

# ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ: ОТ КАТАСТРОФ К НОВЫМ ТИПАМ ДВИГАТЕЛЕЙ



**Павел Кривошеев,**  
завлабораторией физико-химической  
гидродинамики Института  
тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова  
НАН Беларуси, кандидат  
физико-математических наук

Горение как явление известно человечеству и используется им на протяжении многих тысяч лет как одна из самых древних и важнейших технологий. Даже в настоящее время львиная доля всей энергии, вырабатываемой и потребляемой человеком, приходится на процессы горения. Различают медленное горение с дозвуковой скоростью, или дефлаграцию, и быстрый, сверхзвуковой режим – детонацию. В первом случае пламя (волна реакции) распространяется по смеси в основном за счет теплопроводности. Более сложен процесс детонационного горения, который характеризуется комплексом, состоящим из ударной волны и следующей за ней зоны химической реакции, возбуждаемой ударным сжатием газа. Такой комплекс принято называть детонационной волной.

## КЛАССИЧЕСКАЯ (ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ) ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ

Термин «детонация» происходит от французского *detonner* – фальшивить, звучать не в тон, то есть изначально под этим явлением понимали «фальшивое горение». Принято считать, что оно было открыто в 1881 г. независимо друг от друга французами Л. Малляром и Г. Ле Шателье, а также М. Бертелло и П. Виетем в ходе работ по изучению распространения пламени в трубах. Исследования проводились по заданию горнопромышленного комитета Франции после серии страшных катастроф, связанных со взрывами газа в шахтах Бельгии и Франции.

Классическая, или, как ее еще иначе называют, гидродинамическая теория детонации была разработана Д. Чепменом и Е. Жуге в 1899–1905 гг. и построена по аналогии с теорией ударных волн, базировавшейся на работах У.Д. Рэнкина и П.А. Гюгонио. В ней предполагается, что детонационная волна представляет собой бесконечно тонкую зону, в которой претерпевают разрыв все параметры смеси и потока, в том числе и химический состав.

Ранее, в 1890 г., российский ученый В.А. Михельсон, анализируя законы сохранения по разные стороны фронта детонационной волны, обнаружил существование двух возможных решений, из которых на основе экспериментальных данных было выбрано единственное, соответствующее минимальной скорости детонации. Однако работы Михельсона долгое время оставались неизвестными за пределами России, и поэтому элементарную теорию детонации стали связывать только с именами Чепмена и Жуге.

Чепмен предложил правило отбора скорости детонации, которое заключалось в выборе решения с минимально возможной скоростью, а Жуге дополнил эту гипотезу еще одним дополнительным условием – скоростью звука в продуктах сгорания детонации в точности равна скорости распространения стационарной детонационной волны относительно продуктов сгорания.

Классическая теория (Чепмена – Жуге) позволила разработать элементарную методику расчета скорости детонации (скорость идеальной детонации Чепмена – Жуге), но не смогла объяснить некоторые исходные положения расчета, в частности существование минимальной скорости детонации для идеального газа.

## ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ ЗЕЛЬДОВИЧА – НЕЙМАНА – ДЕРИНГА

Бурное развитие тематики, связанной со взрывчатыми веществами, в 1930–1940-х гг. и вызванное этим появление новых экспериментальных данных, которые не укладывались в рамки существовавшей классической теории, привело к необходимости более детального анализа механизма распространения и структуры волны газовой детонации. Проблема была чрезвычайно актуальна, и практически в одно и то же время, независимо друг от друга, было издано несколько очень близких по своим идеям и содержанию работ: Я.Б. Зельдовича и А.А. Гриба (1940 г.) в СССР, Дж. фон Неймана (1942 г.) в США и В. Деринга (1943 г.) в Германии.

В рамках одномерной теории, получившей название модели Зельдовича – Неймана – Деринга (ЗНД), структура детонационной волны включает в себя последовательно в направлении газового потока ударную волну, зоны индукции и химической реакции и волну разрежения. Быстрый нагрев и сжатие газа при переходе через фронт ударной волны приводит к тому, что за это время химический состав смеси не успевает измениться, и реакция происходит в уже сжатом веществе с некоторым эффективным периодом индукции воспламенения за передним фронтом детонационной волны. Выделение энергии в сжатом и нагретом веществе приводит к подъему температуры в зоне реакции и последующему расширению продуктов реакции в волне разрежения.

Теория детонации Зельдовича – Неймана – Деринга предполагает наличие гладкого фронта волны, она основана на решении одномерных уравнений газовой динамики и химической кинетики и применима лишь при условиях, допускающих усреднение параметров в детонационной волне.

## СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Несмотря на физическую ясность интерпретации течения в детонационном фронте, структура волны, описываемая моделью ЗНД, в реальности почти никогда не встречается. Многие исследования показали, что детонационная волна в газовой смеси представляет собой сложное трехмерное и нестационарное образование как вблизи, так и вдали от пределов ее распространения.

Еще в 1926 г. англичане С. Кэмпбелл и Д. Вудхед обнаружили явление спиновой детонации (от англ. spin – вращение), которое состоит в том, что в тру-

бах при определенных режимах распространения (вблизи пределов существования детонации) наиболее яркое свечение фронта волны наблюдается вблизи стенки. Оно существует в ядре (иначе еще называют голове) спина, которое вращается по окружности одновременно с поступательным движением фронта волны. Траектория движения такого ядра относительно стенок трубы образует спираль с шагом, примерно равным трем диаметрам, угол с образующей близок к  $45^\circ$  (рис. 1). В дальнейшем явление спиновой детонации было детально исследовано К.И. Щелкиным, который обнаружил и объяснил излом в ее фронте, связанный с существованием известной в газодинамике структуры – тройной маховской конфигурации скачков плотности. Это не укладывалось в рамки классической гидродинамической теории и трактовалось как частный, предельный случай.

В 1957–1958 гг. детальные экспериментальные исследования (Б.В. Войцеховский, Р.И. Солоухин, Ю.Н. Денисов, В.В. Митрофанов, Я.К. Трошин, М.Е. Топчийн) показали, что детонационная волна обладает сложной ячеистой структурой, в ее фронте всегда фиксируются сильные движущиеся неоднородности – поперечные волны (рис. 2). Упрощенно фронт стационарной детонационной волны представляет следующую регулярную, строго периодическую структуру. Передней поверхностью является фронт ударного сжатия, состоящий из выпуклых участков (рис. 2). Точки сопряжения (или излома) – тройная маховская конфигурация, в которой помимо головной и отраженной

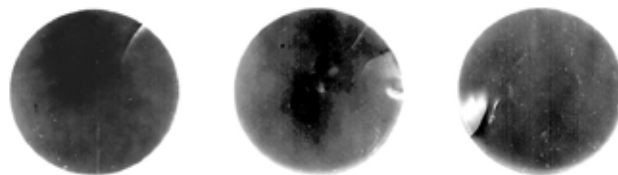
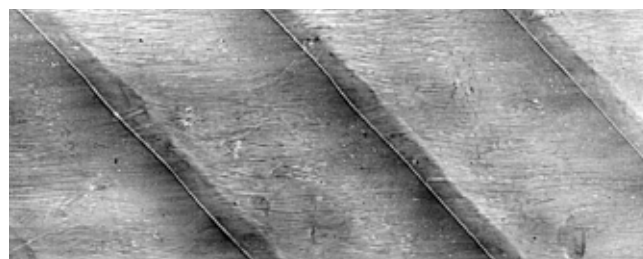


Рис. 1. Следовые отпечатки движения фронта спиновой детонационной волны на боковой поверхности и в поперечном сечении круглой трубы диаметром 25 мм. Смесь ацетилен-кислород-аргон. Эксперименты Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

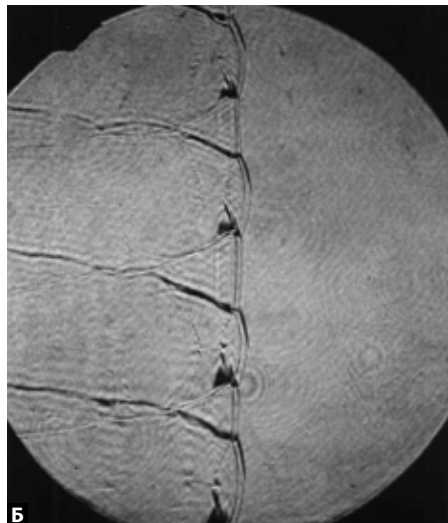
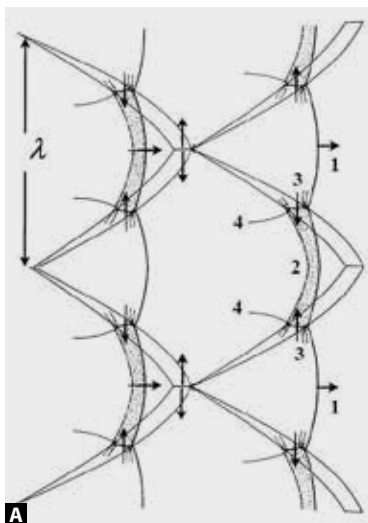


Рис. 2. А) условная схема структуры реальной многофронтной детонационной волны (распространяется слева направо): 1 – головная ударная волна, 2 – зона реакции, 3 – «тройные» точки, 4 – поперечные волны,  $\lambda$  – поперечный размер детонационной ячейки, ромбовидные структуры – траектории (во времени) движения тройных точек; Б) теньевые (шлирен) фотографии детонации в смесях ацетилен-кислород-аргон. Иллюстрация из «Austin, Joanna Maria Karol (2003). The Role of Instability in Gaseous Detonation. Dissertation (Ph.D.). California Institute of Technology»

волн присутствует и третья, поперечная, которая распространяется по зоне реакции и продуктам сгорания. Системы поперечных волн периодически попарно сталкиваются. Траектории движения точек излома, или же тройных точек, выглядят как регулярная, периодическая, ромбовидная структура (рис. 3). Таким образом, детонационная волна – это пульсирующий, периодический процесс, при котором участки переднего фронта, характеризующиеся повышенным давлением и температурой, движутся навстречу друг другу по его поверхности. Участки эти сталкиваются между собой, расходятся, а затем вновь сталкиваются. Кроме того, позднее было обнаружено, что в зависимости от состава смеси детонационная волна может обладать как регулярной, так и нерегулярной структурой, способна «перестраиваться» по мере распространения из одного режима в другой, меняя ее. В дальнейшем было показано, что для определенного класса топливно-окислительных смесей характерна двухразмерная, или же бифуркационная, структура, когда внутри крупномасштабных возмущений наблюдаются также и мелкомасштабные.

Кроме стационарных возможны галолирующие режимы распространения, когда детонационная волна пульсирует вдоль оси трубы, то затухая, то возникая вновь, с шагом пульсаций, который составляет сотни калибров трубы.

Следовательно, вместо одномерной стационарной структуры детонационной волны, соответствующей простейшему решению уравнений гидродинамики

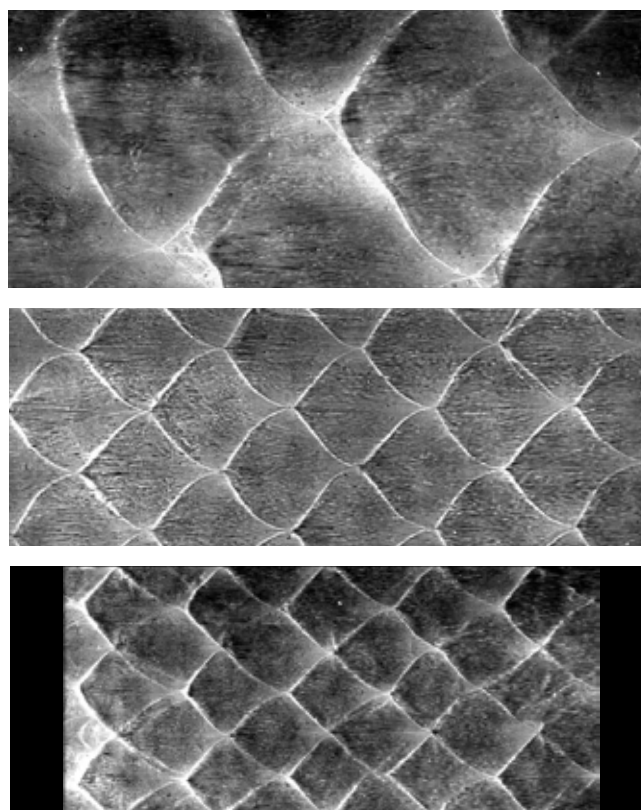


Рис. 3. Следовые отпечатки движения фронта детонационной волны на боковой поверхности круглой трубы диаметром 25 мм. Режимы распространения с одной, двумя и тремя регулярными ячейками. Смесь ацетилен-кислород-аргон. Эксперименты Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

и химической кинетики, распространение детонации в газах сопровождается образованием сложного течения в ее фронте. Период повторения элементов структуры течения в пространстве по мере движения детонационной волны – размер детонационной ячейки – играет роль основного масштаба, на котором вследствие самоорганизации течения восстанавливаются локальные значения максимального энерговыделения и устанавливается режим самоподдерживающегося распространения детонации. Ввиду этого длина или ширина ячейки стала одним из универсальных размерных параметров, с которым сопоставляются масштабы наблюдаемых явлений: размеры зон химической реакции, диаметры детонационных труб и зарядов, геометрические размеры каналов, зоны распределения энергии при инициировании. В табл. 1 представлены размеры детонационной ячейки для некоторых топливно-окислительных смесей при нормальных начальных условиях. С ростом давления размер детонационной ячейки начинает экспоненциально уменьшаться.

Таким образом, основной особенностью процессов, проходящих во фронте детонации, является их сложный трехмерный характер. Законченной теоретической модели, позволяющей предсказывать поведение и свойства трехмерной детонации для произвольных граничных условий, еще не существует, хотя во многих работах предприняты попытки такого описания.

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Эффект возбуждения горения или детонации обычно носит пороговый характер. Для горючей смеси минимальную энергию инициатора, обеспечивающего гарантированное возбуждение горения или детонации, называют критической энергией инициирования. Эта величина служит мерой пожарной или детонационной опасности смеси – чем она меньше, тем более опасна с точки зрения горения или детонации смесь. Например, при нормальных условиях (атмосферное давление и температура 20 °С) для воспламенения идеально перемешанной стехиометрической водородно-воздушной смеси требуется приблизительно 0,017 мДж, а для прямого инициирования детонации – около 4000 Дж (1 г тротила). Для смеси метана с воздухом минимальная энергия зажигания составляет  $10^{-3}$  Дж, а энергия инициирования детонации –  $10^8$  Дж (десятки кг тротила).

Среди классических и достаточно подробно изученных способов возбуждения детонации в объеме реагирующей смеси, как правило, выделяют следующие:

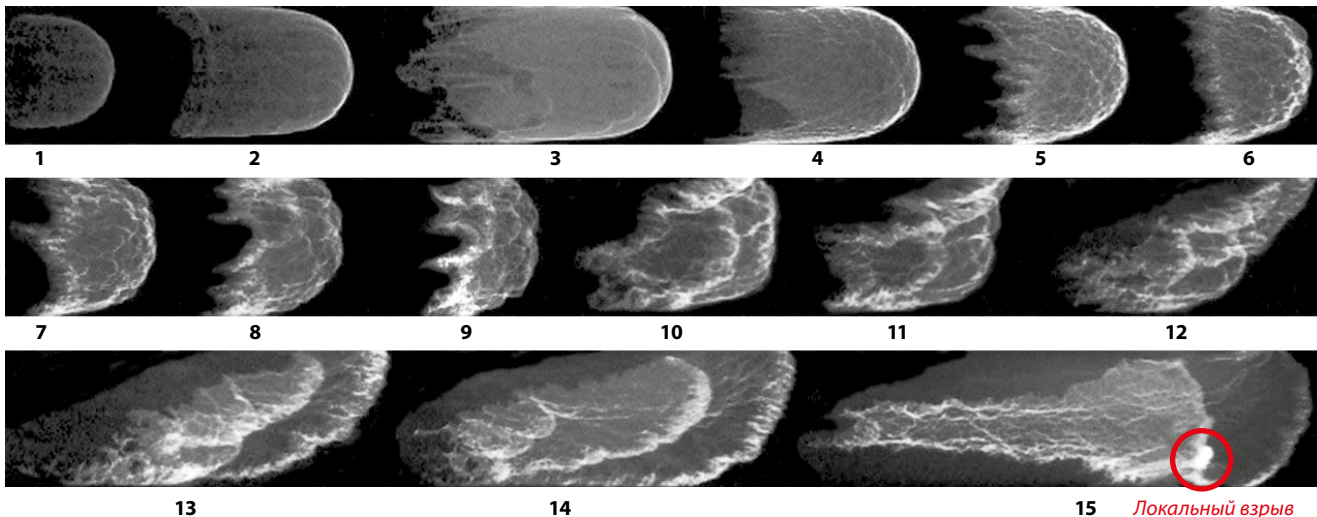
- *прямое инициирование путем быстрого локализованного выделения энергии, вызванного различными источниками: взрывчатые вещества, накал нитей, лазерный пробой, высоковольтный разряд и т.д.;*
- *инициирование при выходе детонационной волны, сформировавшейся в трубе малого диаметра, в объем или в канал с большим поперечным сечением и, кроме того, инициирование при выходе детонации из отверстий различной формы (круглое, эллиптическое, треугольное, прямоугольное и т.д.);*
- *зажигание смеси маломощным источником энергии с последующим переходом горения в детонацию (ПГД).*

К настоящему времени разработаны аналитические модели, описывающие процессы прямого инициирования детонации в объеме, предложена классификация по виду инициирования (плоское, цилиндрическое и сферическое) и формулы для оценки критической энергии, позволяющие удовлетворительно описывать совокупность имеющихся экспериментальных результатов. На основании большого количества исследований определены критические условия, необходимые для успешного реинициирования в случае выхода детонационной волны из канала меньшего диаметра. Предложены теоретические подходы к определению критического диаметра и различные модели, описывающие выход и дифракцию детонационной волны.

В реальности же не так часто возникают ситуации, когда случайное или намеренное воспламенение

Смесь	Поперечный размер детонационной ячейки, мм
Водород-кислород	1,4–2
Водород-воздух	9
Ацетилен-кислород	0,1
Ацетилен-воздух	11
Пропан-кислород	1
Пропан-воздух	53
Метан-кислород	3
Метан-воздух	279

Таблица 1. Детонационная ячейка некоторых газовых смесей, начальные условия нормальные (по данным California Institute of Technology)



ние смеси возможно с помощью мощного локализованного источника энергии. Наиболее вероятным развитием событий является поджиг слабым источником с последующим медленным горением смеси. Однако под воздействием ряда факторов пламя может самопроизвольно ускоряться. Это ведет к формированию волн сжатия перед ним, которые создают условия для самовоспламенения и взрыва смеси, что приведет к формированию детонационной волны. Сценарии интенсивного ускорения пламени и перехода к детонации расцениваются как наиболее разрушительные, и поэтому к ним приковано пристальное внимание исследователей.

Развитие процесса ускорения пламени и перехода горения в детонацию (ПГД) в пластиковой прозрачной трубе круглого сечения при поджиге горючей смеси у закрытого торца трубы слабым источником поджига (автомобильная свеча) представлено на рис. 4. Исследования проводились в лаборатории физико-химической гидродинамики Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, впервые в мире удалось зарегистрировать весь процесс (а не отдельные его стадии) ускорения пламени и возникновения детонации, получить детальные качественные изображения фронта реакции, установить его пространственную структуру и форму. Регистрация процесса осуществлялась высокоскоростными камерами со скоростью съемки 210 тыс. кадров в секунду. Можно выделить следующие характерные стадии. Поначалу пламя движется с ускорением, контуры его фронта ровные, четкие, что свидетельствует о ламинарном характере горения (кадры 1–4, рис. 4). На следующей стадии процесс замедляется. К этому времени

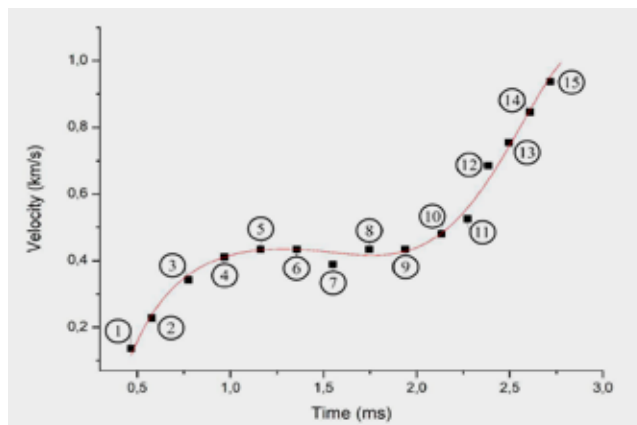


Рис. 4. Мгновенные фотографии самосвечения фронта пламени при распространении горения по трубе диаметром 60 мм и соответствующие профили скорости в зависимости от расстояния и времени. Стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом, на 25% разбавленная аргонem. Начальное давление 21 кПа. Скорость съемки 210 тыс. кадров в секунду, разрешение 1024x72 пикс. Экспозиция каждого кадра 3,15 мкс. Эксперименты Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

поверхность пламени начинает дробиться, и на ней начинает формироваться ячеистая (или сотовая) структура (кадры 5–6, рис. 4). Затем фронт пламени распространяется фактически с постоянной скоростью. Его форма и структура при этом практически не претерпевают каких-либо существенных изменений (кадры 7–9, рис. 4). И наконец, на заключительном этапе наблюдается повторное ускорение. Одна из частей фронта пламени начинает резко выдвигаться вперед в направлении движения, и по мере растяжения вдоль оси трубы его скорость начинает

резко возрастать. Пламя принимает коническую, сильно вытянутую вдоль оси трубы форму, напоминающую бумажный кулек или вафельный стаканчик (кадры 10–15, рис. 4). В результате возникает локальный взрыв, приводящий к формированию детонационной волны.

Несмотря на большое количество работ, описывающих процессы ускорения пламени и формирования детонации, единой теории, объясняющей переход одной стадии в другую, не существует. На сегодняшний день полноценное трехмерное моделирование такого процесса не выполнено и вряд ли возможно, поскольку требует очень серьезных вычислительных мощностей.

## ПРЕДЕЛЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ

Различают концентрационные пределы и геометрические. Первые – диапазон концентраций, от минимальной до максимальной, горючего в топливно-окислительной смеси, при которых возможно инициирование и распространение детонации. Например, состав от 5 до 61% метана в кислороде и приблизительно от 4 до 19% в воздухе считается опасным с точки зрения воспламенения. Детонация возможна при концентрации метана от 8 до 56% в кислороде и от 6 до 13% в воздухе, для водорода такие пределы шире – от 4 до 80%. Детонационные пределы уже пределов воспламенения. И те, и другие расширяются с увеличением начальной температуры и давления.

Геометрические пределы распространения связаны с влиянием граничных условий, то есть геометрических масштабов системы. При их уменьшении ниже некоей критической величины стационарный режим детонации невозможен. Например, для смеси метана с воздухом при нормальных условиях в трубе диаметром 50 мм. Характерным масштабным параметром системы является поперечный размер детонационной ячейки. Считается, что крити-

ческий диаметр трубы  $d_{кр}$  (минимальный диаметр, при котором еще возможно распространение стационарной детонационной волны) связан с поперечным размером трубы  $\lambda$  следующим соотношением:  $d_{кр} \geq \lambda/3$ . А, например, при выходе волны из трубы в свободное пространство для успешного реинициирования детонации требуется, чтобы диаметр трубы превышал величину  $13 \lambda$ .

Пределы воспламенения и детонации – фундаментальные величины в физике горения и взрыва. Их знание необходимо в первую очередь с практической точки зрения для понимания и прогнозирования вероятности развития различного рода сценариев в штатных и нештатных ситуациях. Последствия, например, пожара и детонации, или взрыва газовой смеси несопоставимы по своему воздействию.

## ЧЕМ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ?

На сегодняшний день принято считать, что именно детонация является наиболее опасным и наиболее эффективным режимом горения (табл. 2).

Помимо экстремальной скорости распространения волна детонации характеризуется гораздо более высокими по сравнению с нормальным горением температурой и давлением. Мощность тепловыделения с единицы поверхности детонационного фронта в тысячи раз выше таковой у фронта обычной дефлаграции и сопоставима с энергией излучения Солнца. Кроме того, в отличие от продуктов медленного горения, продукты детонации обладают огромной кинетической энергией.

В табл. 3 представлены расчетные параметры детонации некоторых топливно-окислительных смесей при начальном давлении 1 атм и температуре 20 °С.

Интерес ученых и инженеров всего мира к явлению газовой детонации условно можно разделить на два взаимосвязанных направления. Первое – это целенаправленная борьба с детонацией как с наиболее опасным и разрушительным режимом горения. Основная задача здесь – не допустить возможности ее возникновения в любом (штатном или аварийном) режиме работы промышленного или бытового оборудования, объектов инфраструктуры, сооружений и т.д. Второе направление – использование детонационного режима сжигания топлива в силовых установках различного рода. Еще в 1940 г. Я.Б. Зельдович теоретически показал, что термо-

Параметр	Дефлаграция	Детонация
Число Маха волны	Менее 0,03	4–5
Перепад давления	Приблизительно 0,98	13–55
Перепад температуры	4–16	8–21
Перепад плотности	0,06–0,25	1,4–2,6

Таблица 2. Сравнение основных параметров дефлаграции и детонации

динамическая эффективность этого процесса превосходит таковую у любых иных циклов, основанных на традиционном медленном горении. Однако этот выдающийся результат до сих пор не нашел своего полноценного практического применения. Известны единичные оригинальные разработки, использующие детонационный режим сжигания топлива, среди них отметим устройства для напыления, очистки деталей от заусенцев, дробления и фрагментации и т.п., но широкого распространения они не получили.

Наибольший же интерес явление детонации представляет с точки зрения двигателестроения для авиационной и ракетной промышленности. Предложено множество схем реализации управляемого детонационного режима сгорания, которые можно разделить на две группы – с импульсно-детонационным и непрерывно-детонационным рабочим циклом. В импульсном детонационном двигателе (ИДД) камера сгорания циклически заполняется рабочей смесью, при ее зажигании распространяется детонационная волна, и продукты сгорания истекают в окружающее пространство. Первые образцы ИДД были разработаны и протестированы в 1957 г. в университете г. Мичигана (США). В простейшем варианте ИДД представляет собой трубу, один из концов которой закрыт, в нем расположены устройства для подачи горючей смеси и ее поджига. Из открытого конца происходит истечение продуктов сгорания. Устройство работает на частоте (обычно до 100 Гц), которая существенно ограничена и определяется продолжительностью заполнения камеры сгорания рабочей смесью и временем, требуемым для создания детонации и последующего истечения продуктов сгорания, создающих тягу. Существуют схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, то есть в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Понятно, что он прост, а его тягу можно практически неограниченно увеличивать за счет количества детонационных труб. Существует множество демонстрационных образцов силовых установок, реализующих импульсно-детонационный режим работы. Отметим, что фундаментальных ограничений при создании ИДД нет. Однако существует множество сдерживающих факторов технического и эксплуатационного характера, которые связаны с необходимостью при-

Смесь	Скорость детонации, м/с	Температура, К	Давление, атм
Водород-кислород	2840	3682	19
Водород-воздух	1970	2944	16
Ацетилен-кислород	2425	4215	34
Ацетилен-воздух	1867	3111	19
Пропан-кислород	2358	3829	37
Пропан-воздух	1800	2819	19
Метан-кислород	2393	3727	30
Метан-воздух	1803	2777	17

Таблица 3. Расчетные параметры детонации некоторых горючих смесей, начальное давление 1 атм, начальная температура 293 К

удительного охлаждения камеры сгорания, использования штатных топлив, минимальной энергии для инициирования детонации, соблюдения необходимых массо-габаритных характеристик и т.д.

Иной концепцией является непрерывное детонационное сжигание топлива в одной или нескольких детонационных волнах, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек потока. Идея была предложена и реализована Б.В. Войцеховским в 1959 г. Камера сгорания в этом случае представляет собой зазор между двумя коаксиально расположенными цилиндрами. В детонационной волне (или нескольких) сжигается смесь, которая успевает поступить за время оборота волны по окружности камеры сгорания. Двигатель с непрерывной вращающейся детонацией имеет следующие преимущества по сравнению с пульсирующим детонационным: непрерывный режим создания тяги, возможность функционирования на обедненных топливных смесях, отсутствие необходимости непрерывного вклада энергии для инициирования детонации (осуществляется единожды при запуске двигателя), а также возможность прямой интеграции в существующие реактивные и турбореактивные устройства.

Однако несмотря на теоретически доказанное превосходство и многочисленные лабораторные испытания, еще рано говорить о создании полноценной силовой установки, способной конкурировать с существующими образцами двигателей. Теоретически предсказанная (в идеальных условиях) выгода не так велика, но и ее не удастся реализовать в условиях, близких к реальным. Поэтому вопрос создания полноценного детонационного двигателя пока открыт, для продвижения вперед в данном направлении необходимы кропотливые и планомерные научные исследования. ■