

УДК 536.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ТРУБЕ В ТЕРМИНАХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

© 2011 г.

Д.И. Бабушенко

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

bdi@ciam.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

С помощью численных методов моделировались газодинамические процессы в модельной детонационной пульсирующей трубе, работающей на пропано-воздушной смеси в условиях обтекания внешним потоком. Представлен способ получения по полям газодинамических параметров соответствующих термодинамических циклов для различных жидких объемов газовой смеси. Установлена связь между газодинамическими процессами в различных стадиях рабочего процесса пульсирующей трубы с характерными участками термодинамических циклов. Проведен анализ полученных циклов для различных геометрических конфигураций детонационной трубы и предложен путь повышения эффективного КПД.

Ключевые слова: пульсирующая детонационная труба, термодинамический цикл, термодинамические процессы, газодинамические процессы.

Введение

В настоящее время во многих странах есть исследовательские группы, усилия которых направлены на изучение газодинамических процессов, возникающих при детонации горючих смесей. Среди практических приложений детонации особенно перспективным считается разработка и создание двигателей с детонационным сгоранием топлива. Несмотря на длительную историю исследования детонации в применении к созданию тяговых устройств, до сих пор в различных исследовательских группах рассматривается множество схем организации рабочего процесса в предполагаемом двигателе [1–4]. Рассматривается новый подход для анализа нестационарных газовых процессов при наличии детонационной волны в применении к модельной пульсирующей детонационной трубе, работающей на пропано-воздушной смеси, в условиях обтекания внешним потоком.

Постановка задачи

Все представленные результаты касаются классической схемы организации рабочего процесса в пульсирующей детонационной трубе. В качестве базовой конфигурации численной модели рассматривалась цилиндрическая труба длиной $L_{TUBE} = 2.0$ м и радиусом $R_{TUBE} = 0.12$ м, закрытая с одной стороны клапаном устройством,

которое играет роль тяговой стенки, и открытая с другой стороны.

Предполагается, что воздушный поток на высоте $H_{\Pi} = 11$ км со скоростью, соответствующей числу Маха $M_{\Pi} = 2.0$, тормозится в воздухозаборнике с типичным для данного числа Маха набегающего потока значением потерь и попадает в достаточно большую полость (ресивер). Ресивер обеспечивает постоянство давления газа перед клапаном устройством и стабильность работы воздухозаборника. Для упрощения постановки задачи принимается, что смешение пропана с воздухом производится в ресивере.

Готовая стехиометрическая пропано-воздушная смесь через открытое клапанное устройство поступает в детонационную трубу до тех пор, пока не будет заполнена заданная часть трубы (для базовой конфигурации это 80% от всей длины трубы). Затем клапан закрывается и около закрытого конца трубы генерируется детонационная волна путем повышения давления и температуры в области инициирования длиной $L_{INIT} = 0.08$ м. После прохода детонационной волны по трубе начинается истечение из трубы продуктов сгорания. По мере истечения давление на закрытом клапане падает, и когда оно упадет до давления в ресивере (т.е. до давления торможения сверхзвукового потока с учетом потерь в воздухозаборнике), клапан открывается и начинается стадия заполнения свежей топливно-воздушной смесью следующего цикла.

Математическая модель

При численном моделировании течения в пульсирующей детонационной трубе принимается ряд допущений. Рассматривается невязкий и нетеплопроводный 26-компонентный газ, в котором протекают химические реакции, описываемые с помощью кинетической схемы со 159 реакциями. Считается, что смешение пропана с воздухом в ресивере происходит без потерь. Работа клапанного устройства предполагается безынерционной.

Для описания течения используется система, состоящая из уравнений Эйлера и уравнений для определения массовых концентраций компонентов. Система уравнений решается с помощью специального разработанного в ЦИАМ явно- неявно-го метода на основе схемы Годунова.

Полученное решение представляет собой течение газа в переменных Эйлера на протяжении нескольких периодов работы пульсирующей трубы. Однако термодинамические циклы определяются для заданной массы рабочего тела, поэтому чтобы построить термодинамические циклы, требуется перейти к переменным Лагранжа.

Можно дать следующее краткое описание используемой процедуры перехода от переменных Эйлера к переменным Лагранжа. После выхода на периодический режим работы пульсирующей трубы временной интервал на стадии заполнения свежей смесью делится на определенное число участков так, чтобы масса втекающего газа в течение каждого участка была одинакова. От границ полученных участков строятся траектории движения газа в координатах x, t вплоть до достижения каждой траекторией открытого конца детонационной трубы. Середина отрезка между двумя ближайшими траекториями для каждого момента времени считается центром масс жидкого объема.

Описанная процедура полностью определяет закон движения лагранжевых частиц (жидких объемов). Значения газодинамических параметров и массовых концентраций компонентов в каждый момент времени для центров жидких объемов определяются интерполяцией известного решения на фиксированной сетке.

Таким образом, на основе численного решения нестационарных уравнений газовой динамики и химической кинетики может быть построен участок термодинамического цикла для каждого жидкого объема, который соответствует прохождению газа по пульсирующей детонационной трубе от ее входа до выхода. Замыкание термодина-

мического цикла производится по аналогии с [5].

Результаты

Анализ полученных термодинамических циклов жидких объемов в плоскостях PV и ST для цилиндрической пульсирующей трубы позволил выявить следующую важную особенность. Параметры циклов для отдельных жидких объемов отличаются друг от друга и, соответственно, отличаются их КПД.

С газодинамической точки зрения это связано с двумя факторами. Во-первых, из-за того что в ресивере находится горючая смесь под давлением торможения сверхзвукового потока в воздухозаборнике, а в окружающем трубу пространстве статическое давление меньше, по мере заполнения трубы происходит ускорение потока с соответствующим понижением давления. Это приводит к тому, что давление перед детонационной волной рядом с клапаном выше, чем давление ближе к границе между горючей смесью и продуктами сгорания вниз по потоку. Во-вторых, жидкие объемы, которые детонационная волна прошла раньше по мере движения по трубе, расширяются до больших удельных объемов, чем лагранжевы частицы, достигаемые детонацией почти у выхода из трубы. Представляется, что такое поведение отрицательно сказывается на итоговых тягово-экономических характеристиках.

Математическая и физико-химическая модели для расчета нестационарных течений реагирующего газа в пульсирующей детонационной трубе с использованием редуцированного механизма химических реакций в пропано-воздушной среде разработаны с участием В.И. Копченова, П.Н. Кулешова, А.М. Старика, Н.С. Титовой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №10-01-00809).

Список литературы

1. Левин В.А., Нечаев Ю.Н., Тарасов А.И. // Химическая физика. 2001. Т. 20, №6. С. 90–98.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. // Докл. РАН. 2005. Т. 400, №3. С. 338–340.
3. Ремеев Н.Х., Власенко В.В., Хакимов Р.А. // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С.М. Фролова. М.: Торус Пресс, 2006. С. 311–348.
4. Бабушенко Д.И. и др. // Авиадвигатели XXI века: Матер. конф. М.: ЦИАМ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – ISBN 978-5-94049-026-5. С. 1471–1473.
5. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. // Progress in Energy and Combustion Science. 2004. V. 30. P. 545–672.

**ANALYZING GAS-DYNAMICAL PROCESSES IN THE PULSE DETONATION TUBE
IN TERMS OF THERMODYNAMIC CYCLES***D.I. Babushenko*

The gas-dynamic processes in a modeling pulse detonation tube, which operates on a propane-air mixture under external co-flow conditions, have been numerically simulated. The method of determination of the corresponding thermodynamic cycles for different liquid volumes of the gas mixture based on the gas-dynamic parameter fields is presented. The gasdynamic processes in the different work regimes of the pulse detonation tube operation have been correlated with the characteristic parts of the thermodynamic cycles. The obtained cycles for various geometric configurations of the detonation tube have been analyzed, and a way of increasing the effective thermal efficiency has been proposed.

Keywords: pulse detonation tube, thermodynamic cycle, thermodynamic processes, gasdynamic processes.