

МГД-ЭФФЕКТЫ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Е. Л. Попов*, А. Н. Самсонов, Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников

Представлено академиком РАН В.М. Титовым 02.07.2018 г.

Поступило 25.07.2018 г.

Впервые МГД-способом экспериментально показана возможность преобразования химической энергии продуктов горения водород-кислородной смеси в электрическую при использовании непрерывной спиновой детонации. Измерена удельная проводимость продуктов детонации в области вращения фронта детонационной волны — около $3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$. Рассмотрена структура поперечных детонационных волн, измерена их скорость — $2220 \pm 50 \text{ м/с}$ и изучено течение в их окрестности.

Ключевые слова: МГД-генерация, детонационный двигатель, непрерывная спиновая детонация, ионизация.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845550-553>

В настоящее время (с освоением Арктики и в космических экспедициях) роль компактных источников электроэнергии повышается в связи с потребностью автономного питания как космических аппаратов, так и техники, работающей в сложных климатических условиях. Известны методы преобразования энергии плазмы из термодинамической в электрическую как стационарными [1], так и импульсными (взрывными) МГД-генераторами на газовых [2], газокпельных [3] и конденсированных взрывчатых веществах [4]. Предлагаемый принцип генерации электроэнергии основывается на непрерывной спиновой детонации (НСД), совмещающей положительные качества стационарных (непрерывность работы) и импульсных (повышенная электропроводимость во фронте детонационной волны) МГД-систем. В последнее время к НСД проявляют интерес специалисты, работающие в области аэрокосмической техники. Однако прямого преобразования энергии вращающейся детонационной волны в электрическую до настоящего времени разработано не было, хотя сообщения об этом появлялись в СМИ, но без упора на какие-либо научные работы. Цель работы — экспериментально показать возможность генерации электрической энергии при использовании в качестве рабочего тела продуктов реакции

при НСД в окрестности фронта поперечных детонационных волн (ПДВ). В качестве топливных компонентов использовался водород и кислород.

Впервые идея МГД-генератора на НСД публично была высказана и обоснована в работе [5]. Если в замкнутом кольцевом канале, в котором вращаются ПДВ со скоростью D , создать магнитное поле \mathbf{B} , то по краям проводника, которым являются химически неравновесные продукты реакции во фронте волны и в волне разрежения, появляется эдс (рис. 1а).

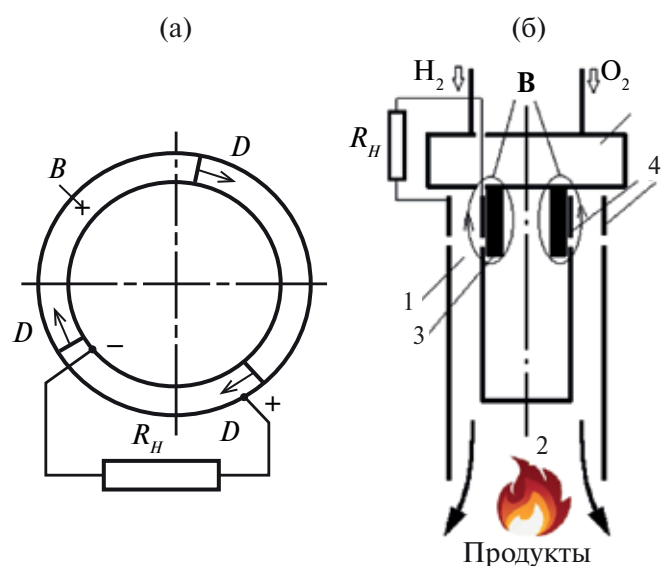


Рис. 1. Схема МГД-генератора на основе НСД (а) и экспериментальная установка (б).

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

* E-mail: popove9@gmail.com

Схема установки представлена на рис. 16. МГД-система включала детонационную камеру сгорания (КС) — 1, представляющую собой кольцевой цилиндрический канал длиной $L_c = 100$ мм, образованный наружной стенкой диаметром $d_{c1} = 40,5$ мм и внутренней вставкой диаметром $d_{c2} = 30$ мм (расстояние между стенками $\Delta = 5,25$ мм). Водород и кислород разделялись в КС 1 и перемешивались в области распространения фронта ПДВ (на расстоянии около 15 мм от форсунок). Процесс инициировался открытым огнём 2 на выходе из камеры. Продукты выбрасывались в атмосферу. Процесс в КС 1 через продольное окно из оргстекла, вклеенное в наружную стенку камеры (на рисунке не показано), фотографировался высокоскоростной камерой типа Photron Fastcam SA5 в режиме съёмки 775 000 кадр/с. Кадры обрабатывались по специальной программе, в результате реконструировалось течение в системе волны. Продольное магнитное поле \mathbf{B} в зазоре Δ создавалось неодимовым магнитом 3 высотой 20 мм. Электрический сигнал снимался с кольцевых контактов 4 шириной $b = 15$ мм, расположенных на наружной и внутренней стенках КС 1, и подавался на АЦП. В отдельных экспериментах измерялись как эдс на контактах 4, так и напряжение на сопротивлении $R_H = 445$ Ом. Компьютер регистрировал и обрабатывал сигналы с датчиков давления и электрические сигналы с контактов 4, подаваемые через АЦП, а также с видеокamеры. Система управления синхронизировала работу отдельных элементов установки. Расходы кислорода и водорода принимали значения $G_{r,ox} = 29,5 \rightarrow 21,9$ г/с и $G_{r,f} = 3,7 \rightarrow 2,7$ г/с, находясь вблизи стехиометрии — $\phi = 1,0 \pm 0,01$ (стрелкой показано направление изменения параметра в течение эксперимента). Проводились опыты: без магнитной системы в камере сгорания, с магнитной системой и записью эдс, с

включением сопротивления R_H в качестве нагрузки и замкнутыми накоротко электродами (рис. 1).

На рис. 2а, б приведены осциллограммы изменения давлений в ресиверах кислорода и водорода ($p_{r,ox}, p_{r,f}$) на входе соответствующих коллекторов ($p_{m,ox}, p_{m,f}$) и в камере сгорания: на расстоянии 5 мм от начала КС (p_{c1}) и на выходе из камеры (p_{c2}), где измерялось и полное давление с помощью трубки Пито (p_{c20}). Инициирование НСД в камере отмечено резким подъёмом давлений в коллекторах и в КС, а прекращение процесса — их резким уменьшением.

На рисунке 3 представлены фрагменты фоторегистрограммы, полученной при включении сопротивления R_H в качестве нагрузки. Слева — реконструкция ПДВ по отдельным снимкам, справа — реконструированные в соответствии с масштабом две последние волны левого фрагмента.

В камере сгорания установилась устойчивая НСД с двумя ПДВ ($n = 2$), движущимися слева направо со скоростью $D = 2240$ м/с относительно наружной стенки камеры. Структура ПДВ следующая. Фронт ВС движется по образующей смеси. К нему примыкает шлейф CD — ударная волна в продуктах. Поскольку течение в камере на выходе докритическое, то снаружи в неё проникают звуковые волны MN, движущиеся синхронно с ПДВ. Волны PQ являются ударными, тормозящими за фронтом ВС сверхзвуковой поток продуктов до дозвукового, и движутся с ним по окружности камеры с той же скоростью. Высота фронта ВС составляет величину $h = 12 \pm 1$ мм, а отношение $h/l = 1/5 - 1/6$, где $l = \pi d_{c1}/n = 63,6$ мм — расстояние между смежными волнами.

На рис. 2в приведены осциллограммы эдс E и напряжения U на нагрузке $R_H = 445$ Ом. По установившимся значениям U_H и E можно определить удельную проводимость продуктов на

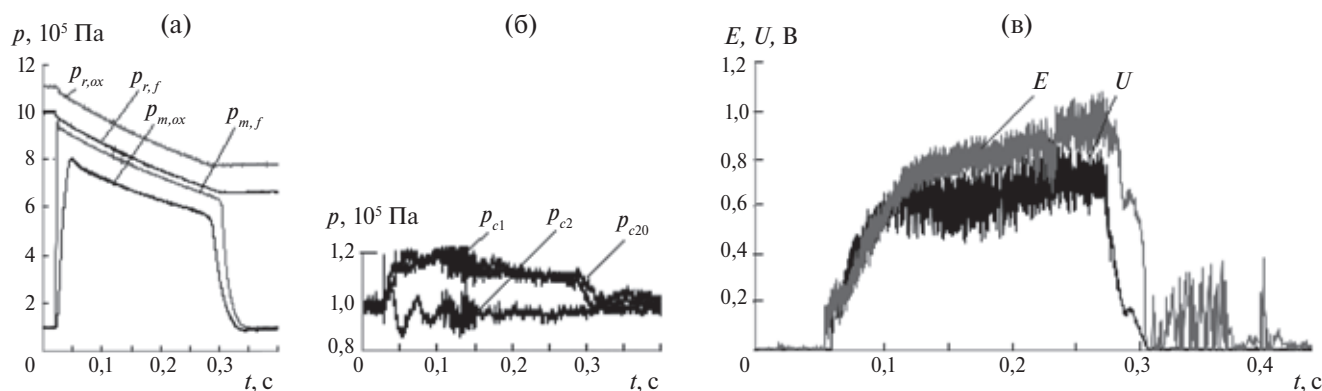


Рис. 2. Давление p в системе подачи (а), в камере сгорания (б); эдс E и напряжения U на электродах (в).

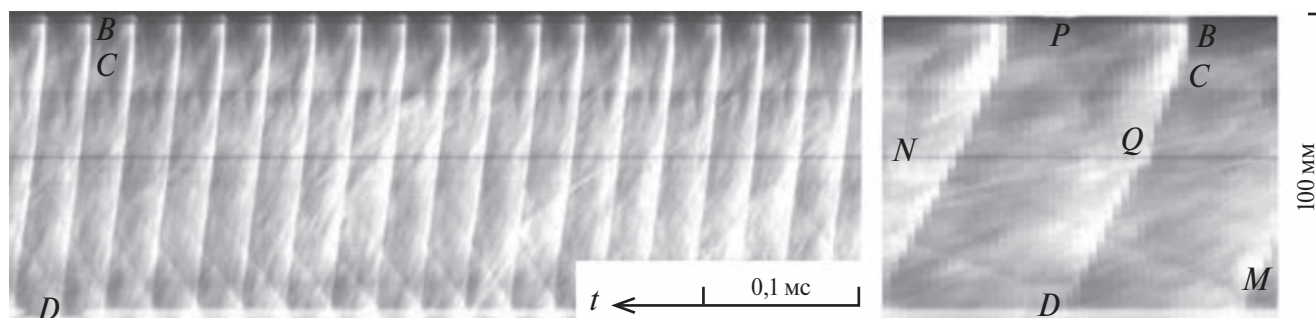


Рис. 3. ПДВ (большой и малый фрагменты) в камере сгорания при включении в электрическую цепь нагрузки $R_H = 445 \text{ Ом}$; $G_{r,ox} = 26,6 \text{ г/с}$ и $G_{r,f} = 3,3 \text{ г/с}$, $\phi = 0,992$, $p_{c1} \approx p_{c20} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $D = 2240 \text{ м/с}$, $n = 2$.

расстоянии между смежными ПДВ $R_i = 150 \text{ Ом}$. Удельная проводимость промежутка между электродами составит величину $\sigma = \Delta / (R_i S_i) = 2,11 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Здесь $S_i = \pi((d_{c1} + d_{c2})/2)b = 16,6 \text{ см}^2$ — средняя площадь электродов. Следует отметить, что продукты детонации занимают не всю площадь электродов. Примерно 1/3 этой площади находится в области натекания свежей смеси с малой проводимостью. Поэтому действительная проводимость продуктов будет выше $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Эта величина оказалась вдвое больше, чем измеренная во фронте детонационной волны Чепмена–Жуге в стехиометрической водород–кислородной смеси с начальным давлением $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ [6].

Известно, что генерируемая эдс определяется произведением $E = Vv_p \Delta$, и при постоянных значениях V и Δ зависит от скорости движения продуктов v_p . На поверхности Чепмена–Жуге она составит величину $v_{p*} = D/(\gamma+1) \approx 1000 \text{ м/с}$ ($\gamma \approx 1,25$ [7] — эффективный показатель адиабаты), и при индукции $B = 1 \text{ Тл}$ продукты создают эдс $E \approx 5 \text{ В}$. В волне разрежения за фронтом ПДВ тангенциальная составляющая скорости продуктов уменьшается, следовательно, снижается вырабатываемая величина E . Разность потенциалов на одноимённых электродах вызывает уравнивающие токи, что требует секционирования электродов как в МГД-генераторах постоянного действия [1]. Если принять среднюю скорость продуктов в тангенциальном направлении $v_{pt} = 500 \text{ м/с}$,

величину измеренной эдс $E = 0,95 \text{ В}$, то можно оценить среднюю величину индукции в зазоре $B = 0,36 \text{ Тл}$. В работе [6] отмечается, что впереди детонационной волны существует облако электронов, диффундируемых из зоны реакции. Это значит, что эдс может быть обусловлена и фазовой скоростью ПДВ. Тогда её величина в зоне фронта возрастёт как минимум вдвое.

Источник финансирования. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант №19–43–543006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979. 512 с.
2. Бакланов Д.И., Жимерин Д.Г., Киселев Ю.Н., Миронов Э.А., Попов В.А. // ФГВ. 1975. Т. 12. № 1. С. 47–52.
3. Авдеев К.А., Аксенов В.С., Иванов В.С., Медведев С.Н., Фролов С.М., Фролов Ф.С., Шамшин И.О. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 7. С. 46–53.
4. Лебедев Е.Ф., Осташев В.Е., Швецов Г.А. // ФГВ. 1982. Т. 18. № 5. С. 3–20.
5. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Труды Междунар. симп. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 245–254.
6. Пинаев А. В., Сычев А. И. // ФГВ. 1984. Т. 20. № 1. С. 112–121.
7. Николаев Ю. А., Топчиян М. Е. // ФГВ. 1977. Т. 13. № 3. С. 393–404.

MHD EFFECTS IN CONTINUOUS SPIN DETONATION**E. L. Popov, A. N. Samsonov, F. A. Bykovskii, E. F. Vedernikov**Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.M. Titov July 2, 2018

Received July 25, 2018

Conversion possibility of the chemical energy of combustion products of a hydrogen–oxygen mixture into electrical energy with the use of continuous spin detonation has been demonstrated for the first time in an MHD system. The specific conductivity of detonation products in the region of rotation of the detonation front was measured to be $\sim 3 \cdot 10^{-2} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$. The structure of transverse detonation waves was examined, their velocity was measured ($2220 \pm 50 \text{ m/s}$), and the flow in their vicinity was studied.

Keywords: MHD-generation, detonation engine, continuous spin detonation, ionization.