

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В АЭРОЗОЛЕ ИЗОПРОПИЛНИТРАТА

Ц.-М. Лю, Ч.-Х. Бай, В.-С. Дай, Л. Цзян

Государственная лаборатория взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института Пекин 100081, Китай, qmliu@bit.edu.cn

Изучены и проанализированы параметры и стадии процесса перехода горения в детонацию (ПГД) в аэрозоле изопропилнитрата (ИПН). Наблюдалось формирование самоподдерживающейся детонационной волны, которой свойственны наличие поперечной волны и структура, характерная для спиновых волн. Определены длина области ПГД и размер шага спиральной траектории, по которой движется центр воспламенения в самоподдерживающейся спиновой детонационной волне. В процессе ПГД наблюдалось формирование волны ретонации. Обнаружены и проанализированы два режима распространения комплекса «ударная волна — зона реакций» в аэрозоле ИПН: высокоскоростного горения и самоподдерживающейся детонации. Изучено влияние концентрации аэрозоля на механизм распространения этого комплекса. Определена минимальная и оптимальная для возникновения ПГД концентрация аэрозоля ИПН. Измерены и рассчитаны скорость и избыточное давление самоподдерживающейся детонационной волны в диспергированном в воздухе ИПН.

Ключевые слова: переход горения в детонацию, изопропилнитрат, аэрозоль, взрыв в многофазной среде.

ВВЕДЕНИЕ

Изопропилнитрат (ИПН) широко применяется в качестве сырья в обрабатывающей промышленности, а также в качестве топлива или добавки к нему в энергетике. В настоящее время вызывает интерес возможность использования ИПН в качестве топлива или добавки к нему для импульсных детонационных двигателей [1]. Скорость детонации мелких капель жидкости, взвешенных в воздухе, обычно примерно на $100 \div 200$ м/с ниже, чем рассчитанная скорость, соответствующая режиму Чепмена — Жуге [2–5]. Концентрационные пределы детонации диспергированных жидкостей или взвешенных твердых частиц в воздухе сильно зависят от размера частиц и их концентрации в смеси, причем предельные концентрации выше, чем в случае газовых смесей [6, 7].

На концентрационные пределы детонации диспергированного в воздухе горючего оказывают влияние различные добавки. В работе [8] установлено, что добавка ИПН к керосину приводит к уменьшению задержки воспламенения за ударным фронтом детонационной волны. Таким образом, введением различных добавок в топливо можно воздействовать на кинетику

тепловыделения в системе аэрозоль горючего/воздух. В работе [9] для определения тяговых характеристик импульсного детонационного двигателя был измерен и рассчитан удельный импульс смесей ИПН/воздух. В работах [10, 11] исследовался процесс перехода горения в детонацию (ПГД) в диспергированном в воздухе *n*-гексане в трубе диаметром 51 мм. Проведенные эксперименты показали, что скорость детонации и максимальное избыточное давление в аэрозоле *n*-гексана составляли соответственно $1700 \div 1800$ м/с и $30 \div 50$ бар. В экспериментах [12] изучался процесс ПГД в диспергированном в воздухе дизельном топливе в трубе (диаметром 80 мм и длиной 2 м), соединенной с камерой (диаметром 150 мм и длиной 150 мм). Детонация в такой системе не возникала, а максимальная скорость комплекса «ударная волна — зона реакций» составила $950 \div 1150$ м/с.

В настоящей работе исследуется процесс ПГД в диспергированном в воздухе ИПН, что представляет интерес с точки зрения безопасности производства и применения ИПН в качестве топлива или добавки к нему в импульсных детонационных двигателях (ИДД). Главным параметром процесса ПГД является его длина, т. е. расстояние от точки зажигания смеси до точки возникновения детонации. Этот параметр характеризует детонационную спо-

Qingming Liu, Chuhua Bai, Wenxi Dai, Li Jiang.
State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, China.

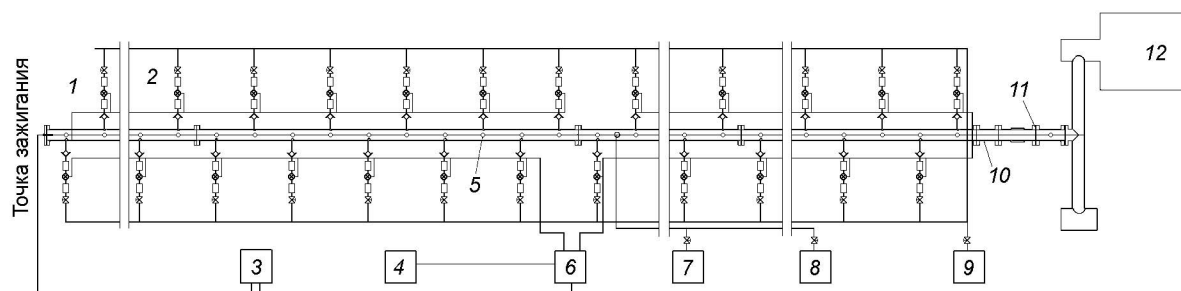


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — экспериментальная труба, 2 — система диспергирования, 3 — система поджига, 4 — система сбора данных, 5 — датчики давления, 6 — блок управления, 7 — вакуумный насос, 8 — система продувки, 9 — воздушный насос, 10 — соединительная секция, 11 — полимерная пленка, 12 — сбросной резервуар

способность горючих смесей. Знание длины области ПГД позволяет сделать грубую оценку наименьшей длины камеры сгорания ИДД, работающего в режиме инициирования ПГД. В работе представлены результаты измерения параметров детонации, таких как скорость и избыточное давление, в диспергированном в воздухе ИПН. Ожидается, что эти данные будут полезны при проектировании безопасных производственных систем, а также для оценки характеристик ИДД.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Используемая в работе установка уже применялась ранее [7, 13]. Она включает в себя экспериментальную трубу, систему электрического поджига, блок управления, систему измерения давления, систему продувки, воздушный насос и резервуар объемом 10 м³, соединенный с тремя экспериментальными трубами (рис. 1). Экспериментальная труба состоит из рабочей секции диаметром 199 мм и длиной 28 м, 40-струйной системы диспергирования жидкостей и переходной секции. В систему поджига входят запальный электрод и генератор зажигания. Система измерения давления включает в себя 16 датчиков давления фирмы «Kistler» и устройство сбора данных. Управление процессом диспергирования ИПН, а также зажигание облака горючего в воздухе и запуск устройства сбора данных осуществлялись с блока управления.

Определенный объем жидкости ИПН отбирался с помощью шприца и вводился в пробоотборные сосуды системы диспергирования. Затем в напорную камеру нагнетался воздух. Концентрация ИПН определялась исхо-

дя из объема трубы и массы распыленного в нее ИПН. Для диспергирования жидкости в воздушную камеру в течение 280 мс нагнетался воздух до давления 0.8 МПа. Начальный диаметр капель ИПН определялся следовым методом. Средний диаметр капель, формируемых системой диспергирования, составлял 25 мкм. После диспергирования жидкости в трубу устанавливалось давление 0.14 МПа.

Энергия зажигания играет важную роль в процессах ПГД в аэрозолях горючего. При мощном инициировании выделяющаяся энергия может оказывать сильное влияние на процессы ПГД, при этом сокращается длина области ПГД. Поэтому в данной работе энергия зажигания была небольшой, но достаточной для того, чтобы осуществить стабильное зажигание смеси и распространение пламени. Поскольку реализовать надежный поджиг смеси ИПН/воздух электрической искрой с энергией 40 Дж не удавалось, аэрозоль ИПН поджигали горящим облаком смеси эпоксипропан/воздух (длиной 2.1 м), зажженной электрической искрой. Содержание эпоксипропана составляло $237 \div 475$ г/м³ при атмосферном давлении, что позволяло варьировать время задержки воспламенения смеси. Стабильное зажигание смесей эпоксипропан/воздух возникало при временах задержки воспламенения $330 \div 530$ мс.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После того как необходимые порции жидкостей ИПН и эпоксипропана были введены в виде аэрозоля в экспериментальную трубу, осуществлялось инициирование взрыва. Сформировавшаяся волна сжатия усиливалась по мере распространения. На рис. 2 представлены ди-

намика избыточного давления p в различных точках трубы и зависимость положения волны сжатия от времени t в процессе ПГД при концентрации ИПН 473 г/м^3 , а на рис. 3 — зависимости скорости v и максимального избыточ-

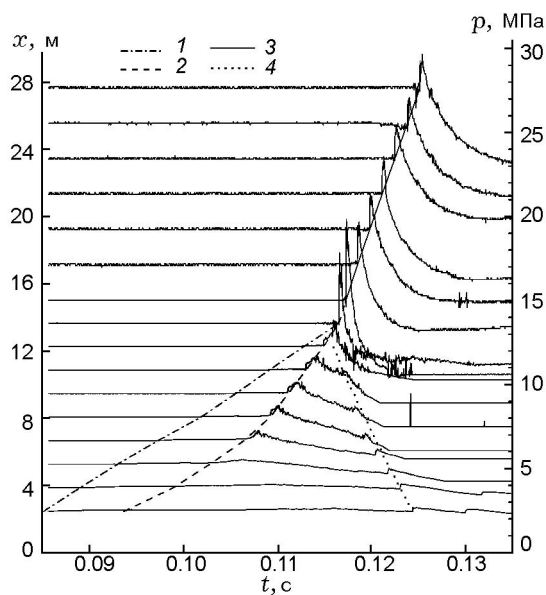


Рис. 2. Изменение давления в различных точках трубы и зависимость положения волны сжатия от времени в процессе ПГД в смеси ИПН/воздух, представленной на рис. 2, а также судя по изменению давления на расстоянии $x = 3.85 \text{ м}$ от точки воспламенения (рис. 4, а), можно сказать, что в самом начале процесса горения ИПН, благодаря слиянию волн давления, порождаемых фронтом пламени, формируется головная волна сжатия, которая распространяется по трубе со скоростью $305 \div 400 \text{ м/с}$. Поскольку скорость реакций в смеси ИПН/воздух невысока и соответственно невелика и скорость распространения пламени, волна сжатия движется значительно быстрее, чем волна горения. Приблизительно через 10 мс скорость реакций стремительно возрастает за счет расширения продуктов сгорания и турбулентности, вызываемой этим расширением. В результате скорость распространения пламени увеличивается и формируется другая волна сжатия, которая усиливается по мере продвижения. Волна, идущая по смеси ИПН/воздух, характеризуется многоволновым фронтом: фронтом головной волны сжатия, фронтом волны сжатия в зоне горения и фронтом волны ретонации (см. рис. 4, б). По мере распространения комплекса «волна сжатия — зона реакций» расстояние между головной волной сжатия и волной сжатия в зоне горения уменьшается. Из типичной динамики давления в положении 3.85 м , представленной на рис. 4, а, видно, что гораздо более мощная волна сжатия формируется за головной волной сжатия. Вскоре после прохождения волны сжатия, сформированной зоной горения, по трубе следует волна ретонации в направлении к источнику зажигания. Из рис. 2 можно определить, что скорость волны ретонации лежит в пределах $1030 \div 1340 \text{ м/с}$.

1 — головная волна сжатия, 2 — волна сжатия в зоне горения, 3 — детонационная волна, 4 — волна ретонации

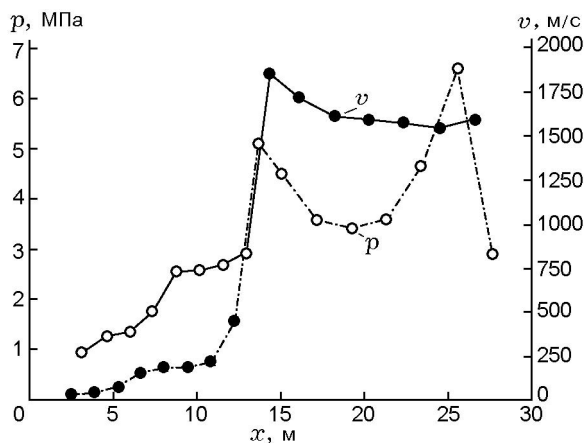


Рис. 3. Скорость и избыточное давление в волне сжатия в аэрозоле ИПН на различном удалении от входа (концентрация ИПН в аэрозоле 473 г/м^3)

ного давления p в волне сжатия от пройденного расстояния x в трубе. Как видно из рис. 2, в процессе ПГД в аэрозоле ИПН формируются четыре типа волн. Процессы, приводящие к образованию волн различной структуры, подробнее описаны ниже.

2.1. Зажигание и формирование волны сжатия в результате медленных реакций

Исходя из зависимости положения волны от времени в процессе ПГД в смеси ИПН/воздух, представленной на рис. 2, а также судя по изменению давления на расстоянии $x = 3.85 \text{ м}$ от точки воспламенения (рис. 4, а), можно сказать, что в самом начале процесса горения ИПН, благодаря слиянию волн давления, порождаемых фронтом пламени, формируется головная волна сжатия, которая распространяется по трубе со скоростью $305 \div 400 \text{ м/с}$. Поскольку скорость реакций в смеси ИПН/воздух невысока и соответственно невелика и скорость распространения пламени, волна сжатия движется значительно быстрее, чем волна горения. Приблизительно через 10 мс скорость реакций стремительно возрастает за счет расширения продуктов сгорания и турбулентности, вызываемой этим расширением. В результате скорость распространения пламени увеличивается и формируется другая волна сжатия, которая усиливается по мере продвижения. Волна, идущая по смеси ИПН/воздух, характеризуется многоволновым фронтом: фронтом головной волны сжатия, фронтом волны сжатия в зоне горения и фронтом волны ретонации (см. рис. 4, б). По мере распространения комплекса «волна сжатия — зона реакций» расстояние между головной волной сжатия и волной сжатия в зоне горения уменьшается. Из типичной динамики давления в положении 3.85 м , представленной на рис. 4, а, видно, что гораздо более мощная волна сжатия формируется за головной волной сжатия. Вскоре после прохождения волны сжатия, сформированной зоной горения, по трубе следует волна ретонации в направлении к источнику зажигания. Из рис. 2 можно определить, что скорость волны ретонации лежит в пределах $1030 \div 1340 \text{ м/с}$.

Из графиков динамики давления (см. рис. 2), а также из зависимостей скорости волны от положения в трубе (см. рис. 3) видно, что на стадии формирования и распространения волны сжатия в результате медленных реакций в промежутке от точки зажигания до от-

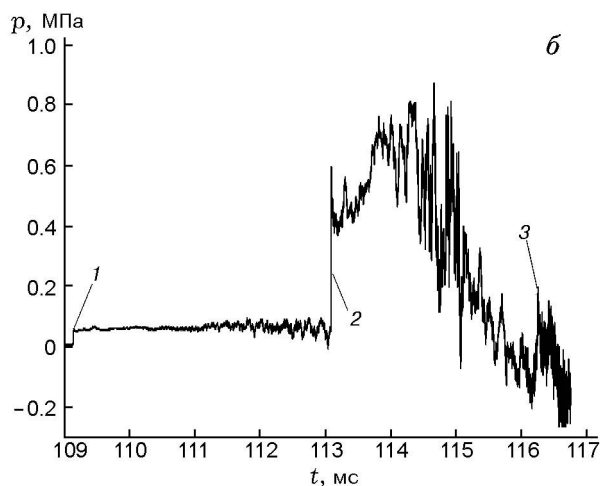
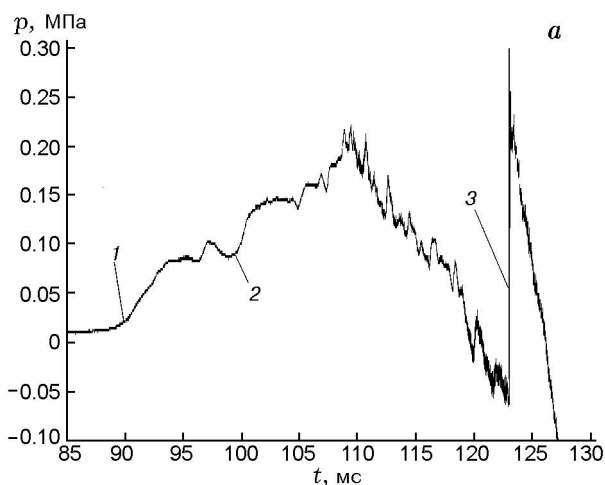


Рис. 4. Типичная динамика давления на стадии формирования и распространения волны сжатия в результате медленных реакций и возбуждения ударной волны в процессе перехода горения в детонацию в аэрозоле ИПН при его концентрации 473 г/м^3 :

a — $x = 3.85 \text{ м}$, *б* — $x = 10.85 \text{ м}$; 1 — фронт головной волны сжатия, 2 — фронт волны сжатия в зоне горения, 3 — фронт волны ретонации

метки 5.25 м волна сжатия, возбужденная процессом горения, характеризуется относительно низкой скоростью и небольшим избыточным давлением. На участке $2.45 \div 5.25 \text{ м}$ волна сжатия немного усиливается: скорость возрастает от 200 до 373 м/с , а избыточное давление — от 0.09 до 0.26 МПа . Средний темп увеличения скорости составляет 62 (м/с)/м , а средняя скорость увеличения избыточного давления — 0.06 МПа/м .

2.2. Ускорение волны сжатия и формирование ударной волны

За счет ускорения волны сжатия и положительной обратной связи между волной сжатия, возбужденной в процессе горения, вторичным дроблением капель, ускорением распространения пламени и процессом турбулизации происходит стремительное увеличение скорости волны горения. В результате имеет место переход от стадии распространения волны сжатия за счет медленных реакций к стадии ускорения волны сжатия и формирования ударной волны.

На этой стадии происходит вторичное диспергирование капель ИПН. Методом, описанным в работе [12], был рассчитан средний диаметр капель ИПН, образующихся при дроблении в процессе ПГД. Жидкость ИПН имеет следующие свойства: плотность — 1.036 кг/м^3 , вязкость — $6.6 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, поверхностное натяжение — $29.3 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$. Средний начальный размер капель ИПН, взвешенных в воздухе внутри трубы, составлял 25 мкм . Скорость движения волны сжатия в зоне горения в различных положениях можно определить, анализируя графики давления, полученные на основе показаний датчиков давления, закрепленных в различных точках трубы. В табл. 1 представлены результаты расчета чисел Вебера, чисел Бонда (Этвёша), диаметров капель ИПН, образующихся в результате вторичного дробления исходного аэрозоля ИПН в различных точках трубы в процессе ПГД. Из этих данных видно, что в начале рассматриваемой стадии на расстоянии 5.25 м от точки зажигания скорость газа относительно капель равна $\approx 52 \text{ м/с}$, число Вебера — 4.0 , число Бонда — 45.5 , а диаметр капель — 25 мкм , т. е. равен исходному. Таким образом, можно сделать вывод, что в точке 5.25 м дробления капель не происходит. По мере распространения волны сжатия ее скорость, скорость газа относительно капель, числа Вебера и Бонда возрастают, а диаметр капель ИПН быстро уменьшается, достигая в конце стадии 1.6 мкм , т. е. каждая исходная капля разбивается на 390 одинаковых капель. Вследствие дробления капель скорость горения ИПН увеличивается.

Из рис. 2 и 3 видно, что на стадии ускорения волны сжатия и формирования ударной волны в промежутке $x = 5.25 \div 8.05 \text{ м}$, считая от точки зажигания, скорость волны сжатия, возбужденной химическими реакциями, увели-

Таблица 1

Результаты расчета при вторичном дроблении исходного аэрозоля ИПН в процессе ПГД

Расстояние от точки зажигания, м	Скорость волны сжатия, м/с	Скорость газа относительно капель, м/с	Число Вебера	Диаметр капле, мкм	Число Бонда
5.25	373	52	4.0	25.00	45.5
8.05	615	356	185.3	1.60	2 858.9
12.95	840	585	501.3	0.71	8 322.5
14.35	1 865	1 502	3 303.5	0.16	60 740.4
>14.35	1 600	1 273	2 371.8	0.22	42 964.9

Примечание. Число Бонда — $(3/8)(C_d \rho v_{rel}^2 / \sigma)$, где C_d — коэффициент сопротивления, ρ — плотность, r — радиус частицы, v_{rel} — относительная скорость, σ — поверхностное натяжение.

чивается с 373 до 615 м/с, а избыточное давление возрастает с 0.26 до 0.63 МПа. Средний темп роста скорости и избыточного давления составляет 86.4 (м/с)/м и 0.13 МПа/м соответственно. После слияния с волной давления, порождаемой фронтом пламени, волна сжатия усиливается, и на расстоянии 8.05 м от точки зажигания формируется ударная волна (безразмерное расстояние составляет 40 диаметров трубы).

2.3. Переход ударной волны в критическую ударную волну

За счет энергии, выделяемой в комплексе «ударная волна — зона реакций», ударная волна усиливается и ускоряется. Анализ динамики давления, определенного по показаниям датчиков на участке трубы $x = 2.45 \div 12.25$ м, а также зависимостей положения волн от времени в процессе ПГД в смеси ИПН/воздух показал, что в точке 12.25 м имеет место вторичный взрыв. В результате этого формируется ударная волна, которая распространяется вперед в сторону свежей горючей смеси и обратно по направлению к продуктам сгорания. Ударная волна, движущаяся в обратном направлении, как видно из рис. 2, порождает волну ретонации, средняя скорость которой $\approx 1\,200$ м/с. Появление головной волны сжатия, волны сжатия в зоне горения и волны ретонации можно также наблюдать на графиках давления (см. рис. 4, а и 4, б). Возникшая в результате вторичного взрыва ударная волна, которая распространяется вперед, усиливает впереди бе-

гущую ударную волну, что приводит к формированию критической ударной волны на отметке 12.95 м. Число Маха при этом составляет ≈ 2.47 , избыточное давление — 3.30 МПа. Как видно из рис. 2 и 3, с момента формирования этой волны начинается ее ускорение и наблюдаются осцилляции максимального избыточного давления. На стадии перехода от ударной волны к критической ударной волне (в промежутке 8.05 ÷ 12.95 м) скорость ударной волны в комплексе «ударная волна — зона реакций» увеличивается с 615 до 840 м/с, а максимальное избыточное давление, осциллируя, возрастает с 0.60 до 3.30 МПа. Эта стадия характеризуется стремительным увеличением скорости ударной волны и стабильным повышением максимального избыточного давления в комплексе «ударная волна — зона реакций». Средний темп увеличения скорости ударной волны и максимального избыточного давления в этом комплексе составляет 46 (м/с)/м и 0.54 МПа/м соответственно. Как упоминалось выше, структура волны в смесях ИПН/воздух характеризуется многоволновым фронтом: фронтом головной волны сжатия, фронтом волны сжатия в зоне горения и фронтом волны ретонации (см. рис. 4, б).

Возбуждение критической ударной волны служит переходом от стадии формирования волны сжатия в результате медленных реакций к стадии формирования ударной волны за счет быстрых реакций. Безразмерное расстояние, на котором наблюдается стадия сжатия за счет медленного горения, составляет около 65 диаметров трубы.

2.4. Переход критической ударной волны в пересжатую детонационную волну

В конце стадии распространения волны сжатия за счет медленных реакций и возбуждения ударной волны формируется критическая ударная волна, которая изменяет механизм воспламенения смеси ИПН/воздух. То есть если до ее формирования свежая смесь воспламенялась за счет тепла, выделяемого при горении турбулентного пламени, то после — за счет тепла, выделяемого при разогреве свежей смеси в ударной волне. На этом этапе, благодаря положительной обратной связи между ускорением горения и процессом турбулизации, комплекс «ударная волна — зона реакций» догоняет фронт головной ударной волны. В результате этот комплекс усиливается и уменьшается размер капель (см. табл. 1) за счет вторичного диспергирования ударной волной. В сравнении со стадией распространения волны сжатия за счет медленных реакций на данной стадии переход критической ударной волны в пересжатую детонационную волну происходит на значительно более коротком участке — $x = 12.95 \div 14.35$ м. Число Маха ударной волны увеличивается с 2.47 до 5.46, а избыточное давление — с 3.30 до 5.10 МПа. Темпы увеличения скорости и избыточного давления 726 (м/с)/м и 2.57 МПа/м соответственно. На стадии формирования и распространения ударной волны за счет быстрых реакций переходные процессы слабее зависят от начальных условий, чем на стадии распространения волны сжатия за счет медленных реакций, в связи с интенсивным энерговыделением и высокими скоростями движения. В настоящем исследовании стадия распространения ударной волны за счет быстрых реакций имела место на участке трубы от $x = 12.95$ м (формирование критической ударной волны) до $x = 14.35$ м (начало распространения пересжатой детонационной волны), т. е. равно примерно семи диаметрам трубы. Эта стадия характеризуется быстрым увеличением избыточного давления и скорости комплекса «ударная волна — зона реакций». С момента возникновения детонации механизм распространения пламени в аэрозоле ИПН изменяется. Если до этого момента перенос тепла осуществлялся за счет турбулентной диффузии позади головной ударной волны, то после начала детонации облако ИПН, находясь в сильно сжатом состоянии, воспламеняется за фронтом головной ударной волны.

2.5. Переход от пересжатой к самоподдерживающейся детонации

Стадия распространения ударной волны за счет быстрых реакций завершается на расстоянии 14.35 м формированием пересжатой детонационной волны, в которой зона химических реакций и фронт ударной волны тесно связаны друг с другом. Эта волна превращается в самоподдерживающуюся детонационную волну, которой свойственно наличие поперечной волны, периодических осцилляций давления за фронтом ударной волны и волновой структуры спиновой детонации. Формирование самоподдерживающейся детонации из слабо пересжатой детонационной волны в многофазной смеси горючее/воздух продемонстрировано в работах [12, 14, 15]. Благодаря наличию поперечной волны, а также взаимодействию между поперечной волной, падающей ударной волной и маховской ножкой, головной фронт детонационной волны колеблется между маховской ножкой и падающей ударной волной трехударной конфигурации. Пройдя через среду с равномерно диспергированным в воздухе ИПН, детонационная волна попадает в переходную секцию трубы, где концентрация ИПН постепенно падает, и в конечном итоге достигает сбросного резервуара.

Скорость самоподдерживающейся детонационной волны в диспергированном в воздухе ИПН была в пределах $1540 \div 1660$ м/с, ее среднее значение 1600 м/с (см. рис. 3). Избыточное давление за детонационной волной изменялось в пределах $3.00 \div 6.60$ МПа, его среднее значение 4.70 МПа. Это можно объяснить взаимодействием между падающей ударной волной, поперечной волной и маховской ножкой. Максимальное давление не было зарегистрировано из-за слишком большой длины шага винтовой траектории (спирали), по которой движется центр воспламенения в детонационной волне. Длину шага этой спирали в самоподдерживающейся детонационной волне можно определить, зная период колебаний давления за фронтом ударной волны и среднюю скорость распространения детонационной волны. Типичная динамика изменения давления представлена на рис. 5. Период колебаний давления за фронтом ударной волны составляет $\approx 0.16 \div 0.23$ мс, таким образом, шаг спирали $0.26 \div 0.368$ м.

На основе элементарной теории были рассчитаны параметры детонации Чепмена — Жуге, а также нижний предел возникнове-

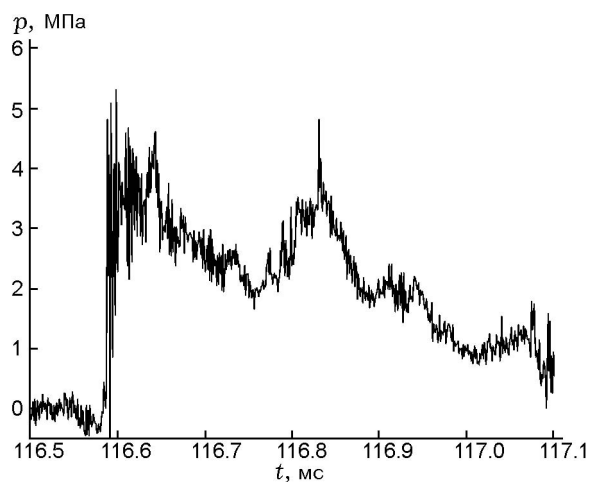


Рис. 5. Типичная динамика давления при самоподдерживающейся детонации в аэрозоле ИПН при его концентрации 473 г/м^3

ния квазидетонации в предположении, что горение происходит при постоянном объеме [7]. На рис. 6 и 7 показаны рассчитанные и измеренные зависимости скорости детонации и избыточного давления от концентрации ИПН и коэффициента избытка горючего ϕ . Оптимальная для детонации концентрация диспергированного в воздухе ИПН, определенная экспериментально, составляет $C_{\text{ИПН}} = 473 \text{ г/м}^3$, что на 54 % выше, чем теоретическое значение 308 г/м^3 . Максимальная скорость детонации, наблюдаемая в эксперименте, оказалась на 8 % ниже рассчитанного значения. Это можно объяснить тем, что для межфазных транспортных процессов при детонации требуется больше времени. Тот факт, что измеренные значения избыточного давления выше предсказанных теоретически, вероятно, обусловлен взаимодействием между падающей ударной волной, поперечной волной и маховской ножкой. Параметры для всех пяти стадий процесса ПГД в аэрозоле ИПН, диспергированном в воздухе, приведены в табл. 2.

2.6. Влияние концентрации ИПН

Различную концентрацию аэрозоля ИПН в экспериментальной трубе создавали путем впрыскивания различных количеств жидкого ИПН. Концентрация ИПН в экспериментах находилась в пределах $378 \div 660 \text{ г/м}^3$. Время задержки воспламенения поддерживалось постоянным и равным 380 мс. Зависимости средней скорости детонации и избыточного давле-

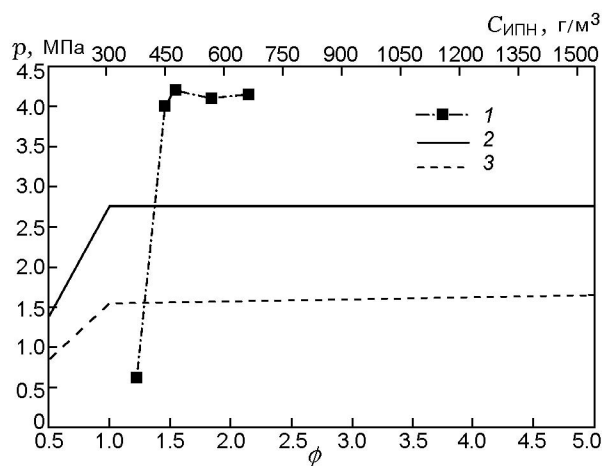


Рис. 6. Зависимость избыточного давления при детонации от концентрации ИПН и коэффициента избытка горючего:

1 — эксперимент, 2 — детонация Чепмена — Жу́ге, 3 — расчет в предположении горения при постоянном объеме

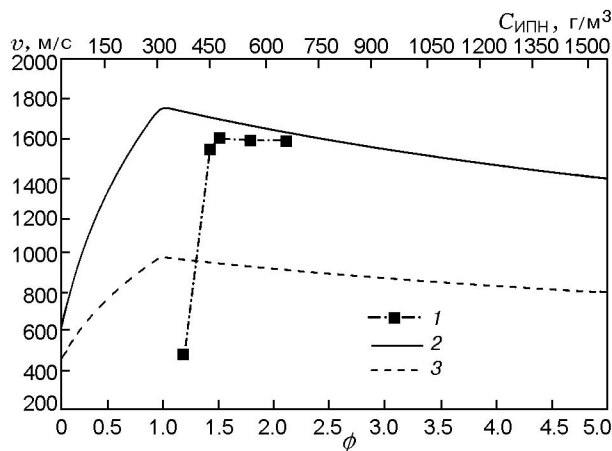


Рис. 7. Зависимость скорости детонации от концентрации ИПН и коэффициента избытка горючего:

1 — эксперимент, 2 — детонация Чепмена — Жу́ге, 3 — расчет в предположении горения при постоянном объеме

ния от концентрации ИПН приведены на рис. 6 и 7. Анализ экспериментальных результатов показал наличие двух режимов распространения комплекса «ударная волна — зона реакций»: высокоскоростного горения и самоподдерживающейся детонации [7]. При $C_{\text{ИПН}} = 378 \text{ г/м}^3$ и $\phi = 1.2$ средняя скорость распространения комплекса достигала $\approx 300 \text{ м/с}$, а среднее избыточное давление — $\approx 0.55 \text{ МПа}$. Из полученных экспериментальных данных, ру-

Таблица 2

Стадии и параметры процесса ПГД в аэрозоле ИПН при его концентрации 473 г/м³

Стадия ПГД	Положение, м	Скорость, м/с	Избыточное давление, МПа	Шаг спирали, м
Формирование и распространение волны сжатия в результате медленных реакций и возбуждение ударной волны				
Сжатие за счет медленных реакций	2.45 ÷ 5.25	200 ÷ 373	0.09 ÷ 0.26	—
Ускорение волны сжатия и формирование ударной волны	5.25 ÷ 8.05	373 ÷ 615	0.26 ÷ 0.63	
Переход ударной волны в критическую ударную волну	8.05 ÷ 12.95	615 ÷ 840	0.63 ÷ 3.30	
Формирование ударной волны за счет быстрых реакций и возникновение детонации				
Переход критической ударной волны в перешагнутую детонационную волну	12.95 ÷ 14.35	840 ÷ 1856	3.30 ÷ 5.10	0.26 ÷ 0.36
Детонация	14.35 ÷ 29.6	1 600	4.70	
Длина области перехода в детонацию	14.35	—	—	

ководствуясь результатами работы [7], можно сделать вывод, что механизм распространения комплекса «ударная волна — зона реакций» в аэрозоле ИПН при $C_{ИПН} = 378 \text{ г/м}^3$ — это высокоскоростное турбулентное горение. При увеличении концентрации ИПН с 378 до 473 г/м³ среднее избыточное давление увеличивается с 0.65 до 4.7 МПа, а скорость — с 300 до 1600 м/с. Из рис. 2, 3, 6, 7, а также из результатов работы [7] следует, что механизм распространения комплекса «ударная волна — зона реакций» при $C_{ИПН} = 473 \text{ г/м}^3$ — самоподдерживающаяся детонация.

На рис. 8 и 9 показаны динамика давления, максимальное избыточное давление и скорость волны давления в процессе распространения комплекса «ударная волна — зона реакций» при $C_{ИПН} = 378 \text{ г/м}^3$. После слияния волн сжатия, порождаемых фронтом пламени, на расстоянии $x = 8.05 \text{ м}$ от точки зажигания формируется ударная волна. В результате комплекс «ударная волна — зона реакций» распространяется в режиме высокоскоростного горения. Волна детонации при этом не формируется. Из рис. 6, 7 видно, что минимальная концентрация ИПН для возникновения ПГД составляет 450 г/м³. При дальнейшем увеличении концентрации ИПН скорость самоподдерживающейся

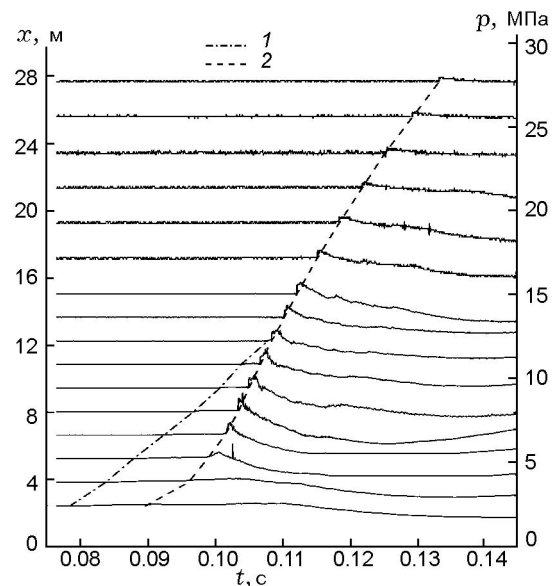


Рис. 8. Изменение давления в различных точках трубы и зависимость положения волны сжатия от времени в процессе перехода горения в детонацию в аэрозоле ИПН при его концентрации 378 г/м³:

1 — головная волна сжатия, 2 — волна сжатия в зоне горения

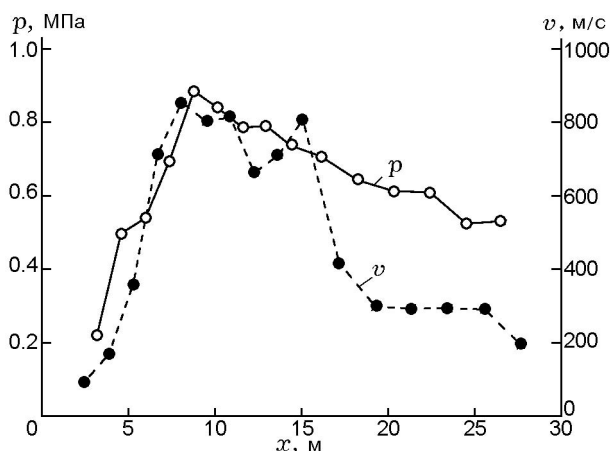


Рис. 9. Зависимости скорости и избыточного давления волны сжатия в аэрозоле ИПН от положения в трубе (концентрация аэрозоля 378 г/м^3)

детонационной волны и избыточное давление в ней остаются постоянными и равными соответственно $\approx 1600 \text{ м/с}$ и $\approx 4.20 \text{ МПа}$. В процессе ПГД в аэрозоле ИПН возникает волна ретонации. Она распространяется по направлению к концу трубы, где осуществлялось зажигание смеси, со скоростью $\approx 1200 \text{ м/с}$. В наших предыдущих экспериментальных работах [6, 7] было показано, что волна ретонации не формируется в процессе ПГД в таких системах, как алюминиевая пудра/воздух, аэрозоль нитрометана, а также в смесях аэрозоль нитрометана/алюминиевая пудра/воздух. Оптимальная концентрация ИПН для возникновения ПГД в аэрозоле ИПН составляет 473 г/м^3 (это соответствует значению $\phi = 1.5$), что больше, чем для аналогичной газовой смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

• В рассматриваемых в данной работе экспериментальных условиях процесс ПГД в аэрозоле ИПН имел место на участке длиной 14.35 м . Сформировавшаяся самоподдерживающаяся детонационная волна распространялась со скоростью $1540 \div 1660 \text{ м/с}$, ее средняя скорость $\approx 1600 \text{ м/с}$. Избыточное давление в детонационной волне изменялось в пределах $2.90 \div 6.60 \text{ МПа}$, его среднее значение 4.75 МПа . Сформировавшейся детонационной волне свойственны наличие поперечной волны и структура, характерная для спиновых волн, с шагом спирали, по которой движется центр воспламенения, равным $0.26 \div 0.36 \text{ м}$.

• На стадии распространения волн в результате медленных реакций структуру волны сжатия в процессе ПГД составляют головная волна сжатия, волна сжатия в зоне горения и волна ретонации.

• В процессе ПГД в аэрозоле ИПН возникла ретонация. Средняя скорость волны ретонации примерно 1200 м/с .

• Минимальная концентрация аэрозоля ИПН для возникновения ПГД составляла 450 г/м^3 . Оптимальная для возникновения ПГД концентрация ИПН — 473 г/м^3 . При концентрации ИПН 450 г/м^3 распространение комплекса «ударная волна — зона реакций» происходило в режиме самоподдерживающейся детонации, а при уменьшении до 378 г/м^3 — в режиме высокоскоростного горения.

Работа поддержана Государственным фондом естественных наук Китая (грант № 10772032) и фондом Государственной лаборатории взрывных процессов и технологий (гранты № ZDKT08-2-6, YBKT09-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 545–672.
2. Brophy C. M., Netzer D. W., Sinibaldi J., Johnson R. Detonation of a JP-10 aerosol for pulsed detonation applications // High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control / G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov (Eds). — Moscow: Elex-KM, 2001. — P. 207–222.
3. Baklanov D. I., Gvozdeva L. G., Scherbak N. B. Detonations of hydrocarbon-air mixtures in a pulse detonation chamber // Advances in Confined Detonations / G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov (Eds). — Moscow: Torus Press, 2002. — P. 225–230.
4. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Initiation of confined spray detonation by electric discharges // Confined Detonations and Pulse Detonation Engines / G. D. Roy, S. M. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov (Eds). — Moscow: Torus Press, 2003. — P. 157–174.
5. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Initiation of spray detonation by successive triggering of electric discharges // Advances in Confined Detonations / G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov (Eds). — Moscow: Torus Press, 2002. — P. 150–157.

6. Liu Q. M., Li X. D., Bai C. H. Deflagration to detonation in aluminum dust-air mixture under weak ignition condition // *Combust. and Flame*. — 2009. — V. 156. — P. 914–921.
7. Liu Q. M., Bai C. H., Jiang L., Dai W. X. Deflagration-to-detonation transition in itromethane mist/aluminum dust/air mixtures // *Combust. and Flame*. — 2010. — V. 157. — P. 106–117.
8. Borisov A. A., Gelfand B. E., Timofeev E. I., Tsyganov S. A., Khomik S. V. Self-ignition of atomized liquid fuel in gaseous medium // *Flames, Lasers, and Reactive Systems* / J. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). — 1983. — P. 239–251. — (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 88).
9. Borisov A. A., Mailkov A. E., Sumskoj S. I., Shamshin I. O., Barykin A. E., Komissarov P. V., Silakova M. A., Elshin R. N. Comparison of impulse generated by gaseous detonations and shock waves supported by heterogeneous reactions // *Advances in Confined Detonations* / G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov (Eds). — Moscow: Torus Press, 2002. — P. 158–160.
10. Frolov S. M., Basevich V. Ya. Spray detonation ignition by controlled trigger of electric dischargers // *J. Propulsion Power*. — 2005. — V. 21. — P. 54–64.
11. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Optimization study of spray detonation initiation electric discharges // *Shock Waves*. — 2005. — V. 14. — P. 175–186.
12. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Khadem J., Alyari-Shourekhdeli Sh. Onset of detonation in polydispersed fuel-air mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31. — P. 2195–2204.
13. Liu Q. M., Bai C. H., Li X. D., Jiang L., Dai W. X. Coal dust explosions in a large-scale tubes // *Fuel*. — 2010. — V. 89. — P. 329–335.
14. Smirnov N. N., Tyurnikov M. V. A study of deflagration and detonation in multiphase hydrocarbon-air mixtures // *Combust. and Flame*. — 1994. — V. 96. — P. 130–140.
15. Smirnov N. N., Zverev N. I., Tyurnikov M. V. Two-phase flow behind a shock wave with phase transition and chemical reactions // *Intern. J. of Experim. Thermal and Fluid Sci.* — 1996. — V. 13. — P. 11–20.

*Поступила в редакцию 4/V 2010 г.,
в окончательном варианте — 11/X 2010 г.*
