

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ИМПУЛЬСНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ

**С. М. Фролов, В. С. Аксёнов, В. С. Иванов, К. А. Авдеев,
С. Н. Медведев, Ф. С. Фролов, И. О. Шамшин**

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Магнитогидродинамический (МГД) генератор, установленный в выходной части реактивного сопла, предлагают использовать в качестве источника для подзарядки бортовых электрических аккумуляторов летательных аппаратов (ЛА) с импульсно-детонационным двигателем (ИДД), не имеющим движущихся частей. Ожидается, что при достижении достаточно высоких значений электропроводности и скорости продуктов детонации такое простое конструктивное решение может обеспечить ЛА электропитанием для систем зажигания, управления и навигации при относительно небольшом увеличении массогабаритных характеристик.

По-видимому, первые экспериментальные исследования МГД-эффектов импульсной детонации проведены в [1, 2], где к импульсно-детонационной камере сгорания, работающей на газовой метанокислородной смеси с малыми добавками соли легко ионизируемого металла (водного раствора карбоната калия (K_2CO_3)), был присоединен линейный МГД-генератор — прямой канал диаметром 16 мм с секционированными электродами и с поперечным магнитным полем с индукцией 0,23 Т. Максимальная электропроводность плазмы, достигнутая в опытах [1, 2], составила 3,3 См/м (для сравнения укажем, что электропроводность морской воды составляет около 3 См/м). К сожалению, описание конструкции МГД-генератора, детали его работы и первичные экспериментальные данные в [1, 2] отсутствуют.

В [3] сообщается об экспериментальных исследованиях МГД-эффекта детонации газовой ацетиленокислородной смеси с малыми добавками спиртового (метанол) раствора гидроксида цезия в режиме одиночного импульса. В опытах [3] применялась детонационная труба диаметром 25,4 мм и длиной 1 м с МГД-каналом прямоугольного сечения $25,4 \times 20$ мм длиной 0,3 м, выполненным из эпоксидной смолы с двумя сплошными электродами из медного сплава, отстоящими друг от друга на расстоянии 25,4 мм. Добавку впрыскивали в свежую смесь порционно с помощью автомобильной форсунки до прихода детонационной волны. Однородное поперечное магнитное поле с индукцией 0,6 Т создавалось двумя наборными постоянными магнитами длиной 0,3 м. Максимальная электропроводность плазмы, достигнутая в

опытах [3], составила 6 См/м при средней скорости детонации ~ 2380 м/с. В [3] представлены примеры записей межэлектродного напряжения и тока как в отсутствие, так и в присутствии внешней нагрузки.

Работы [4, 5] посвящены теоретическому исследованию МГД-эффектов импульсной газовой детонации. В [4] на основе решения двумерных уравнений МГД-течения стехиометрической водородно-воздушной смеси с присадкой цезия (1 % (об.)) в плоском прямом канале ИДД шириной 20 мм и длиной 100 мм с расширяющимся соплом и с индукцией магнитного поля от 1 до 8 Т показано, что для достижения высоких характеристик МГД-генератора, достаточных для организации циклического прямого инициирования детонации, необходимо применять сопло с оптимальной степенью расширения, обеспечивающей наилучшую комбинацию скорости и температуры продуктов детонации, использовать секционированные электроды и правильно выбирать их расположение и размеры. Максимальная электропроводность плазмы, полученная в расчетах [4], достигала 250 См/м. В [5] аналогичная задача решена для МГД-течения стехиометрической водородно-воздушной смеси с присадкой цезия (2 % (масс.)) в плоском прямом канале ИДД шириной 10 мм и длиной 100 мм без сопла или с суживающе-расширяющимся соплом при индукции магнитного поля 4 Т. Показано, что применение суживающе-расширяющегося сопла приводит к повышению характеристик МГД-генератора. Максимальная электропроводность плазмы, полученная в расчетах [5], достигала ~ 10 См/м.

До сих пор все экспериментальные и теоретические исследования МГД-эффектов импульсной детонации относились к газовым взрывчатым смесям. Цель нашей работы состояла в экспериментальной регистрации МГД-эффектов импульсной гетерогенной (капельной) детонации — наиболее вероятного режима горения в перспективных практических ИДД. В качестве генератора детонационных импульсов использовали созданный авторами в 2012 г. импульсно-детонационный жидкостный ракетный микродвигатель (микро-ИДД), предназначенный для систем стабилизации космических аппаратов [6, 7] и обеспечивающий калиброванные импульсы тяги с частотой до 150–200 Гц. К микро-ИДД присоединили линейный МГД-генератор (рис. 1), состоящий из МГД-канала 1 постоянного прямоугольного сечения 10×10 мм длиной 100 мм, выполненного из эпоксидной смолы с четырьмя парами стальных секционированных электродов 2. Для создания в МГД-канале однородного поперечного магнитного поля с индукцией $\sim 0,42$ Т использовали постоянные самарий-кобальтовые магниты 3.

Все эксперименты проводились при работе микро-ИДД на смеси жидкого *n*-гептана с газообразным кислородом, обедненной горючим (коэффициент избытка окислителя ~ 2) с частотой 20 Гц. Средняя скорость детонации в импульсе составляла ~ 2200 м/с. Опыты проводили как в отсутствие ионизируемой добавки, так и в ее присутствии. Как и в [1, 2], в качестве добавки использовали водный раствор карбоната калия, причем перед каж-

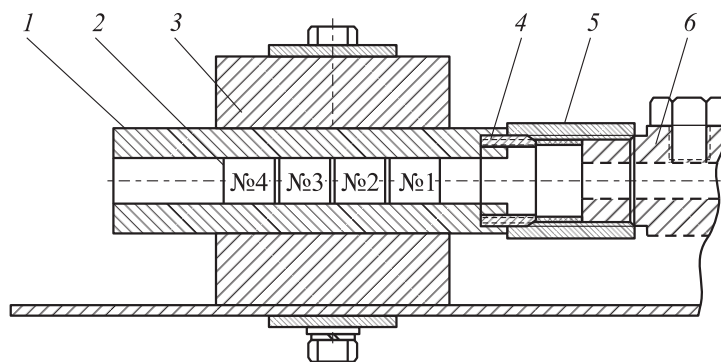


Рис. 1 Схема МГД-генератора и его сопряжения с микро-ИДД: 1 — МГД-канал; 2 — электроды; 3 — постоянные магниты; 4 — втулка крепления канала к микро-ИДД; 5 — переходник; 6 — выходное сопло микро-ИДД

дым опытом добавку наносили кисточкой на стенки МГД-канала, а затем канал просушивали. В ходе испытаний измеряли напряжение на всех парах электродов МГД-канала как без внешней нагрузки, так и с нагрузкой в виде резисторов с сопротивлением 1, 10 и 100 кОм.

На рис. 2 приведены записи напряжения на всех четырех парах электродов МГД-генератора при работе микро-ИДД с частотой 20 Гц в течение 5 с. На всех парах электродов наблюдается устойчивая генерация электродвижущей силы (ЭДС) с частотой, задаваемой работой микро-ИДД.

На рис. 3, а приведен пример двух экспериментальных кривых — записей напряжения на паре электродов №2 (см. рис. 1) в одном (из множества) детонационном импульсе в опыте без добавки (кривая 1) и в опыте с добавкой (кривая 2) в отсутствие внешней нагрузки. Видно, что добавка карбоната калия позволяет существенно увеличить амплитуду напряжения на электродах. Сигнал имеет два пика — первичный и вторичный. Первичный пик напряжения связан с прохождением между электродами горячих, частично ионизованных продуктов детонации непосредственно за фронтом детонационной волны. Длительность первичного пика — около 100 мкс. Вторичный пик возникает через ~ 200 мкс после прохождения фронта детонации и связан, по-видимому, с приходом волны разрежения от открытого конца МГД-канала, ускоряющей истечение, и с последующим торможением течения горячих продуктов детонации, вызванным перерасширением продуктов. Такое объяснение вторичному пику напряжения впервые дано в [4], где расчетным путем получены очень похожие записи напряжения, по крайней мере, в течение ~ 500 мкс после прохождения фронта детонации (рис. 3, б). Оказалось, что и в расчетах, и в экспериментах авторов вклад вторичного пика в генерацию электрической энергии существенно больше, чем вклад первичного пика. Отметим, что в расчетах [4] перерасширение

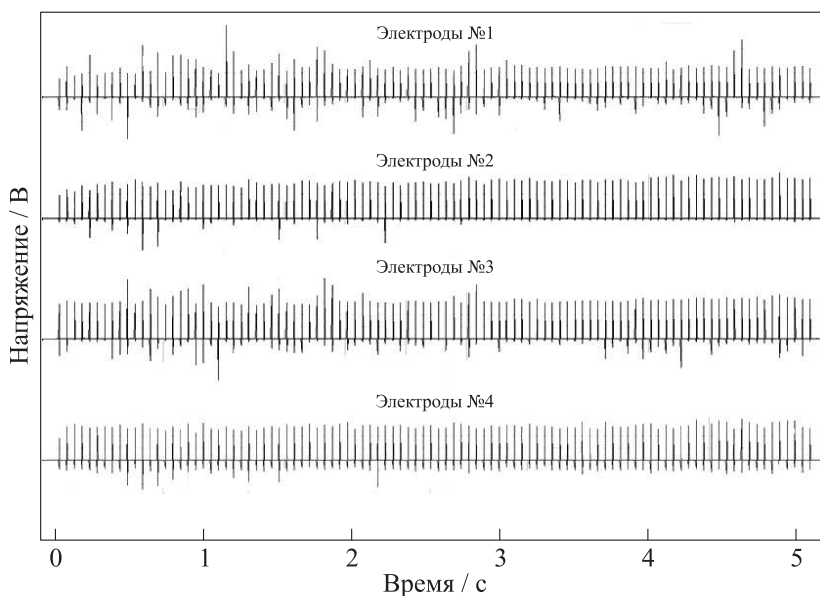


Рис. 2 Пример записей напряжения на электродах №№1–4 (см. рис. 1) МГД-канала при работе микро-ИДД с частотой 20 Гц в течение 5 с

приводило не только к торможению потока, но и к возникновению обратного течения горячих продуктов детонации из атмосферы в МГД-канал и далее в детонационную трубку ИДД, причем поворот потока продуктов детонации на 180° приводил к изменению направления вектора напряженности электрического поля на обратное и, следовательно, к изменению знака ЭДС (см. рис. 3, б) и направления электрического тока. В наших экспериментах авторов изменение знака ЭДС не зарегистрировано (см. рис. 3, а). Это можно объяснить либо отсутствием поворота течения на 180° , либо резким снижением электропроводности плазмы продуктов детонации, содержащих легкоионизируемую добавку, после выхода из МГД-канала и охлаждения, вызванного расширением и смешением с окружающим воздухом, даже при изменении направления течения на 180° . Чтобы дать однозначное объяснение отличию между нашими экспериментами и расчетами [4], необходимы дополнительные исследования.

Опыты с внешней нагрузкой проводились с предварительным нанесением карбоната калия на стенку МГД-канала. Увеличение нагрузки приводило к снижению напряжения на электродах и к увеличению длительности сигнала.

Таким образом, впервые экспериментально зарегистрирован МГД-эффект от импульсной гетерогенной (капельной) детонации. Во всех экспери-

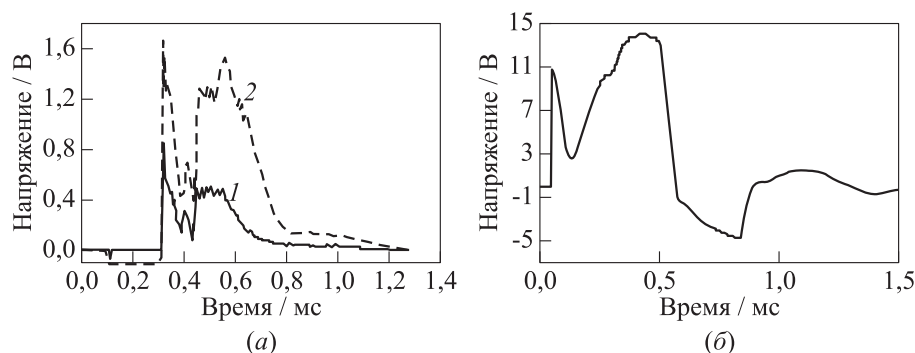


Рис. 3 Записи напряжения на паре электродов № 2 (см. рис. 1) в одном детонационном импульсе в опыте без ионизируемой добавки (1) и с добавкой (2) (а); результаты расчета в [4] (б)

ментах на секционированных электродах МГД-канала наблюдалась устойчивая генерация ЭДС с частотой, задаваемой работой микро-ИДД. В дальнейшем планируется проведение систематических экспериментов по измерению параметров плазмы продуктов детонации и оптимизации конструкции и режима работы МГД-генератора с целью достижения высоких характеристик.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 11-08-01297).

Литература

1. Jimerin, D. G., E. A. Mironov, and V. A. Popov. 1972. MHD energy conversion using detonation conditions. *12th Symposium on Engineering Aspects of MHD Proceedings*. Argonne, IL: Argonne National Lab. II.4.1–II.4.7.
2. Бакланов Д. И., Жимерин Д. Г., Киселёв Ю. Н., Миронов Э. А., Попов В. А. О некоторых технических аспектах использования детонационного режима сгорания // *ФГВ*, 1976. Т. 12. № 1. С. 47–52.
3. Litchford, R. J., B. R. Thompson, and J. T. Lineberry. 2000. Pulse detonation magnetohydrodynamic power. *J. Propul. Power* 16(2):251–62.
4. Cambier, J. L. 1998. MHD power extraction from a pulse detonation engine. AIAA Paper No. 1998-3876.
5. Matsumoto, M., T. Murakami, and Y. Okuno. 2007. Numerical studies of flow behavior and performance in a pulse-detonation-driven MHD generator. AIAA Paper No. 2007-4130.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С. Экспериментальные исследования рабочего процесса в импульсно-детонационном жидкостном ракетном двигателе // *Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова*. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. Вып. 4. С. 154–159.
7. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С. Экспериментальная демонстрация рабочего процесса в импульсно-детонационном жидкостном ракетном двигателе // *Хим. физика*, 2011. Т. 30. № 8. С. 58–61.