

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ И ЧАСТЕЙ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2006 В.Н. Федоренко

Михайловская военная артиллерийская академия, г. Санкт-Петербург

По результатам экспериментов получены графические и аналитические зависимости потерь удельного импульса на заполнение, продувку и соотношение компонентов, которые использованы в теоретико-экспериментальной методике расчёта параметров детонационного двигателя.

В настоящее время существует большое разнообразие реактивных двигателей, которые можно разделить на две больших группы – воздушно-реактивные (ВРД) и ракетные. Наиболее широкое применение для авиации нашли воздушно-реактивные, а для ракетно-космической техники – ракетные двигатели твёрдого топлива и жидкого топлива. Предельно допустимое значение удельного импульса (J_y) наиболее эффективного из химических ракетных двигателей – жидкостного – составляет 5000 Нс/кг и в этом направлении вряд ли стоит ждать каких-либо больших изменений.

Дальнейший прогресс в улучшении экономичности силовых установок и их габаритно-массовых характеристик возможен, в частности, за счет использования газовой детонации в качестве рабочего процесса. В этом плане представляет интерес разработка двигателей детонационного горения, которая основана на «прорывных» технологиях и удовлетворяющая принципу двойного назначения. Практически прямоточные гиперзвуковые воздушно-реактивные двигатели со сверхзвуковым горением являются детонационными двигателями (ДД) с непрерывной подачей компонентов топлива.

Детонационные двигатели – это новый класс двигательных установок, создающих тягу за счёт детонационного сгорания рабочей смеси. Принцип их работы заключается в использовании детонационной волны, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью по заранее смешанной топливовоздушной смеси и вызывающей большие давления в камере сгорания и, вследствие этого, большой импульс тяги. Для ДД характерно большое разнообразие используемых компонентов топлива как по агрегатному состоянию, так и по структуре. Наиболее це-

лесообразной топливной парой является природный газ и кислород. Для полёта в пределах атмосферы в качестве окислителя ДД целесообразно использоваться заборный воздух.

По зарубежным данным, ДД могут иметь более высокий удельный импульс при скоростях полёта $M = 0...4$. Это достигается более полным использованием энергии топлива за счет подвода тепла к газовому потоку при постоянном объеме (с использованием цикла $V=const$), а, следовательно, и при более высоких степенях повышения давления в цикле, недостижимых для ВРД традиционных схем. Следовательно, они могут быть использованы не только в качестве маршевых, но даже и стартовых ракетных двигателей. Однако в настоящее время разработка таких двигателей затруднена.

Результаты проведённых исследований позволяют сделать вывод о том, что ДД также будут иметь высокий удельный импульс при скоростях полёта $M=7...10$ за счёт разработки принципиально нового типа двигателя с организацией непрерывного (стационарного) детонационного процесса с образованием стационарной детонационной волны.

Проведенные исследования также показали, что для детонационных двигателей характерны такие достоинства, как:

- высокое значение удельного импульса по сравнению с другими известными типами реактивных двигателей;

- более экономичная работа, т.к. детонация обладает рядом преимуществ по сравнению с горением, в том числе более высоким КПД;

- возможность организации рабочего процесса в детонационной камере (ДК), как при низких, так и при высоких давлениях подачи компонентов топлива;

- детонационный двигатель может быть разработан на компонентах топлива любого агрегатного состояния (твёрдое, жидкое, газообразное, псевдосжиженное, пастообразное) с последующей их газификацией, что позволит подобрать нетоксичные и дешёвые компоненты топлива, имеющих широкую сырьевую базу;

- простота конструкции, за счет использования меньшего количества подвижных частей.

Основными элементами и системами ДД являются: детонационная камера с соплом, система продувки, система смесеобразования и подачи, система инициирования и система управления. Одним из вариантов может быть также ДД, структурная схема которого предложена в патенте №2066778.

Детонационная камера – устройство для организации и поддержания детонационного процесса. Детонационная камера должна выдерживать необходимые давления и температуры, возникающие при прохождении детонационной волны. Необходимым элементом ДК является сопло.

Система инициирования предназначена для формирования детонационного импульса с целью возбуждения детонации в ДК.

Система смесеобразования и подачи предназначена для качественного смешения компонентов топлива и подачи их в детонационную камеру.

Система продувки предназначена для освобождения ДК от продуктов детонации.

Система управления предназначена для управления всеми системами двигателя в автоматическом режиме.

Рассмотрим их в указанной последовательности.

Основным элементом любого ДД является детонационная камера.

Детонационные камеры могут иметь следующую классификацию:

- односекционные (однокамерные);
- щелевые (линейные);
- многокамерные.

В первом случае детонационная камера состоит из следующих частей: корпуса, центрального тела и инициатора, наличие которого определяется способом инициирования. Можно подобрать ряд схем детона-

ционных камер, для которых характерно следующее:

- интенсификация внутрикамерных процессов за счет системы ударных волн;

- управление модулем и направлением вектором тяги при одновременной интенсификации внутрикамерных процессов путем осевого и углового перемещения отражателя;

- управление модулем вектора тяги за счет варьирования частоты детонационных процессов путем изменения числа срабатывающих детонационных трубок или путем изменения объема детонационных камер.

В связи с тем, что более глубокие исследования с ДК в виде полузамкнутой полости проводятся в МГУ им. М.В. Ломоносова, авторы описание своих исследований в данной работе не приводят.

Щелевая (линейная) детонационная камера имеет один из поперечных размеров больше других. Ввод рабочей смеси в детонационную камеру, и движение детонационной волны происходит вдоль наибольшей стороны. Отличительной особенностью линейной детонационной камеры является возможность придания любой конфигурации щели и произвольного ее размещения на несущих поверхностях летательных аппаратов и других транспортных средств. Щель детонационной камеры может быть выполнена в виде замкнутого или разомкнутого контура. Детонационная камера включает желоб с окнами и козырьками, форсунками и инициатором детонации.

Результаты испытаний линейных ДК показали:

1. Устойчивая детонация наблюдается в металлических трубах при соотношении

$$l/d_{экс} \geq 10.$$

2. В цилиндрических трубах $l/d_{экс} \approx 2...3$ с прорезями вдоль образующей с $\delta = 8\text{мм}$ - результат сомнительный, с $\delta = 20\text{мм}$, $\delta = 25\text{мм}$ и $\delta = 36\text{мм}$ - быстрое горение, переходящее в детонацию.

3. В мелком "желобе" при $l/d_{экс} \leq 2$ детонация не возбуждается.

4. Детонация наиболее устойчиво зарождается на отражённой от дна детонационной волне.

5. В линейных ДК при определённых конструктивных доработках можно получить

устойчивый детонационный процесс.

Третьей разновидностью детонационных камер является многосекционная конструкция, которая состоит из двух частей: самой детонационной камеры с рядом секций и эжекторного насадка. Секции соединяются между собой газодинамически через окна, размещенные в смежных стенках камер. Эжекторный насадок предназначен для увеличения тяги за счет эжекции воздуха. На одной из стенок камеры устанавливается инициатор. Порядок срабатывания секций задается системой управления ДД. К таким камерам также можно отнести сотовые конструкции.

По результатам экспериментов были получены графические и аналитические зависимости потерь удельного импульса на заполнение, продувку и соотношение компонентов, которые были использованы в теоретико-экспериментальной методике расчёта параметров детонационного двигателя.

Кроме того, по результатам проведения 104-х экспериментальных пусков 8-ми секционной модели детонационной камеры сделаны следующие выводы:

1. В процессе проведения экспериментальных исследований подобраны такие профили передаточных окон, которые обеспечивают надежную передачу детонационных процессов из одной детонационной камеры в другую.

2. В процессе испытаний детонационные процессы наблюдались во всех секциях детонационной камеры.

3. На основе исследования баллистического маятника определены усредненные значения J_y и J_I для разработанной модели ДД.

4. Необходимо продувать воздухом внутренний объем секций детонационной камеры между одиночными детонационными циклами.

5. Использование эжектирующего насадка дает прирост J_y и J_I на 20...30% при соотношении $A_{эж}/A_{ок}=0,25...0,3$.

6. Использование на выходе детонационной камеры расширяющегося сопла с углом полураствора $\alpha = 10...20^\circ$ дает прирост J_y и J_I на 50...90%

7. В результате анализа и обработки

результатов огневых испытаний получены следующие зависимости

$$\bar{J}_{3П} = 0,88 - 1,88 \cdot \bar{V}_{3П} + 1,96 \cdot \bar{V}_{3П}^2;$$

$$\bar{J}_{ПР} = 0,59 + 0,08 \cdot \bar{V}_{ПР} + 0,33 \cdot \bar{V}_{ПР}^2;$$

$$\bar{J}_K = -37,22 + 77,04 \cdot \bar{K}_K - 38,84 \cdot \bar{K}_K^2,$$

где $\bar{J} = J_i/J_T$ - относительное значение удельного импульса;

$$\bar{V}_{3П} = V_{3П}/V_{ДК}; \bar{V}_{ПР} = V_{ПР}/V_{ДК};$$

$V_{3П}$ - объем камеры, заполненный детонационной смесью;

$V_{ПР}$ - продутый объем камеры;

K_K - коэффициент избытка окислителя.

8. Полученные зависимости могут быть использованы для расчёта различных ДК, так как они получены в относительных величинах.

Предложенные разновидности многосекционных детонационных камер могут найти применение:

- в подъемных двигателях летательных аппаратов вертикального взлета и посадки;
- в двигателях для транспортных средств на воздушной подушке;
- в маршевых и вспомогательных двигателях.

Одной из основных систем, обеспечивающих программное изменение тяги, является система инициирования. Исполнительным элементом ее, как правило, являются инициатор или мощное электроискровое устройство.

При разработке ДД возникает необходимость в организации замкнутого цикла работы. В этом случае основной детонационный импульс, возникающий в детонационной камере, возбуждает входной (задающий) детонационный импульс. Причем, этот импульс должен формироваться через определенное время t_3 .

Замкнутый цикл работы ДД вызван следующими причинами:

- необходимостью автономной работы двигателя;
- необходимостью достижения предельной частоты детонационных процессов в камере;
- повышением экономичности двигателя.

Время задержки t_3 можно реализовать электрическим и газодинамическим способом.

Электрический способ задержки, в свою очередь, может быть осуществлен как электронными, так и электромеханическими устройствами. Газодинамический способ задержки может быть осуществлен в процессе реализации перехода горения в детонацию и за счет увеличения транспортного времени путем перехода детонационной волны из секции в секцию.

Для реализации этих способов были разработаны две системы инициирования: электрическая и газодинамическая.

Так как работа этих схем во многом аналогична, то рассмотрим их работу на примере электронной системы инициирования. Для нее возможны следующие режимы работы:

- режим запуска;
- рабочий режим.

В случае отказа каких-либо элементов ДД в процессе полета сигнал обратной связи U_{oc} в систему управления не поступает, что сигнализирует об отсутствии детонационных процессов в детонационной камере. В этом случае система управления будет выдавать импульсный электрический сигнал $U_{пуск}$ с заданной частотой до тех пор, пока не появится сигнал обратной связи U_{oc} .

На систему инициирования могут быть возложены функции, как регулирования, так и управления.

Система инициирования может работать только при совместном функционировании с системой управления ДД. Одновременно система управления синхронизирует систему продувки и топливоподачи. Следует иметь в виду, что смесеобразование компонентов топлива с целью образования рабочей смеси происходит вне детонационной камеры. Учитывая внешнюю аналогию в принципах работы систем продувки и топливоподачи, рассмотрим работу только систем продувки.

Предлагаются две схемы систем продувки детонационных камер.

В первой из них компонент для продувки, в качестве которого целесообразно использовать воздух из окружающей среды, подается в детонационную камеру непрерывно и по всей длине.

Во втором случае, компонент для продувки подается за счет эжекции, создавае-

мой детонационной волной.

Отличительной особенностью системы топливоподачи является наличие в ней исполнительных устройств в виде эжекторов, инжекторов или форсунок.

Значительный прирост I_y можно получить с использованием эжекторного насадка.

Известно, что тяга ДД прямо пропорциональна частоте детонационных процессов. Следовательно, для увеличения тяги необходимо увеличить частоту работы ДД. В связи с этим, многими учеными предпринимаются попытки разработки моделей детонационных двигателей с максимальной частотой внутрикамерных процессов к камере двигателя. Для этого предлагается использовать генератор Гартмана, который может служить не только источником высокочастотных импульсов, но и являться инициатором детонационных волн. Генератор состоит из двух основных частей: сверхзвукового сопла и резонатора, представляющего собой трубку, закрытую с одного конца и обращенную открытым концом к сверхзвуковому соплу.

Работает генератор следующим образом. При определенных режимах течения газового потока, истекающего из сверхзвукового сопла в резонатор, в последнем возникают колебания среды с образованием ударных волн. В свою очередь это приводит к увеличению давления и температуры на дне резонатора, что может вызвать детонационные процессы в рабочей смеси с частотой от сотен $\Gamma\mu$ до десятков $k\Gamma\mu$.

Однако в обычном генераторе Гартмана невозможно обеспечить осевое истечение продуктов детонации. Поэтому должна быть разработана такая конструкция, которая позволяла бы истекать продуктам детонации из резонатора параллельно его оси. Это, возможно, реализовать, если сверхзвуковое сопло изготовлено с центральным телом и имеет сквозное отверстие, соосное резонатору и позволяющее истекать продуктам детонации. Для интенсификации процессов в ДД, работающих на гетерогенных смесях, могут быть использованы ультразвуковые устройства.

В статье кратко суммируется важность тщательного, методического и системного инженерного подхода к вопросу разработки ДД, а также представлены некоторые резуль-

таты экспериментальных исследований моделей ДД. В качестве заключения стоит отметить, что перспективными направлениями в развитии ДД считаются разработка схемы с замкнутым циклом работы, с газодинамической системой инициирования, с системами продувки и смесеобразования, с детонационной камерой в виде многосекционной конструкции, а также на основе генератора Гартмана. Фундаментальные исследования детонационных процессов, могут привести к самым неожиданным внедрениям в технике.

На разработку ДД требуются совместные усилия стран и организаций и необходимое для этого финансирование.

В целом, при помощи рассмотренных детонационных двигателей можно обеспечить:

1. Придание максимально возможной скорости полёта летательного аппарата, за

счёт реализации непрерывного детонационного процесса в ДД, использующего химические компоненты топлива.

2. Возможность полёта летательного аппарата в широком диапазоне изменения высот и скоростей за счёт разработки комбинированных двигателей.

3. Улучшение маневренных свойств летательного аппарата при подлёте к цели (причаливании, стыковке, коррекции на орбите и т.д.) за счёт использования высокоточных, стабильных и быстродействующих ($\tau_{имп} = 10^{-4} \text{сек}$) детонационных импульсов в реактивных системах управления повышенной точности.

Работа выполнена по гранту Президента РФ № МК-2871.2005.10

DESIGN PECULIARITIES OF THE MAIN SYSTEMS AND PARTS OF DETONATION ENGINES

© 2006 V.N. Fedorets

In the work there are defined the main trends in the development of jet engines; there are given grounds to the necessity of creation of detonation engines that are considered to be one of the advanced and perspective; there are pointed out the advantages of detonation engines; there is a description of their functioning principle and design peculiarities.