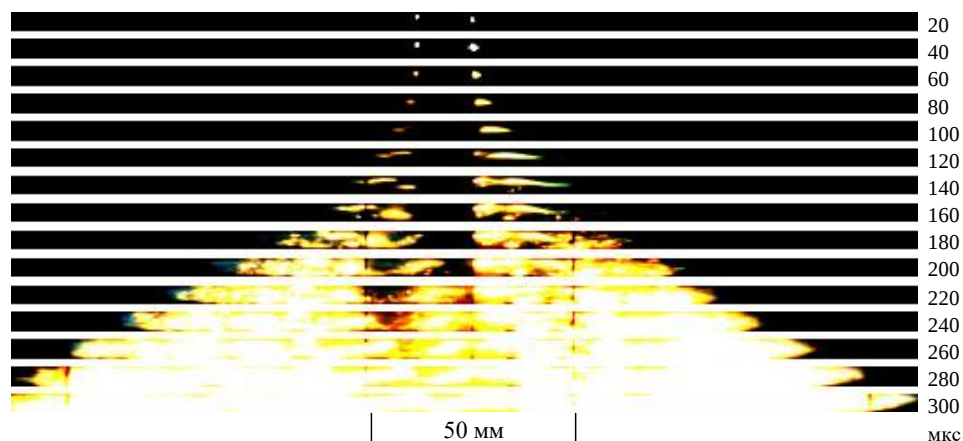


Рис. 8. Контрастированная фоторегистрограмма развития процессов горения при двухискровом инициировании стехиометрической пропан-кислородной смеси при  $l = 14$  мм,  $P_0 = 1$  атм,  $Q = 0,08$  Дж.

Полученные фоторегистрограммы наглядно показывают, что высокотемпературное горение развивается без промежуточных стадий. Это обусловлено тем, что с уменьшением энергии инициирования уменьшается масса плазмойда, которая преимущественно состоит из паров металла от электродов. При этом видно, что и выделяющейся на границе с плазмой энергии оказывается достаточно для обеспечения квазистационарного процесса горения с движением всего плазмойда. Вполне можно полагать, что плазмойд является катализатором горения [11, 15]. По сути, в данном случае плазмойды на границе с горючим газом обеспечивают уже высокотемпературную стадию горения как инициирующие факелы.

Таким образом, из результатов экспериментов следует, что увеличение электрической энергии инициирования не способствует ускорению сжигания газа как для одноочагового, так и для двухочагового искрового инициирования. При одноочаговом инициировании плазмойд остается на месте, и высокотемпературная область симметрично увеличивается вдоль оси трубки (рис. 2). А при двухочаговом инициировании плазмойды могут обеспечивать горение как движущиеся факелы. При этом необходимо учитывать, что если сечение плазмойда соизмеримо с диаметром трубки, то он может тормозиться, как поршень. Из данных рис. 7 и 8 следует, что с уменьшением электрической энергии инициирования размеры искровой плазмы уменьшаются.

Из полученных результатов следует, что для оптимизации сжигания газа с применением многоочаговых методов инициирования необходимо создавать условия конвекции газа. Именно эти условия генерируются парными искровыми разрядами с минимизацией расстояния между очагами. При этом минимальная энергия инициирования  $Q_{\min}$  будет определяться удельной энергией горючего газа  $q$  и объемом искровой плазмы  $V_{pl}$  следующим образом:  $Q_{\min} = q \cdot V_{pl}$ . Данная зависимость демонстрирует, что величина выделяющейся химической энергии между электродами должна быть достаточной для газодинамического разгона искровых плазмойдов, удельная плотность которых выше плотности газа.

### Краткий анализ результатов

Из результатов экспериментов легко видеть существенные различия в развитии процессов горения для одноочагового и двухочагового инициирования в пропан-кислородной смеси. Выделим основные принципиальные различия одноочагового и двухочагового инициирования стехиометрической пропан-кислородной смеси.

1. В вариантах одноочагового инициирования (рис. 2) образовавшийся от электрического разряда плазмодид увеличивается в размерах вдоль трубки, но не перемещается. Голубые фронты горения со скоростями  $V \sim 300$  м/с развиваются влево и вправо с последующим затуханием. Этот процесс соответствует первой стадии горения.

2. Обнаруженное реверсное горение в виде встречных волн с желто-красным свечением следует отнести ко второй стадии горения. Встречное горение может развиваться в результате натекания фронта исходного горения на различные флуктуации плотности, включая микро- и наночастицы. Такими препятствиями могут быть нано- и микрочастички углерода, оставшиеся от предыдущих экспериментов, или частички из атмосферы, проявившиеся при перезарядке камеры. И, наконец, третья стадия — это горение после отражения газодинамических потоков от торцов трубки.

3. В вариантах двухочагового инициирования плазмодиды проявляют функцию факельных поршней. В периоды сближения встречных фронтов горения наблюдается эффект их торможения вплоть до остановки с повышением яркостной температуры. Почти одновременно с торможением фронтов горения можно видеть радиальный разлет левого и правого плазмодидов со скоростями  $V_p \sim 300 - 1000$  м/с. Однако увеличение скорости плазмоида возможно только с уменьшением объема исходной искровой плазмы, что достигается путем уменьшения энергии искрового разряда.

4. Как следует из полученных результатов, с уменьшением расстояния между двумя очагами скорости фронтов горения становятся соизмеримы со скоростью плазмодидов. Предполагается, что в плазмоидах происходят плазмохимические, каталитические и конвективные процессы, которые ускоряют кинетику горения. В целом эти процессы обеспечивают развитие ускорения горения вдоль оси трубки в противоположных направлениях.

5. Во всех вариантах двухочагового инициирования, когда скорость плазмоида соизмерима со скоростью наблюдаемого фронта горения, тип горения уже не удовлетворяет диффузионной модели, т.к. этот процесс развивается с газодинамическим разгоном плазмодидов и сопровождается турбулентными и конвективными процессами.

### Заключение

Экспериментально выявлена принципиальная роль искровой плазмы в динамике ускорения сжигания газа. Показано, что искровые плазмодиды, генерируемые при двухочаговом инициировании, являются определяющими физическими элементами в процессах ускорения горения пропан-кислородных зарядов. Также экспериментально продемонстрированы преимущества двухочагового инициирования по сравнению с одноочаговыми, которые заключаются в создании условий развития ускоренного перехода дефлаграционного горения в процесс сжигания газа за счет ускорения плазмодидов встречными газодинамическими потоками.

Авторы приносят свои благодарности В.А. Буневу и С.А. Ждану за полезные обсуждения работы.

### Список литературы

1. 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.
2. Kociszewski A., Jamrozik A., Sosnowski M., Tutak W. Computational analysis and experimental research into lean mixture combustion in multi-spark plug si engine // J. KONES. 2006. Vol. 13, No. 3. P. 123–130.
3. 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.
4. 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.
5. Miyama. Multispark Multi-point ignition technology. <http://multispark.net/> (2006-2015).
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. техн. физики. 2019. Т. 89, вып. 10. С. 1529–1534.
7. Тесленко В.С., Дроzhжин А.П. Многоочаговое инициирование и горение пропана в макете цилиндра ДВС // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 5. С. 745–751.
8. Teslenko V.S., Drozhzhin A.P., Medvedev R.N. Multispark initiation of ring gas charges in water // J. Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1359. P. 012060-1–012060-7.
9. Teslenko V.S., Drozhzhin A.P., Anisichkin Yu.V. Multispark initiation of propane combustion in an enclosed volume // J. Physics: Conf. Series. 2020. Vol. 1666. P. 012065-1–012065-5.
10. Косый И.А., Силаков В.П., Тарасова Н.М., Тактакишвили М.И. Долгоживущие плазмониды как инициаторы горения газовых смесей // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 4. С. 375–384.
11. Косый И.А., Силаков В.П., Тарасова Н.М., Д ван Ви. Аномально движущиеся плазмониды, генерируемые поверхностной лазерной искрой в горючих газовых средах // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 4. С. 382–384.
12. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. М., 1963. 175 с.
13. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
14. Коул Р. Физика подводного взрыва. М: Изд-во Иностранной литературы, 1950. 494 с.
15. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М: Наука, 1984. 415 с.

*Статья поступила в редакцию 21 мая 2024 г.,  
принята к публикации 5 декабря 2024 г.*