

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В УПРАВЛЯЕМОМ ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ (ОБЗОР)

Т. В. Баженова, В. В. Голуб

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН
125412 Москва, bazhenova@ihed.ras.ru

В обзоре рассмотрены научные проблемы, возникающие в связи с созданием различных устройств с использованием детонации в управляемом частотном режиме (пульсирующая детонация). Частота циклов может варьироваться путем независимого инициирования детонации контролируемой системой поджига. Рассмотрены проблемы инициирования детонации применительно к частотному режиму: прямое инициирование, переход от дефлаграции к детонации, переход сформированной в узком канале детонационной волны в широкий канал. Рассмотрен вопрос о возможности использования термохимической конверсии в устройствах с пульсирующей детонацией. Приведены примеры применений на практике устройств с пульсирующей детонацией (пульсирующий детонационный двигатель, использование пульсирующей детонации для сверления и дробления пород, освобождение резины от металлокорда в изношенных автопокрышках).

Ключевые слова: детонация, частотный режим, инициирование детонации, термохимическая конверсия, пульсирующий детонационный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Использование газовой детонации обосновано стремлением наиболее эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию. Преимущество детонационного режима горения по сравнению с дефлаграционным состоит в более быстром выделении энергии. Это позволяет проектировать двигатели с высокой удельной мощностью. При детонационном сжигании кислородоводородной газовой смеси удельная мощность энерговыделения может на порядок превосходить удельную мощность ракетных кислородоводородных двигателей. Параметры газа при детонационном сжигании во много раз больше, чем при обычном сжигании.

Использование детонации в камере сгорания предполагает воздействие продуктов детонации на некоторую рабочую поверхность. При детонации резко возрастает давление продуктов сгорания, импульс давления воздействует на рабочую поверхность. Затем продукты сгорания расширяются, охлаждаются и выбрасываются в окружающее пространство, освобождая объем для новой порции газов. В пульсирующем детонационном устройстве цикл повторяется с определенной частотой.

Преимущество пульсирующего детонационного устройства состоит в том, что в нем ис-

пользуется цикл, близкий к термодинамическому циклу при постоянном объеме. На это впервые указал Я. Б. Зельдович [1].

Наиболее интересным применением пульсирующего детонационного устройства является пульсирующий детонационный двигатель (ПДД).

Проблема пульсирующей детонации широко обсуждалась в научной литературе [2–7]. Специальные сессии конференций были посвящены этой проблеме [8–11]. Было выяснено, что идеализированная схема процессов в ПДД, положенная в основу расчетов, сильно отличается от реальности. Отметим основные трудности, над преодолением которых работают научные коллективы.

1. В основу расчетов тяги ПДД закладывается представление о том, что в камере возникает стационарная детонация (режим Чепмена — Жуге). В реальности после поджига смеси переход дефлаграции в детонацию происходит на значительном расстоянии. Полученная в экспериментах скорость образовавшейся детонационной волны не сразу достигает значений скорости стационарной детонации Чепмена — Жуге [12].

2. Экспериментальные исследования многоимпульсной детонации ограничены сильным нагревом камеры.

3. Смешение вводимых топлива и окис-

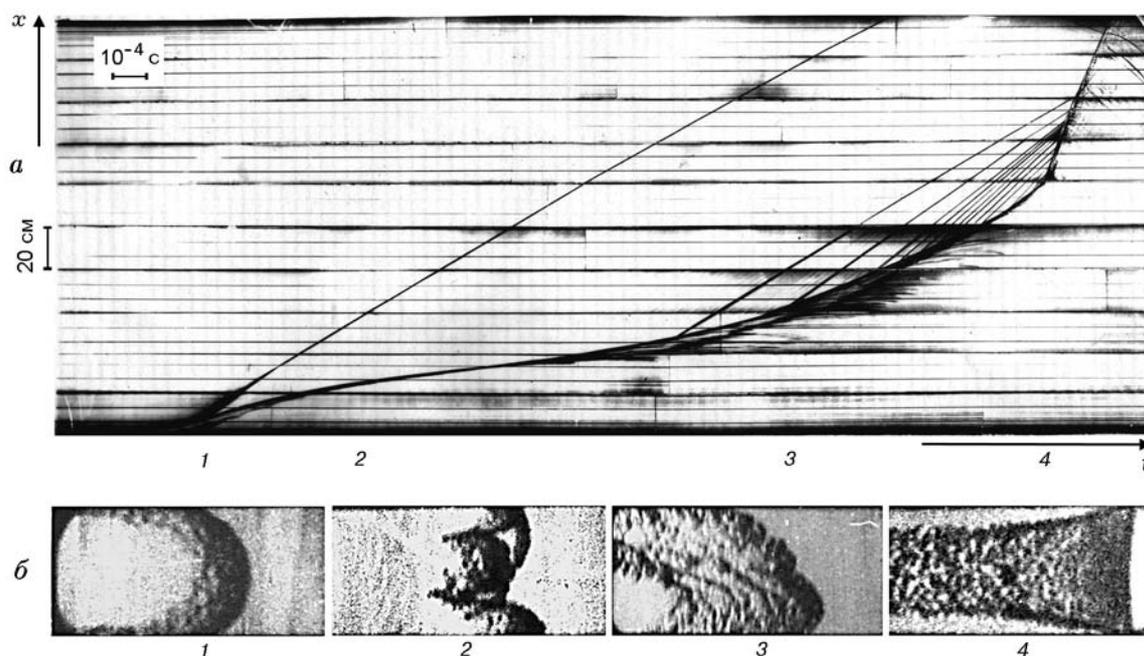


Рис. 1. Временная развертка теневой картины движения фронта пламени и ударных волн при формировании детонации в трубе (*a*), покадровая съемка теневой картины фронта пламени (*б*): 1–4 — номера кадров, полученных в моменты времени от начала процесса, отмеченные на развертке

лителя происходит не мгновенно, необходимы специальные меры для уменьшения пути смешения.

В данном обзоре мы остановимся на двух первых проблемах из перечисленных выше, связанных с изучением ПДД. Вопрос об интенсификации смешения требует отдельного рассмотрения.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ

Переход от дефлаграции к детонации

Детонация формируется при распространении пламени в трубе в результате ускорения и сжатия смеси перед фронтом пламени. Расстояние, на котором происходит переход дефлаграции в детонацию, ограничивает возможность использования детонации в частотном режиме, поэтому рассмотрим подробнее механизм возникновения детонации при движении пламени в канале. На рис. 1, *a* приведена временная развертка движения фронта пламени в трубе длиной 2 м и диаметром 4 см [13, 14]. Процесс формирования детонации в данных условиях хорошо воспроизводился, что дало возможность смонтировать траектории фронта

пламени и волн сжатия, полученные в разных опытах при фоторегистрации теневой картины процесса последовательно на разных участках трубы. Дополнительно были получены серии мгновенных фотографий теневой картины в канале квадратного сечения трубы на каждом ее участке с частотой 40 000 кадр/с. Наиболее характерные кадры приведены на рис. 1, *б*. На рис. 1, *a* отмечены номера кадров, полученных в соответствующие моменты времени от начала процесса. Анализ развертки в сочетании с теневыми фотографиями фронта пламени позволил построить следующую картину перехода от дефлаграции к детонации при распространении пламени в трубах.

После зажигания смеси у торца трубы возникает слабая звуковая волна, которая не влияет на формирование детонации. На начальной стадии фронт пламени имеет выпуклую менискообразную форму (кадр 1 на рис. 1, *б*). По мере распространения пламени и увеличения объема, занятого сгоревшей смесью, выталкивающее действие продуктов реакции уменьшается, что обуславливает замедление фронта пламени. Когда давление за фронтом пламени становится меньше давления перед фронтом, возникает поток газа, направление которого проти-

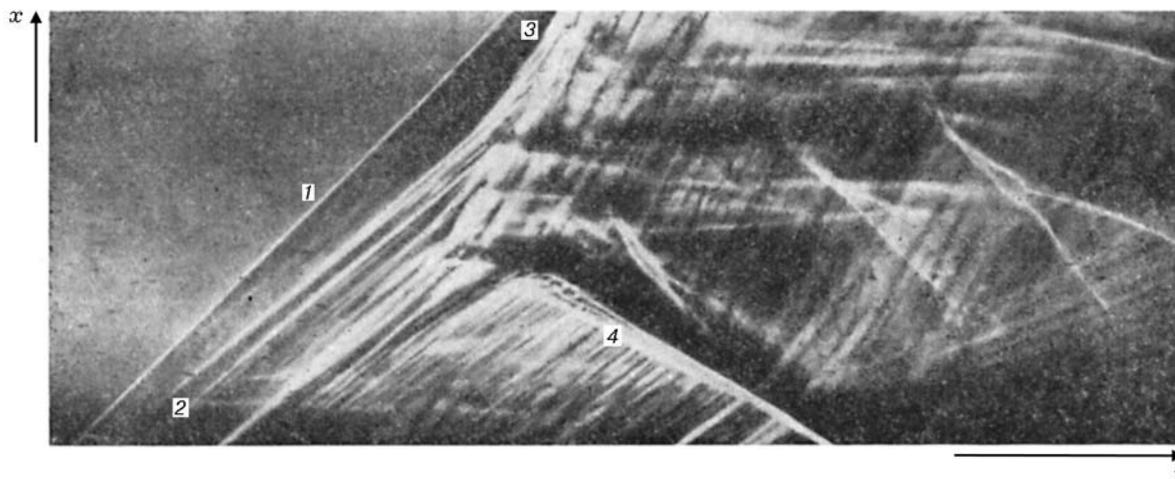


Рис. 2. Временная развертка теневой картины возникновения детонации за фронтом воспламеняющей ударной волны ($\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 0,1$ атм, $M_0 = 3,8$):

1 — ударная волна, 2 — очаги воспламенения, 3 — волна детонации, 4 — волна ретонации

воположно направлению распространения пламени. Фронт пламени приобретает тюльпанообразную форму (кадр 2 на рис. 1, б), общая поверхность фронта пламени увеличивается, и скорость пламени начинает снова расти. Форма фронта пламени приобретает несимметричный относительно оси трубы вид (кадр 3 на рис. 1, б). Это связано с тем, что более тяжелая свежая смесь растекается по нижней поверхности трубы, а продукты сгорания, будучи более легкими, стремятся расположиться в ее верхней части. Вследствие влияния силы тяжести возникают конвективные токи, увеличивающие скорость пламени в верхней части и уменьшающие ее в нижней части камеры. В этой стадии перед ускоренно распространяющимся фронтом пламени формируется большое количество возмущений, образующих ударные волны в непосредственной близости перед фронтом. Пламя распространяется по смеси, возмущенной ударными волнами. Расчет состояния газа за серией ударных волн, видимых на фоторазвертке (см. рис. 1, а), показывает, что в объеме перед фронтом пламени температура смеси становится близкой к температуре самовоспламенения. В условиях высокой температуры и давления за ударными волнами процесс сгорания происходит настолько быстро, что для образования детонационного фронта нет необходимости в слиянии ударной волны и фронта пламени. На стадии, непосредственно предшествующей переходу в дето-

нацию, ударный разрыв и фронт пламени составляют единый комплекс, перемещающийся с одной скоростью. За фронтом пламени вытягивается длинный кометообразный хвост, в котором идет догорание (кадр 4 на рис. 1, б).

Для объяснения механизма перехода дефлаграции в детонацию выдвинуты различные механизмы. В работе [15] ускорение пламени рассматривается как результат турбулизации газа перед фронтом пламени. В [16] выдвинута идея «взрыва во взрыве», опирающаяся на описанное выше явление самовоспламенения смеси за ударной волной. В [17] рассматривается механизм градиентного ускорения пламени. В работе [18] исследовано влияние на переход от дефлаграции к детонации таких факторов, как турбулизация потока, изменение температуры и состава горючей смеси. Исследовано также влияние возбуждения электронного состояния молекул кислорода с помощью электрического разряда на переход от дефлаграции к детонации [19].

Иницирование детонации за слабыми ударными волнами

Процесс иницирования детонации за ударными волнами в ударных трубах хорошо изучен [14, 20, 21]. Если температуры и давления за ударной волной недостаточно для мгновенного воспламенения газовой смеси, то после разрыва диафрагмы развивается такое же течение, как в инертном газе. Через неко-