

НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ТРОЙНОЙ СМЕСИ «ВОДОРОД – ЖИДКИЙ ПРОПАН – ВОЗДУХ»*

В. С. Аксёнов¹, В. С. Иванов², С. М. Фролов³, И. О. Шамшин⁴

Аннотация: Проведены эксперименты по организации непрерывно-детонационного горения тройной смеси «водород – жидкий пропан – воздух» в кольцевой непрерывно-детонационной камере сгорания (НДКС) диаметром 406 мм с кольцевым зазором 30 мм. Жидкий пропан подавался в камеру в момент времени, когда в ней регистрировался устойчивый непрерывно-детонационный режим горения водородно-воздушной смеси. В экспериментах расходы водорода, пропана и воздуха изменялись в пределах от 0,1 до 0,5 кг/с (водород и пропан) и от 5 до 12 кг/с (воздух). Непрерывно-детонационное горение жидкого пропана впервые получено не за счет обогащения воздуха кислородом, а за счет добавления водорода. Экспериментально зарегистрирован рабочий процесс с одной детонационной волной (ДВ) в период, когда подача водорода быстро снижалась, а расходы пропана и воздуха оставались постоянными.

Ключевые слова: непрерывно-детонационное горение; жидкий пропан; водород; воздух; эксперимент; детонационная волна

Введение

Сверхзвуковое детонационное горение обладает целым рядом преимуществ над дозвуковым дефлаграционным горением: оно сопровождается повышением давления и плотности среды и обладает значительно большей мощностью энерговыделения. Ввиду того что химические превращения в ДВ протекают в режиме самовоспламенения, оно обеспечивает высокую полноту сгорания топлива, а вследствие высокой скорости детонации количество экологически вредных веществ, образующихся в детонационной камере сгорания, минимально.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-00782).

¹Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

²Центр импульсно-детонационного горения, Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; ivanov.vls@gmail.com

³Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

⁴Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», shamshin@idgcenter.ru

Впервые на перспективность использования детонационного горения в энергетике и на транспорте указал Я. Б. Зельдович в 1940 г. [1]. В том же году Г. Хоффман [2] предложил организовать управляемое детонационное горение в периодически генерируемых ДВ для создания реактивной тяги. В 1959 г. Б. В. Войцеховский [3] предложил другую схему организации детонационного горения в виде непрерывной спиновой детонации, циркулирующей в кольцевой камере сгорания с непрерывной подачей топливной смеси. Идеи [1–3] получили бурное развитие, начиная с 1990-х гг. Подробные обзоры состояния дел в этой области науки и техники приведены в [4, 5]. В настоящее время одна из основных проблем, стоящих на пути практического применения управляемого детонационного горения, — организация устойчивого рабочего процесса при использовании штатных жидких моторных топлив.

Цель данной работы — экспериментальное исследование непрерывно-детонационного горения тройной смеси «водород – жидкий пропан – воздух». Следует отметить, что до сих пор непрерывную детонацию пропана удавалось получить только при обогащении воздуха кислородом как минимум до 50% по массе [5].

Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов с жидким топливом использовали экспериментальную кольцевую НДКС, на которой ранее проводились эксперименты для водородно-воздушной смеси [6, 7]. Камера установлена на тяговом столе вертикально и имеет следующие размеры: внешний диаметр 406 мм, высоту 310 мм и ширину кольцевого зазора 30 мм. Верхний конец НДКС сообщается с окружающей средой через выходное сопло со сменным центральным телом в виде конуса с полууглом при вершине 23°.

Чтобы обеспечить подачу жидкого топлива в НДКС, были разработаны и изготовлены новая смесительная головка и система подачи топлива вытеснительного типа.

Проект новой смесительной головки создан на основе многовариантных трехмерных газодинамических расчетов по методике [8]. Новая смесительная головка (рис. 1) выполнена из стали и имеет 80 радиальных форсунок диаметром 0,46 мм, равномерно распределенных по окружности диаметром 386 мм. Для подачи жидкого топлива используются две трубки диаметром 10 мм. В НДКС кроме подачи жидкого топлива предусмотрена подача газообразного горючего, например водорода. Газообразное горючее, как и в [6, 7], подается из большой емкости в кольцевой газовый коллектор НДКС и поступает в камеру сгорания через 240 радиальных отверстий диаметром 1 мм, равномерно распределенных по окружности внешней стенки на расстоянии 30 мм (может изменяться) ниже по течению от форсунок жидкого топлива. Воздух подается под давлением из воздушной емкости в воздушный коллектор НДКС через четыре боковые трубы, присоединенные тангенциально к камере, так что нижний торец НДКС полностью закрыт. Из коллектора воздух

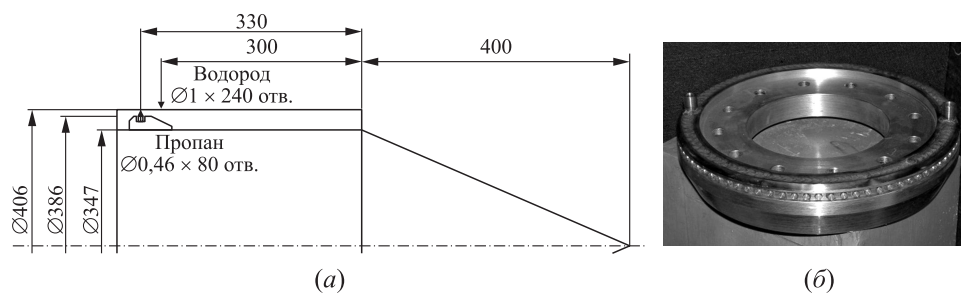


Рис. 1 Схема установки в НДКС новой смешивательной головки для подачи жидкого топлива (размеры указаны в миллиметрах) (а) и фотография смешивательной головки (б)

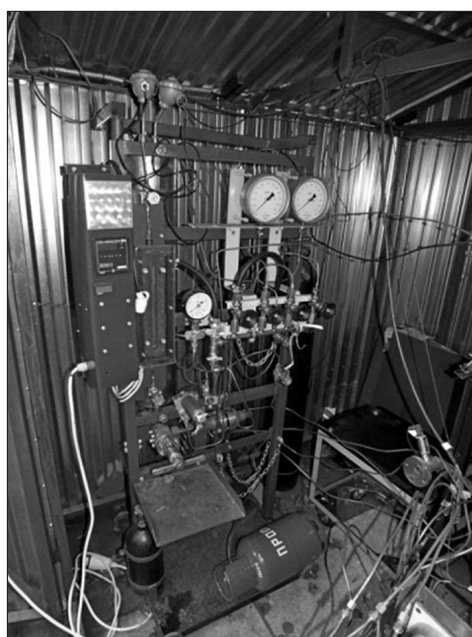


Рис. 2 Система подачи жидкого топлива

поступает в камеру сгорания через кольцевое отверстие шириной 10 мм между смешивательной головкой и внешней стенкой камеры. Тангенциальная подача воздуха приводит к сильной закрутке потока (тангенциальная скорость ~ 200 м/с).

Система подачи жидкого топлива (рис. 2) имеет емкость объемом 5 л с электронагревателем мощностью 6 кВт, позволяющим нагревать жидкое топливо до температуры 200 °С. Максимальное давление подачи топлива — 100 атм.

К внешней стенке камеры сгорания на расстоянии 150 мм от отверстий подачи газообразного горючего тангенциально подведена трубка инициатора детонации внутренним диаметром 26 мм и длиной 600 мм, оборудованная отдельной системой подачи водорода и воздуха, двумя автомобильными свечами зажигания и спиралью Щёлкина длиной 400 мм, которая обеспечивает переход горения в детонацию внутри трубки и надежный перепуск ДВ в кольцевой зазор НДКС.

Перед проведением экспериментов система подачи жидкого горючего была опрессована и пролита водой для оценки коэффициента расхода новой смесительной головки. Коэффициент расхода оказался равным 0,76.

Все опыты проводились при нормальном атмосферном давлении и при температуре окружающего воздуха 22 °С. Максимальная продолжительность одного эксперимента – 1 с.

Эксперименты с водородно-воздушной смесью

В связи с заменой смесительной головки на первом этапе исследований провели опыты с водородно-воздушной смесью, чтобы убедиться в возможности реализации рабочего процесса с непрерывно-детонационным горением. В результате серии экспериментов получена карта устойчивых режимов непрерывно-детонационного горения с одной или несколькими ДВ, одновременно вращающимися в кольцевом зазоре в одном направлении. На рис. 3, *а* показана фотография выхлопной струи

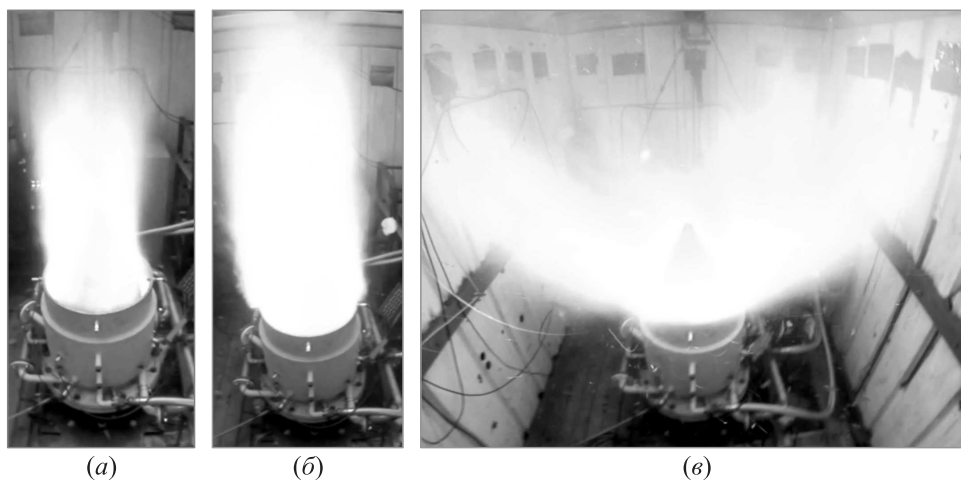


Рис. 3 Фотографии выхлопных струй при непрерывно-детонационном горении водородно-воздушной смеси (*а*) и смеси водород – жидкий пропан – воздух (*б*), а также при диффузионном горении смеси водород – жидкий пропан – воздух (при срыве детонации) (*в*)

при непрерывно-детонационном горении водородно-воздушной смеси в одном из опытов этой серии. Количество ДВ зависело от давления подачи воздуха. Так, при избыточном давлении воздуха 0,2 МПа регистрировался процесс с одной ДВ, бегущей в сторону, противоположную направлению закрутки потока, а при 0,5 МПа регистрировался процесс с двумя ДВ, бегущими в том же направлении.

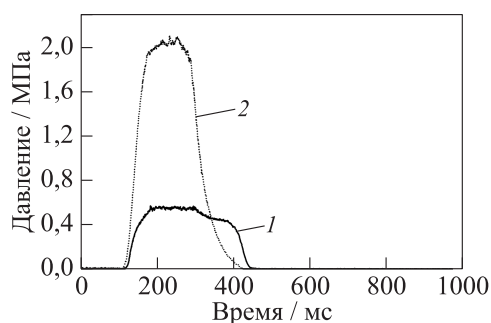
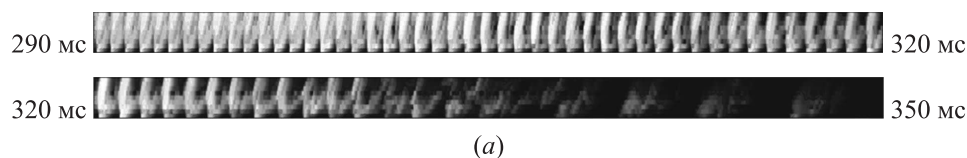


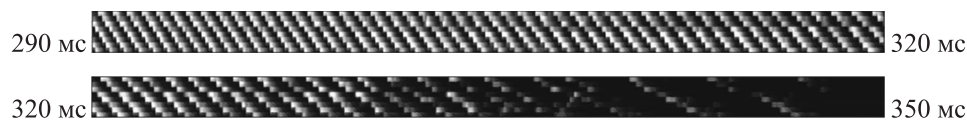
Рис. 4 Записи избыточного давления в коллекторах подачи воздуха (1) и водорода (2) в одном из опытов

ни ~ 400 мс после закрытия клапана подачи воздуха. На рис. 5 показаны результаты обработки фрагментов записей химионизационных зондов, размещенных с одинаковым шагом (30 мм) вдоль образующей внешней стенки НДКС (9 зондов, рис. 5, а) и с одинаковым углом (45°) вдоль периметра внешней стенки в одном сечении НДКС (8 зондов, рис. 5, б). Процедура обработки сигналов подробно описана в [9]. По вертикали фрагментов разверток на рис. 5 отложены пиксели по одному на каждый последовательный химионизационный зонд, а по горизонта-

На рис. 4 показаны записи избыточного давления в коллекторах подачи воздуха и водорода в опыте с начальными давлениями 0,52 и 1,95 МПа соответственно (при расходах 11 и 0,32 кг/с соответственно). Видно, что уровни давления в коллекторах практически постоянны в период времени от ~ 150 до ~ 300 мс. Далее, в момент времени ~ 290 мс, давление подачи водорода начинает быстро снижаться вследствие закрытия клапана подачи водорода, а давление подачи воздуха начинает снижаться в момент времени



(а)



(б)

Рис. 5 Результаты обработки фрагментов записей химионизационных зондов, установленных вдоль образующей (а) и вдоль периметра (б) внешней стенки НДКС при непрерывно-детонационном горении водородно-воздушной смеси

ли отложено время регистрации в миллисекундах. Белый цвет «регистраграммы» соответствует высокому току проводимости (высокой температуре), регистрируемому зондом в ДВ. По такой «регистраграмме» можно определить количество ДВ, скорости их распространения, направление их движения, частоту их вращения, высоту ДВ и многие другие особенности явления, а также проследить динамику переходных процессов. Каждый участок развертки на рис. 5 соответствует периоду времени 30 мс.

На интервале времени 150–300 мс зарегистрированы две ДВ, бегущие с видимой скоростью ~ 1200 м/с в направлении, противоположном направлению закрутки воздушного потока. После отключения подачи водорода (момент времени ~ 290 мс) расход водорода через НДКС быстро снижается и вместе с этим изменяется структура и скорость ДВ (изменяется наклон белых полос на рис. 5, б). К моменту времени ~ 330 мс горение у днища НДКС практически прекращается: происходит срыв рабочего режима (черный фон на рис. 5 со спорадическими вспышками). Срыв режима происходит, когда давление в водородном коллекторе упало до $\sim 0,52$ МПа.

Эксперименты с тройной смесью водород – жидкий пропан – воздух

На втором этапе исследований провели опыты с подачей тройной смеси «водород – жидкий пропан – воздух», причем водород рассматривали как инициирующее горючее: клапан подачи жидкого пропана открывали через 100 мс после открытия клапанов подачи водорода и воздуха. При этом жидкое топливо поступало в кольцевой зазор НДКС только через 250–300 мс, что связано с конечным временем заполнения магистралей и топливного коллектора. Как только жидкое топливо начинало истекать в кольцевой зазор НДКС, подачу водорода отключали, т. е. в дальнейшем в камеру сгорания поступали жидкий пропан и воздух, а также остаточный водород.

В экспериментах с давлением подачи жидкого пропана до 0,7 МПа (с расходом до 0,27 кг/с) и с расходом воздуха до 10,4 кг/с зарегистрирован рабочий процесс с одной ДВ.

На рис. 3, б показана фотография выхлопной струи при непрерывно-детонационном горении жидкого пропана в одном из опытов этой серии. На рис. 6 показаны записи избыточного давления в коллекторах подачи воздуха (1), водорода (2) и жидкого пропана (3) в опыте с начальными давлениями 0,5, 1,9 и 0,7 МПа соответственно (при

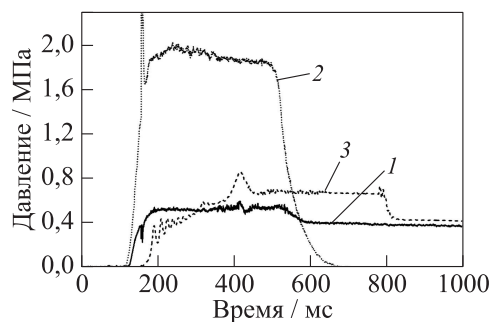


Рис. 6 Записи избыточного давления в коллекторах подачи воздуха (1), водорода (2) и жидкого пропана (3) в одном из опытов

расходах воздуха 10,4 кг/с, водорода 0,32 кг/с (на стадии подачи вместе с воздухом) и 0,15 (на стадии подачи вместе с пропаном и воздухом) и пропана 0,27 кг/с). Видно, что к моменту времени ~ 600 мс подача водорода в НДКС практически прекратилась, а давления подачи жидкого пропана и воздуха постоянны и равны 0,7 и 0,4 МПа соответственно вплоть до момента закрытия клапана подачи жидкого топлива (800 мс).

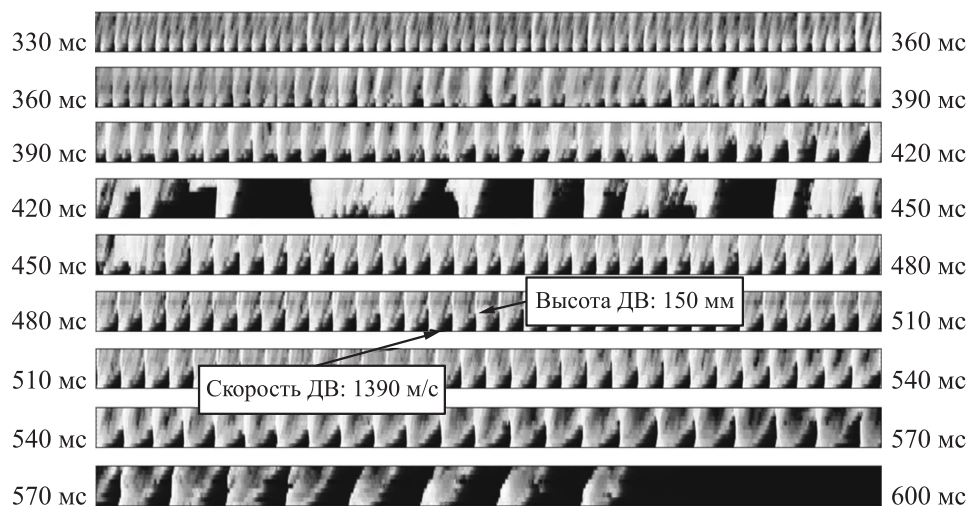
На рис. 7 показаны результаты обработки фрагментов записей хемионизационных зондов. Как и на рис. 5, каждый участок развертки на рис. 7 соответствует периоду времени 30 мс.

На интервале времени 330–370 мс зарегистрированы две ДВ в водородно-воздушной смеси, бегущие с видимой скоростью ~ 1200 м/с в направлении, противоположном направлению закрутки воздушного потока. Далее, в связи с тем, что после открытия клапана подачи жидкого пропана в НДКС сначала поступают пары пропана, на интервале времени 370–420 мс регистрируются уже не две, а одна ДВ, бегущая по газовой смеси «водород – пропан – воздух» с видимой скоростью ~ 1290 м/с в том же направлении.

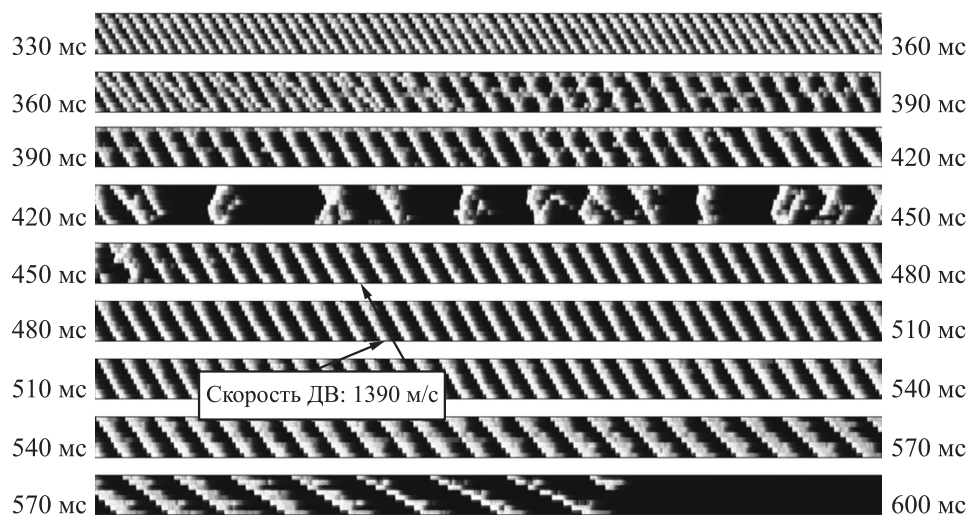
В момент времени 420 мс в камеру сгорания начинает поступать жидкий пропан (этот момент времени соответствует локальному максимуму на кривой давления в коллекторе пропана, см. рис. 6). В связи с поступлением в НДКС холодной жидкости в интервале времени 420–450 мс наблюдаются переходный период, сопровождающийся распространением фронтов реакций в разных направлениях (разные наклоны светлых полос на рис. 7, б). По окончании переходного периода в момент времени ~ 450 мс рабочий процесс в НДКС стабилизируется: здесь снова регистрируется режим с одной ДВ, бегущей с видимой скоростью ~ 1390 м/с. Таким образом, подача сначала газообразного, а затем и жидкого пропана привела к переходу с режима с двумя ДВ к режиму с одной ДВ.

В момент времени 500 мс происходит отключение подачи водорода, в результате чего расход водорода через НДКС быстро снижается, а структура и скорость ДВ остаются практически неизменными. Например, в момент времени 550 мс, когда давление подачи водорода уменьшается более чем в 2 раза и сравнивается с давлением подачи жидкого пропана (см. рис. 6), структура и скорость ДВ практически такие же, как в момент времени 500 мс, т. е. пропан участвует в реакции. При этом суммарный коэффициент избытка горючего в смеси «водород – жидкий пропан – воздух» в данном опыте оценивается как 0,93.

Дополнительным доказательством того, что пропан участвует в реакции, может служить рис. 5 — аналог рис. 7 для эксперимента с водородно-воздушной смесью, в котором пропан вообще не подавался. Если на рис. 5 срыв детонации происходит при снижении давления водорода до 0,52 МПа, то на рис. 7 срыв детонации происходит в моменты времени от 570 до 580 мс при снижении давления водорода до 0,24 МПа. При этом горение у днища НДКС прекращается (сплошной черный фон на рис. 7). В дальнейшем в этом опыте наблюдается внешнее диффузионное горение пропана на выходе из НДКС.



(а)



(б)

Рис. 7 Результаты обработки фрагментов записей химионизационных зондов, установленных вдоль образующей (а) и вдоль периметра (б) внешней стенки НДКС; давление подачи жидкого пропана 0,7 МПа

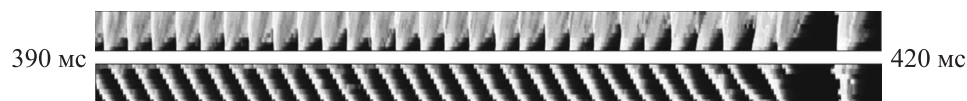


Рис. 8 Срыв детонационного горения при давлении подачи пропана 0,8 МПа

При повышении давления подачи жидкого пропана до 1,0 МПа непрерывно-детонационный рабочий режим срывался даже без отключения клапана подачи водорода (рис. 8). В этом случае наблюдался рабочий режим с внешним горением на срезе НДКС (см. рис. 3, в).

Заключение

Проведены эксперименты по организации непрерывно-детонационного горения тройной смеси «водород – жидкий пропан – воздух» в НДКС диаметром 406 мм с кольцевым зазором 30 мм. Жидкий пропан подавался в камеру в момент времени, когда в ней регистрировался устойчивый непрерывно-детонационный режим горения водородно-воздушной смеси. В экспериментах расходы водорода, пропана и воздуха изменялись в пределах от 0,1 до 0,5 кг/с (водород и пропан) и от 5 до 12 кг/с (воздух).

В экспериментах с давлением подачи жидкого пропана до 0,7 МПа (с расходом до 0,27 кг/с) и с расходом воздуха 10 кг/с зарегистрирован рабочий процесс с одной ДВ после отключения подачи водорода. Получены свидетельства того, что пропан участвовал в реакции при распространении детонации. Если без подачи пропана срыв детонации водородно-воздушной смеси после отключения подачи водорода происходил при снижении давления водорода до 0,52 МПа, то срыв детонации с подачей пропана происходил при снижении давления водорода до 0,24 МПа.

Таким образом, непрерывно-детонационное горение жидкого пропана впервые получено не за счет обогащения воздуха кислородом, а за счет добавления водорода. Планируется продолжение начатых исследований с тем, чтобы обеспечить непрерывно-детонационное горение пропановоздушной смеси без добавления водорода.

Литература

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1455–1461.
2. Hoffman H. Reaction propulsion by intermittent detonative combustion // Volkenrode Translation. German Ministry of Supply, 1940.
3. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР, 1959. Т. 129. № 6. С. 1254–1256.
4. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.

5. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
6. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Дубровский А. В., Иванов В. С., Шамшин И. О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 102–117.
7. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin. I. O. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. P. 1616–1623.
8. Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М. Трёхмерное численное моделирование рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания с отдельной подачей водорода и воздуха // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 2. С. 65–81.
9. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемиионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. РАН, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.

Поступила в редакцию 18.03.16

CONTINUOUS DETONATION COMBUSTION OF TERNARY “HYDROGEN – LIQUID PROPANE – AIR” MIXTURE

V. S. Aksenov^{1,2,3}, V. S. Ivanov^{1,2}, S. M. Frolov^{1,2,3}, and I. O. Shamshin^{1,2,3}

¹Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Experiments on continuous-detonation combustion of ternary “hydrogen – liquid propane – air” mixture in an annular continuous-detonation combustor 406 mm in diameter with an annular gap of 30 mm have been performed. The liquid propane was fed into the chamber at the time when the sustained continuous detonation combustion of the hydrogen–air mixture was recorded. Mass flow rates ranged from 0.1 to 0.5 kg/s for hydrogen and propane and from 5 to 12 kg/s for air. Continuous-detonation combustion of liquid propane was obtained for the first time due to the addition of hydrogen rather than due to air enrichment with oxygen. The operation process with a single detonation wave rotating in the annular gap was registered at the time when hydrogen flow was rapidly decreasing, whereas propane and air flow rates remained constant.

Keywords: continuous-detonation combustion; liquid propane; hydrogen; air; experiment; detonation wave

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 15-08-00782).

References

1. Zel'dovich, Ya. B. 1940. K voprosu ob energeticheskom ispol'zovanii detonatsionnogo goreniya [To the question of energy use of detonation combustion]. *Zh. Tekhn. Fiz.* [J. Tech. Phys.] 10(17):1455–1461.
2. Hoffman, H. 1940. Reaction propulsion by intermittent detonative combustion. Volkenrode Translation. German Ministry of Supply.
3. Voitsekhovskii, B. V. 1959. Statsionarnaya detonatsiya [Stationary detonation]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 129(6):1254–1256.
4. Roy, G. D., S. M. Frolov, A. A. Borisov, and D. W. Netzer. 2004. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective. *Prog. Energ. Combust. Sci.* 30(6):545–672.
5. Bykovskii, F. A., and S. A. Zhdan. 2013. Nepreryvnaya spinovaya detonatsiya [Continuous spin detonation]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 423 p.
6. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, A. V. Dubrovskii, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2015. Energy efficiency of a continuous-detonation combustion chamber. *Combust. Explo. Shock Waves* 51(2):232–245.
7. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2015. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor. *Int. J. Hydrogen Energ.* 40:1616–1623.
8. Dubrovskii, A. V., V. S. Ivanov, and S. M. Frolov. 2015. Three-dimensional numerical simulation of the operation process in a continuous detonation combustor with separate feeding of hydrogen and air. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(1):104–119.
9. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, A. V. Dubrovskii, A. E. Zangiev, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, and I. O. Shamshin. 2015. Chemiionization and acoustic diagnostics of the process in continuous- and pulse-detonation combustors. *Dokl. Phys. Chem.* 465(1):273–278.

Received March 18, 2016

Contributors

Aksenov Victor S. (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; engineer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

Ivanov Vladislav S. (b. 1986) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of

Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; ivanov.vls@gmail.com

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; scientific head, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; shamshin@idgcenter.ru