

ДЕТОНАЦИЯ ПРОПАНОВОЗДУШНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ГОРЯЧИХ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

В. И. Таржанов, И. В. Теличко, В. Г. Вильданов, В. И. Сдобнов,
А. Е. Макаров, С. Л. Мухин, И. Г. Корецкий, В. А. Огарков, В. В. Власов,
А. Д. Зинченко, А. В. Воробьев, А. Н. Грачев, В. А. Маткин,
В. А. Поташников

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, tar@gdd.ch70.chel.su

С использованием установки ТСД (РФЯЦ, ВНИИ технической физики, г. Снежинск) изучено возникновение и развитие детонации пропановоздушных составов при инжекции в них горячих продуктов детонации. Зарегистрирована полная картина этого явления: инжекция горячих продуктов детонации в основную трубу установки с формированием области смеси исходного пропановоздушного состава с горячими продуктами; возникновение локального взрыва в этой смеси и последующее развитие детонации в ней; передача детонации в область холодных исходных реагентов (или ее срыв на границе областей). Установлена область существования детонации по начальной объемной концентрации пропана от 3.3 до 5 %. Определены следующие критические (к моменту локального взрыва) параметры: массовая доля горячих продуктов детонации $6 \div 9$ %, плотность вводимой с продуктами энергии $145 \div 195$ Дж/г, мощность энерговода $70 \div 50$ Дж/(г·мс).

Ключевые слова: детонация, переход горения в детонацию, пропановоздушная смесь.

ВВЕДЕНИЕ

Переход горения в детонацию широко исследуется в последние десятилетия как ключевой процесс, предопределяющий масштаб разрушений в промышленных авариях с газовыми выбросами [1–8]. Основные механизмы процесса сформулированы, например, в [7, 8]. Это возникновение крупномасштабных энергетических вихрей в несгоревшем газе (в турбулентных «карманах» за препятствиями или перед пламенными струями); достаточно высокая интенсивность мелкомасштабной турбулентности, способствующая перемешиванию горячих продуктов сгорания с исходными реагентами в крупных вихрях; градиентное распределение времени индукции в вихревом кармане, необходимое для усиления ударной волны при когерентном энерговыделении [5, 6].

Во ВНИИ технической физики предложены способ и установка для количественного исследования этих механизмов [9, 10]. О первых результатах такого исследования сообщалось в [11–13]. Целью данной работы является более подробное описание возникновения детонации при инжекции в пропановоздушные составы го-

рячих продуктов детонации с приведением количественных характеристик процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ

Установка ТСД (труба спонтанной детонации) (рис. 1), расположенная на открытом воздухе вне взрывозащитного сооружения с диагностической аппаратурой, обеспечивает в пространстве между двумя коаксиальными трубами быстрое перемешивание исходного пропановоздушного состава с горячими продуктами детонации (ГПД). Область перемешивания в левой части трубы соседствует с областью холодных исходных реагентов в правой части. Горячие продукты возникают и впрыскиваются в объем основной трубы установки при детонации исходного пропановоздушного состава в малой перфорированной трубе.

Основные параметры установки ТСД:

длина основной трубы	— 17 м,
внутренний диаметр основной трубы	— 402 мм,
наружный диаметр трубы впрыска ГПД	— 159 мм,
внутренний диаметр трубы впрыска ГПД	— 149 мм,
диаметр отверстий перфорации	

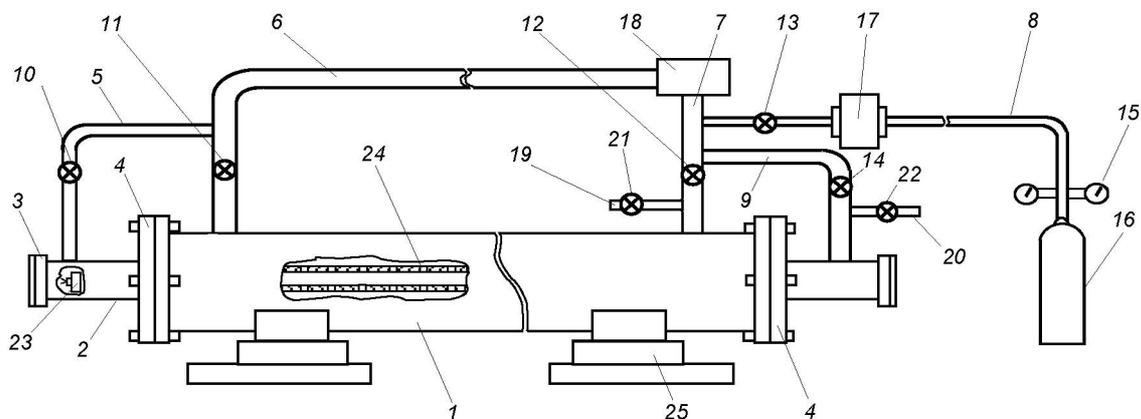


Рис. 1. Установка ТСД:

1 — основная труба; 2 — малая труба впрыска ГПД; 3, 4 — герметизирующие фланцы (на основной трубе правый фланец 4 заменялся полиэтиленовой пленкой); 5–9 — трубы с вентилями 10–14; 15 — редуктор; 16 — баллон с пропаном; 17 — счетчик газа; 18 — вентилятор; 19, 20 — патрубки с вентилями 21, 22 для присоединения компенсаторов объема смеси; 23 — инициатор детонации в малой трубе; 24 — отверстия в стенке малой трубы; 25 — опора

трубы впрыска	— 7 мм,
число отверстий	— 8,
в одном ряду	— 8,
расстояние между рядами	— 55 мм,
отверстий	— 55 мм,
смещение отверстий	— полшага
в соседних рядах	по угловой
	координате,
длина участка перфорации	— 5 500 мм.

Описываемая установка, по сути, является действующим свазером (swager по терминологии [6]) с поперечной газодинамической активацией исходных реагентов.

Детонация в малой трубе инициировалась подрывом заряда взрывчатого вещества с тротильным эквивалентом 12 г, располагавшимся на ее оси на расстоянии 20 мм от левого торца. Плотность энергии инициирования при этом в $1.5 \div 2$ раза превышала критическую плотность энергии инициирования в опытах с разными концентрациями пропана, кроме опыта № 46, в котором она близка к критической. Полноценность детонации составов в малой трубе контролировалась по фазовой скорости волны инжекции ГПД вдоль стенки основной трубы.

Диагностика процессов обеспечивалась тринадцатью тензорезистивными датчиками ДДЭ 060, вмонтированными в стенку основной трубы вдоль ее оси. Чувствительность датчиков 40 мВ/МПа, резонансная частота 250 кГц. Диапазон измерений в статике 2.8 МПа, в динамике (со снижением ресурса) — до 5 МПа.

Применялись располагавшиеся вблизи датчиков усилители с фильтрами высоких частот (от 180 кГц), подавлявшими сигналы резонанса датчиков. Для регистрации использовалась автоматизированная система сбора и обработки информации (частота дискретизации 1 МГц, 10 разрядов аналого-цифрового преобразования, объем памяти в каждом канале 128 кбайт).

ИССЛЕДУЕМЫЕ ПРОПАНОВОЗДУШНЫЕ СОСТАВЫ

В опытах использовались пропановоздушные составы с объемным содержанием пропана $2 \div 7$ %. Составы готовились за $1 \div 2$ ч до опыта путем запуска в герметичный объем установки ТСД расчетного объема пропана в газообразной фазе из баллона со сжиженным газом через счетчик газа Г4 «Берестье» при перемешивании вентилятором. Вентилятор выключался за несколько минут до опыта. Точность измерений счетчика газа ± 2 %. Перед опытом состав контролировался переносным газоанализатором «Кедр», предназначенным для определения содержания пропана. Точность измерений ± 5 %. В некоторых случаях проводился отбор проб в вакуумированные пробоотборники с последующим определением состава газа на хроматографе. Применялся пропан марки «Б» по ТУ 0272-023-001516-99 с массовым содержанием углеводородов C_3 не менее 97.1 %, C_1 и C_2 в сумме — не более 0.8 %, C_4 не более 2.1 %, сероуглерода не более 0.002 %.

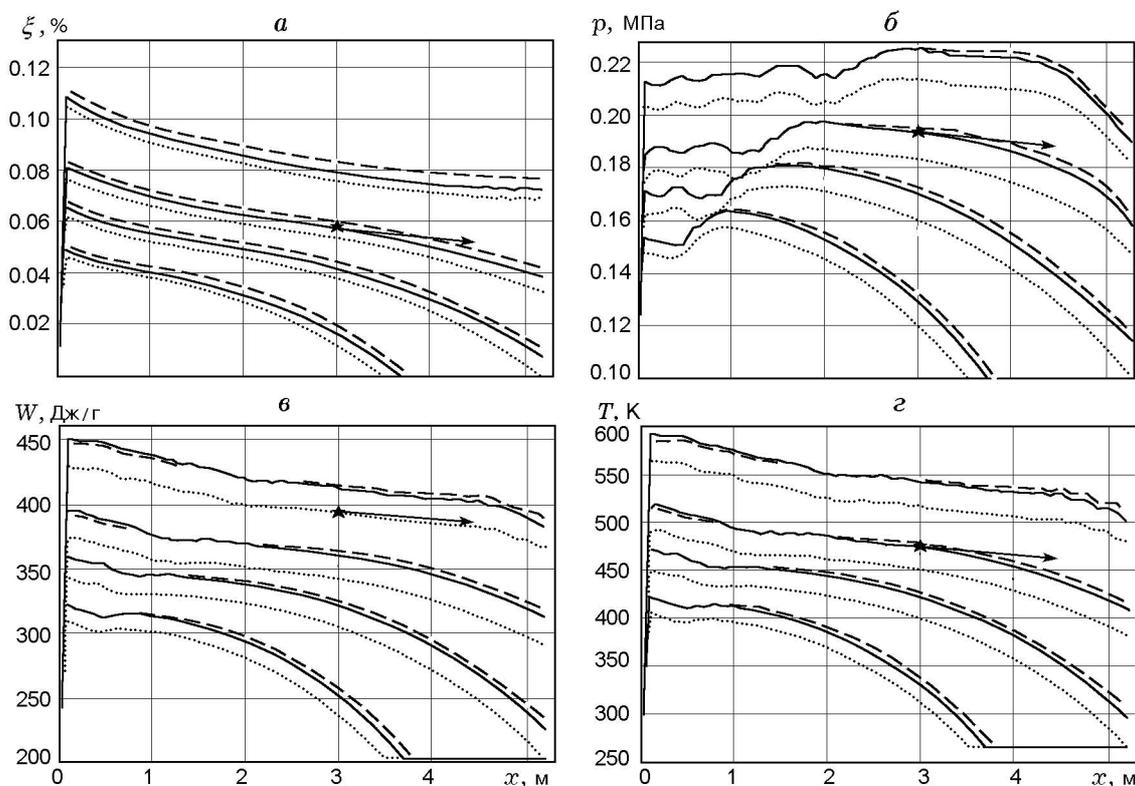


Рис. 2. Расчетные распределения массовой доли ГПД (*a*), давления смеси (*б*), удельной энергии (*в*) и температуры смеси во внешней трубе (*г*) по длине перфорированного участка в моменты времени 2, 3, 4 и 6 мс от начала инъекции у левого фланца (группы линий снизу вверх) для различного объемного содержания пропана в пропановоздушной смеси:

пунктирная линия — 3.3 %, сплошная — стехиометрический состав, штриховая — 5.6 %; звездочка со стрелкой — место и время локального взрыва и направление движения детонационного фронта

Следует отметить, что при подготовке пропановоздушных составов использовался атмосферный воздух, находившийся в трубах установки перед экспериментами. Контролировались влажность воздуха и его температура. При температурах $+1 \div -11$ °C и влажности $23 \div 60$ %, характерных для условий экспериментов, объемная концентрация воды в смесях составляла $0.4 \div 0.04$ %. Влияние такого количества воды (по оценкам с использованием данных [14, 15]) состоит в сужении диапазона между нижним и верхним пределами детонации на ≈ 1 % и в снижении детонационной способности (увеличении критической энергии иницирования) на ≈ 26 %. Рост температуры, сопутствующий увеличению влажности, оказывает обратное влияние, компенсирующее: детонационная способность растет на ≈ 12 %. Таким образом, суммарное влияние влажности и температуры на диапазон детонационной способно-

сти меньше 1 %, а на детонационную способность — менее 14 %.

ПАРАМЕТРЫ СМЕСИ С ГОРЯЧИМИ ПРОДУКТАМИ ДЕТОНАЦИИ

Для количественного описания получаемых в установке параметров смесей исходных реагентов с ГПД была разработана программа «Прогноз» [12]. По программе с использованием нестационарных уравнений газовой динамики рассчитывались два одномерных течения газа вдоль труб установки. Поток вещества через отверстия внутренней трубы рассчитывался по теории сопла. Программа верифицирована сопоставлением расчетов стационарной детонации с расчетами [16], установлением соответствия с экспериментальными данными по наполнению ГПД измерительных камер, подключаемых к единичным отверстиям малой

Постановочные данные и некоторые результаты опытов по возникновению детонации при инъекции горячих продуктов детонации через отверстия диаметром 7 мм

Номер опыта	$T, ^\circ\text{C}$	$w, \%$	$\eta, \%$	$D_{inj}, \text{км/с}$	$D_{det}, \text{км/с}$	$L, \text{м}$	$\Delta W^*, \text{Дж/г}$	$Q^*, \text{Дж/(г}\cdot\text{мс)}$	$\tau, \text{мс}$	$\xi^*, \%$	$\Delta p_{\max}, \text{МПа}$
16	-3	60	7	1.76	—	—	—	—	∞	≥ 12	0.12
18	-4	60	4.9	1.80	1.4 (всп.)	4.2	280	38	7.35	9	1.3
19	-9	56	4.4	1.78	2.07	3	145	70	2.05	6	3.8
20	-9	56	3.7	1.72	2.02	3.2	160	66	2.45	6.5	2.8
21	-8	53	3	1.62	—	—	—	—	∞	≥ 12	0.12
22	-9	53	3.6	1.71	2.12	3.2	170	62	2.75	6.7	3.2
23	-8	36	5.25	1.805	—	—	—	—	∞	≥ 13	0.13
24	-10	36	3.25	1.63	—	—	—	—	∞	≥ 10	0.11
25	-9	34	4.35	1.80	2.0	4.2	190	55	3.45	8	4.0
26	-8	34	4.85	1.805	—	—	—	—	∞	≥ 13	0.40
27	-11	30	3.3	1.72	—	5.5	—	—	4.8	≥ 9	1.7
28	-11	30	5.05	1.81	—	—	—	—	∞	≥ 13	0.12
38	-3	30	3.9	1.78	2.08	3.0	155	66	2.35	6	3.5
40	-9	24	3.2	1.66	Вспышка	5.5	250	33	7.65	10	0.8
41	-7	24	2.95	1.62	—	—	—	—	∞	≥ 12	0.12
42	-9	23	4.45	1.81	2.14	3.9	195	52	3.75	8.5	3.0
43	-6	23	4.8	1.81	1.3 (всп.)	5.5	260	35	6.35	11.5	0.5
44	-6	23	4.7	1.81	1.3 (всп.)	5.5	300	36	8.35	13	2.0
45	-12	27	5.15	1.81	—	—	—	—	∞	≥ 13	0.13
46	-3	30	2	1.50	—	—	—	—	∞	≥ 12	0.1
47	1	30	3.2	1.70	—	—	—	—	∞	≥ 12	0.125

Примечание. T — температура состава, w — влажность воздуха, η — объемная концентрация пропана, D_{inj} — фазовая скорость ГПД, D_{det} — скорость детонации исходных составов в малой трубе, L — расстояние до локального взрыва, ΔW^* — плотность энергии, введенной с ГПД, Q^* — плотность введенной мощности, τ — задержка локального взрыва, ξ^* — массовая концентрация ГПД, Δp_{\max} — максимальное превышение давления.

трубы, подтверждением соответствия расчетного давления в основной трубе установки при инъекции ГПД с показаниями датчиков давления.

Моделировались процессы в установке ТСД для различных составов при начальной температуре -7°C , средней для выполненных экспериментов. Результаты расчетов приведены на рис. 2. Видно, что распределения всех анализируемых параметров вдоль оси трубы переменны и изменяются со временем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные данные и результаты экспериментов представлены в таблице. На рис. 3 приведены примеры записей датчиков давления в координатах «расстояние вдоль трубы — время», вычисленные максимальные скорости детонации D_{det} и других волн, а также фазовая скорость фронта волны инъекции ГПД вдоль основной трубы D_{inj} , определяемая по наклонной линии, соединяющей начала записей разных датчиков, и отождествляемая со скоростью детонации исходных составов в малой трубе.

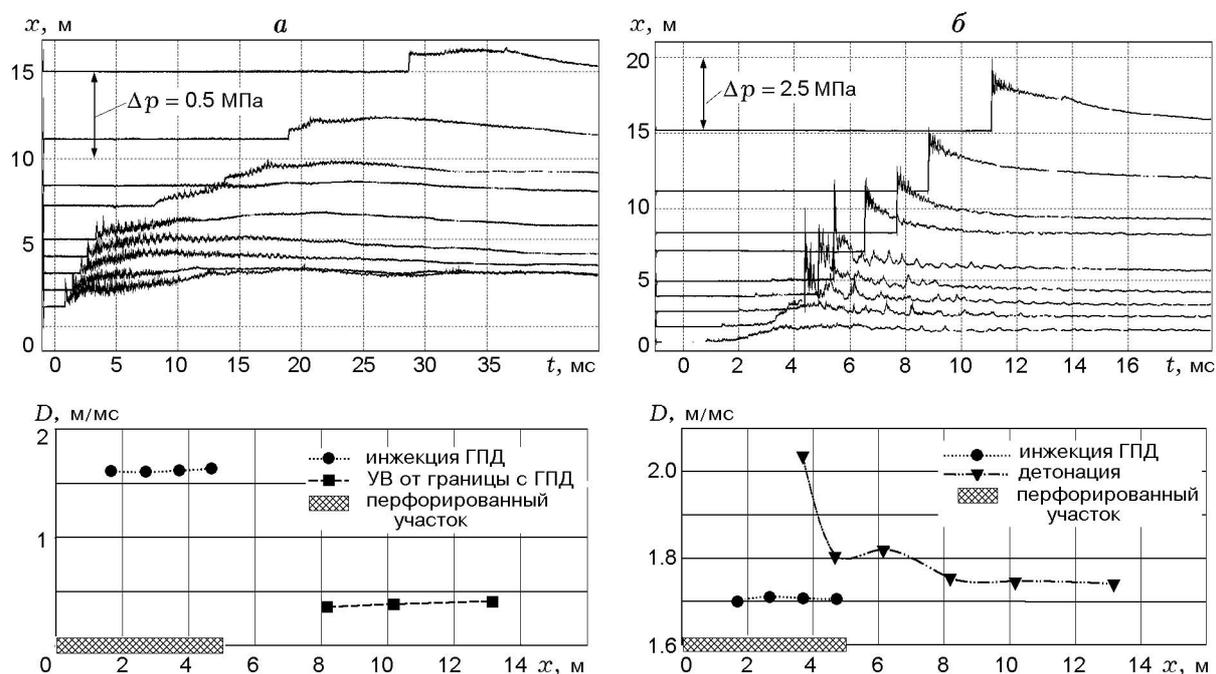


Рис. 3. Записи датчиков давления при отсутствии (а) и при возникновении (б) детонации в области с ГПД:

а: опыт № 21 — впрыск ГПД, горение смеси с ГПД, зажигание исходных реагентов на границе области с ГПД, ускорение ударной волны от границы области с ГПД; б: опыт № 20 — впрыск ГПД, горение смеси с ГПД, локальный взрыв, распространение детонации на фоне горения в области с ГПД, детонация в исходных реагентах

Все записи датчиков давления, установленных в области смешения исходных реагентов с ГПД (до длины 5.5 м), начинаются с регистрации инъекции ГПД в исследуемый объем. Это — осциллирующие кривые. При отсутствии детонации (см. рис. 3,а) в связи с инъекцией ГПД достигается избыточное давление $\Delta p = 0.1 \div 0.2$ МПа. Рост Δp до 0.1 МПа — следствие только впрыска ГПД, от 0.1 до 0.2 МПа — результат вялого горения исходных реагентов. На записях датчиков видно слабое усиление ударной волны, возникающей в исходных реагентах ($x > 5.6$ м) при распаде разрыва на границе области с ГПД ($x = 5.5$ м). Усиление ее связано с медленным горением пропановоздушного состава за ее фронтом.

В случаях возникновения детонации (см. рис. 3,б) наблюдаются существенно большие избыточные давления — до 1.0 МПа, что связано с химическим энерговыделением при смешении исходных реагентов с ГПД. На расстоянии $x = L \approx 3 \div 4.2$ м (см. таблицу) от закрытого торца основной трубы регистрируется локаль-

ный взрыв. Из него вправо по области смеси с ГПД развивается детонация с избыточным давлением $\Delta p \approx 3 \div 4$ МПа. Детонация передается в область исходных реагентов и начиная с расстояния 7 ÷ 8 м распространяется со стационарной скоростью.

В экспериментах наблюдаются также пороговые режимы горения смеси исходных реагентов с ГПД, когда горение не развивается до локального взрыва или когда локальный взрыв возникает, но не переходит в детонацию. При уровне давлений ≈ 0.4 МПа, достигаемых в области смеси с ГПД за счет химического энерговыделения, горение переходит в исходные реагенты ($x > 5.5$ м) в режиме дефлаграции, распространяющейся со скоростью около 700 м/с.

Для того чтобы выяснить роль направления распространения фронта инъекции ГПД в основной трубе, было выполнено несколько опытов с обратным (справа налево, см. рис. 1) направлением распространения детонации в малой трубе. При этом возникающая детонация распространялась также справа налево. Ни одного случая распространения в проти-

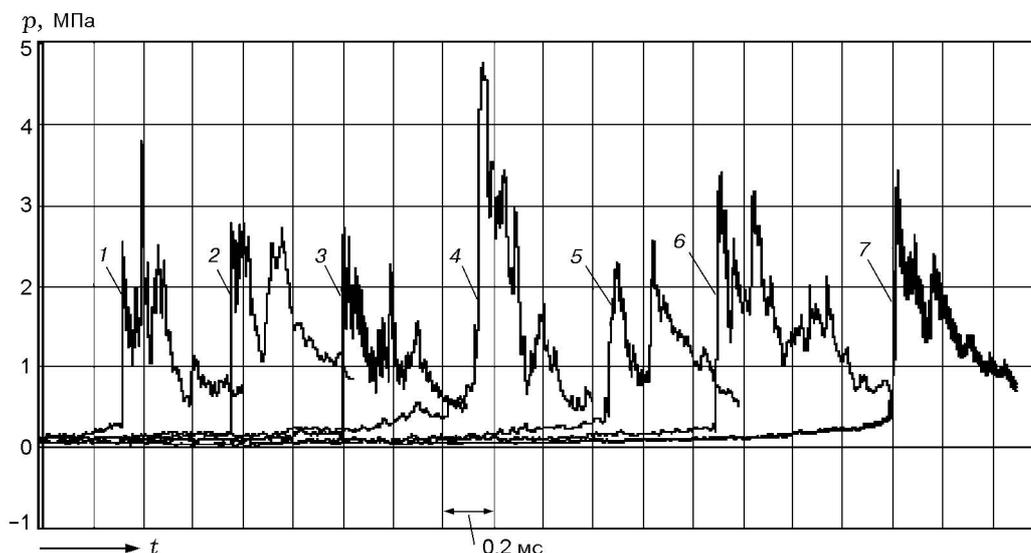


Рис. 4. Форма импульсов локального взрыва:
 1-6 — импульсы в опытах № 19, 20, 22, 25, 38, 42; 7 — осредненный импульс (совмещение импульсов 1-6 по максимумам на фронтах)

в противоположном направлении зарегистрировано не было.

Импульсы локального взрыва на записях датчиков давления в разных опытах (рис. 4) различаются по форме. Двухпиковый характер импульсов обусловлен особенностью конфигурации объема исследуемой смеси. Локальный взрыв возникает в произвольной точке в кольцевой области между трубами, а детонация достигает датчика, огибая малую трубу с двух направлений, со сдвигом во времени. Этот сдвиг (по оценке) для значения $D_{det} = 2$ м/мс составляет $0 \div 0.3$ мс и согласуется с регистрируемыми интервалами между пиками. Длительность первого пика осредненного импульса на полувысоте — 0.12 мс.

Задержка локального взрыва τ (см. таблицу) определялась как время от начала инжекции ГПД в объем основной трубы установки до момента возникновения локального взрыва. Вычислялось это время как интервал от начала сигнала датчика давления до фронта импульса локального взрыва с добавлением 0.35 мс. Начало сигнала связано с приходом на датчик ударной волны, ведомой в радиальном направлении многими струями ГПД. 0.35 мс — это время от старта ГПД из отверстий малой трубы до прихода ударной волны на стенку основной трубы установки. Оно определено в специальных опытах и является средним (± 0.02 мс) для разных значений η . Из рис. 5

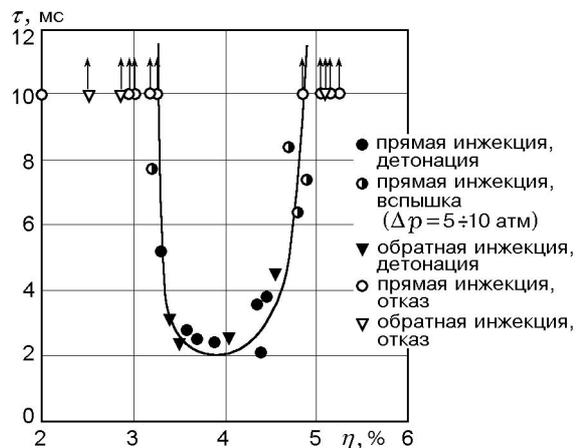


Рис. 5. Корреляция задержек локального взрыва с объемной концентрацией пропана в исходных пропановоздушных составах

следует, что при заданных условиях впрыска ГПД детонация возникает в диапазоне объемных концентраций пропана $3.3 < \eta < 5$ %. Значения τ круто растут вплоть до «отказов» на границах этого диапазона. Задержки в опытах с обратным направлением детонации в малой трубе близки к задержкам при «прямой» инжекции ГПД.

По осциллирующим кривым инжекции ГПД определялась скорость волны сжатия, циркулирующей между стенками основной и

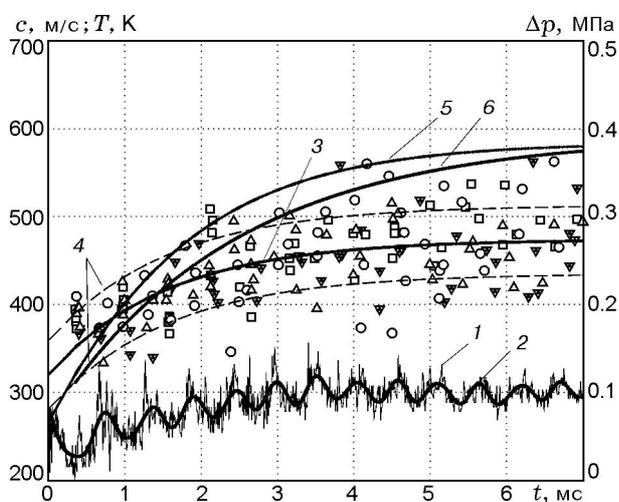


Рис. 6. Скорость звука и температура в смеси с ГПД, определяемые по осцилляциям сигнала датчиков давления, в зависимости от времени:

точки — эксперименты при $\eta = 3, 4.85, 5.8, 7\%$; линии: 1 — зависимость $\Delta p = f(t)$, характеризующая циркуляцию волны сжатия по смеси с ГПД, 2 — то же самое после фильтра высоких частот, 3 — скорость звука (аппроксимация всех экспериментальных точек), 4 — границы среднеквадратичной погрешности скорости звука, 5 — температура, вычисленная по скорости звука, 6 — температура, рассчитанная по программе «Прогноз»

малой труб установки. Эта волна возникает при отражении от стенки основной трубы существенно неоднородной ударной волны, ведомой струями ГПД. Скорость волны сжатия, отождествляемая со скоростью звука c в смеси с ГПД, определялась как удвоенное расстояние между стенками труб установки, деленное на период осцилляции на названных кривых. Из рис. 6 видно, что скорость звука c монотонно растет со временем в каждом сечении трубы. Ее рост связан с увеличением количества впрыскиваемых ГПД и соответствующим ростом температуры смеси. Различие значений скорости звука для составов с разными концентрациями пропана в диапазоне $\eta = 3 \div 7\%$ составило 6% и находится на уровне погрешности измерений.

Скорость волны сжатия, циркулирующей между стенками труб, можно, по-видимому, отождествить со скоростью звука. Действительно, несмотря на достаточно заметное повышение давления в волне ($\Delta p/p \approx 0.1$), которое наблюдается после первого импульса от выхода на стенку основной трубы ударной волны, «сидящей» на струях ГПД, в записях дат-

чиков давления ударные фронты отсутствуют. Полученная методом наименьших квадратов аппроксимация экспериментальных данных $c(t)$ не противоречит при $t = 0$ скоростям звука исходных реагентов ($325 \div 336$ м/с при $\eta = 7 \div 2\%$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установка ТСД задумывалась для моделирования спонтанного [17] горения и детонации. Посмотрим, что же получилось в реальности.

Во-первых, в установке реализуется принудительное поджигание исходных реагентов с фазовой продольной скоростью распространения, равной скорости детонации. О горении свидетельствует увеличение давления в смеси к моменту локального взрыва до ≈ 1 МПа, что на порядок отличается от давления впрыска ГПД (≈ 0.1 МПа). Смесь не только не инициируется ударной волной, находящейся на «головах» множества струй ГПД, но и допускает несколько циркуляций волны сжатия до возникновения локального взрыва. К этому моменту смесь в каждом поперечном сечении «забывает» о своем детонационном происхождении. Иницирование детонации одной струей ГПД невозможно в соответствии с критериями [18, 19] $d/\lambda = 13$ или $d/\lambda = 7$, где d — диаметр ядра струи, λ — ширина детонационной ячейки. В нашем случае $d/\lambda = 0.7$ см/5.5 см = 0.13.

Во-вторых, имеет место мелкомасштабная турбулизация среды при впрыске ГПД. Об этом свидетельствуют результаты прямого математического моделирования ячейки установки с одной струей ГПД [20]. Косвенно это подтверждают и значения задержки τ локального взрыва. Действительно, τ — это эффективное время распространения турбулентного фронта горения поперек ячейки установки, «обслуживаемой» одной струей ГПД с эффективным радиусом 4.3 см. Для среднего (по опытам 19, 20, 22, 25, 27, 42 из таблицы) времени задержки $\bar{\tau} = 2.8$ мс скорость турбулентного горения составит $u_t = 0.043/0.0028 \approx 15$ м/с, а ее отношение к скорости ламинарного горения равно $\frac{u_t}{u_l} = \frac{15 \text{ м/с}}{0.38 \text{ м/с}} \approx 40$. Полученное отношение совпадает с вычисляемым по формуле Лефевра [21] для струйных турбулентных пламен в пропановоздушных смесях при скоростях

струй, больших 200 м/с: $\frac{u_t}{u_l} = 1 + \frac{0.04}{0.305}u =$

$1 + \frac{0.04}{0.305} 320 \text{ м/с} \approx 43$. Здесь $u = 320 \text{ м/с}$ — скорость струи ГПД, а 0.305 — коэффициент пересчета футов в метры. Интенсивное турбулентное перемешивание ГПД с исходными реагентами обеспечивает быстрый прогрев последних, с одной стороны, и срыв пламени — с другой, способствуя достижению еще больших температур. Таким образом, в исследуемом объеме установки возникает турбулизованная пламенная «щетка» с циркулирующей по ней радиально затухающей волной сжатия ($\Delta p \leq 0.1 \text{ МПа}$).

В-третьих, в установке создается крупномасштабное (5.5 м) динамичное градиентное распределение параметров смеси исходных реагентов с горячими продуктами сгорания и соответствующее распределение времени индукции химической реакции.

Таким образом, реализуется вся последовательность событий, характерных для спонтанной детонации [17]. В условиях неравномерного распределения времени индукции реакции возникает локальный взрыв тепловой природы, приводящий к развитию детонации, причем исключительно в направлении роста значений τ .

Локальный взрыв

Понятно, почему локальный взрыв и развитие детонации реализуются в более узком диапазоне начальных концентраций пропана, чем диапазон детонационной способности. При отходе от стехиометрии снижение активности исходных реагентов в экспериментах оказывает двойное влияние на потенциальный очаг взрыва. С одной стороны, резко растет энергия инициирования исходных реагентов [16, 22, 23], а с другой стороны, ослабляется инжекция ГПД (снижаются их температура и скорость ввода).

Возникновение локального взрыва на некотором расстоянии L от левого торца трубы объясняется тем, что именно в этом месте в момент вспышки реализуются более высокие давление и плотность смеси с ГПД. Несколько более высокая объемная плотность внесенной с ГПД энергии оказывается существеннее для развития локального взрыва, чем удельные массовые характеристики (ξ и T).

Профили импульсов локального взрыва, возникших вблизи регистрирующих их датчиков давления, не содержат ударных фронтов (4, 5 на рис. 4), но уже на расстояниях $0.5 \div 1 \text{ м}$ сле-

дующими датчиками записываются профили с ударными фронтами. По измеренной ширине импульса локального взрыва (0.12 мс) может быть оценена характерная длина зоны локального взрыва. Предположив, что взрыв возник вблизи записавшего его датчика и что вся зона, не расплываясь, движется далее со скоростью 2 м/мс, получим верхнюю оценку — 0.25 м.

Критические условия возникновения локального взрыва

Приведем вначале дополнительное подтверждение корректности моделирования инжекции ГПД по программе «Прогноз» и надежности расчетных данных.

С использованием экспериментально измеренной скорости звука c в смесях с ГПД вычислялась температура T (см. рис. 6). Использовалась формула $T = c^2 \mu / \gamma R$, где $\mu = 29.6$ — молекулярная масса смеси, $\gamma = 1.369$ — показатель изоэнтропы, R — универсальная газовая постоянная. Видно, что температура, вычисленная по скорости звука, близка к значению, полученному для равновесных условий.

Отбор значений параметров смесей с ГПД (см. рис. 2) для поперечных сечений в моменты возникновения локального взрыва показывает, что для значений $\eta = 3.5 \div 4.5 \%$ критическая массовая доля ГПД, введенных к моменту возникновения локального взрыва, составляет $\xi^* = 6 \div 9 \%$. Плотность энергии, введенной с ГПД к этому моменту, $\Delta W^* = 145 \div 195 \text{ Дж/г}$. Соответствующая этому энерговоду плотность мощности, определяемая как $Q^* = \Delta W^* / \tau$, достигает значений $70 \div 50 \text{ Дж/(г·мс)}$. При больших и меньших концентрациях пропана, когда реализуются большие задержки локального взрыва (см. рис. 5), ΔW^* достигает значений $250 \div 300 \text{ Дж/г}$, а Q^* — $33 \div 50 \text{ Дж/(г·мс)}$.

Видна тенденция к уменьшению критической мощности ввода ГПД при росте плотности энергии ΔW^* и задержек τ . Критическая плотность энергии растет с увеличением τ . Однако о нахождении соответствующих функциональных зависимостей говорить пока рано, нужно варьировать темп ввода ГПД. Следует отметить, что вводимая с ГПД критическая плотность энергии вблизи стехиометрии составляет лишь около 6 % от калорийности пропановоздушного состава и носит активирующий характер.

Развитие детонации из локального взрыва

Если бы малая труба установки была бесконечно длинной слева (см. рис. 1) и профиль детонационного импульса в ней был бы одинаковым для всех ее отверстий на перфорированном участке, то в основной трубе была бы организована спонтанная детонация, распространяющаяся точно со скоростью детонации. Эта детонация отличалась бы от обычной стационарной детонации профилем, а именно размытым фронтом без химпика [8]. Однако при малейшем отличии максимального давления от давления Жуге на ее затянутом фронте немедленно возникал бы ударный фронт, быстро переводящий спонтанную детонацию в нормальную детонацию подогретой и уплотненной смеси.

Описанная картина наблюдается в эксперименте с теми лишь особенностями, которые обусловлены неодинаковостью впрыска ГПД по длине перфорированного участка малой трубы.

В момент возникновения локального взрыва в смеси с ГПД распределения $\xi(x)$, $T(x)$, $W(x)$ и $p(x)$ неравномерны. Расчетные значения градиентов следующие: $\frac{\Delta\xi}{\Delta x} = 0.8$ мас. %/м, $\frac{\Delta T}{\Delta x} = 15$ К/м, $\frac{\Delta p}{\Delta x} = 0.06$ атм/м, $\frac{\Delta\rho}{\Delta x} = 0$ [(г/см³)/м], $\frac{\Delta W}{\Delta x} = 13$ (Дж/г)/м.

В связи с динамичностью этих распределений полезно рассмотреть их в системе координат, связанной с фронтом развивающейся детонации, т. е. проанализировать условия перед распространяющимся фронтом. На рис. 2 звездочкой со стрелкой показаны траектории фронта от точки локального взрыва в экспериментах с составами, близкими к стехиометрии. Видно, что фронт развивающейся детонации, если он движется со скоростью $2 \div 1.8$ км/с, будет распространяться по смеси с практически постоянными значениями параметров $\xi \approx 0.07$, $T \approx 500$ К, $\Delta p \approx 0.08$ МПа, $\rho \approx 1.25$ кг/м³ в области смеси с ГПД. Это говорит о том, что смесь готова к вспышке в каждом сечении перед фронтом детонации, т. е. готова к спонтанному распространению в ней химической реакции. Однако уже произошло «сцепление» химической реакции с возникающим фронтом ударной волны [17], и распространяется обычная детонация с повышенными значениями скорости фронта и давления в нем.

Описанное развитие детонации очень похоже на развитие спонтанного горения и дето-

нации на некотором оптимальном статическом распределении, «включаемом» в нулевой момент времени. Такие статические распределения рассматривались в расчетах [5, 8]. Подробное сопоставление полученных результатов с данными работ [5, 8] выходит за рамки данной статьи. Однако, если за критическую длину по [8] принять расстояние до локального взрыва L (см. таблицу), то получится полное совпадение безразмерной критической длины L/x_d ($x_d = 3.3$ мм — полуширина зоны химической реакции в детонационной волне): в настоящей работе $\frac{L}{x_d} = \frac{3 \div 4.2 \text{ м}}{3.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 910 \div 1300$, в работе [8] — $L/x_d = 960$.

ВЫВОДЫ

В экспериментальной установке ТСД за счет предельно быстрого впрыска горячих продуктов детонации в пропановоздушные составы реализована турбулизованная пламенная «щетка» с циркулирующей по ней волной сжатия. Обеспечены градиентные распределения параметров смеси с ГПД по длине установки.

Зарегистрировано возникновение в такой системе локального взрыва с развитием из него детонации. Установлен факт распространения возникающей из локального взрыва детонации только в направлении градиента параметров смеси с ГПД. Скорость детонации и давление во фронте повышены по отношению к нормальным значениям. Найдена область существования детонации по начальной объемной концентрации пропана — $3.3 < \eta < 5$ %.

С использованием программы «Прогноз» выполнено моделирование работы установки и определены критические значения концентрации ГПД, температуры, плотности вводимой с ГПД энергии и плотности мощности энерговода. Установлено, что вводимая с ГПД энергия, необходимая для возникновения детонации, составляет около 6 % от калорийности исходных реагентов и носит активирующий характер.

В установке осуществлено физическое моделирование перехода горения в детонацию в пропановоздушных составах в условиях интенсивной мелкомасштабной турбулентности (определяемой шагом отверстий малой трубы), множественном взаимодействии «пламя — волна сжатия», при наличии крупномасштабной (5.5 м) градиентной неоднородности.

Полученные результаты могут использоваться для калибровки программ, разрабо-

тываемых для моделирования промышленных аварий с газовыми выбросами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Urtiev P. A., Oppenheim A. K., Laderman A. J.** Experimental observation of transition to detonation in an explosive gas // Proc. Roy. Soc. London. 1966. V. A295. P. 13–28.
2. **Knystautas R., Lee J. H. S., Moen I. O., Wagner H. G.** Direct initiation of spherical detonation by a hot turbulent gas jet // Proc. 17th Intern. Symp. Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1978. P. 1235–1245.
3. **Pförtner H., Schneider H., Drenchan W., Koch C.** Flame acceleration and pressure build-up in free and partially confined hydrogen-air clouds // Proc. 9th ICDERS. Poitiers, France, July 1983.
4. **Desbordes D., Gueraud C., Hamada L., Presles H. N.** Failure of the classical dynamic parameters relationships in highly regular cellular detonation systems // Proc. 13th ICDERS. Nagoya, Japan, 1991. P. 32.
5. **Zeldovich Ya. B., Librovich V. B., Machviladze G. M., Sivashinsky G. I.** On the development of detonation in a non-uniformly preheated gas // Astronaut. Acta. 1970. N 15. P. 313–320.
6. **Lee J. H. S., Knystautas R., Yoshikawa N.** Photochemical initiation of gaseous detonation // Acta Astronaut. 1978. N 5. P. 971–982.
7. **Thomas G. O., Jones A.** Some observations of the jet initiation of detonation // Combust. Flame. 2000. V. 120. P. 392–398.
8. **Khokhlov A. M., Oran E. S., Wheeler J. C.** A theory of deflagration-to-detonation transition in unconfined flames // Combust. Flame. 1997. V. 108. P. 503–517.
9. **Таржанов В. И., Вильданов В. Г., Сдобнов В. И. и др.** Способ исследования условий развития взрыва при воспламенении взрывоопасной газовой среды и устройство для его осуществления: Пат. РФ № (21) 2000126726/28(028331) с приоритетом от 24.10.2000.
10. **Tarzhanov V. I.** The mixture of initial reagents with hot detonation products — the object of investigations in shock tube // Proc. 18th ICDERS. Seattle, USA, 2001. P. 80.
11. **Tarzhanov V. I., Telichko I. V., Vildanov V. G., et al.** Spontaneous detonations in the mixture of initial reagents with hot detonation products // Ibid. P. 103.
12. **Tarzhanov V. I., Sdobnov V. I., Zinchenko A. D., et al.** Detonation of propane-air composition in perforated tube and hot detonation products release from it // Ibid. P. 104.
13. **Vlasov V. V., Ogarkov V. A., Tarzhanov V. I.** Thermodynamics of propane-air composition detonation in the mixture with hot detonation products // Ibid. P. 105.
14. **Shapiro Z. M., Moffette T. R.** Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accidents // WAPD-SC-545. Westinghouse Electric Corp. Sep. 1957 (NTIS).
15. **Berman M.** A critical review of recent large-scale experiments on hydrogen-air detonations // Nuclear Sci. Eng. 1986. V. 93. P. 321–347.
16. **Васильев В. М., Вольперт А. И., Клычников Л. В. и др.** Расчет параметров детонации смесей горючих веществ с воздухом // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 3. С. 127–134.
17. **Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А.** Спонтанные режимы горения // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 13–27.
18. **Carnasciali F., Lee J. H. S., Knystautas R.** Turbulent jet initiation of detonation // Combust. Flame. 1991. V. 84. P. 170–180.
19. **Ungut A., Shuff Ph. J.** Deflagration to detonation transition from a venting pipe // Combust. Sci. Technol. 1989. V. 63. P. 75–87.
20. **Таржанов В. И., Литвиненко И. А.** Горение и детонация при струйном замешивании горячих продуктов детонации в пропановоздушные составы // Международная конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения», г. Саров, Россия, 14–18 марта 2005. Экспериментальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: Сб. тез. докл. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 33–34.
21. **Lefebvre F. A., Reid R.** The influence of turbulence on the structure and propagation of enclosed flames // Combust. Flame. 1966. V. 10, N 4. P. 355–366.
22. **Borisov A. A., Kasimov A. R., Kulikov A. V.** Numerical simulation of gaseous detonations // Proc. 16th ICDERS. Cracow, Poland, August 3–8, 1995. P. 226–229.
23. **Lee J. H.** Dynamic parameters of gaseous detonations // Ann. Rev. Fluid. Mech. 1984. V. 16. P. 311–336.

*Поступила в редакцию 28/VIII 2003 г.,
в окончательном варианте — 11/X 2005 г.*