

УДК 532.593+534.46+662.252

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ ПРОПАНОВОЗДУШНЫХ СОСТАВОВ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОПЫТАХ

В. И. Таржанов, В. Г. Вильданов, В. И. Сдобнов, И. В. Теличко,
А. Д. Зинченко, А. Е. Макаров, И. А. Литвиненко, В. А. Огарков,
В. В. Власов, А. В. Воробьёв, И. Г. Корецкий, С. Л. Мухин, А. Ф. Ханин,
А. Н. Грачёв, В. А. Маткин, В. А. Поташников

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, V.I.Tarzhanov@vniitf.ru

Приведены результаты двух крупномасштабных опытов, поставленных для уточнения условий развития детонации пропановоздушных составов в модельных приземных облаках при отсутствии и наличии ограничивающих жестких стенок. Модельные облака размеров $15 \times 6 \times 4.2$ и $15 \times 6 \times 2$ м ограничивались пластиковыми палатками. Смесь исходных реагентов в облаке поджигалась горячими продуктами детонации, распространяющейся по перфорированной отверстиями трубе размеров $\varnothing 0.82 \times 23$ м, проложенной сквозь пространство палатки. Горячие продукты детонации инжектировались из трубы через отверстия диаметром 20 и 40 мм. Детонация пропановоздушного состава в трубе инициировалась подрывом у ее торца заряда взрывчатого вещества. Зафиксировано развитие детонации в пропановоздушном облаке, ограниченном с одной стороны вертикальной жесткой стенкой, и отсутствие детонации в объеме облака с аналогичной инжекцией горячих продуктов без жесткой стенки. Сделан вывод о ключевой роли расходимости или сходимости потоков горячих продуктов детонации, предопределяющих соответственно отсутствие детонации в области смещения или ее возникновение.

Ключевые слова: горение, детонация, переход горения в детонацию, пропановоздушные составы, крупномасштабные опыты.

DOI 10.15372/FGV20160503

ВВЕДЕНИЕ

Анализ статистики аварий в промышленности показывает, что значительная их часть сопровождается взрывами паровых облаков углеводородных топлив [1]. Ключевым процессом, предопределяющим масштаб разрушений в таких авариях, считается переход горения в детонацию. В этом процессе достигаются давления, превосходящие давление самоподдерживающейся детонации [2]. Систематические исследования перехода горения в детонацию и особенностей детонации в газах проводятся с начала 1930-х годов по настоящее время (см., например, [3–12]). Особый интерес исследователей связан с крупномасштабными опытами,

моделирующими в той или иной мере аварийные взрывы [13–19].

В [20–22] авторами данной статьи исследовалось возникновение детонации в пропановоздушных составах, находящихся в трубе, при инжекции в них горячих продуктов детонации (ГПД) из отверстий вспомогательной трубы меньшего диаметра, расположенной коаксиально внутри. Обнаружено, что при исходной концентрации пропана $3.3 < \eta < 5$ % детонация развивается всегда в смеси исходных реагентов, турбулентно смешиваемых с ГПД из локального взрыва, возникающего на некотором расстоянии от торца трубы при давлении около 0.2 МПа на фоне динамичного градиентного распределения параметров смеси вдоль трубы. Однако роль стенок трубы и обеспечиваемого ими поддерживающего действия в названных работах не изучалась.

Ожидать перехода горения в детонацию в цилиндрическом объеме при отсутствии стенок и сохранении геометрии инжекции ГПД установки ТСД (труба спонтанной детонации)

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 298 МНТЦ).

© Таржанов В. И., Вильданов В. Г., Сдобнов В. И., Теличко И. В., Зинченко А. Д., Макаров А. Е., Литвиненко И. А., Огарков В. А., Власов В. В., Воробьёв А. В., Корецкий И. Г., Мухин С. Л., Ханин А. Ф., Грачёв А. Н., Маткин В. А., Поташников В. А., 2016.

можно только при увеличении масштаба эксперимента. Необходимость увеличения масштаба обусловлена достаточно большими значениями «критического диаметра трубы», равно 90 см для стехиометрического пропановоздушного состава [7], и «критического диаметра инициирующего ядра струи», составляющего согласно [16, 17] около 50 см. Эти данные взяты из экспериментов по передаче детонации газов из трубы в полупространство и по инициированию детонации в свободных газовых объемах единичной струей продуктов горения из форкамер.

Целью работы является проверка влияния расходимости и сходимости потоков ГПД при их многоструйном смешении с пропановоздушными составами в модельных приземных облаках на процесс перехода горения в детонацию в условиях отсутствия ограничивающих жестких стенок и при их наличии с увеличением масштаба зоны смешения.

ПОСТАНОВКА ОПЫТА № 1

Схема эксперимента показана на рис. 1.

Большая пластиковая палатка из полиэтилена толщиной 0.3 мм была установлена в поле на каркасе из деревянного бруса размеров 100×50 мм и стальных труб диаметром 20 мм с толщиной стенки 2.8 мм. Сквозь пространство палатки была проложена труба, перфорированная множеством отверстий двух диаметров. Назначение этой трубы — обеспечить вокруг себя область радиусом ≈ 2 м смеси исходных реагентов с ГПД путем многоструйного их выброса из отверстий на перфорированном участке. Труба инъекции ГПД размещалась в срединной продольной плоскости палатки на расстоянии 55 см от земли и герметизировалась по торцевым стенкам палатки. В середине палатки она поддерживалась стальным штативом. По отверстиям перфорации и на выходе труба герметизировалась полиэтиленовой пленкой толщиной 0.3 мм, прожигаемой ГПД в ходе опыта. Влияние пленки на инъекцию ГПД и смешение с исходными реагентами несущественно в связи с малостью ее массы по сравнению с массой ГПД. Вход трубы закрывался стальной крышкой с резиновым уплотнителем. Со стороны крышки труба подпиралась двумя бетонными кубами размерами $1 \times 1 \times 1$ м и общей массой 4.4 т. Описанное расположение трубы позволяло реализовать в опыте

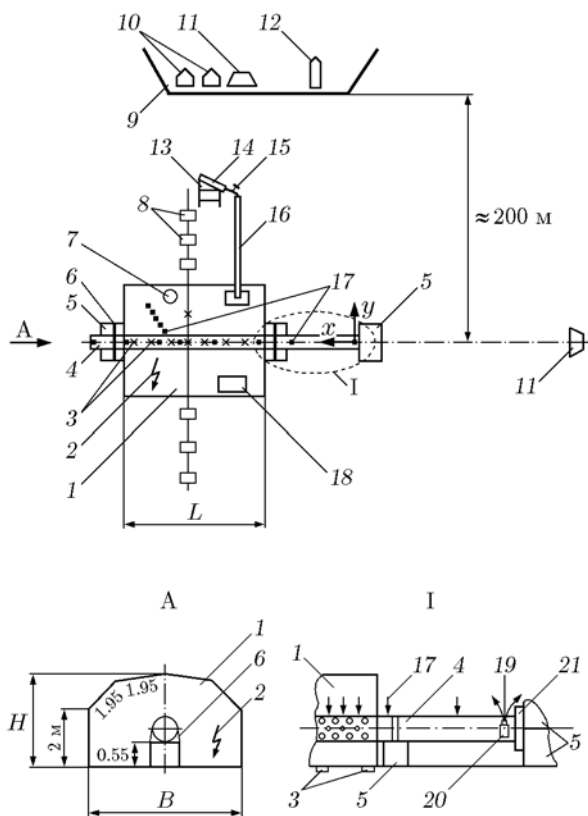


Рис. 1. Постановка опыта № 1:

1 — палатка, 2 — искровик для поджига смеси в аварийной ситуации, 3 — датчики давления (на земле), 4 — труба инъекции ГПД, 5 — бетонные кубы, 6 — бандаж, 7 — вентилятор, 8 — индикаторы давления-импульса, 9 — защитное здание, 10 — скоростные кинокамеры, 11 — видеокамеры, 12 — фотодатчик, 13–16 — система подачи сжиженного пропана, 17 — электроконтактные датчики, 18 — плиты следовой методики, 19 — электродетонатор, 20 — заряд взрывчатого вещества, 21 — стальная крышка трубы

в каждый момент времени большой набор концентраций ГПД — более значительный у земли и меньший в верхней части палатки.

Герметичность объема палатки подтверждалась удержанием давления 0.105 МПа в течение 1 ч.

Параметры установки были следующими.

Палатка:

длина \times ширина \times высота $15 \times 6 \times 4.2$ м, объем (за вычетом объема трубы впрыска ГПД) 322 м^3 , масса газообразного пропана в палатке 27 кг, расчетная объемная концентрация пропана 4 %.

Труба (рис. 2):

диаметр \times длина 0.82×23 м, отверстия на

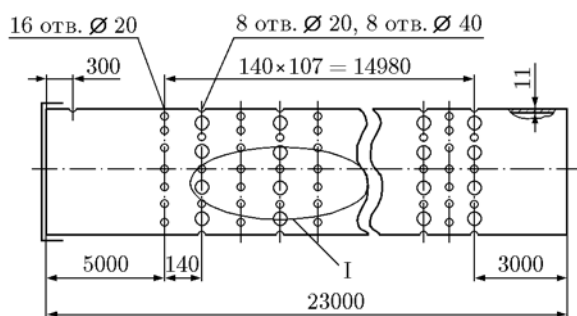


Рис. 2. Схема расположения отверстий на трубе (размеры даны в миллиметрах)

участке перфорации: 54 пояса по 8 отверстий $\varnothing 40$ мм и по 8 отверстий $\varnothing 20$ мм, 54 пояса по 16 отверстий $\varnothing 20$ мм, расположение отверстий в сетке — треугольное, масса пропана в трубе 0.9 кг.

В опыте № 1 масштабировалась зона инжекции ГПД установки ТСД [20] без ее основной трубы. При этом струи ГПД распространялись в объеме модельного облака, не встречая жестких преград (кроме поверхности земли). Реализованы следующие коэффициенты масштабирования:

5.2 — по диаметру перфорированной трубы,
 2.7 — по длине перфорированного участка трубы,
 3 ÷ 5.7 — по диаметру отверстий перфорации,
 2.2 — по доле площади отверстий на поверхности трубы,
 2 ÷ 4.5 — по расстоянию от поверхности трубы до земли (стенки),
 до 20 — по дистанции разлета струй ГПД до полиэтиленовых стенок палаток.

Опыт проводился следующим образом. У крышки трубы устанавливался заряд взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте 350 г, снабженный электродетонатором. В трубу вводили 450 л (0.9 кг) газообразного пропана, что обеспечило его объемную концентрацию 4.0 %. Для этого с помощью системы заправки на металлический поддон площадью 0.36 м², расположенный внутри палатки, медленно было вылит 27 кг сжиженного пропана. При его испарении, выдержке и перемешивании электровентилятором всего объема палатки создавалась необходимая пропановоздушная смесь. Длительность полного испарения — 60 мин (контроль термодатчиками). Вентилятор (200 Вт) работал в течение 75 мин вплоть до подрыва электродетонатора в трубе. Объемная концен-

трация пропана в смеси определялась на хроматографе «Цвет-104» и контролировалась газоанализатором «Кедр» (погрешность $\pm 5\%$). Анализировались пробы смеси из двух первоначально вакуумированных пробоотборников объемом 0.5 л, подключенных к трубкам с выходом по земле к оси палатки на отметках 5 и 10 м.

Для регистрации динамических процессов в опыте использовали восемь методик: тензорезистивные датчики давления ДДЭ 060, две группы электроконтактных датчиков, две видеокamеры, две скоростные кинокамеры СКС-1М и СК-3, фотодатчик суммарного светового излучения, индикаторы давления-импульса, закопченные стальные плиты следовой методики, термодатчик для измерения температуры в палатке.

Опыт был проведен при температуре воздуха $+20^\circ\text{C}$, давлении 98.7 кПа и слабом ветре $0 \div 2$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА № 1

В опыте № 1 установка сработала в запланированном режиме: подрыв заряда взрывчатого вещества в трубе обеспечил детонацию в ней с постоянной скоростью. Скорость детонации, зарегистрированная на длине 2 ÷ 19.5 м восьмью электроконтактными датчиками (табл. 1),

Таблица 1
 Положение электроконтактных датчиков на трубе.
 Скорость детонации

Номер датчика	x_i , м	t_i , мс	$x_l = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$, м	D , км/с
—	0	0	1.00	1.968
1	2.00	1.016	3.25	1.817
2	4.50	2.392	5.75	1.798
3	7.00	3.782	8.25	1.802
4	9.50	5.169	10.75	1.798
5	12.00	6.559	13.625	1.805
6	14.65	7.970	15.825	1.810
7	17.00	9.325	18.25	1.797
8	19.50	10.72	—	—

Примечания. x_i — координаты датчика, t_i — время срабатывания датчика, D — скорость детонации пропановоздушного состава в трубе.

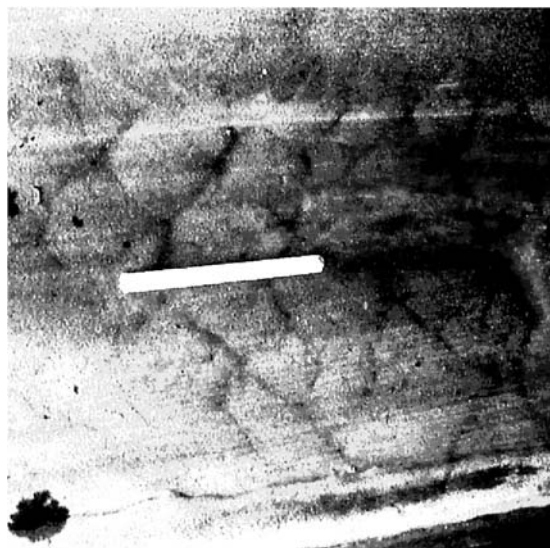


Рис. 3. Ячеистая структура детонации, распространяющейся в трубе слева направо

составила $1.817 \div 1.797$ км/с. Следовой методикой на выходе трубы зарегистрирована типичная ячеистая структура (рис. 3). Средний поперечный размер ячейки (6 см) близок к литературным данным для концентрации пропана 4 % ($5 \div 7$ см [6, 7]).

Два кадра скоростной киносъемки представлены на рис. 4. В соответствии с кинограммой продукты детонации, инжектируемые через систему отверстий на стенке трубы, смешиваясь с исходными реагентами, зажигают их начиная с левого края палатки (2.3 мс) и обеспечивают распространение горения вдоль трубы с фазовой скоростью, равной скорости детонации состава в трубе. Зажигание у земли было более интенсивным, чем в области выше трубы (3.6 мс). Кадр в момент времени 7.9 мс соответствует максимальной интенсивности вспышки исходных реагентов. Такое же время до максимума записано фотодатчиком суммарного излучения.

На рис. 5 показаны записи сигналов датчиков давления, расположенных под трубой. Координаты датчиков на земле и характерные времена приведены в табл. 2. Видно, что датчики фиксируют приход струй ГПД и последующий рост давления, связанный с зажиганием исходных реагентов через $0.3 \div 0.6$ мс. Вычисленная средняя скорость струй на базе 55 см составила $0.42 \div 0.48$ км/с. Среднее давление при торможении струй на поверхности земли — $0.1 \div 0.15$ МПа. Максимальное давле-

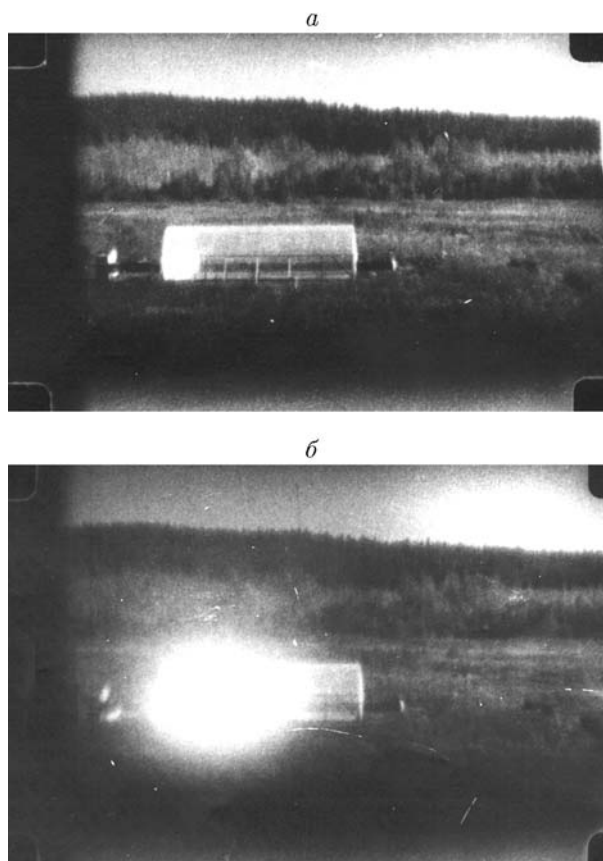


Рис. 4. Кадры скоростной киносъемки в опыте № 1 в моменты времени 3.6 (а) и 7.9 мс (б)

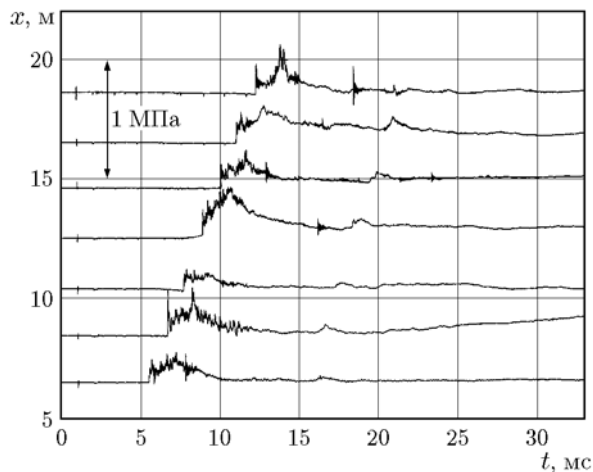


Рис. 5. Записи сигналов датчиков давления в опыте № 1

Таблица 2
Координаты датчиков давления ДДЭ на земле.
Максимальное давление

Номер датчика	x , м	y , м	t_1 , мс	t_2 , мс	p_{\max} , МПа
1	6.49	0	5.462	7.178	0.2
2	8.44	0	6.672	8.260	0.34
3	10.40	0	7.692	9.081	0.13
4	12.55	0	8.899	10.705	0.4
5	12.55	2.095	12.036	—	0.3
6	14.60	0	9.077	10.584	0.29
7	16.50	0	11.074	12.837	0.3
8	18.57	0	12.334	13.910	0.38

Примечания. x , y — координаты датчика, t_1 — время прихода ГПД, t_2 — время начала реакции.

ние 0.4 МПа при горении реагентов записано датчиком № 4 в момент времени 11 мс.

На закопченных плитах следовой методики не получено каких-либо отпечатков.

Индикаторы давления-импульса (параллелепипеды с фиксированными размерами и массой, калиброванные в специальных опытах со взрывами зарядов тротила) были установлены на земле перпендикулярно оси палатки в обе стороны с шагом 10 м. Упал только один из них, на расстоянии 10 м. Это означает, что воздушная ударная волна в опыте эквивалентна волне при взрыве заряда тротила массой 10 кг. Факт возникновения ударной волны с давлением во фронте 0.3 МПа подтвержден осциллограммой датчика № 5, расположенного на расстоянии 2 м от оси трубы в районе максимально интенсивной вспышки.

Осмотр установки после опыта показал, что труба, лежавшая на двух бетонных опорах, не сместилась. Бетонные кубы, в которые труба упиралась крышкой, сместились на 20 см. Полиэтиленовая оболочка палатки оказалась порванной на крупные куски размером $1 \div 5$ м и узкие ($10 \div 20$ см) полосы в длину всей палатки.

Приведенные данные свидетельствуют об отсутствии в опыте перехода горения в детонацию.

ПОСТАНОВКА ОПЫТА № 2

Локальная реакция — необходимый очаг

возникновения детонации — организуется у земной поверхности при перемешивании ГПД с исходной холодной смесью. Это было установлено в опыте № 1. В опыте № 2 реализован большой набор условий для развития такого очага. Опыт № 2 проводился в двух вариантах: при несимметричном расположении в палатке трубы для инъекции ГПД, установленной наклонно к горизонту; при наличии одной вертикальной боковой металлической стенки для организации сходимости потоков ГПД, смешивающихся с исходным пропановоздушным составом, и для увеличения давления в локальном объеме.

Схема постановки опыта приведена на рис. 6. Палатка длиной 15 м была постро-

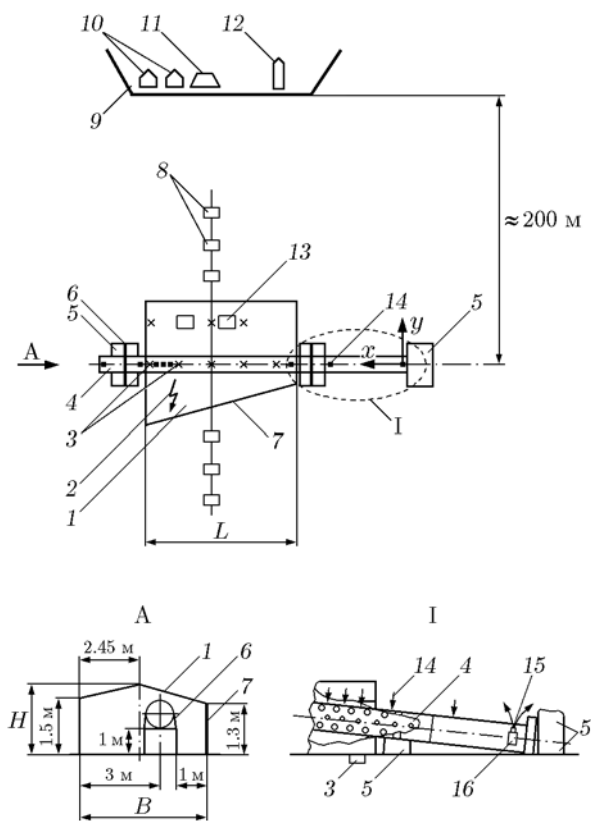


Рис. 6. Постановка опыта № 2:

1 — палатка, 2 — искровик для поджига смеси в аварийной ситуации, 3 — датчики давления (на земле), 4 — труба инъекции ГПД, 5 — бетонный куб, 6 — бандаж, 7 — стальная стенка палатки толщиной 10 мм, 8 — индикаторы давления-импульса, 9 — защитное здание, 10 — скоростные кинокамеры, 11 — видеокамеры, 12 — фотодатчик, 13 — плиты следовой методики, 14 — электроконтактные датчики, 15 — электродетонатор, 16 — заряд взрывчатого вещества

на над той же частью трубы, что и в опыте № 1. Высота палатки была уменьшена до 2 м в связи с ожиданием локального взрыва у земли. Объем палатки за вычетом объема трубы составлял 95.6 м³. Стальная вертикальная боковая стенка располагалась под углом к трубе так, чтобы ось трубы находилась в биссекторной плоскости двугранного угла между поверхностью земли и стенкой. Такое расположение трубы — с переменным расстоянием до земли и до вертикальной стальной стенки вдоль всей палатки — давало широкий набор условий для возникновения локального взрыва и развития детонации из области смеси исходных реагентов с ГПД. Общая длина перфорированного участка трубы внутри палатки была равна 13 м. Начальные 2 м перфорации находились вне палатки, а последние 2 м трубы внутри палатки не имели отверстий. Труба упиралась крышкой в бетонный куб массой 2.2 т. Со стороны открытого конца, герметизированного полиэтиленовой пленкой, труба опиралась на бетонную опору. Технология возведения установки и герметизации ее элементов была аналогична таковой в опыте № 1.

Опыт проводился следующим образом. В трубу с установленным у крышки зарядом взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте 350 г, снабженном электродетонатором, было введено 450 л (0.9 кг) газообразного пропана и получен пропановоздушный состав с объемной концентрацией пропана 4.0 %. Концентрация пропана контролировалась с помощью газоанализатора «Кедр» и хроматографа «Цвет-104».

В палатке был создан слегка обедненный (3.5 % по объему) пропановоздушный состав. Для этого в палатку через расходомер было введено 3350 л газообразного пропана. Перемешивание проводилось вентилятором аналогично опыту № 1. Концентрация пропана определялась на хроматографе также аналогично опыту № 1. Плотность паров воды в воздухе составляла 5.95 г/м³.

Для регистрации процессов использовали те же методики, что и в опыте № 1.

Опыт был проведен при температуре воздуха +3 °С, давлении 98.7 кПа и слабом ветре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА № 2

В опыте № 2 установка сработала в запланированном режиме: подрыв заряда взрывчатого вещества обеспечил детонацию в трубе со

Таблица 3

Положение электроконтактных датчиков на трубе.
Скорость детонации

Номер датчика	x_i , м	t_i , мс	$x_l = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$, м	D , км/с
—	0	0	2.25	1.891
2	4.50	2.380	5.75	1.819
3	7.00	3.754	8.25	1.805
4	9.50	5.139	12.075	1.813
6	14.65	7.979	15.825	1.824

средней скоростью $D = 1.815$ км/с (табл. 3). Факт детонации зарегистрирован электроконтактными датчиками, установленными на трубе, и отпечатками ячеистой структуры на закопченных плитах.

На кадрах киносъемки (рис. 7) видны яркая вспышка позади распространяющегося вправо фронта горения исходных реагентов, ведомого струями ГПД при детонации в трубе (7.9 мс), и приход зоны интенсивного свечения к правому краю палатки с неперфориро-

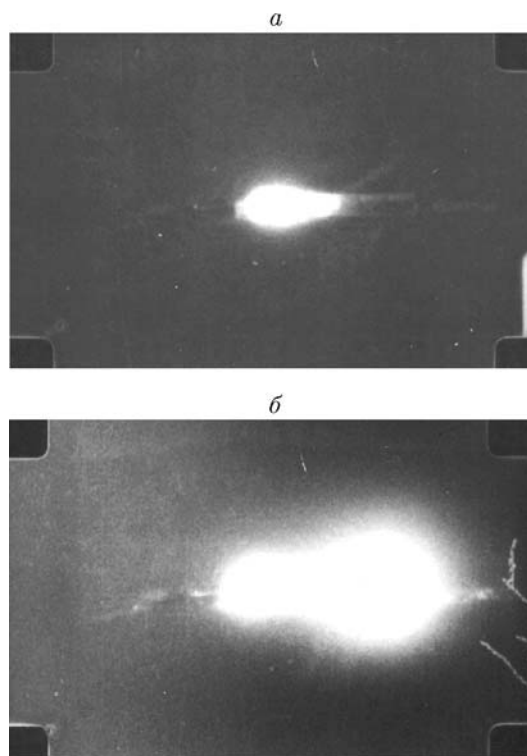


Рис. 7. Кадры скоростной киносъемки в опыте № 2 в моменты времени 7.9 (а) и 14.9 мс (б)

ванном участком трубы (14.9 мс). Скорость распространения фронта интенсивного свечения, определяемая не очень точно из-за сильной диффузной засветки от пленки палатки, составила 2 км/с.

В табл. 4 приведены показания электроконтактных датчиков, расположенных на земле под трубой между двумя датчиками давления. Видно, что на расстояниях 21.25 и 21.585 м зафиксированы скорости детонации.

На рис. 8 приведены осциллограммы сигналов датчиков давления. Координаты датчиков на земле и характерные времена даны в табл. 5. Видно, что датчиками фиксируется приход струй ГПД. Вычисленная средняя скорость струй слегка убывала с удалением от поверхности трубы в связи с наклонным ее положением относительно земли. Давление торможения струй также снижалось и составило $0.15 \div 0.11$ МПа, как и в опыте № 1 (табл. 6). Всеми датчиками, расположенными под трубой, на фоне давления торможения струй за-

Таблица 4
Параметры волн по показаниям электроконтактных датчиков на земле под трубой

Номер датчика	x_i , м	t_i , мс	$x_l = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$, м	D , км/с
1	19.50	12.690	20.25	0.600
2	21.00	15.192	21.25	1.845
3	21.50	15.463	21.585	1.735

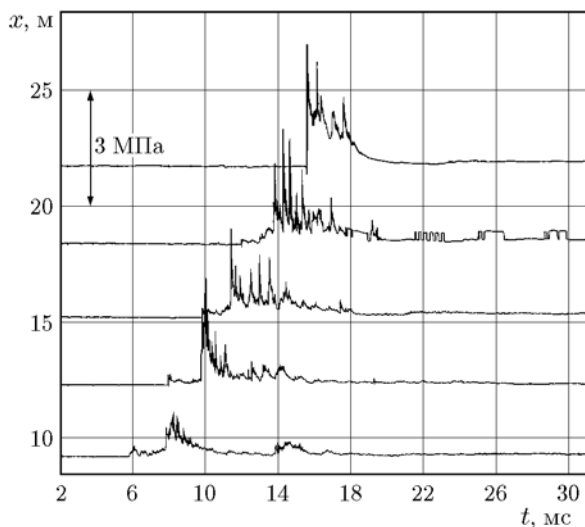


Рис. 8. Записи сигналов датчиков давления в опыте № 2

Таблица 5
Координаты датчиков давления ДДЭ 060 на земле. Максимальное давление

Номер датчика	x , м	y , м	t_1 , мс	t_2 , мс	p_{\max} , МПа
1	9.23	0	5.742	7.729	1.2
2	12.38	0	7.876	9.704	2.5
3	12.38	1.92	—	11.060	2.8
4	15.21	0	9.806	11.370	2.1
5	15.21	1.95	—	12.280	2.8
6	18.35	0	11.941	13.728	2.7
7	21.67	0	—	15.561	2.8
8	21.67	1.95	—	15.504	3.0

Таблица 6
Параметры струй ГПД и давления в зонах локальной реакции

r , м	u , км/с	$p_{\max 1}$, МПа	$p_{\max 2}$, МПа
0.35	0.45	0.15	0.75
0.50	0.42	0.14	1.8
0.63	0.40	0.15	1.7
0.75	0.38	0.11	1.7

Примечания. r — расстояние от стенки трубы до земли, u — средняя скорость струй ГПД, $p_{\max 1}$ — максимальное давление, создаваемое струями ГПД, $p_{\max 2}$ — максимальное давление, создаваемое локальной реакцией.

регистрированы импульсы давления с ударным фронтом, появляющимся с задержкой во времени $1.5 \div 2$ мс. Амплитуды импульсов — $1.1 \div 3.0$ МПа.

Реконструкция положения фронтов волн в разные моменты времени, выполненная по показаниям всех датчиков давления, приведена на рис. 9. Из анализа рисунка вытекает следующая картина явления. Детонация возникла из локального взрыва в области с координатами $x = 3 \div 4$ м, $y = 0.5 \div 1$ м в момент времени $7.7 \div 7.9$ мс. Затем она распространялась по холодным исходным реагентам, обтекая область горячей смеси с ГПД при постепенном развороте фронта. Она распространялась и на последних двух метрах длины палатки, где ГПД не впрыскивались в исходные реагенты.

Описанная картина процессов согласуется с осциллограммой фотодатчика (ФД-7) сум-

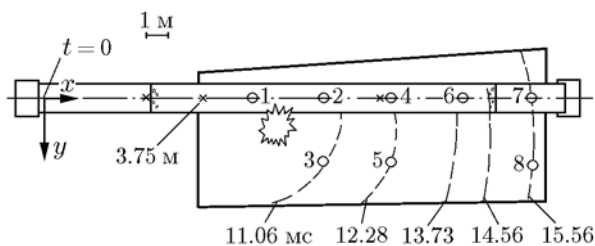


Рис. 9. Схема волновых процессов в опыте № 2 (вид сверху):

цифры около кружков — номер датчика на земле, штриховые линии — положение детонационного фронта у земли в указанный момент времени

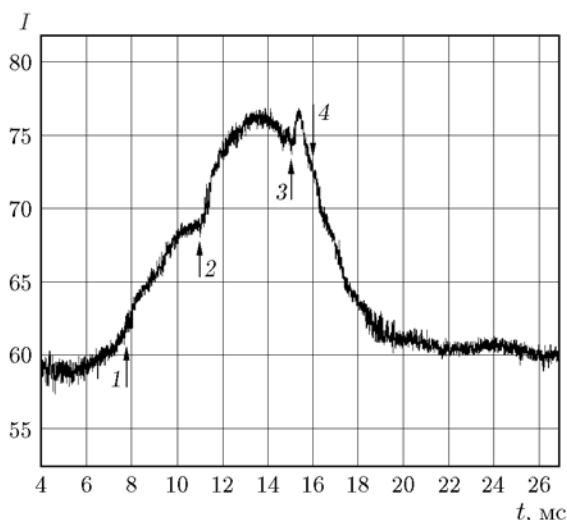


Рис. 10. Интенсивность суммарного светового излучения в опыте № 2:

1 — $t = 7.7$ мс, локальный взрыв, 2 — $t = 11$ мс, выход детонационного фронта на переднюю боковую стенку палатки, 3 — выход детонационного фронта из области смеси с ГПД в область исходных реагентов, 4 — $t = 16$ мс, выход фронта из палатки

марного светового излучения (рис. 10).

Индикаторы давления-импульса были установлены на земле перпендикулярно оси палатки в обе стороны с шагом 10 м. Упали два первых индикатора на расстоянии 10 м. Это означает, что воздушная ударная волна в опыте была эквивалентна волне при взрыве заряда тротила массой $10 \div 40$ кг (при массе тротила больше 40 кг упали бы индикаторы на расстоянии 20 м). С учетом того, что объем палатки с газовым составом в опыте № 2 был в три раза меньше, чем в опыте № 1, полученный результат следует считать существенно отличающимся от такового в опыте № 1.

На закопченных плитах следовой методики не получено каких-либо отпечатков. Это может быть связано либо со срывом слоя сажи на плитах струями ГПД до прихода детонации, либо с неизвестными особенностями ее структуры при распространении по смеси с ГПД.

Осмотр установки после опыта показал, что труба, лежавшая правым концом на бетонном кубе, сброшена с него с отрывом крепежного банджа. Правый конец трубы отнесен в перпендикулярном направлении относительно исходной оси на 1.2 м. Труба в целом сместилась вправо на 15 см. Опорный бетонный куб сместился вправо на 30 см. Полиэтиленовая оболочка палатки оказалась порванной на мелкие куски с преобладающим размером $4 \div 7$ см.

Таким образом, можно констатировать, что в результате инъекции ГПД в объем палатки с зажиганием исходных реагентов при смешении возникла детонационная волна, зафиксированная несколькими применявшимися методиками регистрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Детали возникновения детонации при смешивании холодных исходных реагентов с ГПД в опыте № 2 прояснились по результатам компьютерного моделирования. В основу алгоритма программы прямого двумерного моделирования явлений положен метод частиц Харлоу с дискретным эйлерово-лагранжевым представлением среды. Рассматривались четыре типа дискретных частиц: продукты детонации, инжектируемые из трубы, холодные исходные реагенты, сгоревшие исходные реагенты, металлические частицы, позволявшие задавать граничные стенки. Отверстия трубы для инъекции ГПД заменялись в расчетах восьмью вытянутыми вдоль трубы щелями. Сечение щелей выбиралось из условия соответствия экспериментальным параметрам скорости продуктов детонации, их расхода на единицу длины трубы и оттока внутренней энергии. Для описания химического взаимодействия компонентов среды использовалось, как и ранее в [22], приближение одностадийной брутто-реакции

$$\frac{d\eta}{dt} = -\eta k \exp\left(-\frac{E_a}{E}\right),$$

где η — концентрация исходных реагентов, $E_a = 4.0$ кДж/г — энергия активации реакции, E — внутренняя энергия вещества, $k =$

$8 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ — предэкспонент, t — время. Данная кинетика в связи со сложностью реагирующей системы носит формальный характер и откалибрована по задержкам локального взрыва в пропановоздушных составах при инъекции ГПД на установке ТСД [20].

На рис. 11 приведены результаты моделирования опыта № 2 для оптимального по расчетам сечения с расстоянием от трубы до земли 40 см.

Явление может быть разбито на несколько этапов.

1-й этап. Струйное истечение продуктов детонации из трубы. Формирование перед струями слабой ударной волны, распространяющейся по холодным реагентам, постепенное расширение вокруг трубы области, в которую входят вышедшие из трубы продукты детонации и сгоревшие (первоначально холодные) реагенты, находящиеся снаружи трубы.

2-й этап. Сжатие несгоревших реагентов и ГПД вблизи левого угла у стальной стенки (давление 1.2 МПа и плотность 0.01 г/см^3 подерживались в течение 1 мс).

3-й этап. Локальный взрыв в левом углу (максимальное давление 4.3 МПа).

4-й этап. Выход сильной ударной волны из левого угла. При этом находящаяся рядом поверхность трубы, выступая в качестве жесткой поверхности, не позволяет ослабляться ударной волне, выходящей в зазоры между трубой и землей, трубой и левой стенкой.

5-й этап. Прохождение ударной волны по поджтому приземному слою (и вертикальному слою вдоль левой границы) несгоревших реагентов, приводящее к резкому ускорению скорости выгорания и превращению ударной волны в детонационную через второй локальный взрыв. Следует отметить, что в расчетных сечениях с расстоянием от трубы до земли, большим 40 см, второй локальный взрыв не реализуется, а детонация развивается медленнее из первого локального взрыва.

Важно сказать еще, что в аналогичном моделировании опыта № 1 пропановоздушное облако выгорало без детонации.

2. В обоих проведенных опытах воспроизводилась зона инъекции ГПД установки ТСД [20] без ее основной трубы с коэффициентом масштабирования по разным параметрам от 2 до 20. При этом струи ГПД в опыте № 1 распространялись в объеме модельного облака до его стенок, не встречая жестких преград (кро-

ме поверхности земли). Одна из стенок в опыте № 2 была стальной. Такой подход к постановке опытов, в развитие исследований [20], позволил изучить роль расходимости и сходимости потоков ГПД в зонах смешения с исходными реагентами (при увеличении их масштаба). В [20] это была инъекция ГПД в фиксированный объем внутри основной трубы, в опыте № 1 — цилиндрическая симметрия с расходимостью потоков, в опыте № 2 — наряду с такой же расходящейся цилиндрической симметрией, это еще и область в углу между поверхностью земли и стальной стенкой со схождением потоков.

Попробуем разобраться, почему в опыте № 1 не было перехода горения в детонацию.

В ходе исследования инициирования детонации в свободном объеме газового состава единичной струей продуктов горения из форкамер установлена связь необходимого размера d инициирующего вихревого ядра на выходе из отверстия форкамеры с поперечным размером λ детонационной ячейки исследуемого состава $d \geq 7\lambda$ [16, 17]. Как указывалось выше, в данной работе $\lambda = 5 \div 7 \text{ см}$, значит, по максимуму критический размер ядра струи по названному критерию должен быть около 50 см. Реализованные в данной работе струи ГПД выходят из отверстий диаметрами 20 и 40 мм, т. е. они существенно более тонкие и не могут индивидуально инициировать детонацию. Но совокупность всех струй — это расходящийся конус с диаметром у основания, ограничиваемым только стенками палаток (до 6 м в опыте № 1), и скорость расширения этого образования значительная (более 400 м/с на выходе из трубы). Критерий $d \geq 7\lambda$ явно превышен, но условия для возникновения локального взрыва и развития детонации не достигнуты, в том числе в приземном секторе, где земля оказывала некоторое поддерживающее действие. Если предположить, что большой диаметр отверстий трубы сыграл отрицательную роль, то это представляется маловероятным, так как в условиях установки ТСД [20] при диаметре отверстий перфорации внутренней трубы 7 мм локальный взрыв в стехиометрических пропановоздушных составах возникал с задержками $2 \div 2.5 \text{ мс}$. Увеличение диаметра отверстий до 12 мм приводило к снижению задержек до 1 мс и расширению концентрационного диапазона возникновения детонации до $32 < \eta < 7 \%$ [21].

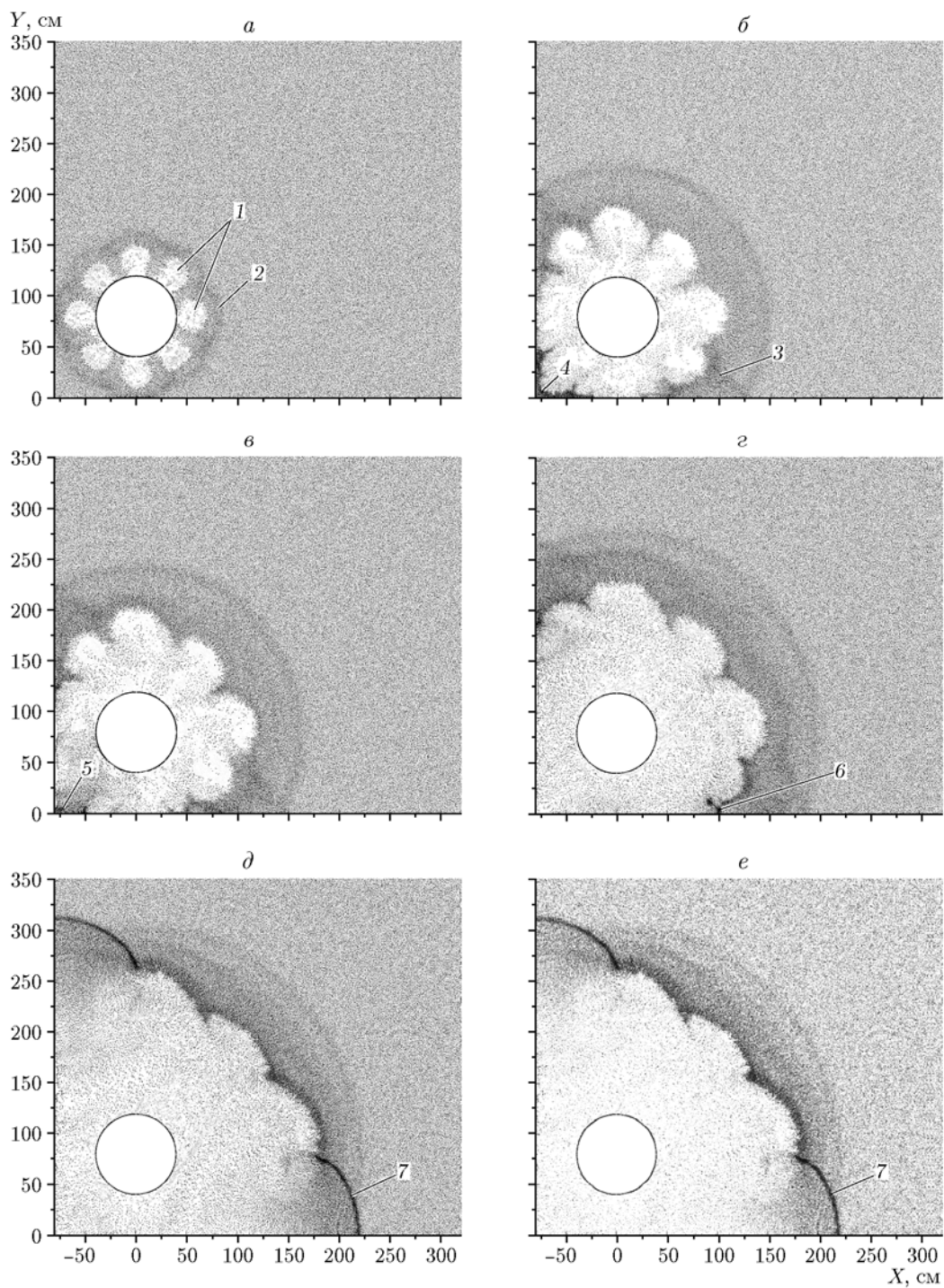


Рис. 11. Двумерное распределение лагранжевых частиц веществ в моменты времени 1.01 (*a*), 2.77 (*б*), 3.17 (*в*), 4.13 (*г*), 4.77 (*д*), 5.29 мс (*е*):

1 — струи ГПД, 2 — ударная волна в исходных реагентах перед струями, 3 — отраженная от земли ударная волна, 4 — поджатые в углу исходные реагенты, 5 — первый локальный взрыв, 6 — второй локальный взрыв, 7 — фронт детонации

Остается предположить, что ключевым фактором, препятствующим возникновению детонации, является цилиндрическая расходимость потоков ГПД (и коническая для совокупности струй). Количественную оценку роли этого фактора выполним следующим образом. Будем считать, что струи ГПД диаметром d_{jet} , занимающие на поверхности трубы радиусом r_{tube} долю поверхности k_{jet} и движущиеся со скоростью U_{jet} , к моменту времени t достигают носовыми частями радиуса r и заполняют цилиндрический объем $V = L\pi(r^2 - r_{tube}^2)$, где L — длина перфорированной части трубы. Плотность вносимой массы ГПД M_{jet} и плотность внутренней энергии Q_{jet} запишутся так: $M_{jet} = \rho U_{jet} 2\pi r_{tube} L k_{jet} t / V$, $Q_{jet} = M_{jet} c$, где c — теплоемкость ГПД. После преобразований получаем $Q_{jet} = 2k_{jet} \rho r_{tube} / (r + r_{tube})$. Видно, что мы имеем снижение внутренней энергии с увеличением радиуса r и объема V смеси с ГПД. Этот вывод справедлив для любого цилиндрического слоя. Такие условия сильно отличаются от условий в трубе установки ТСД, где Q_{jet} со временем только растет, так как струи ГПД не разлетаются дальше стенок основной трубы. Конечно, показанное снижение Q_{jet} могло бы быть незначимым, если бы характерное время τ_{loc} возникновения локального взрыва было малым. Но для наблюдавшегося в [20] среднего значения $\tau_{loc} = 2.8$ мс вещество ГПД «убегает» на расстояние $l = \tau_{loc} U_{jet} = 2.8$ мс \cdot 0.4 м/мс = 1.1 м, да еще со снижением плотности.

Из проведенного рассмотрения следует, что переход горения в детонацию даже в крупномасштабных свободных пропановоздушных облаках не возможен в исследованной конфигурации с цилиндрическим расхождением потока ГПД. Это утверждение можно считать хорошо подтвержденным статистически, поскольку областей с характерным размером 50 см (см. выше), в которых мог бы возникать локальный взрыв, в объеме палаток двух опытов более 3000. Так как изучались наиболее чувствительные околостехеометрические составы, то для богатых и бедных составов утверждение тем более справедливо.

Наличие в опыте № 2 вертикальной жесткой стенки привело к формированию в ограниченной области конфигурации со сходящимися потоками ГПД и в итоге — к возникновению детонации.

ВЫВОДЫ

Проведены два крупномасштабных опыта для проверки влияния расходимости и сходимости потоков ГПД при их многоструйном смешении с пропановоздушными составами в модельных приземных облаках на процесс перехода горения в детонацию в условиях отсутствия ограничивающих жестких стенок и при их наличии с увеличением масштаба зоны смешения. Из результатов опытов и их анализа можно сделать следующие выводы.

1. При увеличении параметров экспериментальной установки и зоны впрыска ГПД в исходный пропановоздушный состав с коэффициентом масштабирования по разным параметрам от 2 до 20 (по отношению к таковым в [20]) не обеспечиваются условия для возникновения локального взрыва и последующего развития детонации в смеси исходных реагентов с ГПД. Причина — цилиндрическая расходимость объемной плотности внутренней энергии, вносимой ГПД в область смешения, при интенсивном сносе потенциальных очагов локального взрыва в область пониженной плотности внутренней энергии. Поддержка поверхностью земли в реализованной конфигурации зоны инъекции ГПД недостаточна, поскольку расходимость потоков у земли сохраняется, хотя и с изменением характера.

2. Введение ограничения пропановоздушного объема одной вертикальной жесткой стенкой приводит к формированию в ограниченной области конфигурации со сходящимися потоками смеси исходных реагентов с ГПД и к созданию условий для возникновения локального взрыва с развитием детонации. Отсюда становится яснее функциональная роль стенки основной трубы установки ТСД в [20]. Она состоит не столько в создании поддерживающего давления, сколько в недопущении расходимости потока при инъекции ГПД в исходные реагенты и обеспечении при этом в фиксированном объеме внутри трубы непрерывного роста вносимой ГПД плотности внутренней энергии Q_{jet} , вплоть до локального взрыва и развития из него детонации.

3. Полученные результаты могут быть использованы для тестирования расчетных моделей и компьютерных программ, разрабатываемых для моделирования промышленных аварий с газовыми выбросами.

Авторы выражают благодарность проф. Дж. Томасу, проф. Д. Деборду, докт. Н. Ай-

зенрайху и докт. Х. Шнайдеру за поддержку проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маршалл В.** Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989.
2. **Когарко С. М.** Исследование давления в торце трубы при нестационарном быстром горении // Журн. техн. физики. — 1958. — Т. 28, вып. 9. — С. 2042.
3. **Соколик А. С., Шелкин К. И.** Распространение пламени в смесях метана с кислородом в закрытых трубах // Журн. физ. химии. — 1933. — Т. 4, вып. 1.
4. **Соколик А. С., Шелкин К. И.** Детонационная способность кислородных смесей углеводородов жирного ряда и ароматических // Журн. физ. химии. — 1933. — Т. 4, вып. 2.
5. **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.
6. **Lee J. H.** Dynamic parameters of gaseous detonations // Ann. Rev. Fluid Mech. — 1984. — V. 16. — P. 311–336.
7. **Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е.** Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 109–131.
8. **Нетлетон М.** Детонация в газах. — М.: Мир, 1989.
9. **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.
10. **Субботин В. А.** Смещение свежей газовой смеси с продуктами реакции как механизм развития взрыва // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 3. — С. 154–158.
11. **Васильев А. А.** Оптимизация перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 25–34.
12. **Фролов С. М.** Ускорение перехода горения в детонацию в газах: от К. И. Шелкина до наших дней // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 13–24.
13. **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.
14. **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.
15. **Carnasciali F., Lee J. H. S., Knystautas R.** Turbulent jet initiation of detonation // Combust. Flame. — 1991. — V. 84. — P. 170–180.
16. **Ungut A., Shuff Ph. J.** Deflagration to detonation transition from a venting pipe // Combust. Sci. Technol. — 1989. — V. 63. — P. 75–87.
17. **Dorofeev S. B., Bezmelnitsin A. V., Sidorov V. P., Yankin J. G., Matsukov I. D.** Turbulent jet initiation of detonation in hydrogen-air mixtures // Proc. 14 Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Coimbra, Portugal, 1–6 August 1993. — D2.4.1, 1–10.
18. **Schildknecht M., Geiger W., Stock M.** Flame propagation and pressure buildup in a free gas-air mixture due to jet ignition // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1984. — V. 94. — P. 474–490.
19. **Hjertager B. H., Fuhre K., Parker S. J., Bakke J. R.** Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1984. — V. 94. — P. 504–522.
20. **Таржанов В. И., Теличко И. В., Вильданов В. Г., Сдобнов В. И., Макаров А. Е., Мухин С. Л., Корецкий И. Г., Огарков В. А., Власов В. В., Зинченко А. Д., Воробьев А. В., Грачев А. Н., Маткин В. А., Поташников В. А.** Детонация пропановоздушных составов при инъекции горячих продуктов детонации // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 3. — С. 100–109.
21. **Таржанов В. И., Вильданов В. Г., Сдобнов В. И., Теличко И. В., Макаров А. Е. и др.** Детонация в пропановоздушных составах при повышенных темпах инъекции горячих продуктов детонации // VII Забабахинские научные чтения, 8–12 сентября 2003 г.: сб. тез. междунар. конф. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. — С. 66.
22. **Таржанов В. И., Литвиненко И. А.** Горение и детонация при струйном замешивании горячих продуктов детонации в пропановоздушные составы // VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 67–71.

Поступила в редакцию 8/IX 2015 г.,
в окончательном варианте — 11/I 2016 г.