

ПОЛУЧЕНИЕ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА С ПОМОЩЬЮ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ ТРОЙНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ «ПРОПАН – КИСЛОРОД – ВОДЯНОЙ ПАР»*

С. М. Фролов¹, В. А. Сметанюк², И. О. Шамшин³, А. С. Коваль⁴, Ф. С. Фролов⁵, С. А. Набатников⁶

Аннотация: Проведены систематические эксперименты по определению концентрационных пределов детонации тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» при нормальном атмосферном давлении. Эксперименты выполнены в инновационном импульсно-детонационном пароперегревателе (ИДП) с многократной циклической детонацией тройных смесей при варьировании коэффициента избытка горючего (от 0,3 до 1,7) и объемной доли водяного пара (от 0 до 0,7). В дополнение к экспериментам проведены термодинамические расчеты. Показано, что циклическая детонация тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» позволяет получить сильно перегретый водяной пар (СПП) с температурой выше 2250 К при атмосферном давлении, причем в выходном сечении ИДП продукты детонации стехиометрической тройной смеси могут содержать до 80% СПП и до 20% CO₂. Предложено использовать такую высокотемпературную среду для глубокой переработки органических коммунальных и промышленных отходов и газификации углей с получением газовой смеси CO и H₂, которая в дальнейшем может использоваться в качестве энергетического газа для производства тепла и/или электричества и/или в качестве сырья для производства метанола и синтетических моторных топлив. Вследствие периодического заполнения ИДП «холодной» тройной газовой смесью температура его стенок и внутренних элементов повышается незначительно, так что для его изготовления можно использовать обычные (не жаропрочные) конструкционные материалы.

Ключевые слова: сильно перегретый водяной пар; детонационный пароперегреватель; циклический рабочий процесс; газовая детонация; концентрационные пределы детонации; переработка органических отходов

DOI: 10.30826/CE19120410

Введение

В настоящее время проблему экологически чистой переработки и утилизации коммунальных и промышленных отходов относят к одной из наиболее актуальных проблем современной цивилизации. Перспективы решения этой проблемы, в основном, связывают с развитием бескислородных технологий, основанных на пиролизе, термическом разложении и газификации отходов в реак-

торах в среде СПП с температурой выше 1600 °С при давлении, близком к атмосферному.

Одно из предлагаемых технологических решений — использование СПП, получаемого сжиганием водородно-кислородной смеси [1].

Другое решение — использование смеси синтез-газа, состоящего из CO и H₂, с водяным паром, предварительно нагретой до указанных выше температур [2]. Считается, что практическая реализация таких технологий обеспечила бы экономи-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 05.607.21.0304 (идентификатор контракта RFMEFI60719X0304) «Разработка эффективных способов химического ингибирования гомогенных и гетерогенных процессов горения и создание демонстрационного образца детонационного конвертора техногенных отходов» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@chph.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ASKoval@mephi.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

⁶ООО «Новые физические принципы», s.nabatnikov@mail.ru

чески эффективную переработку отходов любого морфологического и химического состава с полной утилизацией содержащихся в отходах материальных и энергетических ресурсов без каких-либо вредных выбросов в окружающую среду. К сожалению, вследствие проблем тепловой изоляции устройств горения и реакторов указанные технологии к настоящему времени не реализованы даже в виде опытно-промышленных установок.

В [3, 4] нами предложены новый способ и устройства для получения СПП с температурой выше 1600 °С при атмосферном давлении, в которых проблемы тепловой изоляции устройств горения и реакторов решаются заменой обычного горения на детонационное горение и переходом от стационарного рабочего процесса к циклическому. Сильно перегретый водяной пар предложено получать в ИДП за счет циклического детонационного сжигания тройной газовой смеси «горючий газ – газ-окислитель – водяной пар». В качестве горючего газа может использоваться водород, природный газ, пропан, смесь СО и Н₂ и др., а в качестве газа-окислителя – кислород, воздух, обогащенный кислородом воздух и др. В [3] рассмотрены варианты получения СПП в ИДП. В одном варианте используется предварительно-подготовленная газовая смесь «горючий газ – газ-окислитель – водяной пар», состав которой находится внутри концентрационных пределов детонации, а СПП получается в результате детонационного сжатия и разогрева исходного пара. В другом варианте СПП получается благодаря ударному сжатию и разогреву водяного пара с помощью детонации смеси «горючий газ – газ-окислитель». В обоих вариантах СПП дополнительно получается как продукт детонации горючего газа. С помощью устройств, предложенных в [3, 4], появляется возможность практической реализации технологий [1, 2]: стенки и внутренние элементы ИДП прогреваются до относительно низкой температуры (до ~ 500 °С [5]) вследствие периодического заполнения «холодной» тройной газовой смесью, т. е. ИДП можно изготавливать из обычных (не жаропрочных) конструкционных материалов.

Цель данной работы – определение количественных характеристик продуктов детонации (температура, состав, объемная доля СПП и др.) предварительно подготовленной тройной газовой смеси «горючий газ – газ-окислитель – водяной пар» при нормальном атмосферном давлении.

Экспериментальная установка

Исследования проводятся на специально созданном экспериментальном стенде. Основные

элементы стенда: ИДП, система подачи компонентов горючей смеси: горючего газа и газа-окислителя, система нагрева и подачи водяного пара в ИДП, система измерений и система управления. В качестве горючего газа используется пропан. В качестве газа-окислителя используется технический кислород.

Импульсно-детонационный пароперегреватель – это труба круглого сечения диаметром 50 мм и длиной 2,5 м с одним открытым и одним закрытым концом, выполненная из нержавеющей стали. Открытый конец ИДП соединен с камерой глушения, сообщающейся с атмосферой. У закрытого конца ИДП организована циклическая раздельная подача пропана и кислорода через магистраль с электромагнитными клапанами (ЭМК) и входными патрубками с расходными соплами диаметром 1 мм. Ниже по течению от входных патрубков расположены два источника зажигания (стандартные автомобильные свечи зажигания). Подача пропана в ИДП прерывается одним ЭМК, а подача кислорода – четырьмя ЭМК. Потребляемая мощность и напряжение питания ЭМК: 27 Вт и 24 В соответственно. Для надежного циклического инициирования детонации в ИДП вставлена спираль Щёлкина длиной 1,5 м, выполненная из стальной проволоки диаметром 6 мм с шагом 50 мм.

Пропан поступает в ИДП из 25-литрового баллона-ресивера, который до начала эксперимента заполнен до давления ~ 2 атм. Давление подачи пропана регулируется редуктором БПО-5-3. Кислород поступает в ИДП из 40-литрового баллона высокого давления (до 25 атм). Давление подачи кислорода в ИДП регулируется редуктором БКО-50.

Источник пара, подаваемого в ИДП – закрытая емкость с электронагревателями регулируемой мощности, заполняемая водой. Во время эксперимента водяной пар поступает из емкости в ИДП по теплоизолированной магистрали под небольшим избыточным давлением (~ 0,08 атм) с температурой 102 °С ниже по течению от источников зажигания. Расход водяного пара регулируется мощностью электронагревателей. Специальное направляющее устройство обеспечивает подачу пара только в сторону открытого конца ИДП. Благодаря этому присходит надежное инициирование детонации в смеси «пропан–кислород» на коротком расстоянии от источников зажигания и последующий перепуск детонации в тройную смесь «пропан – кислород – водяной пар» в широком диапазоне составов. Система подачи компонентов тройной смеси настроена так, что ИДП заполняется смесью полностью.

По длине ИДП установлены ионизационные зонды (ИЗ, 8 штук), позволяющие измерять скорость детонационной волны (ДВ) по методике, подробно описанной в [6]: скорость определяется по расстоянию между ИЗ (измерительным базам) и по времени прохождения фронта реакции между ними. Погрешность измерения скорости детонации равна ± 100 м/с ($\sim 5\%$ при скорости детонации на уровне 1800–2000 м/с). Отметим, что ИЗ 5–8 расположены на участке ИДП без спирали Щёлкина. Измерения скорости ДВ с помощью ИЗ нами многократно проводились ранее: они согласуются с измерениями скорости ДВ с помощью высокочастотных датчиков давления. В данной работе дорогостоящие датчики давления не используются в связи с опасностью их поломки при долговременной работе в составе ИДП.

Температура стенки ИДП контролируется термопарой типа ТХА с погрешностью 3%. Температура подаваемого в ИДП водяного пара измеряется термосопротивлением ТСП Pt100 с погрешностью 0,5%. Средние расходы газов определяются по падению давления в баллонах по окончании эксперимента после повышения температуры баллонов до температуры окружающей среды. Погрешность определения среднего коэффициента избытка горючего (КИГ) в горючей смеси равна 15%. Средний массовый расход водяного пара определяется по изменению веса источника пара за время эксперимента. В предварительных экспериментах получена зависимость изменения массы источника пара от мощности электронагревателей.

Погрешность измерения массового расхода пара равна 1%.

Эксперимент полностью контролируется системой автоматического управления. Сначала ИДП работает в частотном режиме без подачи водяного пара, чтобы стенки трубы прогрелись до температуры ~ 105 °С. После этого в ИДП вместе с пропаном и кислородом подается водяной пар. С этого момента отсчитываются циклы с инициированием детонации и ее распространением по тройной смеси. Каждый эксперимент включает от 20 до 40 циклов с частотой импульсов 0,2 Гц. Низкая частота связана с низким давлением подачи пропана и водяного пара. В экспериментах варьируются КИГ (от 0,3 до 1,7) и объемная доля водяного пара X , подаваемого в горючую смесь (от 0 до 0,7).

Обсуждение результатов

На рис. 1 показаны примеры первичных записей ИЗ при распространении ДВ в ИДП, заполненном горючей смесью без водяного пара (рис. 1, *а*) и с водяным паром (рис. 1, *б*). В тройной смеси ДВ распространяется с меньшей скоростью вследствие разбавления смеси водяным паром: преодоление одинакового расстояния от первого ИЗ (№ 1 на рис. 1) до последнего (№ 8) требует большего времени (1 мс вместо 0,82 мс).

На рис. 2 сплошными кривыми со значками показаны примеры изменения скорости фронта реакции с пройденным расстоянием в процессе перехо-

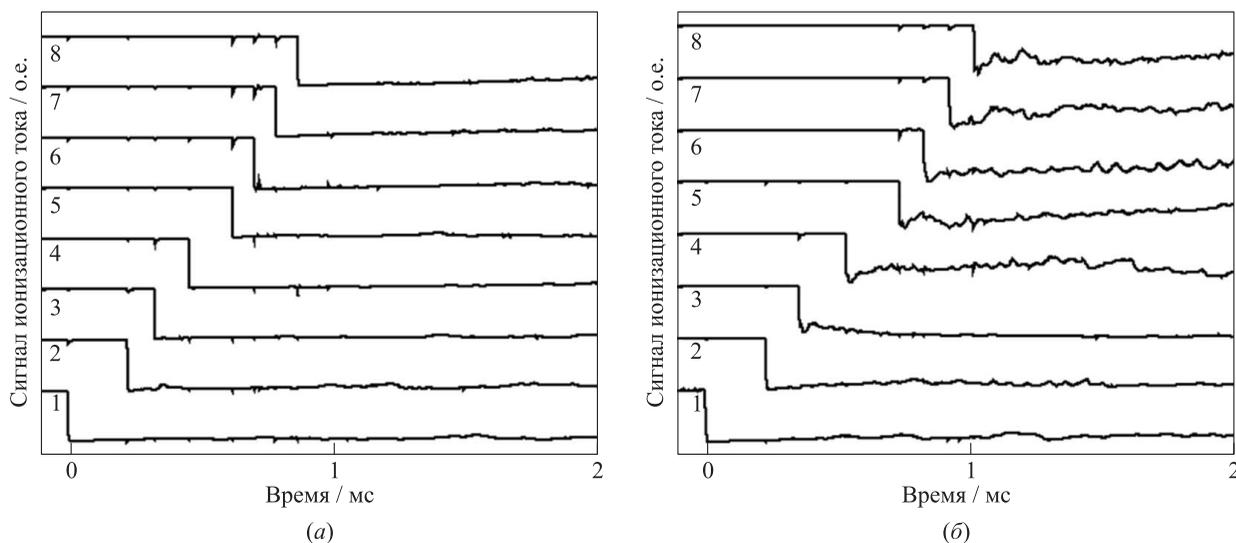


Рис. 1 Первичные записи восьми (1–8) ИЗ при распространении детонации в горючей смеси без водяного пара (объемное содержание пара $X = 0$) (*а*) и с водяным паром ($X = 0,58$) (*б*). Расстояния ИЗ от свечи зажигания: 1 – 330 мм; 2 – 880; 3 – 1130; 4 – 1450; 5 – 1850; 6 – 2050; 7 – 2250; 8 – 2450 мм

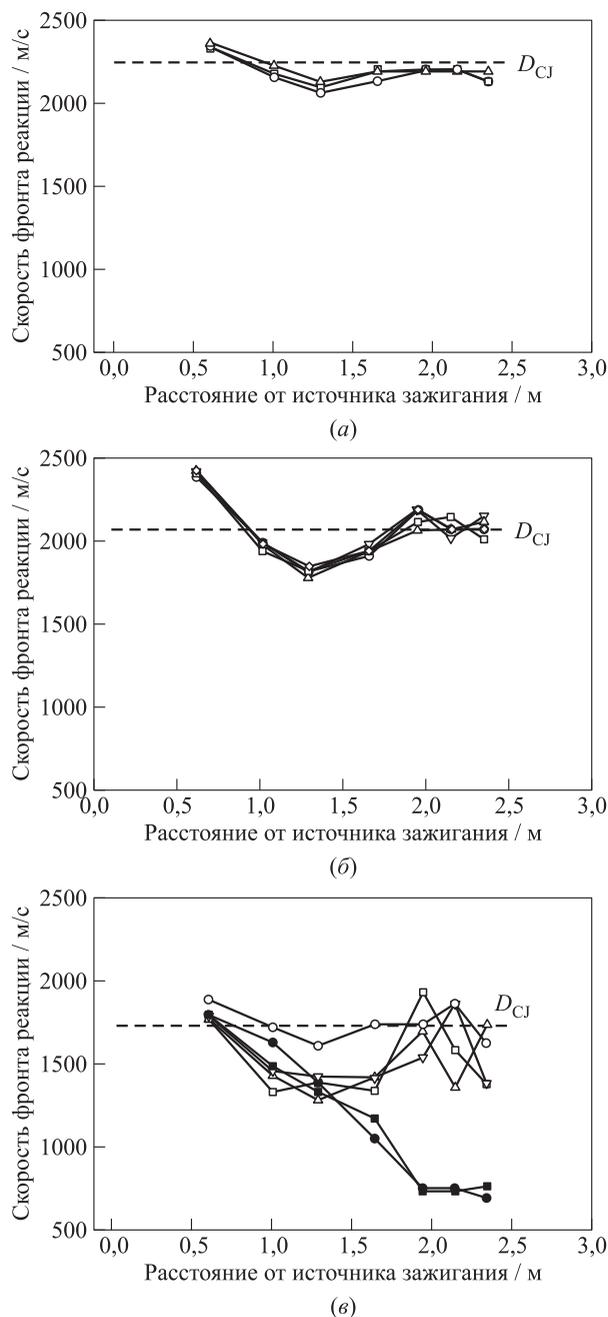


Рис. 2 Примеры динамики процесса перехода детонации из смеси «пропан–кислород» в тройную смесь «пропан – кислород – водяной пар» с разными значениями КИГ и объемной доли водяного пара: (а) КИГ = 1,0, $X = 0,3$; (б) КИГ = 1,04, $X = 0,58$; (в) КИГ = 0,3, $X = 0,33$

да ДВ из смеси «пропан–кислород» в тройную смесь «пропан – кислород – водяной пар» с различными значениями КИГ и объемной доли водяного пара. Разные символы соответствуют разным циклам при работе ИДП. Горизонтальные штриховые прямые соответствуют термодинамической скорости дето-

нации Чепмена–Жуге (ЧЖ) D_{CJ} в тройной смеси, полученной расчетом по программе CANTERA [7]. Во всех примерах сначала наблюдается «провал» в скорости фронта реакции, причем глубина и ширина провала увеличиваются с объемной долей водяного пара в тройной смеси. После «провала» скорость фронта реакции возрастает и выходит на установившийся уровень, близкий к термодинамической скорости детонации.

Если в примере на рис. 2, а наблюдается небольшой (~ 2%) дефицит скорости фронта реакции по сравнению с D_{CJ} , объясняемый потерями количества движения и энергии [8], то в примере на рис. 2, б наблюдается небольшой (~ 4%) заброс скорости фронта реакции по сравнению с D_{CJ} . Последнее, по-видимому, объясняется переходным процессом с образованием пересжатой ДВ.

Примеры на рис. 2, а и 2, б демонстрируют хорошую воспроизводимость результатов от цикла к циклу с достижением самоподдерживающейся детонации, а соответствующий режим распространения фронта реакции нами трактуется как нормальный режим детонации.

Пример, показанный на рис. 2, в, соответствует случаю, когда наблюдается цикловая неустойчивость: в одних циклах наблюдается провал в скорости фронта реакции с последующим восстановлением детонации и ее распространением, в других происходит прогрессирующее снижение скорости фронта — затухание детонации. Такой режим распространения фронта реакции трактуется нами как предельный режим детонации, т. е. соответствующий концентрационному пределу детонации по содержанию водяного пара. Кроме нормального и предельного режимов детонации в экспериментах регистрируется режим с затуханием детонации, в котором от цикла к циклу регистрируется прогрессирующее снижение скорости фронта реакции.

На рис. 3 построены зависимости скорости ДВ от КИГ при различном объемном содержании водяного пара в тройной смеси (от 0 до 0,6). Здесь и далее значения скорости ДВ получены осреднением значений, измеренных на измерительных базах 5–6, 6–7 и 7–8. Для сравнения показаны кривые, полученные с помощью термодинамического расчета. Измеренные значения скорости детонации в целом хорошо согласуются с термодинамическим расчетом.

На рис. 4 приведены зависимости измеренной и термодинамической скорости ДВ от объемной доли водяного пара в тройной смеси с составом, близким к стехиометрическому (КИГ = 1). В используемом ИДП предельное объемное содержание водяного пара в тройной смеси (концентрацион-

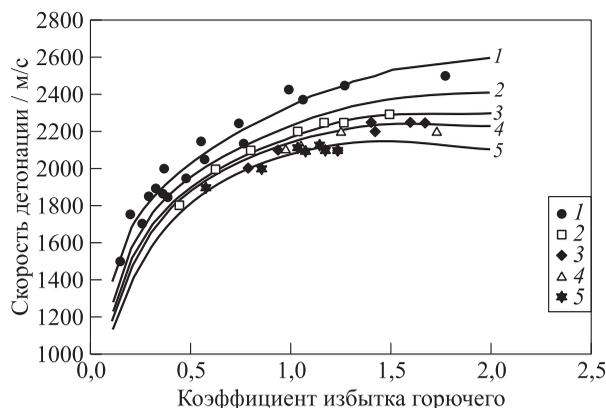


Рис. 3 Зависимости скорости детонации от КИГ: кривые — термодинамические расчеты, значки — экспериментальные данные при различных значениях объемной доли водяного пара X : 1 — 0,0; 2 — 0,3; 3 — 0,4; 4 — 0,5; 5 — 0,6

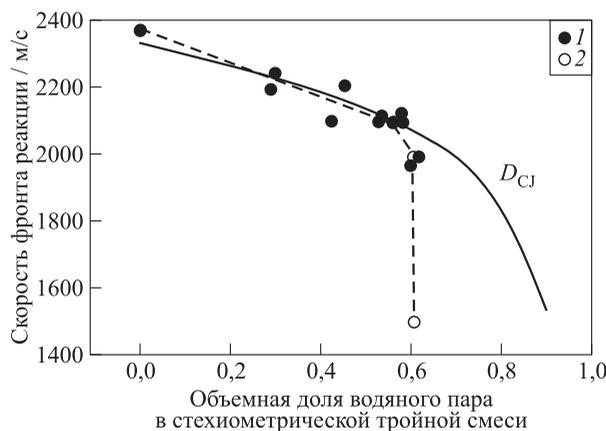


Рис. 4 Зависимость скорости детонации в тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар» от объемной доли водяного пара: сплошная кривая — термодинамический расчет для стехиометрической смеси (КИГ = 1); значки — экспериментальные данные для смесей с КИГ от 0,9 до 1,2; 1 — нормальный режим детонации; 2 — предельный режим детонации

ный предел детонации по водяному пару) $\sim 60\%$. При увеличении объемной доли водяного пара в тройной смеси выше 60% самоподдерживающаяся детонация становится невозможной. Отметим, что термодинамический расчет не учитывает потери количества движения и энергии из зоны реакции ДВ [8], поэтому в нем концентрационный предел детонации наступает при $X \rightarrow 1$.

На рис. 5 показана область существования циклической детонации в тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар» на параметрической плоскости « X –КИГ». Кривая, отделяющая область

«есть детонация» от области «нет детонации», проведена между экспериментальными точками, соответствующими нормальному и предельному режимам детонации. В некоторых случаях предельный режим детонации в эксперименте не регистрируется: при небольшом изменении X или КИГ происходит переход от нормального режима детонации к режиму с затуханием детонации. В этих случаях кривая на рис. 5 проводится между точками, соответствующими нормальному режиму и режиму с затуханием детонации. Из рис. 5 следует, что детонация богатых горючих смесей с КИГ > 1 значительно менее чувствительна к разбавлению водяным паром, чем детонация бедных горючих смесей с КИГ < 1 . Если предел детонации бедных смесей с КИГ = 0,4–0,8 достигается при добавлении 30%–35% водяного пара, то предел детонации богатых смесей с КИГ = 1,2–1,7 достигается при добавлении 45%–50% водяного пара. Максимальное содержание водяного пара (60%), при котором еще возможна детонация тройной смеси, достигается при КИГ = 1,0–1,1. Важно отметить, что измеренная температура стенок ИДП в экспериментах не превышает 120 °С.

Хорошее согласие между измеренными и рассчитанными значениями скорости детонации, полученное на рис. 3 и 4, позволяет предположить, что термодинамический расчет правильно оценивает температуру и состав продуктов детонации, получаемых в эксперименте.

На рис. 6 представлены результаты термодинамического расчета температуры (рис. 6, а) и состава (рис. 6, б) продуктов детонации тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» в зависимости от КИГ и объемной доли водяного пара. Заштрихованные области соответствуют областям, в ко-

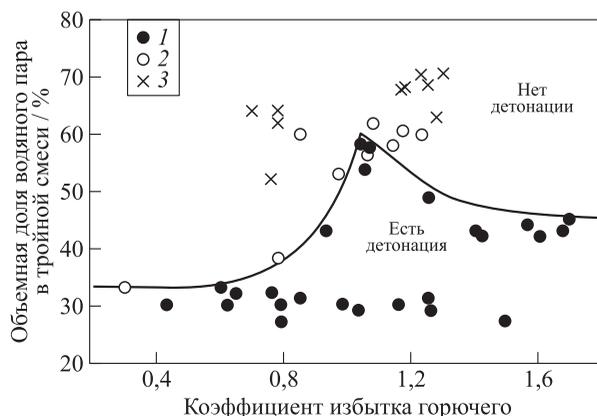
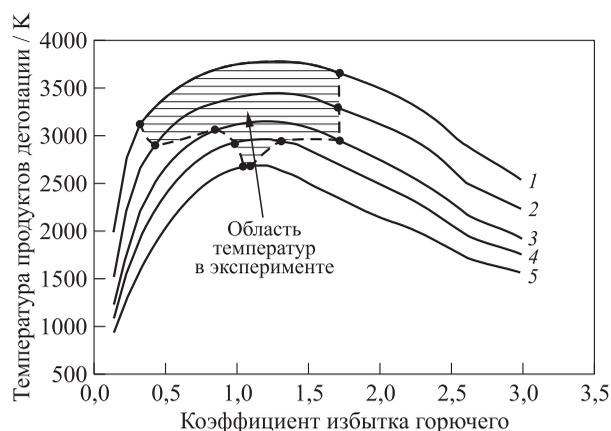
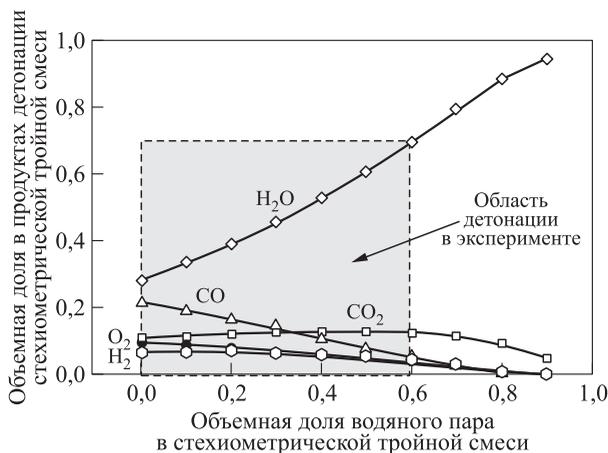


Рис. 5 Область существования детонации в тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар»: 1 — нормальный режим детонации; 2 — предельный режим детонации; 3 — затухание детонации



(а)



(б)

Рис. 6 Температура (а) и состав (б) продуктов детонации тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» с различными значениями объемной доли водяного пара (термодинамический расчет: 1 – $X = 0,0$; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – $X = 0,6$). Заштрихованы области, в которых экспериментально зарегистрирован режим нормальной детонации

торых экспериментально зарегистрирован режим нормальной детонации. Видно, что температура продуктов детонации тройных смесей, включая водяной пар, здесь превышает 2700 К (см. рис. 6, а), а максимальная объемная доля водяного пара в продуктах детонации стехиометрической смеси достигает 70% (при $X = 0,6$, см. рис. 6, б). Кроме водяного пара продукты детонации такой смеси содержат CO₂ (до 15%), CO (до 20%), O₂ (до 10%) и H₂ (до 7%), причем на пределе детонации (при $X = 0,6$) объемные доли CO, O₂ и H₂ снижаются до 5%.

Отметим, что давление в ДВ, бегущей по тройной смеси, значительно превышает атмосферное. Согласно термодинамическому расчету (рис. 7) давление в плоскости ЧЖ в условиях экспериментов изменяется от ~ 13 до ~ 32 атм. При расширении продуктов детонации до 1 атм (т. е. при выходе ДВ из ИДП в атмосферу или в реактор) их температура снижается.

Чтобы определить температуру и состав продуктов детонации после расширения, нами проведены дополнительные термодинамические расчеты. На рис. 8 показаны расчетные зависимости температуры и состава продуктов детонации в стехиометрической тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар» в ДВ (в плоскости ЧЖ, кривая 1 на рис. 8) и после изэнтропического расширения до нормального атмосферного давления (кривая 2 на рис. 8, а), причем области, в которых экспериментально зарегистрирован режим нормальной детонации, на рис. 8 заштрихованы.

Из рис. 8 следует важный вывод: внутри концентрационных пределов детонации температура

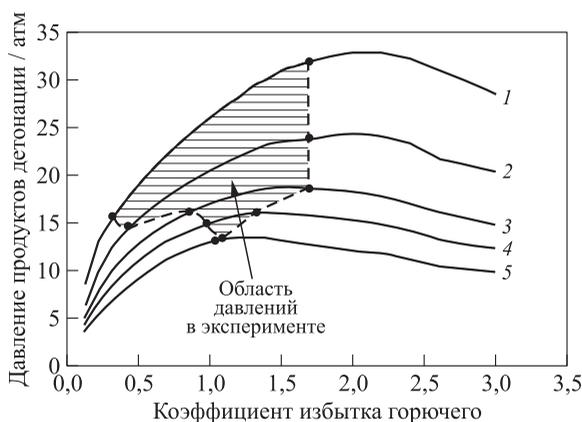


Рис. 7 Давление продуктов детонации тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» с различными значениями объемной доли водяного пара (термодинамический расчет): 1 – $X = 0,0$; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – $X = 0,6$. Заштрихована область, в которой экспериментально зарегистрирован режим нормальной детонации

расширенных продуктов детонации стехиометрической тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар», состоящей, в основном, из водяного пара (~ 80%) и CO₂ (~ 20%), превышает 2250 К.

Заключение

Проведены систематические эксперименты по определению концентрационных пределов детонации тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» при нормальном атмосферном давлении. Эксперименты выполнены в ИДП с многократ-

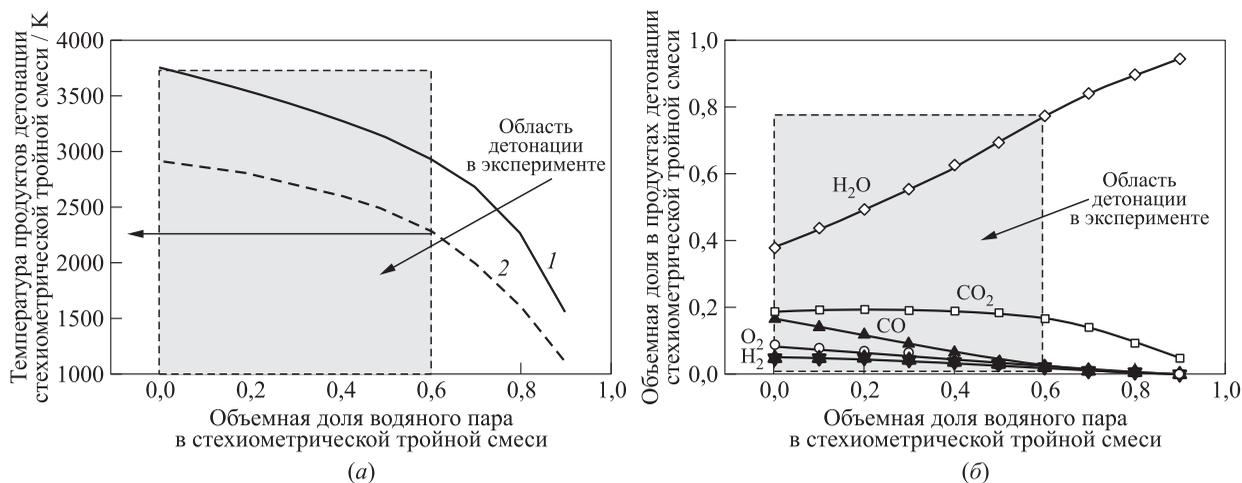


Рис. 8 Зависимости температуры (1 — в ДВ; 2 — после изэнтропического расширения до 1 атм) (а) и состава продуктов детонации (б) стехиометрической тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар» от объемной доли водяного пара (термодинамический расчет). Заштрихованы области, в которых экспериментально зарегистрирован режим нормальной детонации

ной циклической детонацией тройных смесей при варьировании КИГ (от 0,3 до 1,7) и объемной доли водяного пара X (от 0 до 0,7). В дополнение к экспериментам проведены термодинамические расчеты. Получены следующие важнейшие результаты.

1. Экспериментально зарегистрированы три режима распространения фронта реакции: нормальный режим детонации, предельный режим детонации и режим с затуханием детонации.
2. Экспериментально определена область существования детонации на параметрической плоскости «КИГ– X ». Показано, что детонация богатых горючих смесей с КИГ > 1 значительно менее чувствительна к разбавлению водяным паром, чем детонация бедных горючих смесей с КИГ < 1. Предел детонации бедных смесей с КИГ = 0,4–0,8 достигается при добавлении 30%–35% водяного пара. Предел детонации богатых смесей с КИГ = 1,2–1,7 достигается при добавлении 45%–50% водяного пара. Максимальное содержание водяного пара (60%), при котором еще возможна детонация тройной смеси, достигается при КИГ = 1,0–1,1.
3. Измеренные значения скорости детонации в целом хорошо согласуются с термодинамическим расчетом.
4. В нормальном режиме детонации расчетная температура продуктов детонации тройных смесей в плоскости ЧЖ превышает 2700 К. Расчетные объемные доли водяного пара, CO_2 , CO , O_2 и H_2 в продуктах детонации стехиометрической тройной смеси при $X = 0,6$ составляют 70%, 15%, 5%, 5% и 5% соответственно.

5. Изэнтропическое расширение продуктов детонации стехиометрической тройной смеси «пропан – кислород – водяной пар» до атмосферного давления при $X = 0,6$ приводит к снижению их температуры до 2250 К, а продукты детонации состоят, в основном, из водяного пара (~ 80%) и CO_2 (~ 20%).

6. Измеренная температура стенок ИДП в эксперименте не превышает 120 °С.

Таким образом, циклическая детонация тройных смесей «пропан – кислород – водяной пар» позволяет получать СПП с температурой выше 2250 К при атмосферном давлении, причем в выходном сечении ИДП продукты детонации стехиометрической тройной смеси состоят, в основном, из СПП (80%) и CO_2 (20%).

Обработка органических коммунальных и промышленных отходов, а также различных углей такой высокотемпературной средой сопровождается их пиролизом, термическим разложением и полной газификацией с получением газовой смеси CO и H_2 , которая в дальнейшем может использоваться в качестве энергетического газа для производства тепла и/или электричества и/или в качестве сырья для производства метанола и синтетических моторных топлив. Газовая смесь CO и H_2 может использоваться и в качестве горючего для ИДП. В этом случае рассмотренный в данной работе пропан будет служить в качестве пускового горючего для ИДП. Вследствие периодического заполнения ИДП «холодной» тройной газовой смесью температура его стенок и внутренних элементов повышается незначительно, так что для его изготовления

можно использовать обычные (не жаропрочные) конструкционные материалы.

Литература

1. Бебелин И. Н., Волков А. Г., Грязнов А. Н., Малышенко С. П. Разработка и исследование экспериментального водород-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) // Теплоэнергетика, 1997. № 8. С. 48–52.
2. Сариев В. Н. Новая энерготехнологическая система полной переработки и утилизации твердых бытовых и промышленных отходов (ЭТС–ТБПО) // Духовная Россия и интернет. — М.: Ленанд, 2009. С. 1–14.
3. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А. Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ № 2686138 от 24.04.2019. Приоритет от 26.02.2018.
4. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Набатников С. А. Способ газификации угля в сильно перегретом водяном паре и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации на изобретение № 2683751 от 01.04.2019. Приоритет от 24.05.2018.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С., Авдеев К. А., Борисов А. А., Иванов В. С., Коваль А. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Тепловые испытания импульсно-детонационной газовой горелки без принудительного охлаждения // Горение и взрыв, 2013. № 6. С. 98–103.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. академии наук, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
7. Cantera. www.cantera.org.
8. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. — М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.

Поступила в редакцию 12.11.19

GENERATION OF HIGHLY SUPERHEATED STEAM BY PULSED DETONATION OF THE TERNARY GAS “PROPANE–OXYGEN–STEAM” MIXTURE

S. M. Frolov^{1,2}, V. A. Smetanyuk¹, I. O. Shamshin¹, Koval’ A. S.^{1,2}, F. S. Frolov¹, and S. A. Nabatnikov³

¹N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

³Novel Physical Principles Ltd., 4 Beskudnikovskiy Per., Moscow 127474, Russian Federation

Abstract: Systematic experiments are performed to determine the concentration limits of detonation of ternary gas “propane–oxygen–steam” mixtures at normal atmospheric pressure. The experiments are made using an innovative pulse-detonation steam superheater (PDSS) with multiple cyclic detonation of ternary mixtures at various values of fuel-to-oxygen equivalence ratios (from 0.3 to 1.7) and steam volume fractions (from 0 to 0.7). In addition to experiments, thermodynamic calculations are performed. It is shown that pulsed detonation of ternary “propane–oxygen–steam” mixtures allows obtaining highly superheated steam (HSS) with a temperature exceeding 2250 K at atmospheric pressure. At the exit of the PDSS, the detonation products of the stoichiometric ternary mixture can contain up to 80% HSS and up to 20% CO₂. It is proposed to use such a high-temperature medium for the deep processing of organic municipal and industrial wastes to produce a gas mixture of CO and H₂, which can be further used as energy gas for the production of heat and/or electricity and/or as a raw material for the production of methanol and synthetic motor fuels. Due to the periodic filling of the PDSS with a “cold” ternary gas mixture, the temperature of its walls and internal elements rises only slightly, so that conventional (non-heat-resistant) structural materials can be used for its manufacturing.

Keywords: strongly superheated steam; pulse-detonation steam superheater; cyclic operation process; gaseous detonation; concentration limits of detonation; processing of organic wastes

DOI: 10.30826/CE19120410

Acknowledgments

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russia under State Contract No. 05.607.21.0304 (contract identifier RFMEFI60719X0304) “Development of effective methods of chemical inhibition of homogeneous and heterogeneous combustion processes and the creation of a demonstrator of a detonation converter of technogenic wastes” within the framework of the Federal Target Program “Research and development on priority directions of advancement of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020.”

References

1. Bebelin, I. N., A. G. Volkov, A. N. Gryaznov, and S. P. Malysenko. 1997. Development and investigation of an experimental hydrogen–oxygen steam generator of 10-MW thermal capacity. *Therm. Eng.* 44(8):657–662.
2. Sariiev, V. N. 2009. Novaya energotekhnologicheskaya sistema polnoy pererabotki i utilizatsii tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov (ETS–TBPO) [New energy and technology system for the complete processing and disposal of solid household and industrial wastes (ETS–SHIW)]. *Dukhovnaya Rossiya i internet* [Spiritual Russia and the Internet]. Moscow: Lenand Publ. 1–14.
3. Frolov, S. M., V. A. Smetanyuk, K. A. Avdeev, and S. A. Nabatnikov. Sposob polucheniya sil'no peregretoogo para i ustroystvo detonatsionnogo parogeneratora (variant) [Method for obtaining highly overheated steam and detonation steam generator device (options)]. Patent of Russian Federation No. 2686138 dated 24.04.2019. Priority dated 26.02.2018.
4. Frolov, S. M., V. A. Smetanyuk, and S. A. Nabatnikov. Sposob gazifikatsii uglia v sil'no peregreptom vodyanom para i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of gasification of coal in a highly overheated water vapor and device for its implementation]. Patent of Russian Federation No. 2683751 dated 01.04.2019. Priority dated 24.05.2018.
5. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, K. A. Avdeev, A. A. Borisov, V. S. Ivanov, A. S. Koval', S. N. Medvedev, V. A. Smetanyuk, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. 2013. Teplovye ispytaniya impul'sno-detonatsionnoy gorelki bez prinuditel'nogo okhlazhdeniya [Thermal testing of a pulsed detonation burner without forces cooling]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 6:98–103.
6. 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.
7. Cantera. Available at: www.cantera.org (accessed November 30, 2019).
8. Zel'dovich, Ya. B., and A. S. Kompaneets. 1955. *Teoriya detonatsii* [The theory of detonation]. Moscow: Gostekhteorizdat Publ. 268 p.

Received November 12, 2019

Contributors

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, head of laboratory, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 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

Smetanuk Victor A. (b. 1978) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; smetanuk@chph.ras.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; igor.shamshin@mail.ru

Koval' Alexey S. (b. 1985) — research engineer, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior lecturer, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; ASKoval@mephi.ru

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru

Nabatnikov Sergey A. (b. 1976) — Director, Novel Physical Principles Ltd., 4 Beskudnikovskiy Per., Moscow 127474, Russian Federation; s.nabatnikov@mail.ru