

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46; 536.423.4; 544.452; 544.77.051.5

### МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ КАПЕЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ

© 2015 г. К. А. Авдеев<sup>1</sup>, В. С. Аксенов<sup>1,2</sup>, В. С. Иванов<sup>1</sup>,  
С. Н. Медведев<sup>1</sup>, С. М. Фролов<sup>1,2\*</sup>, Ф. С. Фролов<sup>1</sup>, И. О. Шамшин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

\* E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 27.08.2014

Для получения электрической энергии на борту летательного аппарата с импульсно-детонационным двигателем на жидком топливе предложено использовать магнитогиродинамический (МГД) генератор, установленный в выходной части сопла. Проведены экспериментальные исследования МГД-эффектов от импульсной гетерогенной (капельной) детонации *n*-гептано-кислородной смеси с добавлением в продукты детонации водного раствора карбоната калия (ионизирующей добавки). Показано, что на электродах МГД-канала наблюдается устойчивая генерация импульсов напряжения с амплитудой до 3 В, причем зарегистрированы три формы импульсов: одиночные импульсы, двойные импульсы и двойные импульсы с кратковременной сменой знака сигнала. Повышение частоты работы ИДД от 20 до 40 Гц практически не влияет на амплитуду и форму импульса напряжения. Снижение магнитной индукции от 0.6 до 0.3 Тл приводит к уменьшению амплитуды импульса напряжения на электродах МГД-канала, однако форма сигнала в единичном импульсе практически не изменяется. Обеднение горючей смеси жидким топливом приводит к снижению напряжения на электродах МГД-канала. Добавка в топливную смесь энергетического механоактивированного металлосодержащего нанокompозита Mg–MoO<sub>3</sub> не приводит к существенным изменениям формы и амплитуды импульсов напряжения.

*Ключевые слова:* магнитогиродинамический эффект, гетерогенная детонация, жидкое горючее, импульсно-детонационный двигатель.

DOI: 10.7868/S0207401X15070031

#### ВВЕДЕНИЕ

В современных силовых установках аэрокосмической техники широко используются реактивные двигатели, работающие по термодинамическому циклу Брайтона. В течение многих десятков лет они совершенствовались, и дальнейшее улучшение их характеристик требует больших капитальных вложений. Альтернативное решение, позволяющее существенно повысить термодинамическую эффективность современных реактивных двигателей, — использование камер сгорания с повышением полного давления. Повышение полного давления в камере сгорания можно обеспечить, например, путем изменения режима горения. По своей термодинамической эффективности наиболее привлекательный режим быстрого горения — это детонация. В детонационной волне достигается максимальная концентрация химической энергии, запасенной в горючем (энергия выделяется в тонком слое ударно-сжатой смеси),

а при расширении продуктов детонации совершается максимальная полезная работа [1, 2].

Известны две основные схемы организации детонационного горения: в периодических детонационных волнах, бегущих вдоль камеры сгорания (импульсно-детонационные двигатели (ИДД)) [3], и в детонационных волнах, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек камеры сгорания (двигатели с непрерывной детонацией [4]). Обе схемы считаются перспективными для воздушно-реактивных и ракетных двигателей.

Ввиду того, что в таких двигателях отсутствуют подвижные элементы, для получения электрической энергии на борту летательного аппарата, необходимой для работы систем зажигания, управления, навигации и других целей, предлагают использовать магнитогиродинамический (МГД) генератор, устанавливаемый в выходной части реактивного сопла. Ожидается, что при достижении достаточно высоких значений электропроводности и скорости продуктов детонации такое простое кон-

структивное решение может обеспечить летательный аппарат электропитанием при относительно небольшом увеличении массогабаритных характеристик.

По-видимому, первые экспериментальные исследования МГД-эффектов от газовой детонации проведены в работах [5, 6], 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 Тл. Максимальная электропроводность плазмы, достигнутая в опытах [5, 6], 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 [5, 6] отсутствуют.

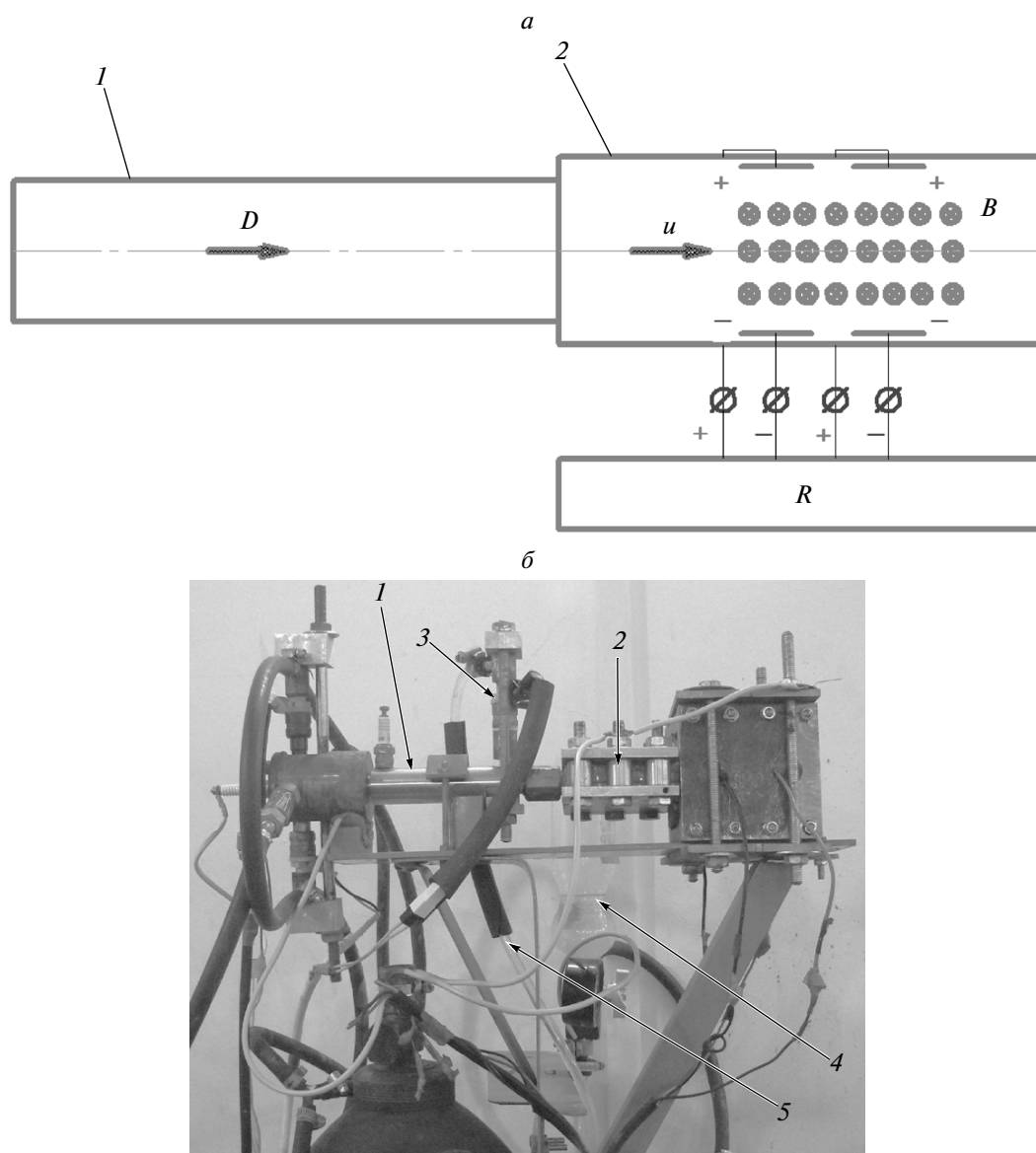
В работе [7] сообщается об экспериментальных исследованиях МГД-эффекта детонации газовой ацетиленокислородной смеси с малыми добавками спиртового (метанол) раствора гидроксида цезия в режиме одиночного импульса. В опытах, проведенных в указанной работе, применялась детонационная труба диаметром 25.4 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 Тл создавалось двумя наборными постоянными магнитами длиной 0.3 м. Максимальная электропроводность плазмы, достигнутая в опытах работы [7], составила 6 См/м при средней скорости детонации  $\sim 2380$  м/с. В [7] представлены примеры записей межэлектродного напряжения и тока как в отсутствие, так и в присутствии внешней нагрузки.

Работы [8, 9] посвящены теоретическому исследованию МГД-эффектов импульсной газовой детонации. В [8] на основе решения двумерных уравнений МГД-течения стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавкой цезия (1 об. %) в плоском прямом канале ИДД шириной 20 мм и длиной 100 мм с расширяющимся соплом при индукции магнитного поля от 1 до 8 Тл показано, что для достижения высоких характеристик МГД-генератора, достаточных для организации циклического прямого инициирования детонации, необходимо применять сопло с оптимальной степенью расширения, обеспечивающей наилуч-

шую комбинацию скорости и температуры продуктов детонации, использовать секционированные электроды и правильно выбирать их расположение и размеры. Максимальная электропроводность плазмы, полученная в расчетах [8], достигала 250 См/м. В работе [9] аналогичная задача решена для МГД-течения стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавкой цезия (2 мас. %) в плоском прямом канале ИДД шириной 10 мм и длиной 100 мм без сопла или с суживающе-расширяющимся соплом при индукции магнитного поля 4 Тл. Показано, что применение суживающе-расширяющегося сопла приводит к повышению характеристик МГД-генератора. Максимальная электропроводность плазмы, полученная в расчетах [9], достигала  $\sim 10$  См/м.

Из анализа литературы следует, что все известные работы по рассматриваемой тематике связаны с исследованиями МГД-эффектов газовой детонации, тогда как наиболее приемлемым режимом горения в перспективных детонационных двигателях следует считать не газовую, а гетерогенную (капельную) детонацию штатного жидкого топлива. В нашей работе [10] впервые проведено экспериментальное исследование МГД-эффектов импульсной гетерогенной (капельной) детонации. В этой работе в качестве генератора детонационных импульсов использовали импульсно-детонационный жидкостный ракетный микродвигатель, предназначенный для систем стабилизации космических аппаратов [11, 12] и обеспечивающий калиброванные импульсы тяги с частотой до 150–200 Гц. К микро-ИДД присоединили линейный МГД-генератор, состоящий из МГД-канала постоянного прямоугольного сечения  $10 \times 10$  мм длиной 100 мм, выполненного из эпоксидной смолы с четырьмя парами стальных секционированных электродов. Для создания в МГД-канале однородного поперечного магнитного поля с индукцией  $\sim 0.42$  Тл использовали постоянные самарий-кобальтовые магниты. Все эксперименты проводились при работе микро-ИДД на смеси жидкого н-гептана с газообразным кислородом, обедненной горючим (коэффициент избытка окислителя  $\sim 2$ ), с частотой 20 Гц. Средняя скорость детонации в импульсе составляла  $\sim 2200$  м/с. Опыты проводили как в отсутствие ионизирующей добавки (водный раствор карбоната калия), так и в ее присутствии. Во всех экспериментах на секционированных электродах МГД-канала наблюдали устойчивую генерацию электрического напряжения с амплитудой до 2.5 В и с частотой, задаваемой работой микро-ИДД. Добавление в топливную смесь водного раствора карбоната калия приводило к увеличению амплитуды импульса напряжения на электродах по сравнению с работой без добавки приблизительно в 2 раза.

Цель данной работы – проведение систематических экспериментов по изучению МГД-эффек-



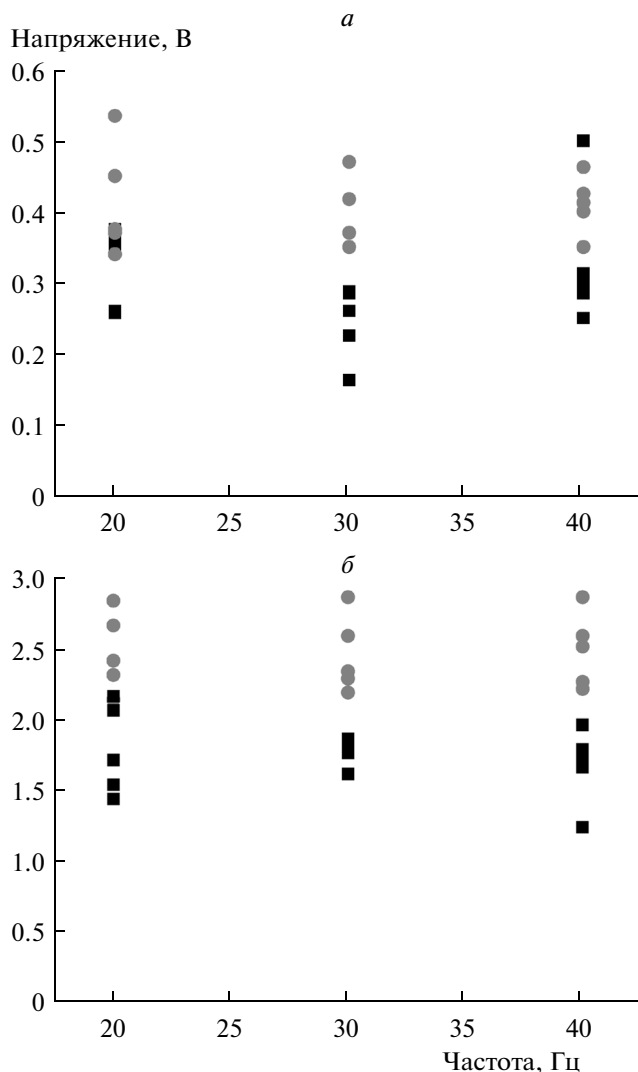
**Рис. 1.** Принципиальная схема МГД-генератора (а) и экспериментальная установка (б): 1 – микро-ИДД, 2 – МГД-канал, 3 – форсунка, 4 – емкость, 5 – трубопровод;  $D$  – скорость детонационной волны,  $u$  – скорость продуктов детонации,  $B$  – индукция магнитного поля,  $R$  – резистивная нагрузка.

тов импульсной гетерогенной (капельной) детонации, зарегистрированных в [10].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

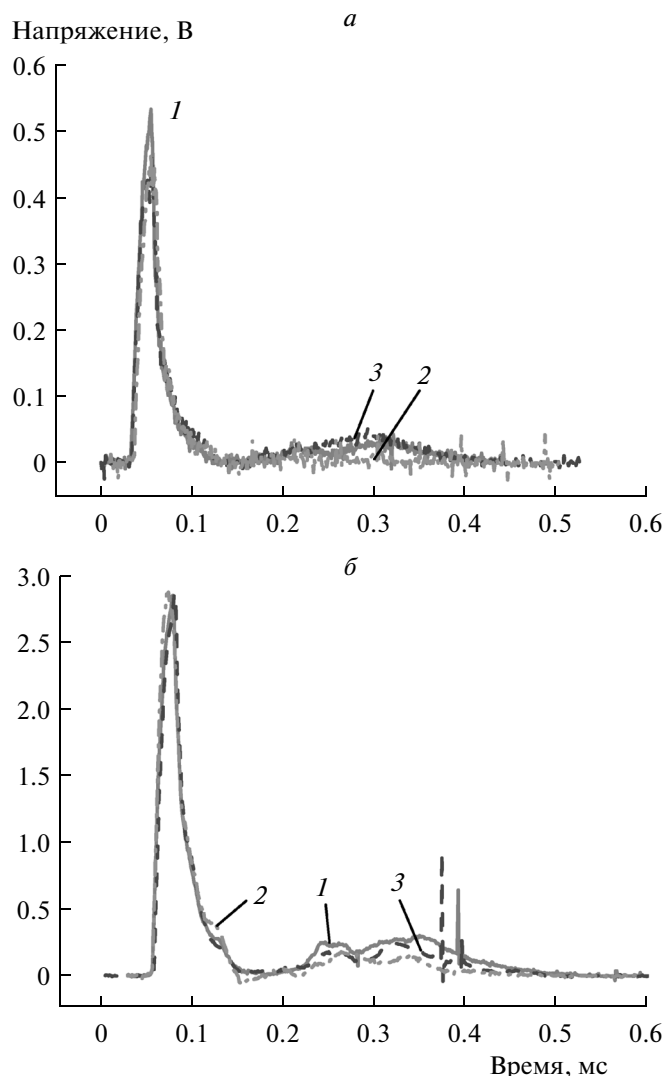
В качестве генератора детонационных импульсов использовали экспериментальный образец жидкостного ракетного микро-ИДД, конструкция и принцип работы которого представлены в работах [11, 12]. К микро-ИДД (позиция 1 на рис. 1) присоединили линейный МГД-генератор (позиция 2 на рис. 1), состоящий из МГД-канала постоянного прямоугольного сечения  $8 \times 40$  мм длиной

110 мм с двумя парами стальных секционированных электродов (далее – электроды 1 и 2), присоединенных к резистивной нагрузке  $R$  (рис. 1а). Для создания однородного поперечного магнитного поля с индукцией от 0.3 до 0.6 Тл использовали постоянные самарий-кобальтовые магниты. Индукцию магнитного поля измеряли с помощью тесламетра. Относительная ошибка измерения индукции магнитного поля не превышала  $\pm 2.5\%$ . Все эксперименты проводились при работе микро-ИДД на смеси жидкого н-гептана с газообразным кислородом с частотой от 20 до 40 Гц. Коэффициент избытка окислителя в смеси варьировали



**Рис. 2.** Влияние рабочей частоты микро-ИДД на амплитуду импульса напряжения на электродах (● – электрод 1, ■ – электрод 2) МГД-канала (индукция магнитного поля – 0.6 Тл): *a* – нагрузка в 1 Ом, *б* – 10 Ом.

от 1.5 до 2.0 путем изменения давления подачи кислорода в микро-ИДД. В качестве ионизирующей добавки использовали насыщенный 50%-ный водный раствор карбоната калия. Добавку впрыскивали в МГД-канал с помощью топливной форсунки ZMZ-6354 (позиция 3 на рис. 1), расположенной в окрестности выходного сопла микро-ИДД и соединенной с емкостью 4 трубопроводом 5. Производительность форсунки составляла  $(5 \pm 0.2)$  г/с (при давлении в емкости 4 не менее 3.5–4 атм), так что содержание добавки в горючей смеси составляло 4–5 мас. %. Кроме того, в качестве энергетической присадки использовали добавку механоактивированного металлосодержащего нанокompозита Mg–MoO<sub>3</sub> в количестве до 2.5 мас. %.

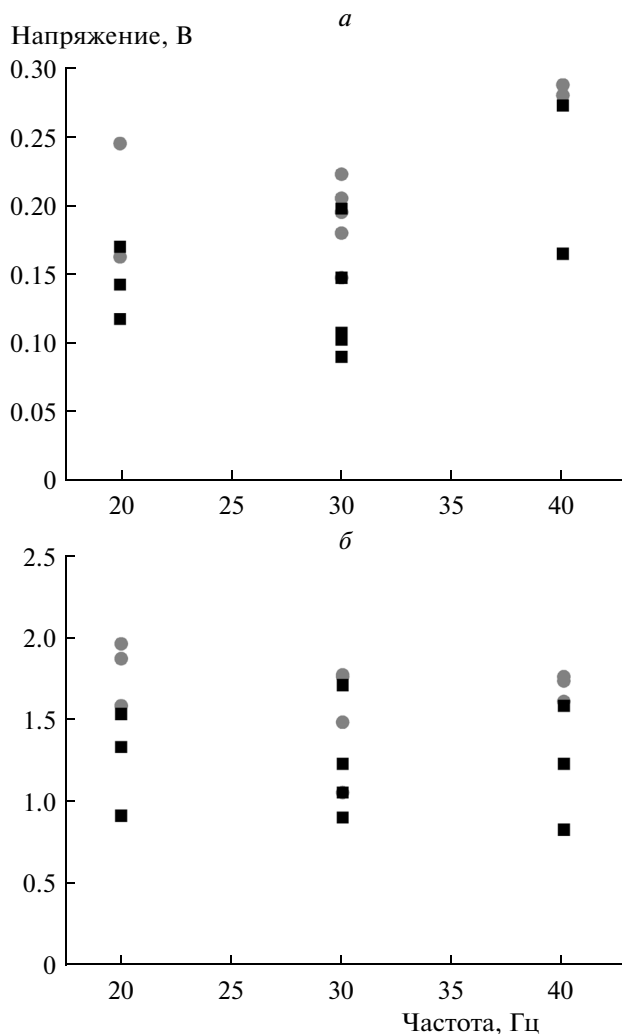


**Рис. 3.** Форма импульса напряжения на электродах МГД-канала в зависимости от рабочей частоты (1 – 20 Гц, 2 – 30 Гц, 3 – 40 Гц) микро-ИДД (магнитная индукция – 0.6 Тл): *a* – нагрузка в 1 Ом, *б* – 10 Ом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе экспериментов исследовали влияние частоты работы микро-ИДД, интенсивности магнитного поля МГД-генератора, состава горючей смеси и присадки механоактивированного металлосодержащего нанокompозита на величину напряжения, генерируемого на электродах МГД-канала при разной резистивной нагрузке в электрической цепи.

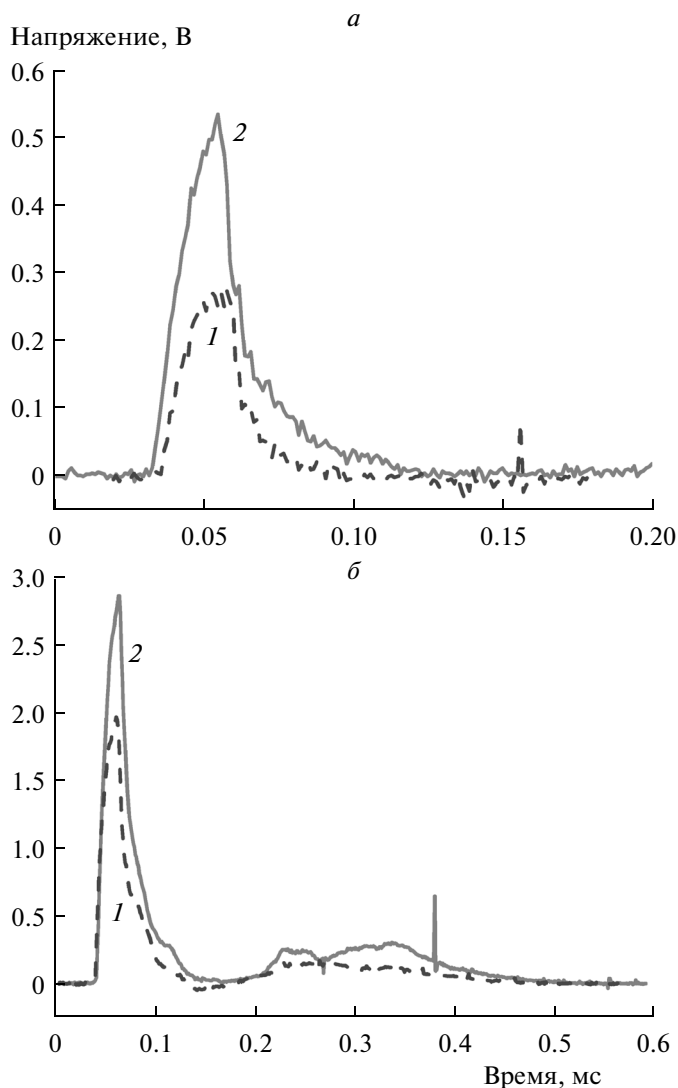
На рис. 2 и 3 приведены результаты экспериментов по влиянию частоты рабочих циклов микро-ИДД на величину напряжения, генерируемого на электродах МГД-канала (рис. 2), и на форму импульса напряжения (рис. 3) при внешней резистивной нагрузке 1 и 10 Ом. Видно, что повышение частоты работы ИДД практически не влияет



**Рис. 4.** Влияние рабочей частоты микро-ИДД на амплитуду импульса напряжения на электродах (● — электрод 1, ■ — электрод 2) МГД-канала (индукция магнитного поля — 0.3 Тл): а — нагрузка в 1 Ом, б — 10 Ом.

на амплитуду (до 3 В) и форму импульса напряжения. Такой результат ожидался, поскольку, с одной стороны, напряжение на электродах зависит от скорости движения плазмы в МГД-канале (при прочих равных условиях), а с другой — повышение частоты работы микро-ИДД в интервале частот 20–40 Гц не влияло на скорость детонации в единичном импульсе [11, 12].

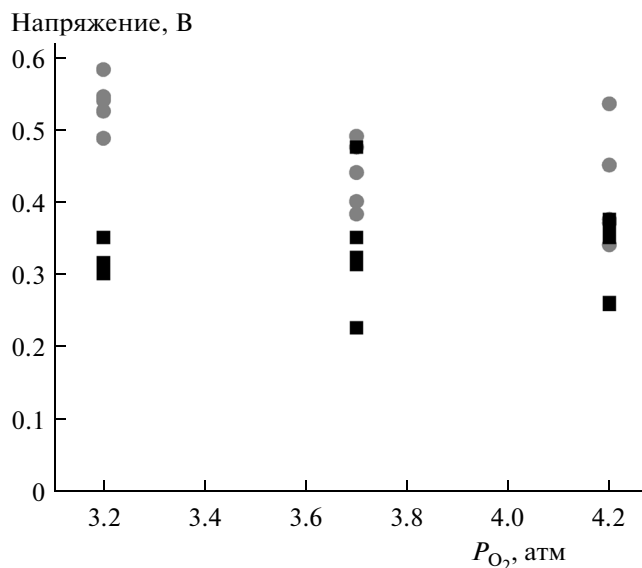
На рис. 4 и 5 приведены результаты экспериментов по влиянию индукции магнитного поля МГД-канала на амплитуду (рис. 4) и форму (рис. 5) импульса напряжения, генерируемого на его электродах при разной частоте рабочих циклов ИДД и при двух значениях внешней резистивной нагрузки. Видно, что снижение магнитной индукции приводит к уменьшению амплитуды импульса напряжения на электродах МГД-кана-



**Рис. 5.** Форма импульса напряжения на электродах МГД-канала для различных значений магнитной индукции (1 — 0.3 Тл, 2 — 0.6 Тл; рабочая частота микро-ИДД — 20 Гц): а — нагрузка в 1 Ом, б — 10 Ом.

ла, однако форма сигнала в единичном импульсе практически не изменяется.

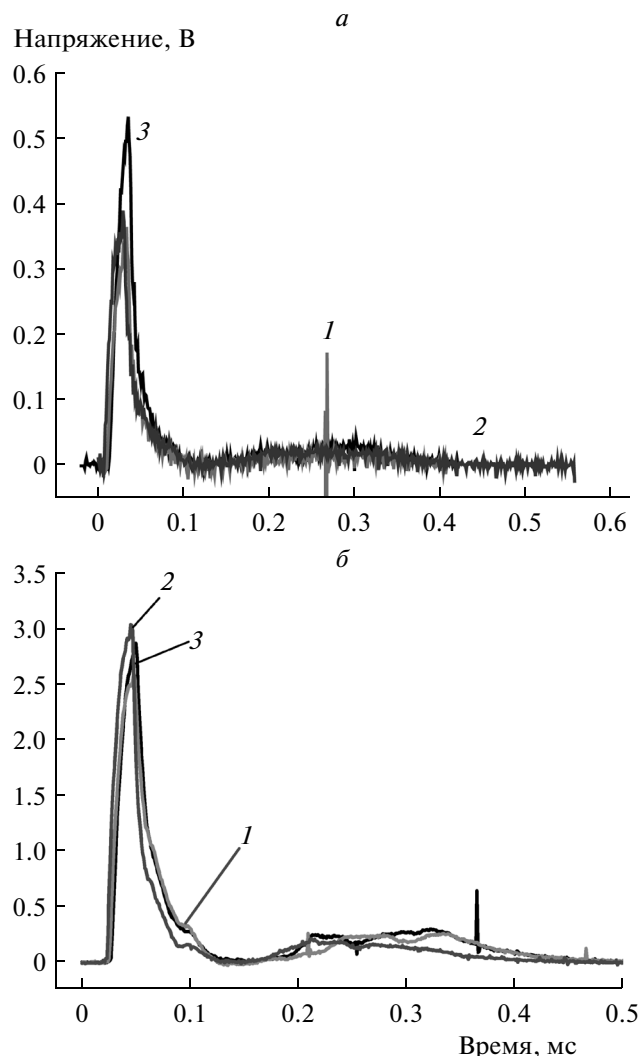
На рис. 6 приведены результаты экспериментов по влиянию состава горючей смеси на амплитуду импульсов напряжения, генерируемых на электродах МГД-канала при рабочей частоте микро-ИДД 20 Гц и внешней резистивной нагрузке 1 Ом. В ходе экспериментов состав горючей смеси варьировали, изменяя давление подачи кислорода от 3.2 до 4.2 атм при неизменной цикловой подаче жидкого горючего. При этом коэффициент избытка окислителя изменялся от 1.5 до 2.0. Видно, что обеднение смеси приводит к некоторому снижению напряжения на электродах МГД-канала, которое следовало ожидать ввиду снижения скорости и температуры продуктов детонации.



**Рис. 6.** Влияние избыточного давления кислорода на входе в камеру сгорания микро-ИДД на амплитуду импульсов напряжения на электродах МГД-канала (магнитная индукция – 0.6 Тл, нагрузка – 1 Ом, частота – 20 Гц): ● – электрод 1, ■ – электрод 2.

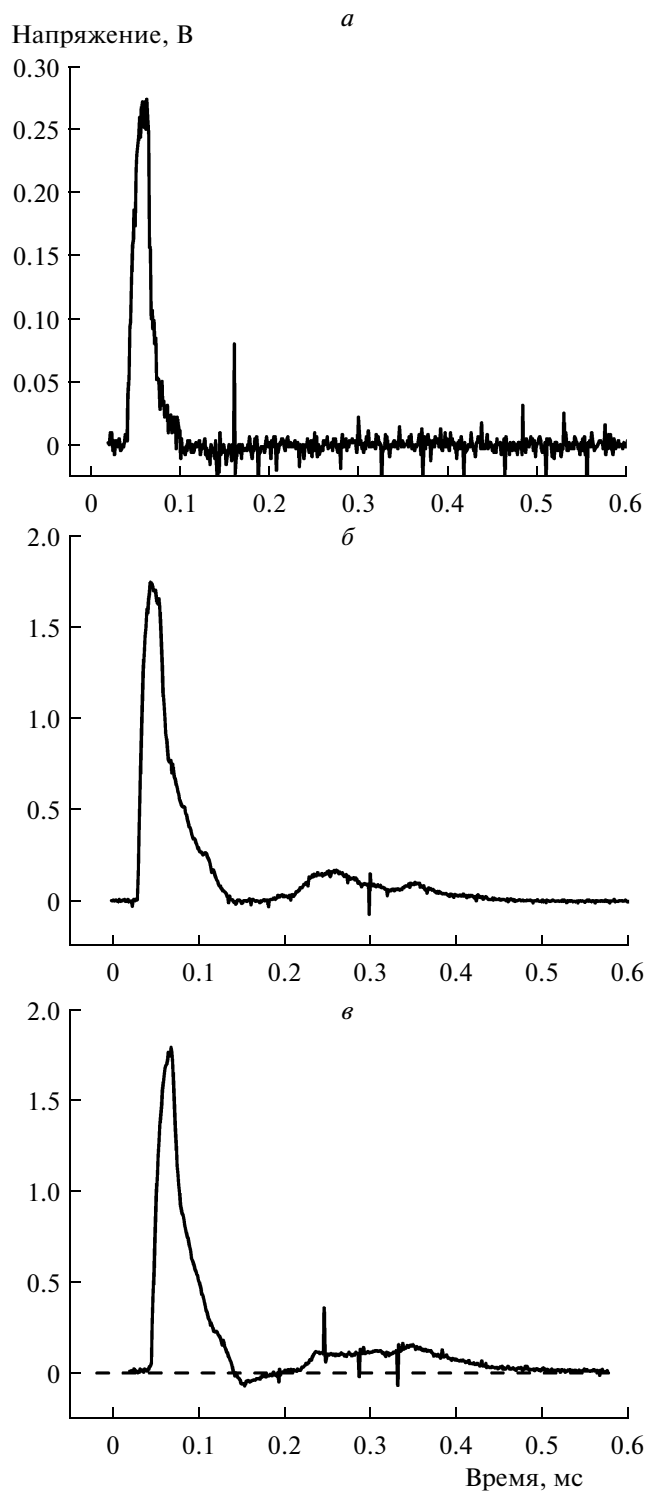
На рис. 7 приведены результаты экспериментов по влиянию массовой концентрации нанокompозита Mg–MoO<sub>3</sub>, добавленного в топливо, на амплитуду импульсов напряжения, генерируемых на электродах МГД-канала при рабочей частоте микро-ИДД 20 Гц и различной внешней резистивной нагрузке. Концентрация Mg–MoO<sub>3</sub> в топливе задавалась в процессе его предварительной подготовки (добавление и смешение) по методике, описанной в работе [13]. Цикловая подача смесового топлива и давление подачи кислорода во всех экспериментах оставались постоянными. Из рис. 7 видно, что влияние добавки нанокompозита неоднозначно. При работе с нагрузкой в 1 Ом добавки Mg–MoO<sub>3</sub> приводят к снижению амплитуды напряжения по сравнению с работой установки на чистом топливе. Однако при повышении резистивной нагрузки до 10 Ом и добавке к топливу 1.25 мас. % Mg–MoO<sub>3</sub> наблюдается некоторый рост амплитуды напряжения: с 2.8 до 3.1 В. Тем не менее при повышении концентрации добавки до 2.5 мас. % амплитуда импульса напряжения снижается до значения, сопоставимого с напряжением, полученным при работе установки на чистом топливе. Отмеченная неоднозначность связана, по-видимому, с влиянием присадки на характеристики детонационной волны. Для объяснения наблюдаемых эффектов требуются дополнительные исследования.

В ходе экспериментов обнаружено, что импульсы напряжения на электродах МГД-канала могут иметь одну из трех форм, представленных



**Рис. 7.** Влияние добавки нанокompозита Mg–MoO<sub>3</sub> к топливу (1 – 2.5 мас. % добавки, 2 – 1.25 мас. % добавки, 3 – без добавки) на амплитуду импульсов напряжения на электродах 1 МГД-канала (индукция магнитного поля – 0.6 Тл, частота – 20 Гц): а – нагрузка в 1 Ом, б – 10 Ом.

на рис. 8. Первый пик (длительность ~100 мкс) во всех трех формах импульса напряжения связан с прохождением детонационного фронта между электродами МГД-канала. Резкое уменьшение напряжения в первом пике вызвано торможением и охлаждением продуктов детонации в волне разрежения, следующей за детонационным фронтом. Наблюдаемая скорость падения напряжения составляет около 20 кВ/с. Вторичный пик в импульсах напряжения на рис. 8б и в (длительность ~200 мкс) связан, по-видимому, с приходом волны разрежения от открытого конца МГД-канала, которая вызывает временное ускорение истечения остаточных продуктов детонации и, как следствие,



**Рис. 8.** Типичные формы импульсов напряжения на электродах МГД-канала: *a* – одиночный импульс, *б* – двойной импульс, *в* – двойной импульс с кратковременной сменой знака напряжения.

повышение напряжения на электродах. Участок с отрицательным напряжением между двумя пиками может быть вызван кратковременным изменением направления течения в МГД-канале [8].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены экспериментальные исследования МГД-эффектов от импульсной гетерогенной (капельной) детонации с добавкой

в продукты детонации насыщенного 50%-ного водного раствора карбоната калия (ионизирующей добавки). Показано, что на электродах МГД-канала наблюдается устойчивая генерация импульсов напряжения с амплитудой до 3 В при задаваемой микро-ИДД частоте. Повышение частоты работы ИДД от 20 до 40 Гц практически не влияло на амплитуду и форму импульса напряжения. Снижение магнитной индукции от 0.6 до 0.3 Тл приводило к уменьшению амплитуды импульса напряжения на электродах МГД-канала, однако форма сигнала в единичном импульсе практически не изменялась. Обеднение горючей смеси жидким топливом приводило к снижению напряжения на электродах МГД-канала. Добавление в топливную смесь энергетического механоактивированного металлосодержащего нанокompозита Mg—MoO<sub>3</sub> в количестве до 2.5 мас. % не приводило к существенным изменениям формы и амплитуды импульсов напряжения. Зарегистрированы три формы импульсов напряжения на электродах МГД-канала: одиночные импульсы, двойные импульсы и двойные импульсы с кратковременной сменой знака сигнала.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом (грант № 14-13-00082) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 15-08-00782).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453.
2. Фролов С.М., Барыкин А.Е., Борисов А.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 3. С. 17.
3. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. // Progress in Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. Issue 6. P. 545.
4. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. С. 423.
5. Jimerin D.G., Mironov E.A., Popov V.A. // Proc. 12th Sympos. Eng. Aspects of MHD. Argonne: Argonne National Lab., 1972. P. II.4.1.
6. Бакланов Д.И., Жимерин Д.Г., Киселёв Ю.Н., Миронов Э.А., Попов В.А. // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12. № 1. С. 47.
7. Litchford R.J., Thompson B.R., Lineberry J.T. // J. Propulsion and Power. 2000. V. 16. № 2. P. 251.
8. Cambier J.L. // AIAA paper 1998-3876. 1998.
9. Matsumoto M., Murakami T., Okuno Y. // AIAA Paper 2007-4130. 2007.
10. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С., Авдеев К.А., Медведев С.Н., Фролов Ф.С., Шамшин И.О. // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 6. М.: Торус Пресс, 2013. С. 104.
11. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 4. М.: Торус Пресс, 2011. С. 154.
12. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 8. С. 58.
13. Борисов А.А., Колбанёв И.В., Стрелецкий А.Н., Трошин К.Я., Фролов С.М. // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 3. М.: Торус Пресс, 2010. С. 118.