

УДК 536.46:533.6:621.4

УПРАВЛЯЕМОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Харламов Ю.А.

CONTROLLED INITIATION OF A GASEOUS DETONATION

Kharlamov Y.A.

В статье рассмотрены способы и методы управляемого инициирования газовой детонации в технических устройствах, использующих в качестве источника энергии детонационное горение газов. Систематизированы и классифицированы конструктивно-технологические способы и приемы инициирования. Рассмотрены схемы конструкций для ускорения перехода горения в детонацию. Кратко описаны методы прямого инициирования детонации.

Ключевые слова: детонационная волна, детонационная камера сгорания, источник зажигания, преддетонационное расстояние, источник зажигания, препятствия-турбулизаторы, ударная волна.

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. Параметры газа при детонационном сжигании во много раз больше, чем при обычном сжигании [1]. Переход к использованию управляемого детонационного горения - горения с существенно сверхзвуковой скоростью сулит качественный скачок в энергосбережении.

Постановка проблемы. Существует множество фундаментальных и технических проблем, препятствующих использованию детонации в технических устройствах. Одна из ключевых проблем - инициирование детонации в относительно коротких трубах (длиной до 1 м) при низкой энергии зажигания смеси (до нескольких джоулей). Обеспечение быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) в углеводородовоздушных смесях при минимальной энергии зажигания - важнейшая фундаментальная проблема, решение которой открывает пути практического использования детонационного взрыва в перспективных силовых установках летательных аппаратов - импульсных детонационных двигателях (ИДД).

Анализ последних исследований и публикаций. 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 используется цикл, близкий к термодинамическому циклу при постоянном объеме. На это впервые указал Я. Б. Зельдович.

Примерами практического применения газовой детонации являются детонационно-газовое напыление покрытий [2], сверление и дробление горных пород, утилизация автомобильных покрышек, очистка технологического оборудования от пылевых отложений, удаление заусенцев, метание тел и многие др. [3]. Интересным применением пульсирующего детонационного устройства является пульсирующий детонационный двигатель (ПДД) [3]. Проблема повышения тяговой и топливной эффективности авиационных двигателей вызвала интерес к научным разработкам по созданию детонационного двигателя, способного заменить существующие силовые установки летательных аппаратов, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (например, [4]). Идея использования управляемой детонации в технических устройствах не нова. Еще в 40-е годы прошлого столетия Я.Б. Зельдович и Г. Хоффман исследовали возможность сжигания топлива в детонационной волне для получения реактивной тяги. Это позволяет проектировать двигатели с высокой удельной мощностью. При детонационном сжигании кислородоводородной газовой смеси удельная мощность энерговыделения может на порядок

превосходит удельную мощность ракетных кислородоводородных двигателей.

Целью данной статьи является систематизация, классификация и разработка конструктивных способов управляемого инициирования газовой детонации, главным образом, в технологических устройствах для обработки материалов.

Способы инициирования газовой детонации. При проектировании детонационно-газовых устройств различного назначения необходимо обеспечить возможность инициирования детонации в газовых смесях при минимальных затратах энергии на коротких расстояниях и за малое время.

Известно много схем организации управляемого детонационного горения, включая схемы с импульсно-детонационным (ИД) и с непрерывно-детонационным (НД) рабочим процессом [2-4]. Импульсно-детонационный рабочий процесс основан на циклическом заполнении камеры сгорания (КС) горючей смесью с последующим зажиганием и распространением детонации вдоль КС. Непрерывно-детонационный рабочий процесс основан на непрерывной подаче горючей смеси в КС и ее непрерывном сгорании в одной или нескольких детонационных волнах (ДВ), циркулирующих в тангенциальном направлении поперек потока.

Важнейшая проблема, возникающая при реализации управляемого детонационного горения,— это проблема инициирования детонации в рабочей смеси того или иного горючего газа (топлива) с окислителем — на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания. Согласно современным представлениям возбуждение химической реакции в горючей смеси достигается тремя основными способами [5]:

1) слабое инициирование (воспламенение), возбуждающееся ламинарное горение; 2) сильное (прямое) инициирование, обеспечивающее формирование самоподдерживающейся детонационной волны (ДВ) в непосредственной близости от воспламенителя;

3) промежуточное, когда смесь только поджигается на начальном этапе, а затем фронт пламени ускоряется под воздействием естественных или искусственных причин до скоростей видимого пламени (сотен метров в секунду), с возможностью реализации перехода горения в детонацию (ПГД).

В результате слабого воспламенения у источника инициирования формируется ламинарное или турбулентное пламя с характерными дозвуковыми скоростями его распространения по смеси. В случае сильного инициирования в непосредственной близости от инициатора возникает детонационная волна, которая распространяется по горючей смеси со сверхзвуковой скоростью. Сильное инициирование также принято называть прямым инициированием

детонации. Иницирование перехода горения в детонацию обеспечивается первоначально зажиганием смеси от слабого инициатора и последующим ускорением пламени за счет автотурбулизации или взаимодействия с препятствиями и переходом к детонации. Такой переход возникает на существенном удалении от источника зажигания.

Переход горения в детонацию (ПГД) является одной из актуальных проблем в теории горения и взрыва [1], в практике взрывобезопасности и взрывозащиты [6] и в проектировании детонационно-газовых технологий и оборудования. Детонация представляет собой распространение горения со сверхзвуковой скоростью, другими словами, распространение в горючей среде самоподдерживающейся (за счет энергосвободы при экзотермической реакции) ударной волны [1]. Образование детонационных взрывных волн без искусственного инициирования обусловлено неустойчивостью нормального горения (процесса распространения ламинарного пламени). В результате развития внутренней неустойчивости пламени, процесс горения автотурбулизуется, и движение пламени ускоряется: происходит резкое увеличение скорости фронта горения по сравнению с ламинарными режимами за счет увеличения площади поверхности горения. Турбулизации пламени могут способствовать также внешние факторы:

- отражение слабой ударной волны, порожденной пламенем, от различных препятствий с последующим усилением этой волны [1,6,7]:

- шероховатость стенок [5];

- многочисленные неоднородности среды (особенно для гетерогенных сред) [8]:

- вихревые потоки перед фронтом пламени [5];

- другие факторы тепловых и химических процессов [9].

Способы ускорения перехода горения в детонацию. Проблема ускорения процессов ПГД изучается и разрабатывается многими научными коллективами. Прямое инициирование детонации требует высоких затрат энергии, однако, детонацию можно инициировать через переход горения в детонацию, что требует в $10^3 \dots 10^5$ раз меньше энергии. Без применения дополнительных методов по ускорению перехода горения в детонацию переход осуществляется за значительное время и на большом расстоянии от точки воспламенения.

Для многих практических применений газовой детонации необходимо сокращение расстояния между точкой поджига и местом фактического возникновения детонационной волны. При этом предпочтительным является переход горения в детонацию (ПГД) так как не требует большого начального вложения энергии. Способы ПГД Ивановым К.В. разделены на три группы: 1. различные воздействия на фронт пламени, уже распространяющийся в канале (акустическое

воздействие, шероховатости канала, применение форкамер); 2. увеличение эффективности поджига (акустическое воздействие на очаг воспламенения, струйный и объемный поджиг); 3. возбуждение волны детонации в узких каналах, в пределе – около или субкритического диаметра.

Особо важное значение проблема ПГД при конструировании технологических устройств имеет при использовании горючих газов-заменителей ацетилена и использовании в устройствах преддетонационных режимов сгорания. Рекомендации по организации благоприятных условий для ускорения пламени в КС рассматриваются во многих работах [1, 10-19 и др.].

Основными конструктивными приемами ускорения ПГД являются:

1. выполнение детонационных камер сгорания (ДКС) постоянного сечения с крутыми поворотами и витками;
2. установка спиралей Щелкина К.И. на преддетонационном участке ДКС;
3. выполнение ДКС с переменным поперечным сечением по длине;
4. профилирование стенок ДКС;
5. установка в ДКС препятствия специальной формы;
6. использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри ДКС;
7. применение форкамерного зажигания;
8. использование предкамер с пористой набивкой;
9. использование распределенных источников зажигания;
10. использование средств для повышения эффективности поджига;
11. термическая активация горючей смеси;
12. раздельная подача газообразных топливных компонентов перекрестными высокоскоростными газовыми струями;
13. перепуск ДВ из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в КС, заполняемую рабочим телом;
14. комбинированные способы ускорения процесса ПГД.

Рассмотрим эти приемы более подробно.

1. Экспериментальные и теоретические исследования инициирования и распространения газовой и гетерогенной детонации традиционно проводились в прямых трубах или трубах с поворотами малой кривизны. Длина ПГД сокращается с уменьшением диаметра трубы. Однако существует минимальный (предельный) диаметр трубы d_{min} , при котором еще возможно распространение детонации. Значение d_{min} находится в пределах от $\frac{\lambda}{\pi}$ до λ [20], где λ - ширина ячейки многофронтной детонации (например, для стехиометрической пропано-

воздушной смеси при нормальных начальных условиях $\lambda = 50$ мм).

Однако в 2006-2007 гг. выяснилось [20-22], что крутые повороты и витки труб — элементы, которые значительно ускоряют переход горения в детонацию (ПГД). Это позволяет создавать компактные компоновки детонационных труб с несколькими U-образными поворотами. Такие компоновки позволяют обеспечить ПГД за счет увеличения длины трубы и многократных отражений волн сжатия, образованных ускоряющимся пламенем, при их дифракции в U-образных поворотах. Повороты существенно облегчают инициирование газовой детонации. Минимальная скорость ударной волны (УВ), требуемая для возбуждения детонации в трубах внутренним диаметром 51 и 41 мм в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных начальных условиях, оказалась близкой к 800 м/с (вместо 1700-1800 м/с в прямых трубах). Такие волны легко генерировать в прямой трубе со спиралью Щелкина с помощью слабого источника зажигания. Механизм инициирования детонации в этом случае связан с многократными отражениями УВ при прохождении поворотов и вторичными взрывами. Однако U-образные повороты увеличивают гидравлическое сопротивление и осложняют циклическое заполнение ДКС свежей горючей смесью. Следовательно, для применения таких компоновок в ИДД необходимо искать компромиссное решение для обеспечения ПГД на кратчайшем расстоянии.

2. Классические эксперименты К.И. Щелкина по ускорению пламени и ПГД в трубах с проволочными спиралями убедительно показали [1], что турбулизация течения перед ускоряющимся фронтом пламени – самое сильное средство воздействия на ускорение горения, позволяющее значительно сократить преддетонационное расстояние и время.

3. Выполнение ДКС с переменным поперечным сечением по длине. Наличие турбулизационных камер большего диаметра, чем диаметр самой детонационной трубы [23], способствует возникновению существенных неоднородностей в потоке перед зоной пламени, что может приводить к возникновению детонации. Поршневой эффект, создаваемый расширяющимися продуктами горения смеси в камерах, порождает серию первичных ударных волн, движущихся перед фронтом пламени. Некоторые волны образуются в результате взаимодействия поперечных волн сжатия, возникающих при ускорении турбулентного пламени. Наличие одной или двух турбулизационных камер с широким поперечным сечением в области зажигания сокращает преддетонационное расстояние для смесей углеводородов с воздухом и стабилизирует переход к детонации. Увеличение числа турбулизационных камер, расположенных в начальной секции трубы,

способствует переходу горения в детонацию, пока скорость турбулентного пламени при выходе из последней не превышает скорость звука. Дальнейшее увеличение числа камер препятствует переходному процессу.

4. Профилирование стенок ДКС [24]. Регулярный параболический профиль может существенно сократить время и расстояние перехода ударной волны в детонационную по сравнению с профилем стенки в виде прямоугольных выступов. Переход ударной волны в пропановоздушной смеси в детонационную в канале с прямыми стенками для инициирующей ударной волны с числом Маха 4,0 не происходит за время 1 мс и на расстоянии 1,4 м, а в канале с регулярным параболическим профилем стенок для инициирующей ударной волны с числом Маха 3,0 детонация возникает ко времени 590 мкс на расстоянии 0,57 м.

5. Установка в ДКС препятствия специальной формы. [21,24.] Установка в трубе осесимметричного препятствия специальной формы (сопла) позволяет обеспечить переход УВ в детонацию в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных условиях при очень низкой минимальной скорости УВ на входе в сопло - 680 ± 20 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха, равному 2 [26].

При распространении УВ в трубе с центральным телом (ЦТ) существенно облегчается ПГД в метано-воздушной смеси [27]. ЦТ должно удовлетворять определенным требованиям: перекрывать сечение трубы приблизительно на 60%, иметь параболический профиль головной части с углом атаки $\sim 40^\circ$ и параболический или эллиптический профиль хвостовой части с углом схождения не более 7° . В этом случае детонацию можно инициировать УВ с числом Маха 3.5 на длине ~ 0.5 м за время ~ 0.2 мс.

6. Использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри ДКС. Регулярные препятствия специальной формы позволяют значительно сократить длину и время ПГД по сравнению с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов [28,29]. Иницирование детонации аналогично случаю бегущего импульса зажигания, по крайней мере на заключительных стадиях процесса, когда в трубе сформировалась УВ. В этом случае вместо принудительного зажигания смеси вблизи фронта УВ происходит самовоспламенение смеси, вызванное отражением УВ от препятствий. Задержка самовоспламенения, определяемая интенсивностью УВ и длительностью фазы сжатия в ней, играет ту же роль, что и задержка принудительного зажигания.

7. Применение форкамерного зажигания. Для уменьшения преддетонационного расстояния известно применение форкамеры (расширение в начале детонационного канала) [34]. В связи с

ускорением фронта пламени в канале вследствие расширения продуктов сгорания газа в форкамере, на начальном этапе достигается смещение баланса между выделяемой в ходе реакции и диссипирующей энергиями в положительную сторону.

8. Использование предкамер с пористой набивкой. Ускорение ПГД гетерогенной смеси гептана с кислородом и воздухом достигается при размещении в предкамере, где происходят впрыск топлива и смешение его с окислителем, пористой набивки из металлической (медной, стальной) стружки – ПНМС; набивка хаотично заполняет полость предкамеры [30].

9. Использование распределенных источников зажигания. Детонацию в горючем газе можно инициировать с помощью бегущего импульса принудительного зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких разрядников с тщательно подобранными временами задержки [31].

10. Использование средств для повышения эффективности поджига (воспламенения) горючей смеси. Сокращение длины перехода горения в детонацию достигается при использовании неравновесной плазмы высоковольтного наносекундного газового разряда [32,33]. В [35] определено влияние акустического воздействия на область воспламенения газа при энергиях инициирования в диапазоне 0,06 – 0,48 Дж. При энергиях инициирования меньших 0,1 Дж влияние акустического воздействия на область воспламенения имеет негативный характер. Одним из способов ускорения развития детонации является применение комбинированного метода зажигания: сочетание коронного и искрового разрядов, служащих для предобработки малой части объема камеры сгорания и зажигания смеси [36].

Известны исследования возможности применения струйного воспламенения с использованием эффекта самовоспламенения водорода для безыскрового поджига основного объема горючей смеси. Эксперименты по самовоспламенению водорода проводились в канале диаметром 5 мм и длиной до 185 мм. Из-за высокого давления и температуры за ударной волной происходит воспламенение в зоне перемешивания на контактной поверхности с последующим абсолютным ускорением фронта пламени [35]. Применение струйного воспламенения с использованием эффекта самовоспламенения водорода при истечении в канал для возбуждения детонации на расстояниях до 10 калибров затруднено необходимостью наличия водорода под высоким давлением (~ 100 атм.).

11. Термическая активация горючей смеси. Повышение начальной температуры смеси перед зажиганием – фактор, существенно ускоряющий переход горения в детонацию [23,30].

12. Раздельная подача газообразных топливных компонентов перекрестными высокоскоростными газовыми струями обеспечивает высокую турбулентность, что создает условия для быстрого ускорения пламени в гладкой трубе [37]. Раздельная подача газообразных топливных компонентов — природного газа (ПГ) и кислорода—без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов сверхзвуковыми перекрестными струями, истекающими под давлением от 25 до 150 атм в гладкую детонационную трубу (ДТ) диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый ПГД на расстояниях до 300 мм за времена, составляющие десятые доли миллисекунды (0,4 мс). Это перспективно для создания компактных преддетонаторов для детонационных камер сгорания (КС).

13. Перепуск ДВ из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в КС, заполняемую рабочим телом [37]. При организации управляемого детонационного горения по схеме импульсно-детонационного (ИД) рабочего процесса процедура перепуска ДВ происходит в каждом рабочем цикле. При непрерывно-детонационном (НД) рабочем процессе перепуск ДВ происходит однократно с возможностью повторения инициирующих импульсов в случае срыва режима.

14. Комбинированные способы ускорения процесса ПГД. В случае одновременного воздействия термической активации смеси и пористой набивки из металлорежущей стружки на процессы в импульсной камере усиливается эффект, приводящий к сокращению преддетонационного расстояния [30]. Для ускорения ПГД широко применяют различные комбинации конструктивных элементов. Так, например, в [38] комбинированное инициирование детонации достигалось с помощью труб околопредельного диаметра, спирали Щелкина, витков и переходных конусов для перепуска ДВ в трубу большого диаметра. Детонация возникала на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказалась значительно меньшей, чем при прямом инициировании одним электрическим разрядом. В работе [22] использовали комбинации спирали Щелкина и витки детонационной трубы (ДТ), а также генераторы ударных волн и крутые повороты ДТ. По патенту РФ № 2427756 устройство для инициирования газовой детонации имеет систему генерации первичной ударной волны и рабочий участок ДКС со стенками, имеющими регулярные профилированные препятствия. Система генерации первичной ударной волны состоит из источника зажигания и турбулизатора для турбулизации и ускорения фронта пламени до видимой скорости пламени 550-750 м/с с образованием первичной ударной волны с числом Маха не выше 2,5-3,0, а перед рабочим участком трубы, оборудованным

регулярными профилированными препятствиями, имеется участок трубы без препятствий длиной не менее $L = V \cdot \tau$, где V - видимая скорость пламени, τ - время индукции самовоспламенения горючей смеси при нормальном отражении ударной волны от жесткой стенки, обеспечивающий пространственное разделение турбулентного фронта пламени и фронта первичной ударной волны. По патенту РФ № 2429409 аналогичное устройство отличается наличием центрального тела с криволинейными поверхностями взамен рабочего участка с профилированными стенками, а по патенту РФ № 2430303 - использованием суживающе-расширяющегося сопла.

Некоторые конструктивные приемы ускорения пламени в ДКС представлены на рис. 1, а и б.

Схема I (рис. 1, а) представляет один из вариантов форкамерного зажигания. В начале камеры сгорания 1 размещается диафрагма 2 с одним или несколькими отверстиями, образуя таким образом камеру зажигания 3, в которой установлен точечный источник зажигания 4. Через отверстия диафрагмы пламя вырывается далеко вперед, поджигая большую массу горючей смеси. К недостаткам такой ДКС относится необходимость организации охлаждения диафрагмы для предупреждения неконтролируемого инициирования воспламенения горючей смеси.

В схеме II (рис. 1, а) используется прием создания шероховатостей путем введения спирали в камеру сгорания. Эту же роль могут выполнить канавки, нарезанные в стенках камеры сгорания. Интенсификация сгорания осуществляется за счет интенсивной турбулентности, вызываемой шероховатостью. Во избежание перегрева спирали внутри камеры сгорания ее можно изготовить из трубки малого диаметра, подсоединив к системе проточной жидкости и использовать даже в качестве прямого или обратного подвода к охлаждающей полости ствола.

В схеме III (рис. 1, а) используется так называемый детонационный ящик путем перекрытия сечения камеры сгорания на начальном участке перегородками, увеличивающими путь пламени [4,10]. Горение ускоряется в детонационном ящике за счет большой неравномерности в распределении скоростей. Здесь также требуется организация охлаждения перегородок

Схема IV (рис. 1, а) иллюстрирует использование теплового пограничного слоя создаваемого, например, накаливаемой электрическим током проволокой. Тепловой пограничный слой, внося дополнительную кривизну во фронт пламени, может способствовать ускорению пламени [40].

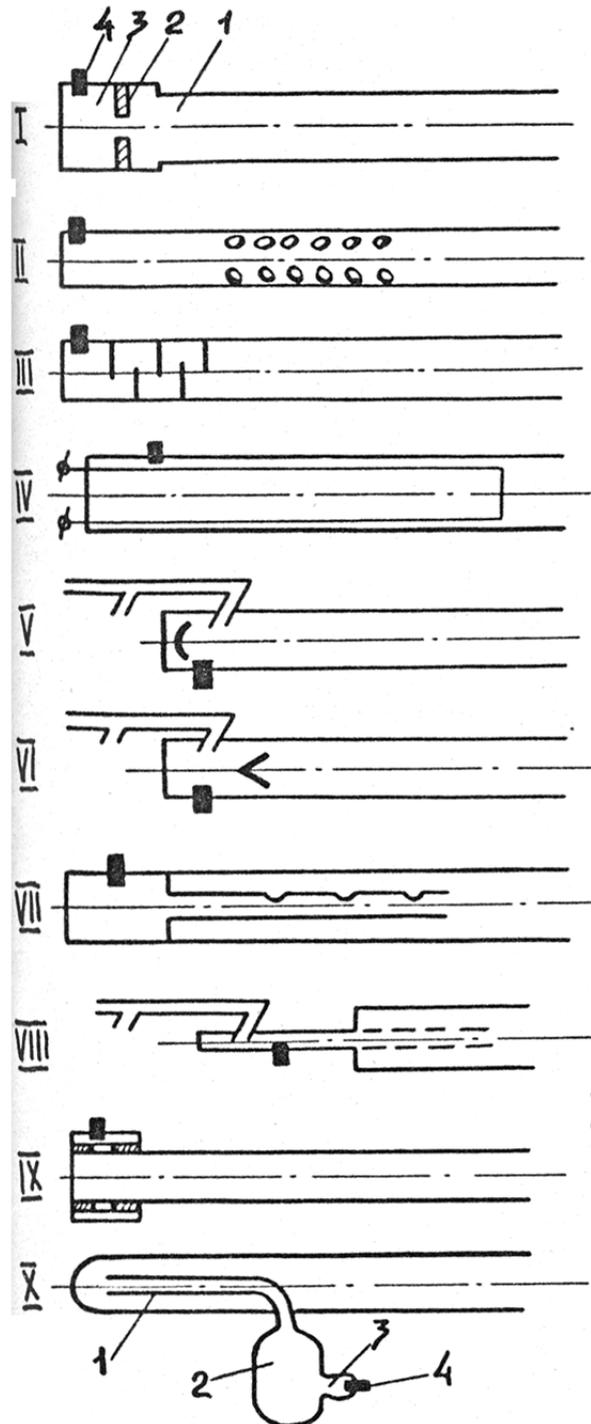


Рис. 1,а. Схемы устройств для ускорения перехода горения в детонацию

В схеме V (рис. 1,а) для сокращения времени выгорания торец камеры сгорания закрывается полусферой [11, 41]. В схеме VI (рис. 1,а) для сокращения времени выгорания установлен угольный турбулизатор [11, 42]. В схемах VII и VIII (рис. 1,а) для лучшего смешения горючей смеси и форкамерного зажигания применяется перфорированная трубка [11, 43]. Эти схемы можно использовать при низкой частоте рабочих циклов детонационно-газового оборудования. В противном

случае возможно преждевременное воспламенение и требуется охлаждение конструктивных элементов внутри ДКС.

В схеме IX (рис. 1,а) форкамера зажигания выполнена в виде кольцевой полости, охватывающей начальный участок основной камеры сгорания и соединенной с ней через отверстия. В этом случае требуется организовать охлаждение кольцевой стенки, разделяющей камеру зажигания и ДКС. Конструкция кольцевой камеры зажигания со всеми водоохлаждаемыми стенками использована в конструкции установки напыления покрытий, разработанной в Луганском машиностроительном институте [44].

Схема X (рис. 1,а) применяется в импульсных камерах большого объема и отличается наличием сферического закрытого торца и патрубком подачи горючей смеси 1, соединенного с дополнительной камерой сгорания 2, имеющей форкамеру зажигания 3 с точечным источником зажигания 4 [45,46].

Применение форкамерно-факельного зажигания улучшает характеристики горения, в частности уменьшает время горения и увеличивает стабильность выгорания рабочего заряда в ДВС [50, 51] и в какой-то мере характеризует процессы инициирования горения в ДКС. Причем скорость выгорания топливного заряда в ДВС при форкамерно-факельном зажигании переменна по времени, достигая значительной величины в начальный момент и снижаясь до величин, характерных для искрового зажигания. Падение скорости выгорания связано с затуханием пульсаций в турбулентном ядре, образующемся в результате форкамерного истечения. Высокая начальная скорость выгорания при малом масштабе турбулентности в ядре приводит к значительности стабилизации выгорания заряда. Ускорение процесса сгорания при осуществлении факельного зажигания обуславливает значительное увеличение температуры и давления газов, изменение состава продуктов сгорания. Все это в определенной мере влияет также и на образование импульсной двухфазной струи при детонационно-газовом напылении (ДГН) и может быть использовано для регулирования ее параметров.

Ускорение выгорания горючей смеси достигается использованием криволинейных камер сгорания или их участков, кольцевых камер сгорания, а также имеющих резкие повороты (схемы XI, XIII) (рис. 1,б) [11].

В схеме XII (рис. 1,б) для сокращения времени выгорания применяют форкамерное зажигание сильными струями в сочетании с искривленным рабочим каналом [11, 47].

В схемах XIII и XIV (рис. 1,б) применяются специальные вставки (стержневые или с отверстиями), также сокращающие преддетонационное расстояние [48]. Функции этих вставок могут выполнять патрубки для ввода порошка в ствол.

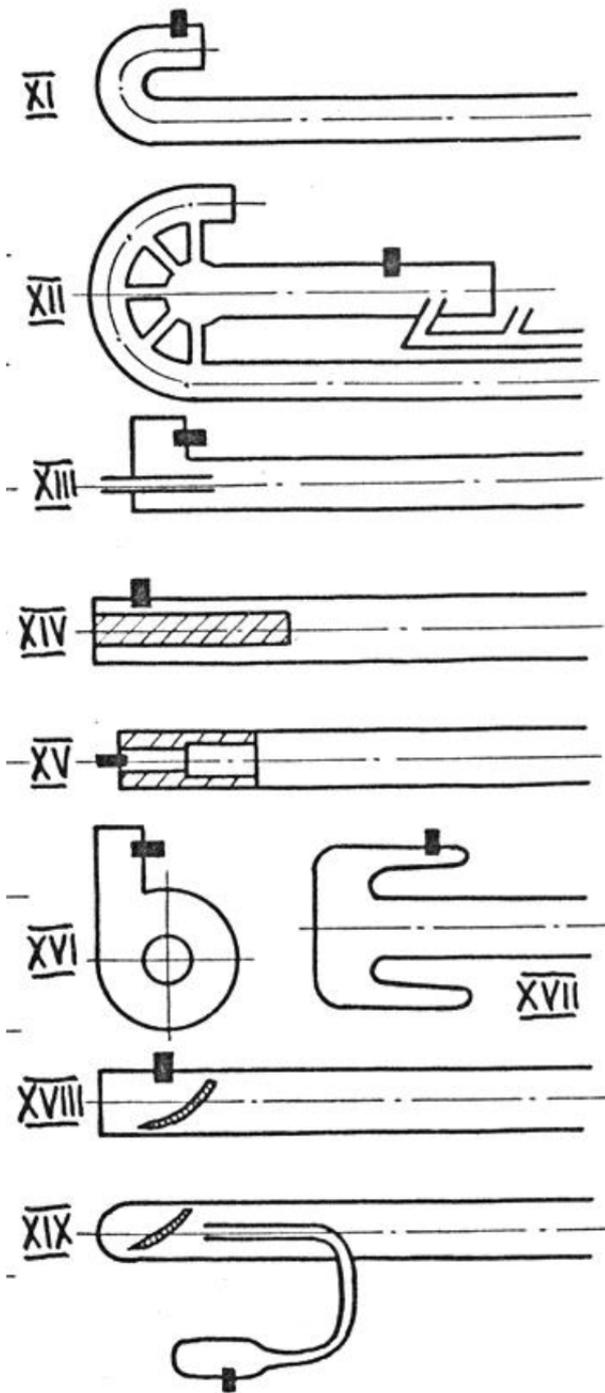


Рис. 1,б. Схемы устройств для ускорения перехода горения в детонацию

Определенные преимущества имеют тангенциально расположенные (XVI) и кольцевые (XVII) (рис. 1,б) камеры зажигания, к тому же обеспечивающие более равномерное заполнение ствола свежей горючей смесью.

Для ускорения выгорания смеси и сокращения преддетонационного расстояния применяют спиральные и винтовые турбулизаторы, устанавливаемые на начальном участке камеры сгорания (схемы XVIII и XIX) (рис. 1,б)[45,46].

Известно применение и других приемов: ступенчатые стволы о увеличением размеров поперечного сечения по направлению движения фронта горения; воспламенения смеси множеством одновременно срабатывающих источников зажигания или воспламенение смеси от нескольких источников, последовательно срабатывающих с заданной скоростью [40], воспламенение лучом лазера; смещение источника зажигания от закрытого торца; использование мощных электрических разрядов и химических запалов; предварительный подогрев горючей смеси и пр.

Если скорость горения довольно просто можно изменить в желательном направлении изменением аэродинамики потоков в камере, т.е. увеличением эффективной поверхности пламени, расслоением заряда, то улучшение воспламенения требует локального или общего изменения условий протекания химической реакции, которое не может быть обеспечено только конструктивными модификациями камеры сгорания. Надежность и интенсивность стадии воспламенения горючей смеси в ДГУ влияет не только на скорость тепловыделения, но и определяет такие характеристики, как экономичность ДГУ, возможность работы с различными видами и характером исходной подготовки горючих смесей. Из способов улучшения характеристик воспламенения рабочей смеси в первую очередь следует отметить внедрение промоторов в горючее и форкамерно-факельное зажигание [49]. Несмотря на кажущуюся несхожесть этих решений технической задачи, они имеют общую научную основу: создание благоприятных условий для самовоспламенения за счет дополнительной подачи в топливовоздушную смесь химически активных частиц (в общем случае этот термин объединяет атомы, радикалы и легко окисляющиеся промежуточные продукты) и повышение температуры перед воспламенением.

Увеличение скорости движения потока смеси приводит к увеличению максимальной скорости пламени в 2-4 раза по сравнению со скоростью распространения пламени по покоящейся смеси [11]. Для всех конструкций камер горения в потоке происходит с большей скоростью, чем в покоящемся газе. Причина в том, что фронт пламени искривляется и становится турбулентным. В работах [29, 52] показана возможность быстрого ПГД в условиях высокоскоростного течения (~10 м/с) с раздельной подачей топливных компонентов — природного газа {98.9% метана} и воздуха — в трубе диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. Показано, что в такой трубе с помощью препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный ПГД на расстоянии 3—4 м от источника зажигания за время 15—16 мс с момента зажигания.

В «предетонаторах» (ДТ с донорной топливной смесью), как правило, используются слабые источники зажигания (запальные свечи), препятствия-турбулизаторы, обеспечивающие быстрый ПГД [37], а в качестве окислителя — кислород. Кроме требования надежной работы в частотном режиме к предетонаторам предъявляют требования высокой живучести и компактности — минимальных габаритных размеров, обеспечивающих генерацию инициирующей ДВ при минимальном запасе донорной топливной смеси. Однако продукты детонации кислородных смесей имеют очень высокую температуру (выше 3000 К), и неохлаждаемые препятствия-турбулизаторы быстро разрушаются, тогда как отказ от использования препятствий-турбулизаторов приводит к значительному (в десятки раз) увеличению габаритных размеров предетонаторов.

Прямое инициирование детонации. В отличие от прямого инициирования детонации переход от медленного горения к детонации характеризуется, с одной стороны, меньшими энергозатратами, а с другой — меньшей воспроизводимостью. А в ряде горючих смесей (водород-воздух, метан-воздух) детонация как следствие собственного ускорения ламинарного пламени недостижима, и предельным режимом является сверхзвуковое пламя, не обеспечивающее энергетически перспективного детонационного термодинамического цикла. Поэтому прямое инициирование детонации является более точно контролируемым [53]. К недостаткам этого подхода следует относиться достаточно большой энергозатрат за микросекундные времена, оказывающий высокую интенсивность воздействия на детонационно-способную смесь. Это приводит к возникновению больших динамических нагрузок на стенки рабочей камеры и существенное изменение состояния горючей среды в области подвода энергии.

Для прямого инициирования детонации необходимо существование достаточно сильной ударной волны, способной зажечь горючую смесь. Одним из способов создания такой волны является концентрированный подвод энергии - выделение энергии по какому-либо закону в некотором объеме в течение достаточно малого промежутка времени [53]. При данном способе инициирования сгорание газа может происходить как в волне детонации, так и во фронте пламени. При этом один режим горения может переходить в другой, например, с течением времени волна детонации может расщепиться на обычную ударную волну и следующий за ним фронт медленного горения.

Параметрами, влияющими на прямое инициирование детонации, являются: критическая энергия, критическое время, критический объем [54]. Под критической энергией подразумевается минимальное количество энергии, которую необходимо затратить для инициирования детонации в заданных условиях. Иницирование детонации

определяется временем ввода энергии в заданный объем. Поэтому критическая энергия является функцией времени и объема.

В качестве горючих в детонационно-газовых устройствах используются газообразные и жидкие углеводороды: природный газ, пропан-бутан, бензин, авиационный керосин и дизельное топливо, что связано с развитой инфраструктурой их производства и сбыта. Поскольку эти горючие не предназначены для детонационного сжигания, ведутся поиски модификации их характеристик, в частности, повышения их детонационной способности. Одно из возможных решений — использование для этой цели добавки водорода — альтернативного топлива с широкими концентрационными пределами детонации и высокой детонационной способностью. В [55] показано, что добавки водорода существенно облегчают условия инициирования ДВ в стехиометрической метано-воздушной смеси.

Увеличение радиуса, по которому осуществляется ввод энергии, снижает удельную мощность источника энергии, уменьшает пороговые значения температуры, которую необходимо достичь за счет ввода энергии, увеличивает время, в течение которого требуется ввести критическую энергию [54]. Поэтому, целесообразно создавать источники инициирования, в которых обеспечивается объемный ввод энергии.

Существенное снижение критической энергии прямого инициирования детонации (например, искровым разрядом) в топливо-кислородных смесях с локальными неоднородностями, сформировавшимися при воздействии неравновесной плазмы, может быть использовано для оптимизации существующих и разработки новых схем плазменного инициирования детонации [56].

При кольцевом электрическом разряде в метано-кислородной смеси обнаружен уникальный режим отражения ударных и детонационных волн от оси симметрии [57]. При докритических значениях энергии разряда, происходящем в ограниченном объеме, формируется высокоскоростной режим распространения горения, связанный сего турбулизацией.

Анализ масштаба времени процесса инициирования детонации, осуществляемый комбинированным поджигом с помощью коронного и искрового разрядов показал, что детонация [58] формируется на расстоянии порядка 1 см от места искрового разряда, и, следовательно, процесс формирования неразрывно связан с взаимодействием взрывной волны от искры с локальными неоднородностями в реагирующей среде, вызванными стримерами коронного разряда. При этом возможны два механизма инициирования детонации: 1. при взаимодействии ударной волны с протяженными тепловыми неоднородностями, одномерный механизм, 2. дифракция ударной волны

на тепловой неоднородности с формированием поперечной детонационной волны. Наименьшее значение критической энергии прямого инициирования детонации (0,4 Дж/см) обеспечивается во втором механизме, когда основную роль играют двумерные эффекты дифракции ударной волны.

Бесконтактные методы реализуют более мягкое инициирование детонации. Химически активные микрочастицы, выполненные из нанотрубок, легированных железом, при лучистом нагреве и последующем испарении обеспечивают локальный энерговыход, достаточный для инициирования детонации в облаке взвешенных в горючей газовой смеси частиц [54]. Необходимый для воспламенения разогрев газообразной горючей смеси может быть достигнут также при лучистом нагреве химически нейтральных микрочастиц, взвешенных в этой среде [59].

Принципиальное отличие лазерного инициирования горения и детонации от других способов (взрыв, электрический разряд, разогрев о поверхность, искра) состоит в возможности дистанционного и почти мгновенного возбуждения процессов в больших объемах взрывоопасной смеси [53]. Конфигурация лазерного пучка (например, в виде кольца или вытянутого прямоугольника) может формировать не только расходящийся, но и плоский или сходящийся фронт волны горения или фронт ударной волны в случае образования плазмы.

Для снижения энергии прямого инициирования детонации в ДТ устанавливают центральное тело специальной формы. С помощью численной оптимизации найден профиль центрального тела, максимально облегчающий условия перехода УВ в ДВ в трубе со стехиометрической метано-воздушной смесью [55].

При комбинированном способе снижения энергии прямого инициирования детонации кроме установки в трубе центрального тела специальной формы в горючую смесь добавляют водород. Добавки водорода существенно облегчают условия инициирования ДВ в стехиометрической метано-воздушной смеси [55].

Интересным представляется прямое инициирование детонации встречными соударяющимися струями газов [60].

Выводы. Механизм инициирования режима детонационного горения в технических устройствах зависит от состава, свойств и параметров начального состояния газовых смесей, вида источника зажигания и его параметров, конструктивных особенностей и параметров камер зажигания, детонационных камер сгорания и соединяющих их каналов.

Выбор рациональных способов и приемов инициирования газовой детонации должен осуществляться с учетом области применения, условий эксплуатации и требований к надежности инициирования.

В настоящее время отсутствуют достоверные критерии и рекомендации для выбора вида и параметров рациональных систем контролируемого инициирования газовой детонации в устройствах, использующих горение.

Целесообразно разработать рекомендации и критерии выбора способов инициирования газовой детонации для конкретных применений и видов детонационно-газового оборудования.

Л и т е р а т у р а

1. Шелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР.- 1963.-256 с.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
3. Баженова Т. В., Голуб В. В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме (обзор) // Физика горения и взрыва, 2003, т.39, № 4. - С.3-21.
4. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. Iss. 6. P.545-672.
5. Васильев А.А. Оптимизация перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва, 2012, т. 48, № 3. - С.25-34.
6. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 1 / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.- М: Мир, 1986. -319 с.
7. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. - М.: Изд-во МГУ, 1987. - 307 с.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. - М: Гл. ред. Физ.-мат. лит.- 1987. - 464 с.
9. Зельдович Я.Б. Избранные труды: Химическая физика и гидродинамика. - М.: Наука. 1984. - 374 с.
10. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапка.- М.: ИМЕТ АН СССР, 1980 - 65 с.
11. О механизме импульсной очистки. - Казань: Изд-во КГУ, 1979 - 72 с.
12. Подымов В.Н. Релаксационные колебания пламени - Казань: Изд-во КГУ, 1979 - 63 с.
13. Подымов В.Н., Северянин В.С., Щелоков Я.М. Прикладные исследования вибрационного горения. - Казань: Изд-во КГУ, 1978. - 219 с.
14. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ. - 1957.
15. Пятницкий Л.И. О механизме ускорения пламени при переходе нормального горения в детонацию. Доклады АН СССР, 1962, т. 144, № 6, с. 1262-1265.
16. Фрайвальд Г. Быстрые химические реакции, горение и детонация в газах. В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. III. - М.: Мир, 1971.
17. Попов В.А. Некоторые закономерности преддетонационного участка распространения пламени. - Известия АН СССР. ОТН, 1953, № 10, с. 1428-1439.
18. Ударные волны в реальных газах. М.: Наука, 1968.
19. Саламандра Г.Д. Состояние среды перед фронтом пламени в начальной стадии процесса сгорания // Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. М.: Наука, 1972, с. 122-130.

20. Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О. Иницирование газовой детонации в трубах с крутыми U-образными поворотами // Доклады Академии наук, 2007, том 417, № 6, С. 1-5.
21. Уткин П.С., Ахмедьянов И.Ф., Лебедева А.Ю. Численное исследование иницирования газовой детонации в трубах со сложной геометрией стенок // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (3), с. 1206–1208.
22. Frolov S.M. Detonation initiation techniques for pulse detonation propulsion // Progress in Propulsion Physics 1 (2009) 321-340.
23. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф. Влияние геометрии канала и температуры смеси на переход горения в детонацию в газах // Физика горения и взрыва, 2004, т. 40, № 2. – С. 68-83.
24. Уткин П.С. Численное моделирование иницирования и распространения волн газовой детонации в профилированных трубах. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2010. – 23 с.
25. Фролов С.М., Аксенов В.С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием // Доклады РАН, 2009, том 427, № 3, с. 344-347.
26. Фролов С.М., Аксенов В.С., Скрипник А.А. Иницирование детонации в смеси природного газа с воздухом в трубе с фокусирующим соплом // Доклады РАН, 2011, том 436, № 3, с. 346-350.
27. Иницирование детонации в трубе с профилированным центральным телом / С. М. Фролов, И. О. Шамшин, С. Н. Медведев, А. В. Дубровский // Доклады РАН, 2011, том 438, № 5, с. 640-643.
28. Сокращение длины и времени перехода горения в детонацию в трубе с профилированными регулярными препятствиями / С. М. Фролов, И. В. Семенов, П. В. Комиссаров, П. С. Уткин, В. В. Марков // Доклады РАН, 2007, том 415, № 4, с. 509-513.
29. Циклический переход горения в детонацию в проточной камере сгорания импульсно-детонационного горелочного устройства / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов и др. // Химическая физика, 2013, том 32, № 3. - С. 39-43.
30. Ассад М.С., Пенязьков О.Г. Способы ускорения перехода горения в детонацию в малогабаритной камере сгорания реактивного типа // ВЕСЦІ НАЦЬОНАЛЬНОЇ АКАДЭМІЇ НАВУК БЕЛАРУСІ, № 2, 2015. СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. – С.72-76.
31. Иницирование газовой детонации бегущим импульсом принудительного зажигания / С. М. Фролов, В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов // Доклады Академии наук, 2004, том 394, № 2, с. 1-3.
32. Жуков В.П. Воспламенение насыщенных углеводородов при высоких давлениях и иницирование детонации наносекундным разрядом. Автореф...к.ф.-м.н. – Долгопрудный, 2005. – 23 с.
33. Ракитин А.Е. Иницирование детонации в газах высоковольтным наносекундным разрядом. Автореф...к.ф.-м.н. – Долгопрудный, 2009. – 24 с.
34. Смирнов Н.Н. Газовая и волновая динамика, Айрис-пресс, Москва, 2005.
35. Иванов К.В. Управление переходом горения в детонацию в каналах субкритического диаметра. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2012. – 24 с.
36. Коновалов Г.М. Исследование влияния импульсного коронного разряда на процесс развития детонации в газовых смесях. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2007. – 22 с.
37. Компактный импульсный преддетонатор для иницирования рабочего процесса в детонационных камерах сгорания / В.А. Сметанюк, В.С. Аксёнов, А.С. Коваль, С.М. Фролов // Горение и взрыв, 2017, Т.10. № 2. – С.66-72.
38. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. Иницирование гетерогенной детонации в трубах с витками и спиралью Щелкина // Теплофизика высоких температур, 2006, том 44, № 2. – С.285-292.
39. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 428 с.
40. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов / Я.М. Щелоков, Э.М. Телегин, В.Н. Подымов, В.И. Гасников. - Казань: Изд-во КГУ, 1974. - 216 с.
41. А.с. № 457844 (СССР). Камера пульсирующего горения / Э.М. Телегин, Д.А. Ильин, В.Н. Подымов и др. - БИ № 3, 1975.
42. А.с. № 612125 (СССР). Устройство пульсирующего горения / Н.Р. Чучалин, В.Н. Подымов, Я.М. Щелоков - БИ № 23, 1978.
43. А.с. № 612122 (СССР). Устройство для создания пульсирующего потока продуктов сгорания / Э.М. Телегин, Я.М.Щелоков, О.В. Танцырев и др. - БИ № 23, 1978.
44. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые установки для нанесения покрытий (обзор) // Сварочное производство, 1989, № 11. – С.21-24.
45. Разрушение горного массива машинами взрывоимпульсного действия. М.: Наука, 1974. - 230 с.
46. Взрывоимпульсное разрушение горных пород. М.: Наука, 1978. - 212 с.
47. А.с. № 612123(СССР). Устройство для создания пульсирующего потока продуктов сгорания / Э.М. Телегин, А.Г. Габидовский, В.Н. Подымов и др. - БИ № 23, 1978.
48. Experimental and theoretical studies on the formation of detonation waves in variable geometry tubes/ By E.Bolinger, M.C. Fong et al. Washington, 1963 (NASA TN D-1983). – 75 p.
49. Самовоспламенение углеводородов в присутствии промотирующих добавок / А.А. Борисов, Б.Е. Гельфанд, Е.В. Драгалова и др. // Химическая физика, 1983, № 6, с. 838 - 848.
50. Мехтиев Р.И. Особенности образования NO и CHx при форкамерно-факельном поджигании горючей смеси и возможности уменьшения их концентраций. - Физика горения и взрыва, 1984, № 5, с. 70-73.
51. Скорость и стабильность выгорания при форкамерно-факельном зажигании в двигателе внутреннего сгорания / Л.А. Гуссак, В.П. Карпов, В.Г. Слущкий, А.И. Спасский.- Физика горения и взрыва, 1983, № 5, с. 104 - 108.
52. Переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения с отдельной подачей топливных компонентов / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов, В. С. Иванов, А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк, Ф. С. Фролов, И.О. Шамшин // Доклады Академии наук, 2013, том 449, № 6, с. 1-4.
53. Волков К.Н., Булат П.В. История исследования детонационного горения // Ударные волны: Сборник

- статей – Краснодар: Издательский Дом – ЮГ, 2015 – С.105-128.
54. Корытченко К.В. Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления // Вісник НТУ «ХП». 2012. № 49 (955). – С. 85-98.
 55. Медведев С.Н. Математическое моделирование самовоспламенения, горения и детонации тройных смесей углеводород – водород – воздух. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2011. – 23 с.
 56. Заев И.А. Расчетно-теоретическое исследование механизмов инициирования детонации в газовых смесях при воздействии неравновесной плазмы электрического разряда. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2008. – 21 с.
 57. Мануйлович И.С. Взрывные и детонационные процессы в каналах и открытом пространстве. Автореф...к.ф.-м.н. – М., 2010. – 25 с.
 58. Заев И. А., Кириллов И. А., Потапкин Б. В. Теоретическое исследование механизмов инициирования детонации при взаимодействии взрывной волны с тепловыми неоднородностями, вызванными стримерами коронного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-6/articles/278/>
 59. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц / В.П. Ефремов, М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, И.С. Яковенко // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 4. – С.52-59.
 60. Kailasanath K., Li C. Detonation Initiators for Propulsion Systems https://www.nrl.navy.mil/content_images/05Simulation_Kailasanath.pdf
 61. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APMWinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2011. - 388 с.
 62. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
 63. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. - 142 с.
 7. Zverev I.N., Smirnov N.N. Gas dynamics of combustion. - Moscow: Izd-vo MGU, 1987. - 307 p.
 8. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. Part 1. - M: Ch. Ed. Phys.-Math. lit.- 1987. - 464 p.
 9. Zel'dovich Ya.B. Selected works: Chemical physics and hydrodynamics. - Moscow: Science. 1984. - 374 p.
 10. Detonation-gas equipment for coating deposition / Yu.A. Kharlamov, M.H. Shorshorov, Yu.I. Pisklov, B.L. Ryaboshapko. - M.: IMET AS USSR, 1980 - 65 p.
 11. On the mechanism of pulse cleaning. - Kazan: Publishing house KSU, 1979 - 72 p.
 12. Podymov V.N. Relaxation oscillations of the flame - Kazan: Izd-vo KSU, 1979 - 63 p.
 13. Podymov V.N., Severyanin V.S., Shchelokov Ya.M. Applied research of vibration combustion. - Kazan: Publishing house KSU, 1978. - 219 p.
 14. Khitrin L.N. The physics of combustion and explosion. Moscow: Moscow State University. - 1957.
 15. Pyatnitsky L.I. On the mechanism of the acceleration of the flame in the transition of normal combustion to detonation. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1962, v. 144, No. 6, p. 1262-1265.
 16. Freivald G. Rapid chemical reactions, combustion and detonation in gases. In: Physics of fast processes. T. III. - Moscow: Mir, 1971.
 17. Popov V.A. Some regularities of the predetonational section of flame propagation. - Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. OTN, 1953, No. 10, p. 1428-1439.
 18. Shock waves in real gases. Moscow: Nauka, 1968.
 19. Salamandra G.D. State of the environment in front of the flame front in the initial stage of the combustion process // Thermophysical properties and gas dynamics of high-temperature media. Moscow: Nauka, 1972, p. 122-130.
 20. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. Initiation of gas detonation in pipes with steep U-shaped turns // Reports of the Academy of Sciences, 2007, Vol. 417, No. 6, pp. 1-5.
 21. Utkin P.S., Ahmadyanov I.F., Lebedeva A.Yu. Numerical study of the initiation of gas detonation in pipes with complex wall geometry // Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N.I. Lobachevsky, 2011, No. 4 (3), p. 1206-1208.
 22. Frolov S.M. Detonation initiation techniques for pulse detonation propulsion // Progress in Propulsion Physics 1 (2009) 321-340.
 23. Smirnov N.N., Nikitin V.F. Influence of channel geometry and mixture temperature on the transition of combustion to detonation in gases // Physics of Combustion and Explosion, 2004, v. 40, No. 2. - P. 68-83.
 24. Utkin P.S. Numerical simulation of initiation and propagation of gas detonation waves in profiled tubes. Autoref... k.f.-m.n. - M., 2010. - 23 p.
 25. Frolov S.M., Aksenov V.S. The Initiation of Gas Detonation in a Pipe with a Profiled Obstacle // Doklady RAN, 2009, Vol. 427, No. 3, pp. 344-347.
 26. Frolov S.M., Aksenov V.S., Skripnik A.A. Initiation of detonation in a mixture of natural gas with air in a pipe with a focusing nozzle // Doklady RAN, 2011, Vol. 436, No. 3, pp. 346-350.
 27. Initiation of detonation in a pipe with a profiled central body / S.M. Frolov, I.O. Shamshin, S.N. Medvedev, A.V. Dubrovsky // Doklady RAN, 2011, Vol. 438, No. 5, pp. 640-643.
 28. Reduction of the length and time of the transition of combustion to detonation in a pipe with profiled regular obstacles / S.M. Frolov, I.V. Semenov, P.V. Komissarov, P.S.

References

1. Shchelkin K.I., Troshin Ya.K. Gas dynamics of combustion. — M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. - 1963. - 256 p.
2. Shorshorov M.Kh., Kharlamov Yu.A. Physicochemical bases of detonation-gas spraying of coatings. - M.: Nauka, 1978. – 224 p.
3. Bazhenova T.V., Golub V.V. Use of gas detonation in controlled frequency mode (review) // Physics of Combustion and Explosion, 2003, vol. 39, no. 4. - P.3-21.
4. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. Iss. 6. P.545-672.
5. Vasiliev A.A. Optimization of the transition of combustion to detonation // Physics of Combustion and Explosion, 2012, vol. 48, No. 3. - P.25-34.
6. Explosive phenomena. Evaluation and consequences: In 2 books. Book. 1 / Baker U., Cox P., Westin P. et al. - M: Mir, 1986. - 319 p.

- Utkin, VV Markov // *Doklady RAN*, 2007, Vol. 415, No. 4, pp. 509-513.
29. Cyclic transition of combustion to detonation in a flowing combustion chamber of a pulse detonation burner device / SM Frolov, VS Aksenov, KA Avdeev, AA Borisov et al. // *Chemical Physics*, 2013, Volume 32, No. 3. - P. 39-43.
 30. M. Assad, O. Penyazkov. Methods for accelerating the transition of combustion to detonation in a small-sized combustion chamber of a reactive type. VESTSI NATSYANALNYA AKADEMII NAVUK BELARUS, No. 2, 2015. SERIES FIZIKA-TEKhNICHNYKH NAVUK. - P.72-76.
 31. Initiation of gas detonation by a traveling impulse of forced ignition / SM Frolov, V. Ya. Basevich, VS Aksenov. SA Polikhov // *Reports of the Academy of Sciences*, 2004, vol. 394, No. 2, p. 1-3.
 32. Zhukov V.P. Ignition of saturated hydrocarbons at high pressures and initiation of detonation by a nanosecond discharge. Autorefkf.-mn. - Dolgoprudny, 2005. - 23 p.
 33. Rakitin A.E. Initiation of detonation in gases by a high-voltage nanosecond discharge. Autorefkf.-mn. - Dolgoprudny, 2009. - 24 p.
 34. Smirnov N.N. Gas and wave dynamics, Iris Press, Moscow, 2005.
 35. Ivanov K.V. Control of the combustion transition in combustion in detonation in channels of subcritical diameter. Autorefkf.-mn. - M., 2012. - 24 p.
 36. Konovalov G.M. Investigation of the effect of a pulsed corona discharge on the development of detonation in gas mixtures. Autorefkf.-mn. - M., 2007. - 22 p.
 37. Compact pulse predetonator for initiating the working process in detonation combustion chambers / V.A. Smetanyuk, V.S. Aksenov, A.S. Koval, S.M. Frolov // *Burning and Explosion*, 2017, T.10. № 2. - P.66-72.
 38. Frolov SM, Aksenov VS, Basevich V.Ya. Initiation of heterogeneous detonation in pipes with coils and spiral Schelkina // *Thermophysics of high temperatures*, 2006, Volume 44, No. 2. - P.285-292.
 39. Sokolik A.S. Self-ignition, flame and detonation in gases. - Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960. - 428 p.
 40. Methods of external cleaning of waste-heat boilers / Ya.M. Shchelokov, E.M. Telegin, V.N. Podymov, V.I. Gasnikov. - Kazan: Publishing house of KSU, 1974. - 216 p.
 41. A.c. No. 457844 (USSR). Pulsating Burning Chamber / EM.Telegin, O.A. Ilyin, V.N. Podymov and. others - BI No. 3, 1975.
 42. A.c. No. 612125 (USSR). The device of pulsating combustion / N.R. Chuchalin, V.N., Podymov, Ya.M.Shchelokov - BI No. 23, 1978.
 43. A.c. No. 612122 (USSR). Device for creating pulsating flow of combustion products / E.M. Telegin, Ya.M.Shchelokov, O.V. Dancirev et. al. - BI No. 23, 1978.
 44. Kharlamov Yu.A. Detonation-gas plants for coating applications (review) // *Welding Production*, 1989, No. 11. - P.21-24.
 45. Destruction of the mountain massif by explosion-pulse machines. Moscow: Nauka, 1974. - 230 p.
 46. Explosive destruction of rocks. Moscow: Nauka, 1978. - 212 p.
 47. A.c. No. 612123 (USSR). Device for creating pulsating flow of combustion products / EM. Telegin, A.G. Gabidovsky, V.N. Podymov et. al. - BI No. 23, 1978.
 48. Experimental and theoretical studies on the formation of detonation waves in variable geometry tubes/ By E.Bolinger, M.C. Fong et al. Washington, 1963 (NASA TN D-1983). - 75 p.
 49. Self-ignition of hydrocarbons in the presence of promoting additives. Borisov, B.E. Gelfand, E.V. Dragalova et al., *Chemical Chemistry*, 1983, No. 6, p. 838 - 848.
 50. Mekhtiyev RI Features of the formation of NO and CHx in the prechamber-flare ignition of the combustible mixture and the possibility of reducing their concentrations. - *Physics of burning and explosion*, 1984, No. 5, p. 70-73.
 51. Velocity and stability of burn-up in prechamber-flare ignition in an internal combustion engine / L.A. Gussak, V.P. Karpov, V.G. Slutsky, A.I. Spassky. - *Physics of Combustion and Explosion*, 1983, No. 5, p. 104 - 108.
 52. Combustion into detonation under conditions of high-velocity flow with separate supply of fuel components / SM Frolov, VS Aksenov, KA Avdeev, AA Borisov, VS Ivanov, A. S. Koval, S. N. Medvedev, V. A. Smetanyuk, F. S. Frolov, I.O. Shamshin // *Reports of the Academy of Sciences*, 2013, volume 449, No. 6, p. 1-4.
 53. Volkov K.N., Bulat P.V. History of Detonation Combustion Studies // *Shock Waves: Collection of Articles - Krasnodar: Publishing House - SOUTH*, 2015 - P.105-128.
 54. Korytchenko K.V. Analysis of the conditions for direct initiation of detonation in a hydrogen-oxygen mixture of atmospheric pressure // *Bicnik NTU "KhPI"*. 2012. No. 49 (955). - P. 85-98.
 55. Medvedev SN Mathematical modeling of autoignition, combustion and detonation of ternary hydrocarbon-hydrogen-air mixtures. Autorefkf.-mn. - M., 2011. - 23 p.
 56. Zaev IA A theoretical and theoretical study of the mechanisms of initiation of detonation in gas mixtures under the influence of a nonequilibrium plasma of an electric discharge. Autorefkf.-mn. - Moscow, 2008. - 21 p.
 57. Manuilovich IS Explosive and detonation processes in channels and open space. Auto-refph-m. - M., 2010. - 25 with.
 58. Zaev IA, Kirillov IA, Potapkin BV Theoretical investigation of the deuteron initiation mechanisms during the interaction of a blast wave with thermal inhomogeneities caused by corona discharge streamers // *Physico-chemical kinetics in a gas di- nite*. 2008. T. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-6/articles/278/>
 59. Volumetric initiation of gas detonation due to radiant heating of microparticles suspended in a gas / V.P. Efremov, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, I.S. Yakovenko // *Letters in ZhTF*, 2016, Vol. 42, no. 4. - P.52-59.
 60. Kailasanath K., Li C. Detonation Initiators for Propulsion Systems https://www.nrl.navy.mil/content_images/05Simulation_Kailasanath.pdf
 61. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
 62. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 63. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Харламов Ю.О. Керуоче ініціювання газової детонації.

У статті розглянуті способи і методи керованого ініціювання газової детонації в технічних пристроях, що використовують як джерело енергії детонаційне горіння газів. Систематизовані і класифіковані конструктивно-технологічні способи і прийоми ініціювання. Розглянуто схеми конструкцій для прискорення переходу горіння в детонацію. Коротко описані методи прямого ініціювання детонації.

Ключові слова: детонаційна хвиля, детонаційна камера згорання, джерело запалювання, предетонаційна відстань, джерело запалювання, перешкоди-турбулізатори, ударна хвиля.

Kharlamov Y.A. Controlled initiation of a gaseous detonation

The means and methods of controlled initiation of gas detonation in technical devices that use detonation combustion of gases as an energy source are considered in the article. Systematized and categorized constructive-technological means and methods of initiation. Schemes of designs for accelerating the transition of combustion to detonation are considered. The methods of direct initiation of detonation are briefly described.

Key words: detonation wave, detonation combustion chamber, ignition source, predetonation distance, ignition source, obstacle-turbulizers, shock wave.

Харламов Ю.О. – д.т.н., професор, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 12.10.2017