

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Влияние магнитного поля на продольно-поперечный разряд в высокоскоростных потоках воздушно-углеводородной смесиА. И. Алексеев^а, Д. Н. Ваулин^б, В. А. Черников*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^а ai.alekseev@physics.msu.ru, ^б vaud@yandex.ru*

Статья поступила 19.01.2015, подписана в печать 27.04.2015.

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния неоднородного магнитного поля на характер воспламенения и горения воздушно-пропановой смеси в сверхзвуковом потоке, инициированных продольно-поперечным разрядом постоянного тока. Показано, что в зависимости от ориентации вектора индукции магнитного поля относительно направления разрядного тока и вектора скорости потока горение воздушно-пропановой смеси в высокоскоростном потоке может происходить либо более интенсивно, либо ухудшаться по сравнению со случаем отсутствия магнитного поля.

Ключевые слова: электрический разряд, плазменно-стимулированное горение, высокоскоростной поток, разряд в магнитном поле.

УДК: 533.9. PACS: 52.57.Kk.

Введение

В последние годы выполнено достаточно большое количество экспериментальных и теоретических работ, относящихся к сравнительно новой области физики — плазменной аэродинамике, в том числе посвященных исследованиям возможности использования плазменных разрядов для инициации горения топливной смеси в сверхзвуковых потоках, необходимого для эффективной работы прямоточных воздушно-реактивных двигателей [1–10]. При этом применялись различные типы газовых разрядов: высоковольтные [1], импульсные [2, 3] и СВЧ [4–6] разряды, а также разряды постоянного тока [7, 8] и барьерные разряды [9, 10]. В указанных работах показано, что именно электрические разряды позволяют обеспечить плазменно-стимулированное объемное и быстрое воспламенение и горение топливно-воздушной смеси, определены режимы несамостоятельного горения. Однако во всех работах [1–8] по плазменно-стимулированному горению топливной смеси в высокоскоростных потоках наблюдается один характерный факт: горение смеси прекращается при исчезновении плазмы, созданной любым источником. В связи с этим остается нерешенной проблема реализации процесса горения топливной смеси в высокоскоростном потоке после прекращения разряда. Кроме того, остается нерешенным до конца вопрос о влиянии на полноту сгорания (интенсивности горения) топлива различных внешних условий, при которых происходит плазменный разряд. Одним из методов решения указанных проблем может являться создание в области разряда магнитного поля, которое при определенной ориентации изменяет траекторию (с прямолинейной на спиральную) движения как плазменных, так и образовавшихся при горении заряженных частиц. При этом увеличивается время взаимодействия топлив-

ной смеси с плазмой, что может привести к частичной стабилизации фронта горения и к увеличению полноты его сгорания. Настоящая работа посвящена исследованию влияния неоднородного магнитного поля, созданного в области продольно-поперечного разряда, на процесс плазменно-стимулируемого горения воздушно-пропановой смеси в высокоскоростном потоке.

1. Экспериментальная установка

Для исследования воздействия магнитного поля на плазму в сверхзвуковом потоке топливной смеси использовалась баллонно-вакуумная аэродинамическая установка кратковременного действия, схема которой приведена на рис. 1. Более подробное описание установки дано в работе [8], поэтому приведем лишь краткое изложение принципов работы установки в целом и некоторых отдельных ее узлов. Основой установки являлся сверхзвуковой канал 9, который состоял из осесимметричного сопла, рассчитанного на число Маха $M = 2$, формирующей секции и четырех прямоугольных рабочих секций сечением $2.5 \times 4 \text{ см}^2$, в одной из которых размещался генератор плазмы, а другие служили для диагностики процессов воспламенения и горения воздушно-пропановой смеси в высокоскоростном потоке.

Канал оборудован системой подачи топлива 14 и оснащен системой из 15 датчиков абсолютного давления 10, расположенных во всех секциях. Топливо в канал поступает через топливораздаточные фланцы 13 как непосредственно в сверхзвуковой тракт, так и в область за уступом. Топливо-воздушная смесь воспламеняется с помощью генераторов плазмы того или иного типа, вводимого в камеру сгорания через нижние фланцы 12. Основные параметры канала следующие: число Маха потока $M = 2$, диапазон статических давлений

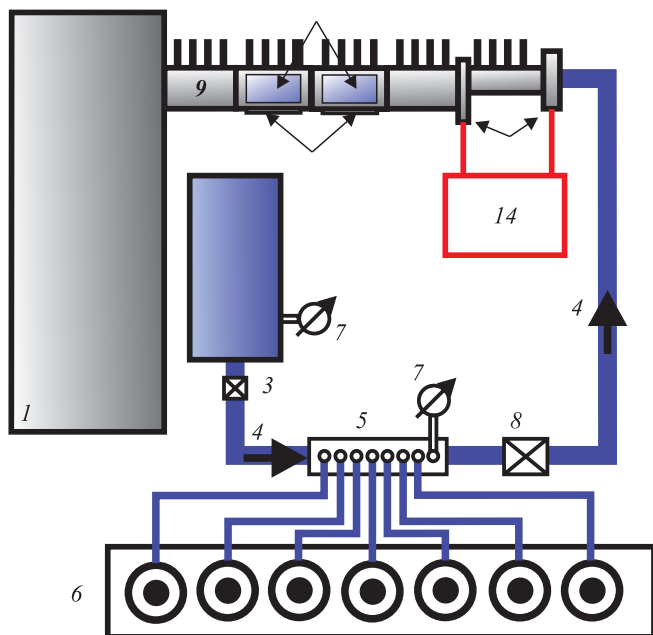


Рис. 1. Общая схема экспериментального стенда: 1 — вакуумная камера, 2 — компрессор, 3 — кран, 4 — воздухопроводы, 5 — сборочный коллектор, 6 — баллонная рампа, 7 — манометры, 8 — управляемый пневмоклапан, 9 — сверхзвуковой канал, 10 — датчики давления, 11 — иллюминаторы, 12 — фланцы для крепления вспомогательных электродов, 13 — топливораздаточные фланцы, 14 — система подачи топлива

$p_{st} = 0.25\text{--}0.6$ атм, давлений в ресивере компрессора $P = 2\text{--}6$ атм; время стационарного режима работы 1–3 с. Во всех экспериментах в качестве топлива использовался пропан.

Принцип работы установки следующий: с помощью компрессора 2 воздух по трубопроводу 4 через сборочный коллектор 5 нагнетается в дополнительную баллонную систему 6. Ее наличие позволяет довести общий объем камеры высокого давления (ресивер самого компрессора вместе с баллонами) до 0.5 м^3 . Рабочее давление в ресивере контролируется с помощью манометров 7 и может достигать 6 атм. Из ресивера через управляемый пневмоклапан 8

поток воздуха поступает непосредственно в сверхзвуковой канал 9.

Для инициации горения потока сверхзвуковой воздушно-пропановой смеси применялся продольно-поперечный разряд (ППР) постоянного тока. Он создавался с помощью источника питания с выходным напряжением до 5 кВ и максимальным током до 25 А. Длительность работы источника могла изменяться в пределах от 1 мс до нескольких секунд. Выделяемая в разряде средняя мощность не превышала 2.5 кВт.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Регистрация процесса воспламенения и горения воздушно-пропановой смеси в высокоскоростном потоке производилась при помощи двух фотоэлектронных умножителей. ФЭУ-1 фиксировал свечение разряда во второй секции канала, расположенной непосредственно за рабочей секцией с разрядом (боковой ФЭУ). Данный ФЭУ размещался перпендикулярно каналу и был диафрагмирован для повышения точности измерений. Второй фотоумножитель, ФЭУ-2, использовался для регистрации свечения с торца канала (торцевой ФЭУ). Использовалась также система датчиков давления, расположенных во всех секциях канала. Для характеристики горения правильное было бы использовать термин «полнота сгорания топлива», но в настоящих экспериментах определить полноту сгорания не представлялось возможным, поэтому был использован термин «интенсивность горения», который качественно зависит от полноты сгорания смеси.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы свечения разряда, регистрируемые торцевым и боковым фотоумножителями. Из приведенных осциллограмм следует, что при разряде в воздушно-пропановой смеси фиксируется резкое возрастание (на порядок и более) интенсивности свечения, регистрируемое боковым ФЭУ, и незначительный рост сигнала с торцевого ФЭУ. Это связано с тем, что торцевой ФЭУ фиксирует интегральное (вдоль оси канала) свечение разряда как в воздухе, так

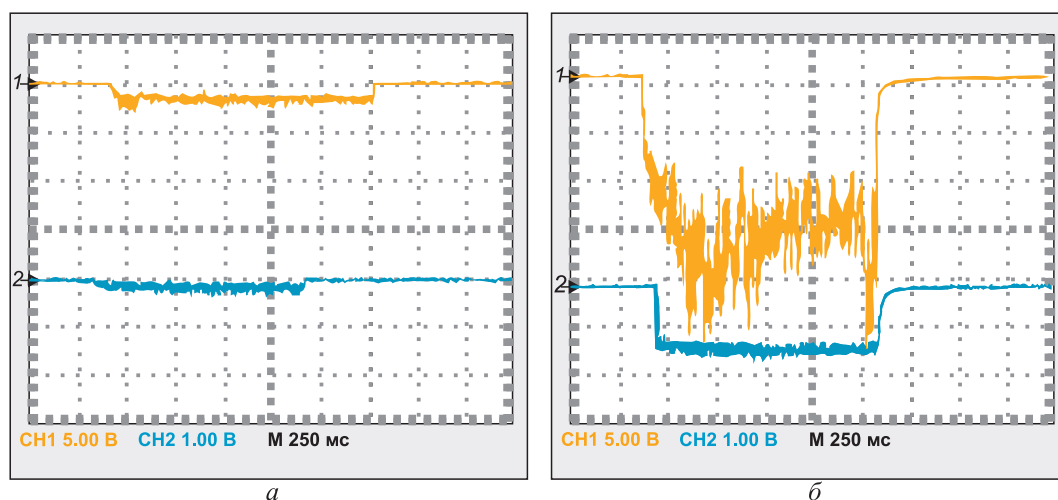


Рис. 2. Характерные осциллограммы свечения, регистрируемые боковым (1) и торцевым (2) ФЭУ. Разряд: а — в воздушном потоке и б — в потоке топливной смеси. $I = 19$ А

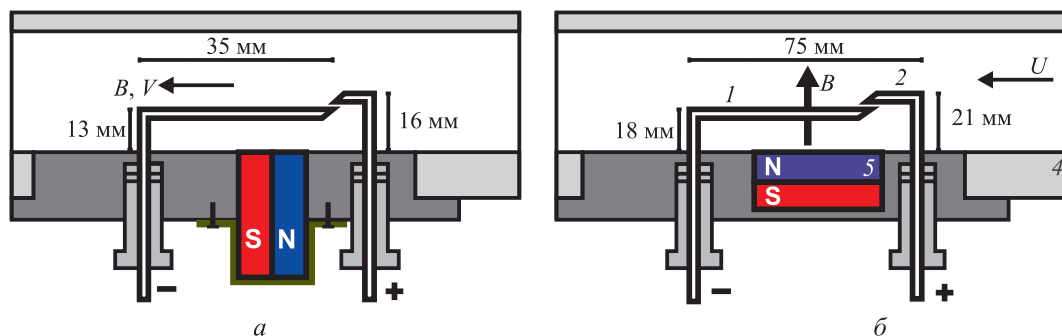


Рис. 3. Расположение постоянных магнитов внутри электродного фланца, расположенного во второй секции канала: 1 — катод, 2 — анод, 3 — диэлектрический люк, 4 — стенка канала, 5 — магниты. Кривые соответствуют аксиальным линиям напряженности магнитного поля. Стрелками изображено направление максимальной индукции магнитного поля и горизонтальной составляющей скорости потока

и в воздушно-пропановой смеси. При этом рост интенсивности свечения разряда в результате горения смеси оказывается относительно небольшим. В то же время боковой ФЭУ, расположенный на расстоянии 30 см от разряда по потоку, регистрирует интенсивность свечения пламени, возникающего при горении и выносимого потоком из области разряда во вторую секцию канала. При разряде в воздухе горения нет и сигнал с ФЭУ очень слабый: фиксируется только рассеянное свечение самого разряда. При разряде в воздушно-пропановой смеси возникает плазменно-стимулированное горение, образующееся при этом пламя горения выносится потоком из области разряда, что приводит к резкому возрастанию сигнала с бокового ФЭУ, что и наблюдается в эксперименте.

Неоднородное магнитное поле в окрестности электродов создавалось при помощи двух постоянных магнитов (NdFeB), максимальная величина остаточной индукции которых в открытом воздушном пространстве составляет $B = 1.22\text{--}1.26$ Тл (аксиальное намагничивание).

Максимальная удельная магнитная энергия магнита составляет 303 кДж/м³. Линейные размеры каждого магнита, имеющего форму параллелепипеда, составляют $40 \times 20 \times 9$ мм. В зависимости от ориентации вектора индукции магнитного поля были выбраны две основные конфигурации расположения магнитов. При таком выборе предполагалось, что в первом случае сила, действующая со стороны магнитного поля на тяжелые заряды, возникающие в плазме и при горении смеси, минимальна, а во втором — максимальна.

Схемы непосредственного расположения магнитов в канале относительно электродов представлены на рис. 3.

В конфигурации № 1 (рис. 3, а) магнитное поле направлено вдоль потока, а сила Лоренца действует только на вертикальную составляющую разрядного тока. При этом на основной токовый канал влияния почти не оказывается.

В конфигурации № 2 магниты расположены в люке ниже разряда (рис. 3, б) и поле направлено вертикально, сила Лоренца, действующая на положительные ионы, отклоняет их поток и разряд в целом либо к левой (по потоку) стенке канала (конфигурация № 2S, под разрядом расположен южный полюс

магнита), либо к правой (конфигурация № 2N, под разрядом расположен северный полюс магнита).

Рассмотрим конфигурацию № 1. В этом случае линии индукции магнитного поля направлены вдоль потока. При этом, согласно [11], возможно выделить две характерные фазы развития разряда: первоначальный пробой межэлектродного промежутка и образование линейного разряда в области зазора между электродами (фаза I, рис. 4, а). Реализация первой фазы связана с локальным торможением потока вблизи края катода в связи с наличием косого скачка. В этой области скорость дрейфа заряженных частиц в электрическом поле, направленного поперек потока, превышает скорость сноса, связанную с потоком. Поэтому в этой фазе разряд сохраняет относительно стабильную форму, характерную для протекания разряда без потока. Время существования первой фазы составляет величину $\sim 20\text{--}60$ мкс, затем под действием потока начинается вынос линейного разряда вдоль нижнего электрода и формируется вторая конвективная фаза разряда (фаза II, рис. 4, б). В этой фазе развития разряда характерно преобладание скорости сноса заряженных частиц в результате действия потока над скоростью дрейфа. При достижении определенного напряжения [11] происходит повторный пробой межэлектродного разрядного промежутка, и процесс формирования фаз повторяется с частотой ~ 10 кГц.

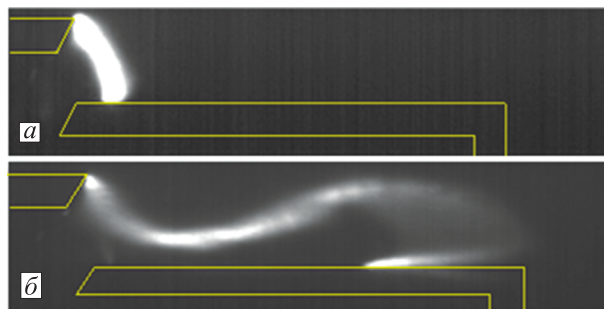


Рис. 4. Два последовательных кадра скоростной видеосъемки, выполненные с экспозицией 20 мкс: а — фаза I, б — фаза II

Влияние объемной магнитной силы является наиболее значимым при протекании тока поперек вектора максимальной индукции системы постоянных магнитов, т. е. в первой фазе существования разряда.

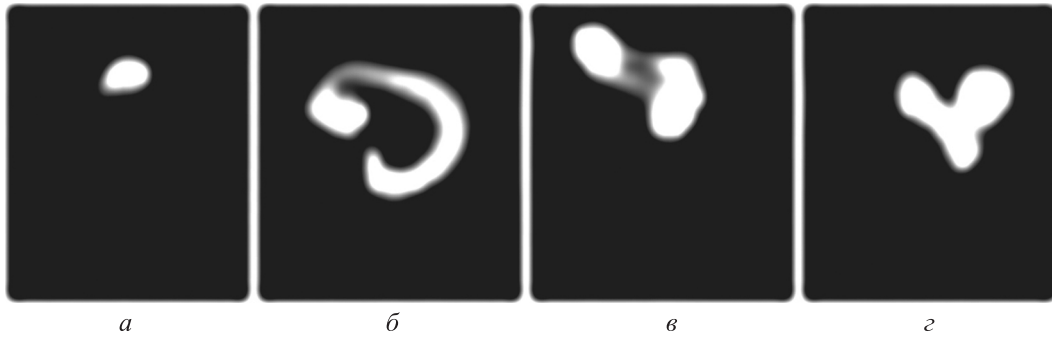


Рис. 5. Структуры разряда, реализуемые в потоке воздушно-пропановой смеси. Средний разрядный ток $I = 15$ А; а — разряд в минимальном межэлектродном промежутке, б — вращение разрядного канала, в — частичное вращение разрядного канала, г — совместное существование разрядных каналов, замыкающихся через боковую поверхность катода. Время экспозиции каждого кадра 20 мкс

Размещение скоростной видеокамеры у фланца, расположенного напротив выхода аэродинамического канала, позволило провести видеосъемку развития разряда в поперечном сечении (рис. 5). Используемая в экспериментах скоростная камера позволяла получать серию кадров длительностью 20 мкс каждый, с частотой 50 Гц. Поскольку процесс формирования фаз разряда повторялся (как уже указывалось ранее) с частотой 10 кГц, то даже при отсутствии синхронизации удавалось получать кадры, соответствующие различным моментам развития разряда. Полученные фотографии позволяют выявить структуры, которые могут быть классифицированы по типу замыкания разрядного канала и его динамики.

На фотографиях (рис. 5) представлено классическое протекание разряда (а), вращение разряда, обусловленное дестабилизацией магнитным полем и гидродинамическим полем скоростей (б), снос разряда в направлении, ортогональном основной составляющей скорости потока (в), совместное существование двух разрядных каналов (г).

Следующая серия экспериментов была проведена в конфигурации № 2, когда магниты расположены в люке канала горизонтально, и линии магнитного поля перпендикулярны потоку и направлены либо сверху вниз (№ 2S), либо в противоположном направлении (№ 2N). В этих конфигурациях магнитное поле действует на конвективную, вторую фазу

развития разряда.

На рис. 6 приведены зависимости от разрядного тока: давления в разрядной секции канала (рис. 6, а) и интенсивности свечения разряда, регистрируемого боковым ФЭУ. Объемная сила Лоренца в этом случае действует на заряженные частицы в горизонтальной плоскости перпендикулярно потоку. Как следует из рис. 6, а, направление вектора магнитной индукции практически не влияет на показания датчиков давления. Следовательно, в данной конфигурации № 2 эффективность перемешивания воздушно-пропановой смеси в потоке не зависит от направления магнитного поля. В то же время можно отметить, что интенсивность горения топливной смеси в присутствии магнитного поля в данной конфигурации возрастает относительно случая без воздействия магнитного поля в результате увеличения объема взаимодействия топливной смеси с плазмой. Так, в присутствии магнитного поля одно и то же давление в разрядной области достигается при меньших токах разряда, чем при отсутствии поля.

В случае регистрации свечения пламени горения боковым ФЭУ (рис. 6, б) зависимости от разрядного тока получаются несколько иными. В условиях данных экспериментов интенсивность свечения существенно зависит от направления вектора индукции магнитного поля. Так, при конфигурации № 2N в результате увеличения объема взаимодействия топливной смеси с плазмой интенсивность горения

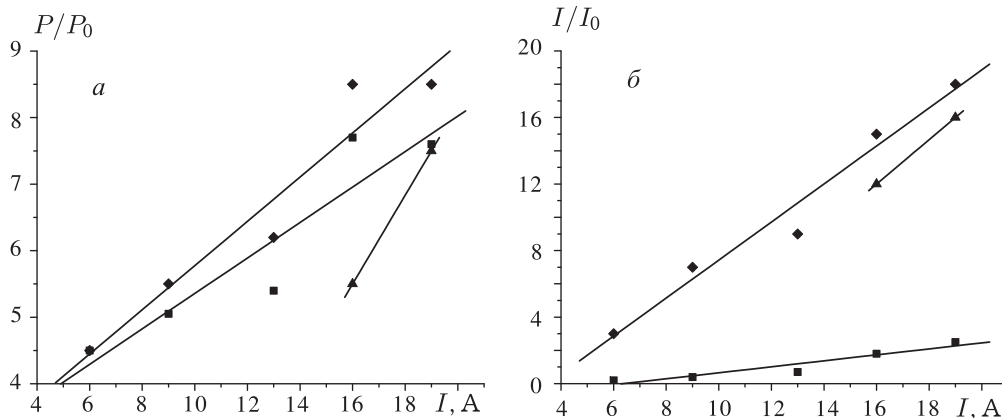


Рис. 6. Зависимости от тока разряда: а — давление в разрядной секции и б — интенсивности свечения пламени горения. Поле вертикально, перпендикулярно потоку. Конфигурации: $\blacklozenge$ — № 2N, $\blacksquare$ — № 2S, $\blacktriangle$ — без магнитного поля

топливной смеси возрастает по сравнению со случаем отсутствия поля. При другой конфигурации № 2S интенсивность свечения оказывается значительно меньше, чем при конфигурации № 2N, и даже меньше интенсивности свечения, которая фиксируется при отсутствии магнитного поля. Такая ситуация объясняется тем, что при конфигурации № 2S сила, действующая на заряженные частицы со стороны магнитного поля в горизонтальном направлении, приводит к их замыканию на стенку канала, и наблюдаются срывы разрядного тока. Это связано с тем, что регистрация осциллограмм тока разряда осуществляется при помощи шунта (с сопротивлением 0.32 Ом), включенного в электрическую цепь между катодом и отрицательным полюсом источника питания, с которым также соединен канал. В условиях, когда разряд замыкается на стенку канала, разрядный ток попадает на минус источника питания, минуя сопротивление шунта, и на осциллограммах фиксируется нулевое значение тока. Таким образом, срывы разряда на стенку канала можно регистрировать по осциллограммам разрядного тока, типичные примеры которых приведены на рис. 7, 8.

Из приведенных осциллограмм видно, что существует практически полное совпадение между нулевыми значениями разрядного тока и интенсивностью свечения разряда. Из рис. 7 следует, что замыкание тока разряда на стенку канала происходит только при наличии магнитного поля. Причем, как показывает эксперимент, число замыканий возрастает с ростом тока разряда при постоянном магнитном поле (сравнить рис. 7, б и 8, б).

В то же время из осциллограмм, приведенных на рис. 8, следует, что срывы разрядного тока на стенку канала даже при наличии магнитного поля происходят только при горении воздушно-пропановой смеси. Таким образом, при данном размещении электродного узла и магнитов в канале срывы тока разряда происходят только при соблюдении двух условий: наличия магнитного поля и возникновения горения воздушно-пропановой смеси в канале. Первое условие очевидно, а второе условие, по-видимому, связано с возникновением тяжелых ионизированных радикалов при горении.

Наличие срывов разрядного тока на стенку канала позволяет объяснить уменьшение интенсивности

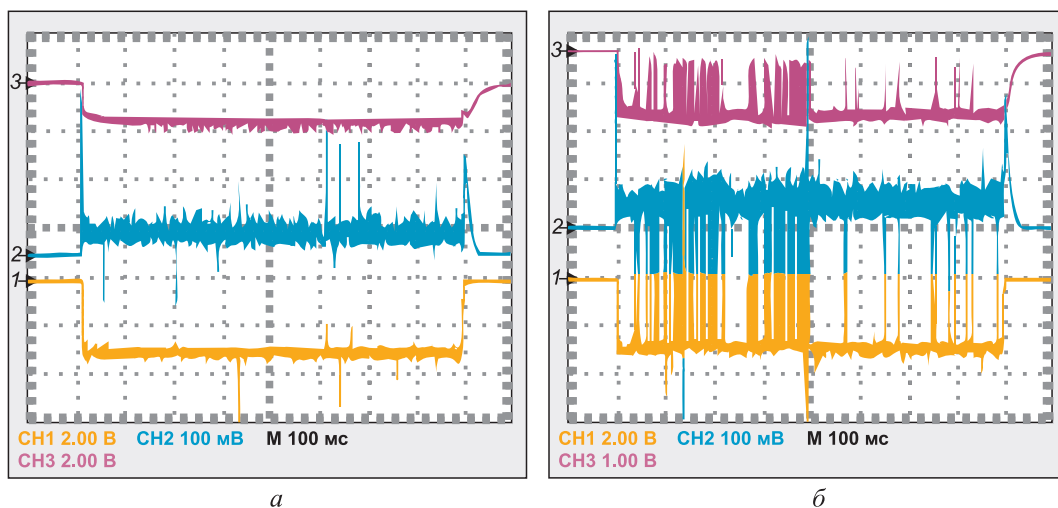


Рис. 7. Осциллограммы тока (1), напряжения (2) и свечения разряда (3) без магнитного поля (а) и с магнитным полем (б) в конфигурации № 2S. Ток разряда 9 А

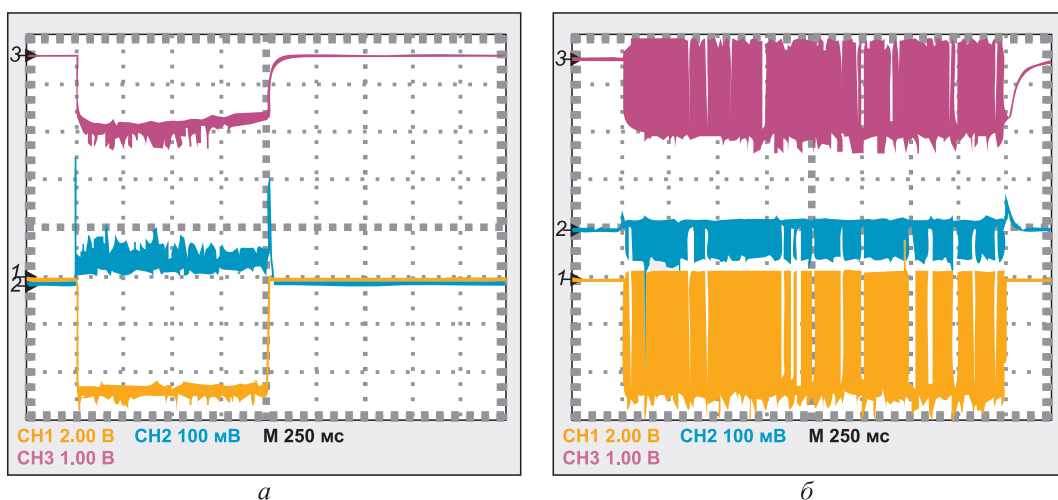


Рис. 8. Осциллограммы тока (1), напряжения (2) и свечения разряда (3) без пропана (а) и с пропаном (б) в конфигурации № 2S. Ток разряда 16 А

свечения пламени горения в конфигурации № 2S. Действительно, как уже отмечалось ранее, боковой ФЭУ регистрирует свечение пламени горения, выносимого потоком из области разряда по каналу. В случае срыва тока тяжелые ионизованные радикалы уходят из области разряда на стенку и, естественно, не выносятся потоком в область расположения ФЭУ, что приводит к уменьшению интенсивности излучения, регистрируемой боковым ФЭУ. Следует отметить, что при полной симметрии потока и электродов в канале явления срывов тока на стенку должны фиксироваться и в случае конфигурации № 2N, однако этого не наблюдается в эксперименте. Таким образом, на основании полученных результатов можно утверждать, что в условиях данных экспериментов существует определенная асимметрия, связанная либо с несимметричным расположением электродов в канале, либо с несимметричным распределением коэффициента стехиометрии в потоке. При этом возникновение асимметрии в распределении коэффициента стехиометрии смеси может определяться возникновением ударно-волновых структур в сверхзвуковом потоке. Асимметричность ударно-волновых структур может возникать в том числе и в результате несимметричного расположения электродов относительно потока.

Заключение

На основании проведенных детальных исследований влияния магнитного поля на продольно-поперечный разряд можно сделать следующие заключения.

В случае когда вектор индукции магнитного поля параллелен потоку и разряду, поле влияет только на начальную фазу разряда, что приводит к изменению формы разряда и его вращению под действием магнитного поля.

Установлено, что в конфигурации, при которой вектор индукции магнитного поля перпендикулярен току и направлен вертикально вверх либо вертикально вниз, поле практически не влияет на показание датчиков давления, что, возможно, связано с независимостью эффективности перемешивания воздушно-пропановой смеси в потоке от направления магнитного поля.

Из проведенных экспериментов следует, что в этой же конфигурации при направлении вектора индукции магнитного поля вертикально вверх в результате увеличения объема взаимодействия топ-

ливной смеси с плазмой интенсивность горения топливной смеси возрастает по сравнению со случаем отсутствия поля. В то же время при противоположном направлении поля (вертикально вниз) интенсивность свечения пламени горения оказывается даже значительно меньше интенсивности свечения, которая фиксируется при отсутствии магнитного поля. Это связано с тем, что при данном направлении поля наблюдаются срывы разрядного тока на стенку канала.

Экспериментально показано, что замыкания тока на стенку при наличии магнитного поля происходят только в случае горения воздушно-пропановой смеси.

Список литературы

1. Starikovskaia S., Kosarev I., Krasnochub A. et al. // AIAA-2005-1195. Reno, NV, 2005.
2. Александров А.Ф., Ершов А.П., Каменщиков С.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 2. С. 63 (Aleksandrov A.F., Ershov A.P., Kamenshchikov S.A. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2008. **63**, N 2. P. 145).
3. Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. // ТВТ. 2009. **47**, № 6. С. 822.
4. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 5. С. 67 (Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Ershov A.P. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2004. **59**, N 5. P. 64).
5. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 6. С. 65 (Aleksandrov A.F., Shibkov V.M., Shibkova L.V. // Moscow University Phys. Bull. 2008. **63**, N 6. P. 433).
6. Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Van Wie D. // AIAA. 2004. 0840.zz.
7. Александров А.Ф., Бауров А.Ю., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 4. С. 65 (Aleksandrov A.F., Baurov A.Yu., Ershov A.P. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2008. **63**, N 4. P. 293).
8. Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. // ТВТ. 2009. **47**, № 5. С. 643.
9. Anokhin E.M., Kindysheva S.V., Kuzmenko D.N. et al. // 20th Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications (GD2014). July 6–11, 2014. Orleans, France.
10. Kogelschatz U. // Fundamentals and applications of dielectric-barrier discharges. HAKONE VII Intern. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry. Greifswald, Sept. 2000.
11. Ершов А.П., Колесников Е.Б., Логунов А.А., Черников В.А. // ТВТ. 2009. **47**, № 1. С. 1.

The effect of a magnetic field on longitudinal–transverse discharge in the high-speed flow of an air–hydrocarbon mixture

A. I. Alekseev^a, D. N. Vaulin^b, V. A. Chernikov

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aai.alekseev@physics.msu.ru, ^bvaulin@yandex.ru.

The results of experimental studies on the influence of an inhomogeneous magnetic field on the nature of the ignition and combustion of an air–propane mixture in a supersonic flow that is initiated by a longitudinal–transverse dc discharge are presented. It is shown that the nature of a mixture-combustion regime strongly depends on the orientation of the magnetic field with respect to both the direction of the discharge current and the flow-velocity vector.

Keywords: electric discharge, plasma-enhanced combustion, high flow, discharge in a magnetic field.

PACS: 52.57.Kk.

Received 19 January 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2015).

Сведения об авторах

1. Алексеев Алексей Ильич — аспирант; e-mail: ai.alekseev@physics.msu.ru.
2. Ваулин Дмитрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (916) 526-93-20, e-mail: vaud@yandex.ru.
3. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел. (495) 939-38-85.