

# РАНЖИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПО ИХ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭТАЛОННОЙ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ ТРУБЫ\*

С. М. Фролов<sup>1</sup>, И. О. Шамшин<sup>2</sup>, В. С. Аксёнов<sup>3</sup>, М. В. Казаченко<sup>4</sup>, П. А. Гусев<sup>5</sup>

**Аннотация:** Предложенный ранее новый экспериментальный способ оценки детонационной способности (ДС) топливно-воздушных смесей (ТВС), основанный на измерении расстояния и/или времени перехода горения в детонацию (ПГД) в эталонной импульсно-детонационной трубе (ЭДТ), использован для ранжирования газовых ТВС по их ДС в существенно одинаковых термодинамических и газодинамических условиях. В экспериментах использованы ТВС на основе водорода, ацетилен, этилена, пропилена, пропан-бутана, н-пентана и природного газа (ПГ) разных составов: от предельно обедненных до предельно обогащенных горючим при нормальных значениях температуры и давления. Предложена концепция «эквивалентных» ТВС, имеющих одинаковую или близкую ДС при одинаковых условиях. «Эквивалентные» ТВС могут использоваться для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием ТВС других горючих.

**Ключевые слова:** топливно-воздушные смеси; детонационная способность; эталонная импульсно-детонационная труба; переход горения в детонацию

**DOI:** 10.30826/CE19120309

## 1 Введение

Детонационная способность ТВС, с одной стороны, определяет их взрывоопасность при хранении, транспортировке и использовании в различных секторах экономики, а с другой — возможность их практического применения в перспективных энергопреобразующих устройствах, работающих на детонационном горении [1]. Под ДС ТВС обычно понимают способность ТВС заданного состава поддерживать распространение стационарной детонационной волны в тех или иных термодинамических (например, по давлению и температуре) и газодинамических (например, по уровню турбулентности) условиях.

Детонационная способность ТВС — понятие относительное. Так, в качестве способа оценки ДС можно принять сравнение среднего размера детона-

ционной ячейки многофронтной детонации, распространяющейся в покоящейся предварительно перемешанной ТВС того или иного горючего при нормальных условиях, с размером ячейки какой-либо выбранной (эталонной) ТВС, например стехиометрического состава в тех же условиях. В этом случае в качестве меры ДС принимается средний размер детонационной ячейки в эталонной ТВС, а ДС всех других ТВС оценивается по отношению к этой мере: чем больше размер детонационной ячейки, тем меньше ДС.

Если же средний размер детонационной ячейки в ТВС того или иного горючего близок к таковому в эталонной ТВС, то ДС такой смеси близка к ДС эталонной ТВС, а сами ТВС можно рассматривать как «эквивалентные» по ДС. Например, если за меру ДС принять средний размер детонационной ячейки в стехиометрической этиленовоздуш-

\* Работа частично выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011 «Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами», номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5, а также при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00076а).

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

<sup>2</sup> Федеральное исследовательское учреждение химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук; igor.shamshin@mail.ru

<sup>3</sup> Федеральное исследовательское учреждение химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, v.aksenov@mail.ru

<sup>4</sup> Федеральное исследовательское учреждение химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет, maksx71997@gmail.com)

<sup>5</sup> Федеральное исследовательское учреждение химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, gusevpa@yandex.ru

ной смеси, приблизительно равной 20 мм, то по данным [2] близкую ДС будут иметь бедная и богатая водородно-воздушные смеси с коэффициентом избытка горючего 0,7 и 1,5 в тех же условиях. Это означает, что эталонную ТВС можно использовать для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием «эквивалентных» ТВС других горючих, если и другие важнейшие характеристики ТВС (такие как скорость детонации и т. д.) близки друг к другу.

В качестве способа оценки ДС можно также принять сравнение критической энергии прямого инициирования сферической детонации в покоящейся предварительно перемешанной ТВС того или иного горючего при нормальных условиях с критической энергией прямого инициирования сферической детонации какой-либо выбранной (эталонной) ТВС, например стехиометрического состава в тех же условиях. В этом случае в качестве меры ДС принимается критическая энергия прямого инициирования сферической детонации в эталонной ТВС, а ДС всех других ТВС оценивается по отношению к этой мере: чем больше энергия прямого инициирования, тем меньше ДС. Если же критическая энергия прямого инициирования детонации в ТВС того или иного горючего близка к таковой для эталонной ТВС, то ДС такой смеси близка к ДС эталонной ТВС, а сами ТВС также можно рассматривать как «эквивалентные» по ДС. Например, если за меру ДС принять критическую энергию прямого инициирования сферической детонации в стехиометрической этиленовоздушной смеси, приблизительно равную энергии взрыва 20 г тетрила, то по данным [2] близкую ДС будут иметь бедная и богатая водородно-воздушные смеси с коэффициентом избытка горючего 0,5 и 2,0 в тех же условиях. Как и выше, это означает, что эталонную ТВС можно использовать для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием «эквивалентных» ТВС других горючих, если и другие важнейшие характеристики ТВС близки друг к другу.

К другим способам и мерам для оценки относительной ДС той или иной ТВС можно отнести сравнение ТВС по критическому диаметру перепуска детонации из трубы в неограниченный объем [2] и/или по предельному диаметру распространения детонации в прямой трубе с гладкими стенками [3]. Кроме того, к способам и мерам оценки относительной ДС можно отнести сравнение ТВС по расстоянию ПГД, впервые предложенное А. С. Соколиком и К. И. Щелкиным [4, 5]. В работе [4] отмечается, что «измерение этой величины для различных топливных смесей при постоянных, стандартных условиях (постоянная длина и диаметр

трубы, определенное начальное давление, постоянный источник зажигания) даст новый простой и надежный способ для объективной оценки детонационной способности топлива». Для проверки такого способа оценки относительной ДС авторы провели сравнительные опыты со стехиометрическими смесями метана и этана с кислородом при различных начальных давлениях и показали, что детонация в этановых смесях возникает раньше, чем в метановых. В работе [5] этот способ оценки относительной ДС авторы применили к другим предельным и ароматическим углеводородам. В работе [6] К. И. Щёлкин впервые применил такой же способ к оценке ДС кислородных смесей на основе гексана и этилена.

Для полноты картины следует упомянуть и способы оценки ДС моторных топлив для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), подробно описанные в государственных стандартах ГОСТ 511-82 и ГОСТ 8226-82 (СТ СЭВ 2183-80). В первом из них определяется состав эталонного топлива, представляющего собой смесь изооктана и н-гептана, детонирующего в тех же условиях, что и испытуемое моторное топливо. Во втором способе относительную ДС моторного топлива оценивают при максимальной мощности одноцилиндрового ДВС, работающего в определенных условиях. В обоих случаях в качестве меры относительной ДС используется октановое число, которое численно равно процентному объемному содержанию изооктана в эталонном топливе.

Важно отметить, что все перечисленные выше способы и меры для оценки ДС ТВС основаны исключительно на эксперименте: современный уровень развития теории детонации пока не позволяет достоверно оценивать ДС ТВС в разных условиях на основе каких-либо однозначных научно обоснованных критериев. Экспериментальное определение размера детонационной ячейки, энергии прямого инициирования сферической детонации, критического диаметра перепуска детонации из трубы в неограниченный объем и/или предельного диаметра распространения детонации в прямой трубе с гладкими стенками даже для газовых ТВС сопряжено с огромными трудностями и с большими погрешностями измерений. Трудности обусловлены необходимостью использования сильных источников инициирования (взрывчатых веществ весом до 100 г и даже выше, мощных электрических разрядов и др.), детонационных труб разных размеров и др. Большие погрешности измерений обусловлены существенно неравномерной ячеистой структурой многофронтной детонации газовых ТВС (для одной и той же ТВС при одних и тех же условиях размер ячейки может различаться в несколько раз)

и критическим характером явлений инициирования сферической детонации, перепуска детонации из трубы в неограниченный объем, а также распространения детонации в гладких трубах околопредельного диаметра. Именно поэтому в приведенных выше примерах составы «эквивалентных» ТВС, определенные по двум способам оценки ДС, значительно отличаются друг от друга.

Оценивать ДС двухфазных ТВС, содержащих жидкое или твердое горючее в виде мелкодисперсных капель или частиц, еще сложнее: ячеистая структура детонации в двухфазных ТВС наблюдается только при очень малых размерах капель и частиц (на уровне 10 мкм и меньше) [7], а критическая энергия инициирования сферической детонации зависит от содержания паровой фазы в двухфазной ТВС, т.е. зависит от временной задержки между созданием облака ТВС и инициированием детонации. Если ко всему этому добавить зависимость ДС от термодинамических условий (значений давления и температуры, отличающихся от нормальных), а также от газодинамических условий (ненулевой скорости течения ТВС, турбулентности, неоднородности состава ТВС и др.), то всеобъемлющее решение проблемы оценки ДС ТВС с помощью описанных выше способов и мер выглядит нереальным.

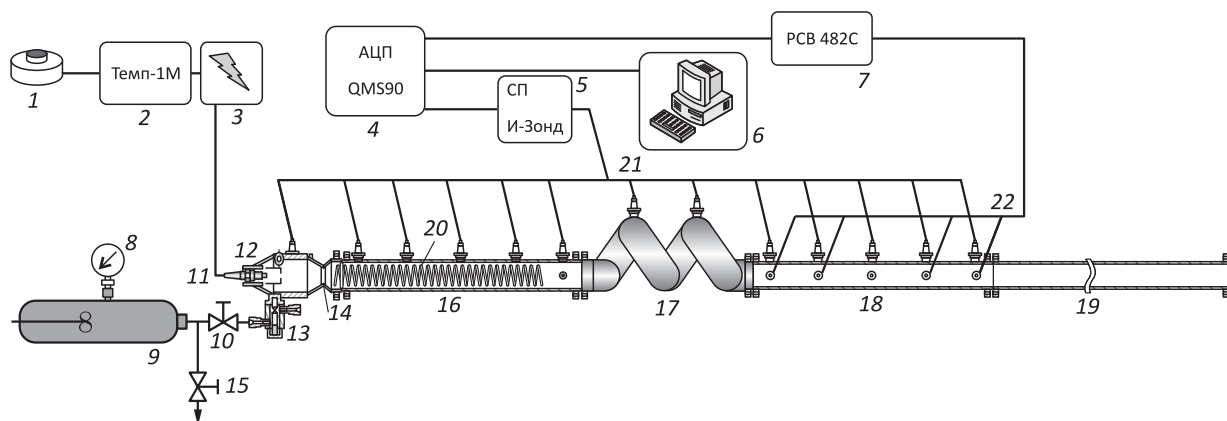
В развитие идей работ [4–6], в [8, 9] нами предложен альтернативный способ оценки ДС ТВС на основе измерения не только расстояния, но и времени ПГД в ЭДТ в существенно одинаковых термодинамических и газодинамических условиях. Дока-

зано, что этот способ применим как к газовым ТВС, так и к ТВС на основе жидких и твердых горючих. В частности, в [8, 9] проведены эксперименты по изучению ДС воздушных смесей продуктов пиролиза полипропилена. Показано, что в смесях с воздухом, обогащенных горючим (с коэффициентом избытка воздуха  $0,73 \leq \alpha \leq 0,90$ ), при нормальном давлении и повышенной начальной температуре (60–90 °С) продукты пиролиза полипропилена обладают ДС, близкой к ДС сжиженного углеводородного газа (СУГ) марки ПБА — пропан-бутан автомобильный — в стехиометрической смеси с воздухом при нормальных условиях. Это означает, что для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием ТВС на основе продуктов пиролиза полипропилена, обогащенных горючим, можно использовать эталонную стехиометрическую ТВС на основе СУГ.

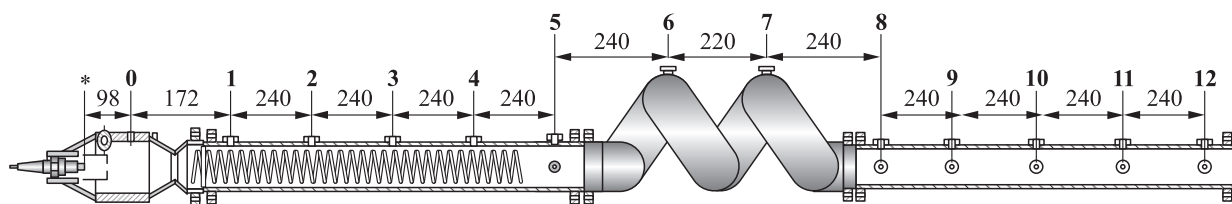
Цель данной работы — совершенствование экспериментальной методики, использованной в [8, 9], и определение сравнительной ДС ряда предварительно перемешанных газовых ТВС.

## 2 Испытательный стенд

На рис. 1 представлена схема испытательного стенда с ЭДТ, модифицированной для исследования ДС предварительно перемешанных ТВС. Основным элементом стенда — импульсно-детонационная труба открытого типа, включающая в себя форкамеру 12 и три секции: (1) секцию ускорения пламени со спиралью Щёлкина; (2) винтовую



**Рис. 1** Схема испытательного стенда с ЭДТ: 1 — кнопка дистанционного запуска; 2 — реле времени Темп-1М; 3 — модуль зажигания; 4 — АЦП QMS90 фирмы R-Technology; 5 — станция питания ионизационных зондов; 6 — персональный компьютер для сбора и обработки данных; 7 — усилитель-преобразователь PCB 482C пьезоэлектрических датчиков давления; 8 — датчик давления (манометр); 9 — баллон-смеситель (40 л) с вентилятором; 10 — напускной вентиль; 11 — автомобильная свеча зажигания; 12 — форкамера; 13 — инжектор; 14 — коническое сопло, отделяющее форкамеру от детонационной трубы; 15 — заправочный вентиль; 16 — 1-я секция детонационной трубы; 17 — 2-я секция детонационной трубы; 18 — 3-я секция детонационной трубы; 19 — выхлопная труба; 20 — спираль Щёлкина; 21 — ионизационные зонды с сигнальными линиями (13 шт.); 22 — пьезоэлектрические датчики давления PCB 113B24 с сигнальными линиями (4 шт.)



**Рис. 2** Схема ЭДТ с указанием базовых расстояний: \* — сечение отсчета базовых расстояний, место возникновения искры; 0 — сечение установки специального зонда; 1–12 — сечения установки ионизационных зондов и/или датчиков давления. Размеры указаны в миллиметрах

секцию трубы для газодинамической фокусировки ударной волны; (3) прямую гладкую секцию для измерения давления во фронте детонационной волны и скорости детонации. В состав стенда входят устройства управления, зажигания и регистрации, измерительные зонды. Топливо-воздушная смесь готовится в баллоне-смесителе 9, который через запорный вентиль 15 подключается к гребенке (на схеме не показана). Через гребенку осуществляется подключение баллона-смесителя к вакуумному насосу, воздушному компрессору и к баллону с горючим газом. Предварительно подготовленная ТВС через напускной вентиль 10 подается в инжектор 13, из которого смесь поступает в форкамеру 12 ЭДТ по касательной к внутренней поверхности ЭДТ и перпендикулярно ее оси.

Топливо-воздушная смесь в ЭДТ поджигается автомобильной свечой зажигания 11, установленной в центре торца форкамеры 12. Высокое напряжение на свечу зажигания подается от модуля зажигания 3. Сигнал управления на включение модуля зажигания 3 подается от реле времени 2 (Темп-1М). После воспламенения пламя из форкамеры попадает в первую секцию — секцию ускорения пламени 16, в которой установлена спираль Щёлкина 20 длиной 900 мм. Спираль Щёлкина выполнена из стальной проволоки толщиной 6 мм, навитой с шагом 24 мм. Наружный диаметр спирали Щёлкина равен внутреннему диаметру трубы.

За секцией ускорения пламени расположена вторая — винтовая — секция ЭДТ 17, в которой происходит газодинамическая фокусировка волн сжатия и переотражение ударных волн, за счет чего в потоке возникают горячие точки и очаги самовоспламенения, что, в конечном счете, и приводит к возникновению детонации по механизму [10]. Винтовая секция представляет собой трубу, свитую в спираль с короткими прямолинейными участками длиной 50 мм с обоих концов секции. Наружный диаметр спирали из трубы равен 136 мм, внутренний — 36 мм, шаг — 220 мм.

Параметры детонационной волны — ее амплитуда и скорость — измеряются в третьей — пря-

мой и гладкой — измерительной секции ЭДТ 18. Внутренний диаметр трубы во всех трех секциях равен 50 мм. Габаритная длина первой, второй и третьей секций равна 1060, 908 и 1060 мм соответственно. Длина и внутренний диаметр форкамеры: 200 и 70 мм. К концу 3-й секции прикреплена дополнительная гладкая секция длиной 1790 мм — выхлопная труба, направляющая продукты детонации в вентиляционную шахту. Общая длина ЭДТ равна 5040 мм.

На рис. 2 представлена схема ЭДТ с указанием номеров измерительных сечений — мест установки ионизационных зондов и датчиков давления — и расстояний между ними. Всего по длине трубы расположено 13 измерительных сечений. В сечениях 0–7 и 10 установлены только ионизационные зонды, а в сечениях 8, 9, 11 и 12 установлены ионизационные зонды и датчики давления. Расстояния между датчиками в сечениях: \*–0 ( $98 \pm 2$ ) мм; 0–1 ( $172 \pm 1$ ) мм; 1–5 и 8–12 ( $240 \pm 1$ ) мм. Расстояние между сечениями 5 и 6, а также 7 и 8 также равно ( $240 \pm 1$ ) мм, а между сечениями 6 и 7 оно составляет ( $220 \pm 1$ ) мм.

При расчете средней скорости волны давления в винтовой секции необходимо знать путь, пройденный волной. За базовые расстояния приняты расстояния между контрольными точками, измеренными по наружной поверхности винтовой трубы. Они приняты равными ( $300 \pm 5$ ) мм для расстояния между точками 5 и 6, ( $370 \pm 5$ ) мм для измерительной базы 6–7 и ( $315 \pm 5$ ) мм для измерительной базы 7–8.

Как будет показано ниже, такая конструкция ЭДТ обеспечивает ПГД в ТВС большего разнообразия горючих составов до выходного сечения винтовой секции.

### 3 Методика проведения экспериментов

В данной работе эксперименты проводятся с заранее перемешанными ТВС. Смеси готовятся в смесителе 9 (см. рис. 1) объемом 40 л по парциальным



давлениям и перемешиваются вентилятором в течение не менее 10 мин. Погрешность задания парциального давления компонента с наименьшей концентрацией (горючего) — не более 1% ( $\pm 0,1$  кПа). Давление контролируется по образцовому датчику абсолютного давления Курант-ДА с классом точности 0,15. Объем приготовленной смеси достаточен для проведения 5–6 опытов.

При заполнении ЭДТ продувается не менее чем четырехкратным объемом ТВС по отношению к объему детонационной трубы, равному  $\sim 5$  л. Объем выдуваемой ТВС (не менее 20 л) контролируется по падению давления в смесителе: падение давления при продувке составляет не менее 50 кПа. Мгновенное местоположение пламени определяется с помощью ионизационных зондов. Принцип их действия и методика измерения описаны в [11]. Максимальный измеряемый ионизационный ток (ток короткого замыкания) равен 0,5 мА. Ионизационный зонд представляет собой центральный аксиальный электрод в изоляторе, запрессованный в стальную втулку с резьбой, как у стандартной автомобильной свечи зажигания. Длина центрального электрода, выступающего из втулки внутрь ЭДТ, равна 25 мм за исключением зондов, установленных в сечениях 0–4, где расположены зонды с удлиненным центральным электродом длиной 40 мм для повышения их чувствительности. Ионизационные зонды установлены в каждом из 13 измерительных сечений. Точность определения местоположения пламени с помощью ионизационных зондов  $\pm 2$  мм.

Для регистрации амплитуды и профиля давления в детонационной волне используются высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления РСВ 113В24 с собственной частотой 500 кГц. Датчики устанавливаются на ЭДТ через специальные электровиброизолирующие втулки для снижения помех от электрических наводок и от упругих волн, распространяющихся по металлической стенке трубы. В гладкой измерительной секции в сечениях 8, 9, 11 и 12 установлены четыре таких датчика (см. рис. 2). Точность определения местоположения волны давления с помощью высокочастотных датчиков давления  $\pm 6$  мм.

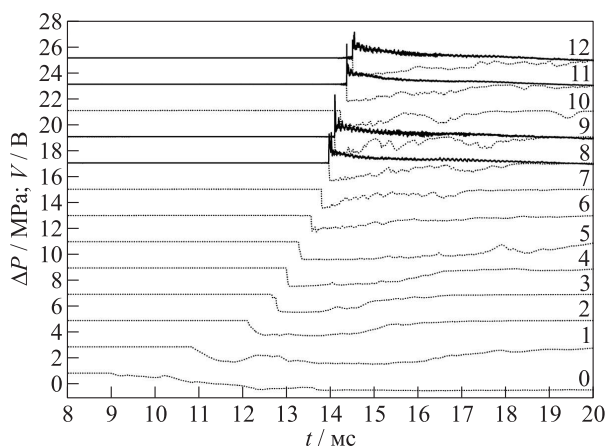
Эксперименты проводятся по следующей методике. Труба продувается воздухом из компрессора в течение 1–2 мин при среднем расходе воздуха порядка 1 л/с. Затем труба продувается ТВС из баллона-смесителя 9 (см. рис. 1), пока через трубу не пройдет объем ТВС, четверо превышающий объем ЭДТ. Объем ТВС контролируется по падению давления в баллоне-смесителе, а расход регулируется вентилем 10 так, что давление снижается со скоростью 0,5–1 кПа/с. После перекрытия вентиля напуска 10 и запуска аналого-цифрового преобра-

зователя (АЦП) подается команда на зажигание. Реле времени 2 выдает импульс заданной длительности (10 мс) на модуль зажигания 3, и смесь поджигается свечой зажигания. После сохранения осциллограммы в памяти компьютера 6 опыт повторяется. Количество опытов для каждой смеси определенного состава, как правило, составляет от 3 до 8, причем оно увеличивается с приближением к предельным условиям ПГД. По записям ионизационных зондов и датчиков давления рассчитываются скорости лидирующей ударной волны (датчики давления) и волны горения (ионизационные зонды) и строятся диаграммы «расстояние–время» ( $x-t$  диаграммы) и «скорость волны – расстояние» ( $v-x$  диаграммы) развития процесса.

Детонационная способность ТВС разных горючих и разных составов оценивается по расстоянию  $L_{DDT}$  и/или времени  $t_{DDT}$  ПГД при условии, что в измерительной секции ЭДТ регистрируется распространение самоподдерживающейся детонации. Под самоподдерживающейся детонацией понимается стационарно распространяющийся сверхзвуковой взрывной процесс, скорость которого на двух последних измерительных базах в третьей секции ЭДТ постоянна с точностью до  $\pm 3\%$ , а фронты лидирующей ударной волны и волны горения совпадают в пределах  $\pm 6$  мкс. Особое внимание уделяется воспроизводимости результатов: детонационная волна считается стационарной, если во всех проведенных опытах с ТВС заданного состава она распространяется с одинаковой сверхзвуковой скоростью. Аналогичный подход к идентификации детонации ранее использовался в работе [12].

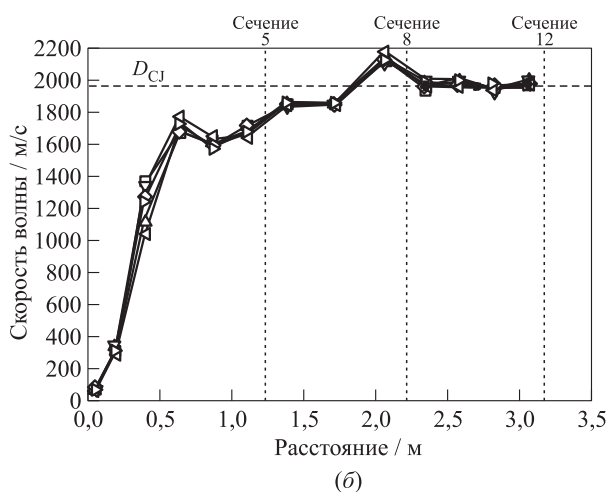
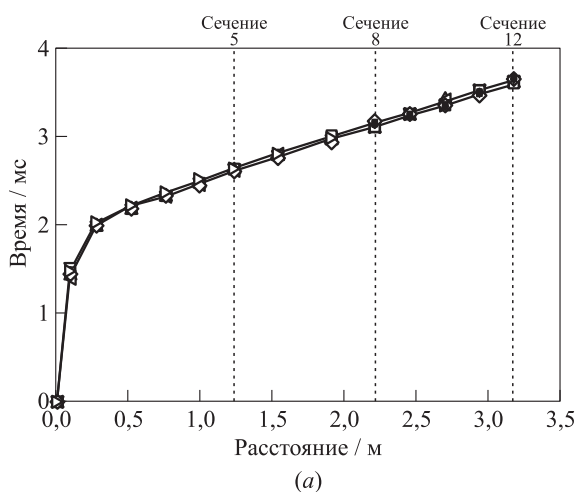
#### 4 Обработка результатов: расстояние и время перехода горения в детонацию

Опишем методику обработки результатов экспериментов на примере стехиометрической водородно-воздушной смеси. Заранее перемешанная ТВС подается в ЭДТ из баллона-смесителя при комнатной температуре. На рис. 3 показаны первичные записи ионизационных зондов (пунктирные кривые) и датчиков давления (сплошные кривые) для одного из шести опытов с ТВС одного и того же состава. Отсчет времени ведется от момента возникновения электрического пробоя в разрядном промежутке свечи зажигания. Длительность электрического разряда 2–2,5 мс. Моменты резкого отклонения записей ионизационных зондов вниз от нулевой линии нами тракуются как моменты прихода волны горения в то или иное измерительное сечение. Аналогично моменты резкого отклоне-



**Рис. 3** Первичные записи ионизационных зондов (напряжение  $V$ ) в сечениях 0–12 (пунктирные кривые) и датчиков давления (избыточное давление  $\Delta P$ ) в сечениях 8, 9, 11 и 12 (сплошные кривые) для одного опыта со стехиометрической водородно-воздушной смесью

ния записей датчиков давления вверх от нулевой линии нами трактуется как моменты прихода волны давления или ударной волны в то или иное измерительное сечение. Зная расстояния всех измерительных сечений от источника зажигания, на основе рис. 3 можно построить зависимости расстояний, пройденных волнами горения и давления, от времени, т. е. диаграммы «расстояние–время». Пример диаграмм «расстояние–время», построенных по записям ионизационных зондов и датчиков давления для шести опытов с той же ТВС, что и на рис. 3, представлен на рис. 4, *a*. На рис. 4, *б* представлены соответствующие диаграммы «скорость волны – расстояние».



**Рис. 4** Диаграммы «расстояние–время» (*a*) и «скорость волны – расстояние» (*б*) для шести опытов ЭДТ с ТВС одинакового состава — стехиометрической водородно-воздушной смесью: пустые значки — ионизационные зонды; залитые значки — датчики давления

На рис. 4, *б* скорость волны горения на той или иной измерительной базе определяется по известному расстоянию между измерительными сечениями, в которых расположены ионизационные зонды, и по интервалу времени между моментами прихода волны горения на эти зонды. Аналогично определяется и скорость волны давления, только вместо записей ионизационных зондов используются записи датчиков давления. Горизонтальная штриховая линия на рис. 4, *б* соответствует термодинамической скорости детонации Чепмена–Жуге для стехиометрической водородно-воздушной смеси ( $D_{CJ} \approx 1967$  м/с). Совместное рассмотрение рис. 4, *a* и 4, *б* позволяет определить расстояние  $L_{DDT}$  и время  $t_{DDT}$  ПГД и, следовательно, получить данные для оценки ДС стехиометрической водородно-воздушной смеси при нормальных начальных условиях.

Данные на рис. 4 иллюстрируют высокую повторяемость результатов в разных опытах ЭДТ для смесей с высокой реакционной способностью. Данные каждой серии опытов для смеси определенного состава усредняются. Из рис. 4, *б* следует, что скорость волны горения  $D$  достигает значения  $D_{CJ}$  ( $D = D_{CJ}$ ) между измерительными сечениями 7 и 8, т. е. ПГД в рассматриваемых опытах происходит на выходе из второй секции ЭДТ между указанными измерительными сечениями. Действительно, после перехода волны горения в третью секцию ЭДТ моменты прохождения волной горения ионизационных зондов в сечениях 9, 10, 11 и 12 совпадают с моментами прохождения волной давления датчиков давления, установленных в тех же сечениях (см. рис. 3 и 4, *a*). Это означает, что здесь сформир-

рован комплекс «ударная волна – фронт реакции», который распространяется с постоянной (сверхзвуковой) средней скоростью  $D$ , близкой к  $D_{СД}$ , т. е. регистрируется самоподдерживающаяся детонация. Следовательно, в рассматриваемом примере расстояние  $L_{ДДТ}$ , отсчитываемое от источника зажигания, равно  $\approx 2$  м. Отметим, что переход от дозвукового к сверхзвуковому режиму распространения пламени в ТВС происходит между сечениями 1 и 2, где пламя резко ускоряется от 290–340 до 1100–1360 м/с, и далее продолжает ускоряться, проходя сечения 2 и 3 и достигая скорости  $D_* = 1600$ –1760 м/с, которая остается постоянной вплоть до сечения 5. Интересно, что между сечениями 1 и 2 скорость волны горения достигает скорости звука в продуктах горения ТВС. Учитывая, что измерительные сечения 1–3 находятся в первой секции ЭДТ со спиралью Шёлкина, а скорость  $D_*$  сверхзвуковая и постоянная от опыта к опыту, рассматриваемую волну горения также можно трактовать как самоподдерживающуюся детонацию, но не нормальную, а неидеальную (по терминологии [13]). В этом случае преддетонационное расстояние находится между сечениями 2 и 3, т. е.  $L_{ДДТ} \approx 0,6$  м.

Другой параметр, по которому можно судить об относительной ДС ТВС, — это время ПГД  $t_{ДДТ}$ , т. е. время от момента зажигания до момента возникновения детонации. Так, в опытах, рассмотренных на рис. 4, а,  $t_{ДДТ} \approx 3,1$  мс, если в качестве критерия ПГД принять условие  $D = D_{СД}$ , или  $t_{ДДТ} \approx 2,2$  мс, если в качестве критерия ПГД принять условие  $D = D_*$ . Время ПГД более чувствительно к свойствам ТВС и легче поддается измерению с высокой точностью (не хуже 3%), чем расстояние ПГД. По нашему мнению, для сравнительной оценки ДС у ТВС, близких по своим реакционным и энергетическим характеристикам, в качестве меры ДС следует использовать именно время ПГД.

## 5 Результаты экспериментов

На ЭДТ проведены эксперименты с предварительно перемешанными газовыми ТВС на основе водорода, ацетилена, этилена, пропилена, смеси пропана и бутана, н-пентана и ПГ. В экспериментах использовались технические газы без какой-либо предварительной очистки: водород технический марки А (99,99%); ацетилен отбирался из баллона, заполненного ацетоном, в малый баллон-проботборник при температуре не выше  $-6$  °С и затем использовался для составления смеси; этилен и пропилен технические для синтеза полимеров; смесь пропана и бутана — автомобильный сжижен-

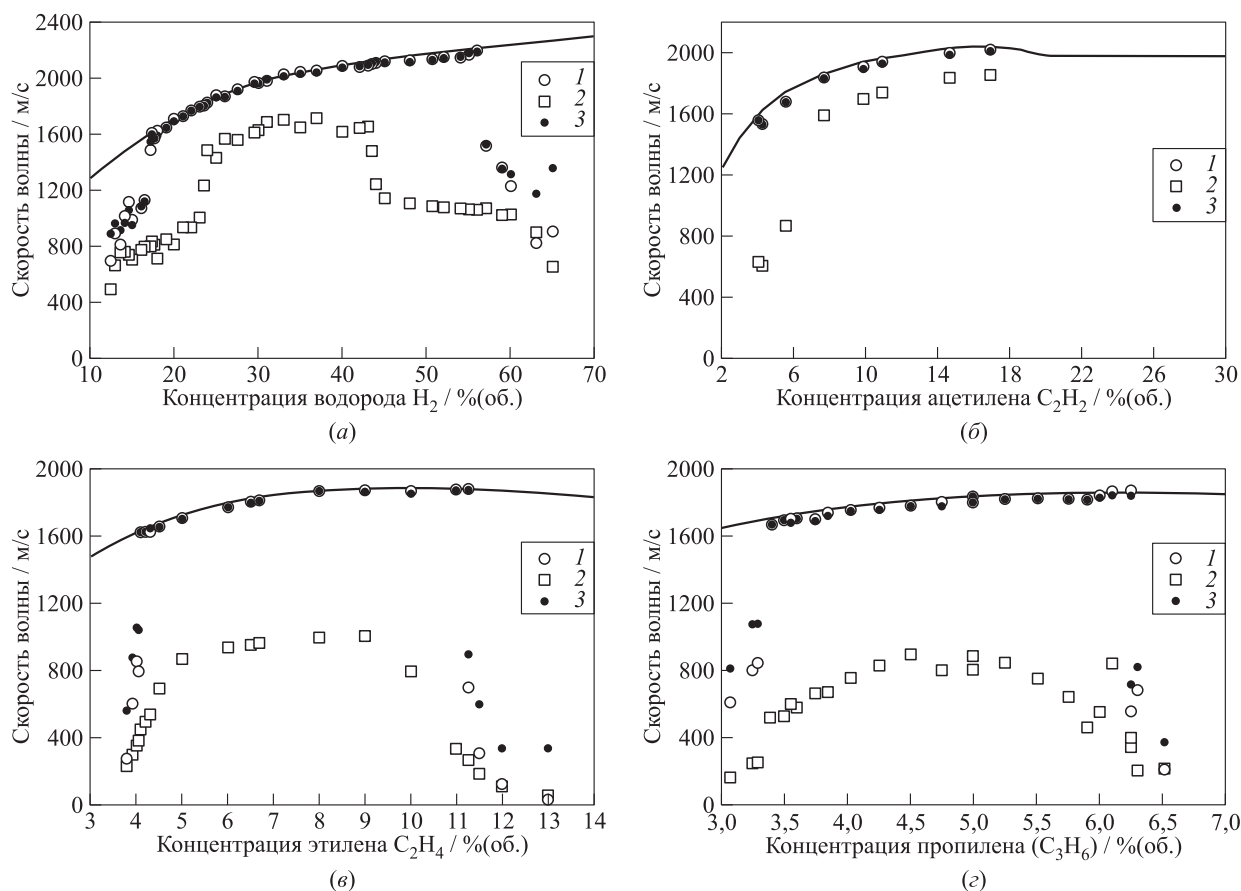
ный нефтяной газ марки ПБА летний (соотношение пропан/бутан = 50%/50% по массе); н-пентан ЧДА (чистый для анализа) (массовая доля н-пентана 98,5%); ПГ, содержащий 98,9% метана.

В водородных ТВС объемное содержание водорода изменялось от 14% до 65% (коэффициент избытка горючего  $\varphi = 0,39$ –4,42). В ацетиленовых ТВС объемное содержание ацетилена изменялось от 2,97% ( $\varphi = 0,36$ ) до 16,9% ( $\varphi = 2,42$ ) (более богатые ацетиленовоздушные смеси не исследовались ввиду высокого сажеобразования). В этиленовых ТВС объемное содержание этилена изменялось от 3,8% ( $\varphi = 0,56$ ) до 13% ( $\varphi = 2,13$ ). В пропиленовых ТВС объемное содержание пропилена изменялось от 3,0% ( $\varphi = 0,66$ ) до 6,5% ( $\varphi = 1,49$ ). В пропан-бутановых ТВС объемное содержание пропан-бутана изменялось от 2,6% ( $\varphi = 0,71$ ) до 5,1% ( $\varphi = 1,45$ ). В н-пентановых ТВС объемное содержание пентана изменялось от 1,7% ( $\varphi = 0,66$ ) до 3,7% ( $\varphi = 1,46$ ). В ТВС на основе ПГ объемное содержание горючего изменялось от 7,75% ( $\varphi = 0,8$ ) до 11,2% ( $\varphi = 1,2$ ).

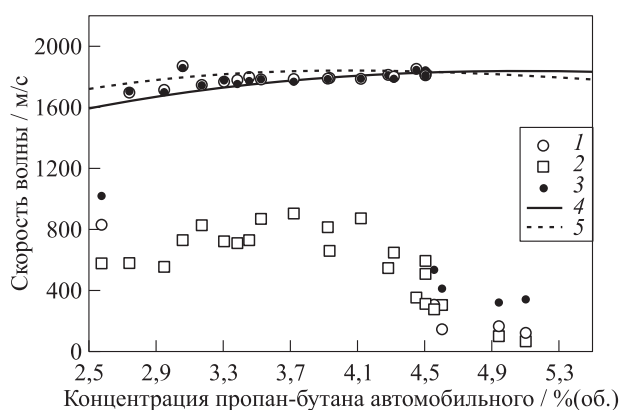
На рис. 5–7 значки 1 и 3 соответствуют измененным значениям средней скорости волн горения и давления в третьей секции ЭДТ при разных объемных концентрациях горючего в ТВС на основе водорода (рис. 5, а), ацетилена (рис. 5, б), этилена (рис. 5, в), пропилена (рис. 5, г), пропан-бутана (рис. 6) и н-пентана (рис. 7). Каждая точка на рисунках — результат осреднения как минимум по 5–6 опытам. Кривые на рис. 5–7 соответствуют расчетным зависимостям термодинамической скорости детонации  $D_{СД}$  от состава ТВС; значки 2 соответствуют средней скорости волны горения, измеренной на выходе из спирали Шёлкина (между сечениями 3 и 4 ЭДТ).

В экспериментах с ПГ детонация регистрировалась только при стехиометрической концентрации горючего ( $\sim 9,5$  % (об.)), причем средняя скорость детонационной волны  $D$  составила  $\sim 1700$  м/с, т. е. относительный дефицит скорости  $(D_{СД} - D)/D_{СД}$  составил  $\sim 6$ %. В ТВС другого состава регистрировались низкоскоростные взрывные процессы со скоростью 1200–1350 м/с.

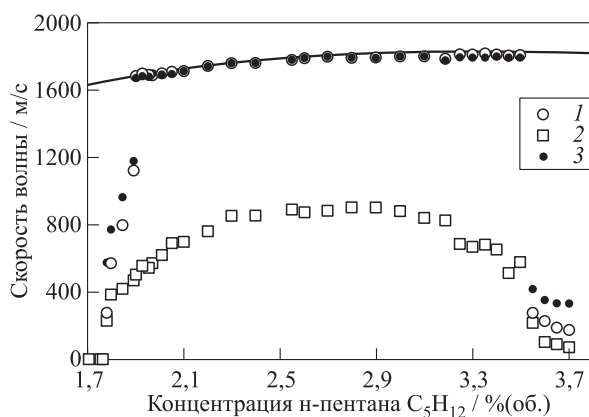
Совместное рассмотрение рис. 5–7 позволяет сделать следующие общие заключения. Во-первых, во всех случаях, когда в измерительной секции ЭДТ зарегистрирована самоподдерживающаяся детонация, средняя скорость детонационной волны, как правило, немного ниже расчетного значения  $D_{СД}$ , но очень близка к  $D_{СД}$ . Небольшой дефицит скорости детонации связан с потерями энергии и количества движения на гладких стенках ЭДТ [14]. Во-вторых, в этих случаях ПГД всегда происходил внутри винтовой секции ЭДТ, т. е.  $L_{ДДТ} \approx 2$  м.



**Рис. 5** Измеренные значения средней скорости волн горения в третьей секции ЭДТ (1) и на выходе из спирали Щёлкина (2) при разных объемных концентрациях горючего в ТВС на основе водорода (а), ацетилена (б), этилена (e) и пропилена (z): 3 — измеренные значения средней скорости волн давления в третьей секции ЭДТ; кривые — расчетные значения термодинамической скорости детонации

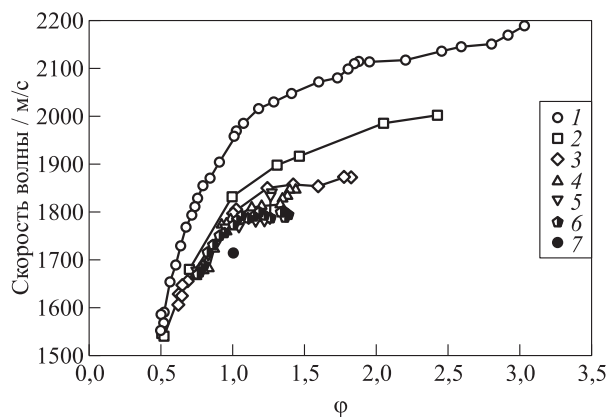


**Рис. 6** Измеренные значения средней скорости волн горения в третьей секции ЭДТ (1) и на выходе из спирали Щёлкина (2) при разных объемных концентрациях горючего в ТВС на основе пропан-бутана: 3 — измеренные значения средней скорости волн давления в третьей секции ЭДТ; кривые — расчетные значения термодинамической скорости детонации ТВС на основе пропана (4) и на основе бутана (5)



**Рис. 7** Измеренные значения средней скорости волн горения в третьей секции ЭДТ (1) и на выходе из спирали Щёлкина (2) при разных объемных концентрациях горючего в ТВС на основе н-пентана: 3 — измеренные значения средней скорости волн давления в третьей секции ЭДТ; кривая — расчетные значения термодинамической скорости детонации

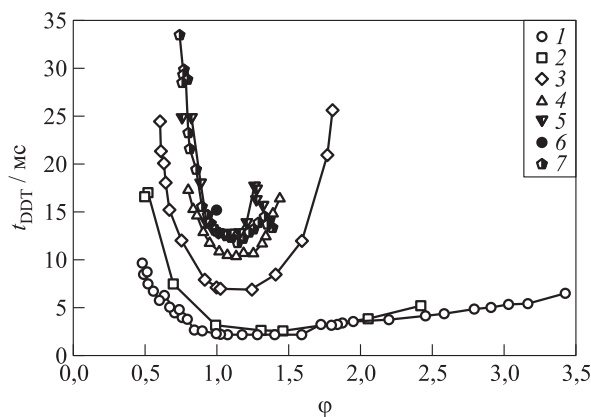




**Рис. 8** Зависимости средней скорости детонации в третьей секции ЭДТ от коэффициента избытка горючего для ТВС на основе водорода (1), ацетилена (2), этилена (3), пропилена (4), пропан-бутана (5), н-пентана (6) и ПГ (7)

В-третьих, для всех ТВС имеется минимальная концентрация горючего, при которой в измерительной секции ЭДТ детонации нет. В-четвертых, для всех ТВС (кроме ацетиленовых, см. выше) имеется максимальная концентрация горючего, при которой в измерительной секции ЭДТ детонации тоже нет. Указанные минимальные и максимальные концентрации горючих в ТВС можно условно трактовать как нижний и верхний концентрационные пределы ПГД в ЭДТ, которые следует отличать от концентрационных пределов детонации, определяемых в опытах с прямым инициированием детонации. Что касается ацетиленовых ТВС, то по некоторым литературным данным верхний концентрационный предел их детонации близок к 50% ( $\varphi = 11,9$ ) [15]. В-пятых, на нижнем и верхнем концентрационных пределах средняя скорость детонации ниже скорости  $D_{СД}$  приблизительно на 3%–5%, а детонация распространяется в спиновом режиме. В-шестых, скорость волны горения на выходе из спирали Щёлкина всегда ниже, чем  $D_{СД}$  (более чем на 10%), что связано с повышенными потерями энергии и количества движения в первой секции ЭДТ с препятствиями в виде проволочных витков. Особенности распространения волн горения в трубах с турбулизирующими препятствиями многократно и детально описаны в литературе (см., например, [2, 13]), поэтому здесь не обсуждаются.

Представленные на рис. 5–7 экспериментальные данные обобщены на рис. 8, который показывает измеренные зависимости средней скорости детонации в третьей секции ЭДТ от коэффициента избытка горючего  $\varphi$  в ТВС разных горючих газов. На нижнем концентрационном пределе ПГД скорость детонации составляет  $\sim 1550$  м/с для во-



**Рис. 9** Зависимости измеренного времени ПГД  $t_{DDT}$  от коэффициента избытка горючего  $\varphi$  в ТВС разных горючих газов: 1 –  $H_2$ ; 2 –  $C_2H_2$ ; 3 –  $C_2H_4$ ; 4 –  $C_3H_6$ ; 5 –  $C_3H_8 + C_4H_{10}$ ; 6 –  $CH_4$ ; 7 –  $C_5H_{12}$

дорода и ацетилена ( $\varphi = 0,49$ – $0,50$ ),  $\sim 1630$  м/с для этилена ( $\varphi = 0,60$ – $0,61$ ),  $\sim 1670$  м/с для пропилена ( $\varphi = 0,74$ – $0,75$ ) и н-пентана ( $\varphi = 0,73$ – $0,74$ ). В ТВС на основе пропан-бутана при концентрации горючего 2,7% ( $\varphi = 0,76$ ) скорость детонации равна  $\sim 1700$  м/с, а при концентрации 2,6% ( $\varphi = 0,71$ ) детонация не возникает.

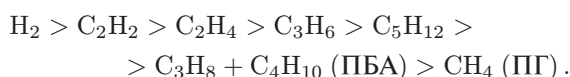
Из рис. 8 следует, что из всех изученных ТВС наиболее широкими концентрационными пределами ПГД в ЭДТ обладают водородные ТВС, а наиболее узкими — ТВС на основе ПГ. Максимальное отличие в значениях скорости детонации между водородными и углеводородными ТВС составляет  $\sim 15\%$ . В диапазоне  $0,5 < \varphi < 1,5$  измеренные скорости детонации для ТВС на основе ацетилена, этилена, пропилена, пропан-бутана и н-пентана отличаются незначительно (не более 6%).

Наиболее интересный результат проведенных исследований представлен на рис. 9, на котором показаны зависимости измеренного времени ПГД  $t_{DDT}$  от коэффициента избытка горючего  $\varphi$  в ТВС разных горючих газов (разные кривые и символы соответствуют разным горючим газам). Как отмечалось выше, в некоторых опытах с водородом и с ацетиленом ПГД происходил внутри спирали Щёлкина. В этих опытах за  $t_{DDT}$  принимали момент времени, при котором выполнялось условие  $D = D_*$ . Абсолютное значение времени ПГД изменяется от  $\sim 2$  до  $\sim 34$  мс, т. е. в 17 раз. Все кривые  $t_{DDT}(\varphi)$  имеют U-образную форму с ярко выраженными минимумами для составов, обогащенных горючим ( $\varphi = 1,1$ – $1,4$ ). «Хвосты» U-образных кривых на концентрационных пределах ПГД резко уходят вверх, особенно на нижнем пределе. При этом кривые, расположенные выше, вложены в кривые,

расположенные ниже, т. е. для верхних кривых границы существования детонации уже, чем для нижних. При любом заданном  $\varphi$  наименьшим временем ПГД обладают водородные ТВС, а наибольшим — ТВС на основе н-пентана.

Данные рис. 9 можно напрямую использовать для сравнительной оценки ДС разных ТВС, используя время ПГД  $t_{DDT}$  в качестве меры ДС. Например, примем в качестве эталонной ТВС стехиометрическую водородно-воздушную смесь с  $t_{DDT} \approx 2,5$  мс. Тогда можно утверждать, что все водородные ТВС с  $0,9 < \varphi < 1,6$  имеют такую же ДС, как и эталонная ТВС. Кроме того, такую же ДС имеют ТВС на основе ацетилена с  $1 < \varphi < 1,7$ . Если учесть, что скорости детонации в указанных смесях отличаются незначительно (не более чем на 10%, см. рис. 8), это означает, что эталонную ТВС можно использовать для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием указанных «эквивалентных» смесей. Другой пример «эквивалентных» ТВС: пропан-бутановые ТВС с  $1 < \varphi < 1,2$ , пропиленовые ТВС с  $\varphi = 0,9$  и  $1,3$  и этиленовые ТВС с  $\varphi = 0,8$  и  $1,6$ .

В соответствии с рис. 9 можно ранжировать ТВС по убыванию ДС при одинаковых условиях:



Интересно, что ТВС на основе н-пентана оказались несколько более детонационноспособными, чем пропан-бутановые ТВС, что не согласуется с ранжированием ТВС по среднему размеру ячейки многофронтной детонации [2]. По-видимому, здесь проявляется отличие способов получения детонации при оценке ДС: при ПГД основную роль играет низкотемпературное самовоспламенение ТВС, а при прямом инициировании детонации — высокотемпературное самовоспламенение. Известно, что с ростом числа атомов углерода в молекуле алкана задержка самовоспламенения в области отрицательного температурного коэффициента скорости реакции уменьшается [16].

Из рис. 9 следует еще один важный результат: ТВС на основе ацетилена оказались менее детонационноспособными, чем водородные ТВС, особенно в окрестности нижнего концентрационного предела ПГД. Этот факт также не согласуется с ранжированием ТВС по среднему размеру ячейки многофронтной детонации [2], согласно которому ацетиленовые ТВС обладают значительно большей детонационной способностью, чем водородные, во всем диапазоне составов ТВС. По-видимому, здесь также проявляется отличие способов получения детонации: при ПГД важную роль играет скорость

горения, которая при нормальных условиях для водородных ТВС значительно выше, чем для ацетиленовых.

## 6 Заключение

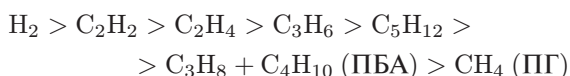
С помощью нового экспериментального способа оценки ДС ТВС, основанного на измерении длины и/или времени ПГД в ЭДТ, проведено ранжирование газовых ТВС по их ДС в существенно одинаковых термодинамических и газодинамических условиях. Эталонная труба состоит из трех секций: секции ускорения пламени со спиралью Щёлкина, винтовой секции для газодинамической фокусировки ударной волны и прямой измерительной секции. В экспериментах использованы ТВС на основе водорода, ацетилена, этилена, пропилена, пропан-бутана, н-пентана и ПГ разных составов: от предельно обедненных до предельно обогащенных горючим при нормальных значениях температуры и давления.

Во всех экспериментах, в которых в измерительной секции ЭДТ зарегистрирована самоподдерживающаяся детонация, ПГД происходил внутри винтовой секции ЭДТ. Определены минимальная и максимальная концентрации горючего, при которых в измерительной секции ЭДТ детонация не возникает. Указанные минимальные и максимальные концентрации горючих предложено условно трактовать как нижний и верхний концентрационные пределы ПГД в ЭДТ. На нижнем и верхнем концентрационных пределах средняя скорость детонации ниже скорости Чепмена–Жуге  $D_{CJ}$  приблизительно на 3%–5%. Скорость волны горения на выходе из спирали Щёлкина всегда ниже, чем  $D_{CJ}$  (более чем на 10%). Из всех изученных ТВС наиболее широкими концентрационными пределами ПГД в ЭДТ обладают водородные ТВС, а наиболее узкими — ТВС на основе ПГ. Максимальное отличие в значениях скорости детонации между водородными и углеводородными ТВС составляет  $\sim 15\%$ . В диапазоне коэффициента избытка горючего  $0,5 < \varphi < 1,5$  измеренные скорости детонации для ТВС на основе ацетилена, этилена, пропилена, н-пентана и пропан-бутана отличаются незначительно (не более 6%).

Для всех изученных ТВС абсолютное значение времени ПГД  $t_{DDT}$  изменяется от  $\sim 2$  до  $\sim 35$  мс. Все кривые  $t_{DDT}(\varphi)$  имеют U-образную форму с ярко выраженными минимумами для составов, обогащенных горючим ( $\varphi = 1, -1, 4$ ). «Хвосты» U-образных кривых на концентрационных пределах ПГД резко уходят вверх, особенно на нижнем пределе. При этом кривые, расположенные выше, вложены в кривые, расположенные ниже, т. е. для верхних

кривых границы существования детонации уже, чем для нижних. При любом заданном  $\varphi$  наименьшим временем ПГД обладают водородные ТВС, а наибольшим — ТВС на основе н-пентана.

Полученные данные использованы для сравнительной оценки ДС разных ТВС, используя время ПГД  $t_{DDT}$  в качестве меры ДС. Все ТВС, рассмотренные в данной работе, ранжированы по убыванию ДС:



Предложена концепция «эквивалентных» ТВС, имеющих одинаковую или близкую ДС при одинаковых условиях. «Эквивалентные» ТВС могут использоваться для предсказательного физического моделирования взрывных процессов с участием ТВС других составов и горючих.

## Литература

1. *Kasahara J., Frolov S.* Present status of pulse and rotating detonation engine research // 25th ICDERS Proceedings. — Leeds, U.K., 2015. Paper No. 304.
2. *Lee J. H. S.* The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: The Cambridge University Press, 2008. 400 p.
3. *Фролов С. М., Гельфанд Б. Е.* О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. АН СССР, 1990. Т. 312. № 5. С. 1177–1180.
4. *Соколик А. С., Щёлкин К. И.* Распространение пламени в смесях метана с кислородом в закрытых трубах // Ж. физ. химии, 1933. Т. 4. № 1. С. 109–128.
5. *Соколик А. С., Щёлкин К. И.* Детонационная способность кислородных смесей углеводов жирового ряда и ароматических // Ж. физ. химии, 1933. Т. 4. № 2. С. 129–131.
6. *Щёлкин К. И.* Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах // Ж. эксп. теор. физ., 1940. Т. 10. № 7. С. 823–827.
7. *Papavassiliou J., Makris A., Knystautas R., Lee J. H. S., Westbrook C. K., Pitz W. J.* Measurements of cellular structure in spray detonations // Dynamics aspects of explosion phenomena / Eds. A. L. Kuhl, J.-C. Leyer, A. A. Borisov, W. A. Sirignano. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — Washington, DC, USA: AIAA, 1993. Vol. 154. P. 148–169.
8. *Фролов С. М., Звезгинцев В. И., Аксёнов В. С., Билера И. В., Казаченко М. В., Шамшин И. О., Гусев П. А., Белоцерковская М. С., Ковержанова Е. В.* Детонационная способность воздушных смесей продуктов пиролиза полипропилена // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 4. С. 44–60. doi: 10.30826/CE18110406.
9. *Фролов С. М., Звезгинцев В. И., Аксёнов В. С., Билера И. В., Казаченко М. В., Шамшин И. О., Гусев П. А., Белоцерковская М. С.* Переход горения в детонацию в воздушных смесях продуктов пиролиза полипропилена // Докл. Акад. наук, 2019. Т. 488. № 2. С. 162–166.
10. *Frolov S. M.* Initiation of strong reactive shocks and detonation by traveling ignition pulses // J. Loss Prevent. Proc., 2006. Vol. 19. No. 2-3. P. 238–244.
11. *Фролов С. М., Аксёнов В. С., Дубровский А. В., Зангев 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. Акад. наук, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67. doi: 10.7868/S0869565215310138.
12. *Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Лобань С. А., Маилков А. Е., Хомик С. В.* Исследование пределов детонации топливовоздушных смесей в гладких и шероховатых трубах // Хим. физика, 1982. Т. 1. № 6. С. 848–853.
13. *Zel'dovich Ya. B., Borisov A. A., Gelfand B. E., Frolov S. M., Mailkov A. E.* Nonideal detonation waves in rough tubes // Dynamics of explosions / Eds. A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyer, and A. Borisov. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — Washington, DC, USA: AIAA Inc., 1988. Vol. 114. P. 211–231.
14. *Зельдович Я. Б., Компанеев А. С.* Теория детонации. — М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.
15. *Антонов В. Н., Липидис А. С.* Производство ацетилена. — М.: Химия, 1970. 415 с.
16. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М.* Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводов: переход от  $\text{C}_1$ – $\text{C}_{10}$  к  $\text{C}_{11}$ – $\text{C}_{16}$  // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 4. С. 87–96.

Поступила в редакцию 12.08.19

# RANKING OF GASEOUS FUEL–AIR MIXTURES ACCORDING TO THEIR DETONABILITY USING A STANDARD PULSED DETONATION TUBE

S. M. Frolov<sup>1,2,3</sup>, I. O. Shamshin<sup>1,3</sup>, V. S. Aksenov<sup>1,2</sup>, M. B. Kazachenko<sup>1,4</sup>, and P. A. Gusev<sup>1,5</sup>

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

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

<sup>3</sup>Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

<sup>4</sup>N. E. Bauman Moscow State Technical University, 5-1 Baumanskaya 2nd Str., Moscow 105005, Russian Federation

<sup>5</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 13-2 Izhorskaya Str., Moscow 125412, Russian Federation

**Abstract:** The previously proposed new experimental method for evaluating the detonability of fuel–air mixtures based on measuring the detonation run-up distance and/or time in a standard pulsed detonation tube was applied to rank gaseous fuel–air mixtures by their detonability under essentially identical thermodynamic and gasdynamic conditions. In the experiments, fuel–air mixtures of various compositions based on hydrogen, acetylene, ethylene, propylene, propane-butane, *n*-pentane, and natural gas were used: from extremely fuel-lean to extremely fuel-rich compositions at normal temperature and pressure. The concept of “equivalent” fuel–air mixtures exhibiting the same or similar detonability under the same conditions is proposed. “Equivalent” fuel–air mixtures can be used for predictive physical modeling of explosion processes involving air mixtures of other fuels and compositions.

**Keywords:** fuel–air mixtures; detonability; standard pulsed detonation tube; deflagration-to-detonation transition

**DOI:** 10.30826/CE19120309

## Acknowledgments

The work was partly supported by the subsidy given to the N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the state assignment on the topic No. 0082-2016-0011 “Fundamental studies of conversion processes of energetic materials and development of scientific grounds for controlling these processes” (Registration No. AAAA-A17-117040610346-5) and by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 18-08-00076a).

## References

1. Kasahara, J., and S. Frolov. 2015. Present status of pulse and rotating detonation engine research. *25th ICDERS Proceedings*. Leeds, U.K. Paper No. 304.
2. Lee, J. H. S. 2008. *The detonation phenomenon*. New York, NY: The Cambridge University Press. 400 p.
3. Frolov, S. M., and B. E. Gel'fand. 1990. O predel'nom diametre rasprostraneniya gazovoy detontatsii v trubakh [On the limiting diameter for propagation of gas detonation in tubes]. *Dokl. USSR Acad. Sci.* 312(5):1177–1180.
4. Sokolik, A. S., and K. I. Shchelkin. 1933. Rasprostranenie plameni v smesyakh metana s kislородом v zakrytykh trubakh [Flame propagation in mixtures of methane with oxygen in closed tubes]. *Zh. Fiz. Khim.* 4(1):109–128.
5. Sokolik, A. S., and K. I. Shchelkin. 1933. Detonatsionnaya sposobnost' kislородnykh smesey uglevodorodov zhirnogo ryada i aromaticheskikh [Detonability of oxygen mixtures of saturated and aromatic hydrocarbons]. *Zh. Fiz. Khim.* 4(2):129–131.
6. Shchelkin, K. I. 1940. Vliyaniye sherokhovatosti trubyy na vozniknoveniye i rasprostraneniye detonatsii v gazakh [Effect of tube roughness on the onset and propagation of detonation in gases]. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 10(7):823–827.
7. Papavassiliou, J., A. Makris, R. Knystautas, J. H. S. Lee, C. K. Westbrook, and W. J. Pitz. 1993. Measurements of cellular structure in spray detonations. *Dynamics aspects of explosion phenomena*. Eds. A. L. Kuhl, J.-C. Leyrer, A. A. Borisov, and W. A. Sirignano. Progress in astronautics and aeronautics ser. Washington, DC: AIAA. 154:148–169.
8. Frolov, S. M., V. I. Zvegintsev, V. S. Aksenov, I. V. Bilera, V. V. Kazachenko, I. O. Shamshin, P. A. Gusev, M. S. Belotserkovskaya, and E. V. Koverzanova. 2018.



- Detonatsionnaya sposobnost' vozdukhnykh smesey produktov piroliza polipropilena [Detonability of air mixtures of the polypropylene pyrolysis products]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 11(4):44–60. doi: 10.30826/CE18110406.
9. Frolov, S. M., V. I. Zvegintsev, V. S. Aksenov, I. V. Bilera, V. V. Kazachenko, I. O. Shamshin, P. A. Gusev, and M. S. Belotserkovskaya. 2019. Deflagration-to-detonation transition in air mixtures of polypropylene pyrolysis products. *Dokl. Phys. Chem.* 488(1):129–133.
  10. Frolov, S. M. 2006. Initiation of strong reactive shocks and detonation by traveling ignition pulses. *J. Loss Prev. Proc.* 19(2-3):238–244.
  11. 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. doi: 10.1134/S0012501615110019.
  12. Borisov, A. A., B. E. Gel'fand, S. A. Loban', A. E. Mailkov, and S. V. Khomik. 1982. Issledovanie predelov detonatsii toplivovozdukhnykh smesey v gladkikh i sherokhovatykh trubakh [Study of detonation limits in fuel–air mixtures in smooth and rough tubes]. *Khim. Fiz.* 1(6):848–853.
  13. Zel'dovich, Ya. B., A. A. Borisov, B. E. Gelfand, S. M. Frolov, and A. E. Mailkov. 1988. Nonideal detonation waves in rough tubes. *Dynamics of explosions*. Eds. A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyer, and A. Borisov. Progress in astronautics and aeronautics ser. Washington, DC: AIAA Inc. 114:211–231.
  14. Zel'dovich, Ya. B., and A. S. Kompaneets. 1955. *Teoriya detonatsii* [The theory of detonation]. Moscow: Gostekhteorizdat. 268 p.
  15. Antonov, V. N., and A. S. Lapidis. 1970. *Proizvodstvo atsetilena* [Production of acetylene]. Moscow: Khimiya. 415 p.
  16. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, V. S. Posvyanskii, and S. M. Frolov. 2013. Mechanisms of the oxidation and combustion of normal paraffin hydrocarbons: Transition from C<sub>1</sub>–C<sub>10</sub> to C<sub>11</sub>–C<sub>16</sub>. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7(2):161–169.

Received August 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; senior research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@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; research scientist, Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; igor\_shamshin@mail.ru

**Aksenov Victor S.** (b. 1952) — 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; associate + professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

**Kazachenko Maxim V.** (b. 1997) — research engineer, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; magister, Department of Power Engineering, N. E. Bauman Moscow State Technical University, 5-1 Baumanskaya 2nd Str., Moscow 105005, Russian Federation; maksx71997@gmail.com

**Gusev Pavel A.** (b. 1942) — Candidate of Science in physics and mathematics, research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; leading engineer, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 13-2 Izhorskaya Str., Moscow 125412, Russian Federation; gusevpa@yandex.ru