

УДК 519.63:533.9.07

С.И. ПЛАНКОВСКИЙ¹, О.В. ТРИФОНОВ¹, О.В. ШИПУЛЬ¹, В.Г. КОЗЛОВ^{1,2}¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков²ОАО «Мотор Сич», Запорожье

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В КАМЕРАХ ТЕРМОИМПУЛЬСНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДА СГОРАНИЯ В ДЕТОНАЦИОННЫЙ РЕЖИМ

Разработана математическая модель для расчета процесса горения в замкнутой цилиндрической камере постоянного объема с учетом перехода процесса сгорания топливной смеси из дефлаграционного в детонационный режим. Модель учитывает конечную, зависящую от температуры и давления, скорость химических реакций при горении, процессы теплообмена конвекцией и излучением. Показано, что начальное давление топливной смеси, а также тип горючего оказывает существенное влияние на режимы сгорания, в частности на переход горения в детонацию, что является основным фактором при выборе параметров термоимпульсной обработки.

Ключевые слова: термоимпульсная машина, горение в камере, пропан, метан, детонация, переход горения в детонацию, математическое моделирование.

Введение

Проблема обеспечения промышленной чистоты высокоточных деталей и механизмов, имеющих пары трения, актуальна для всего производства агрегатов летательных аппаратов. На этапе производства она главным образом связана с качественной очисткой кромок и поверхностей составляющих деталей от макро- и микрозаусенцев, микрочастиц и других микроликвидов, которые определяют величину абразивного износа, а для высокоточных механизмов, таких как агрегаты двигателей ЛА, существенно влияют на надежность работы изделия в целом [1].

Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет требованиям финишной очистки агрегатов ЛА. Инструментом при этом является горючая газовая смесь, а очистка происходит при интенсивном тепловом воздействии на деталь в режиме детонационного сгорания топливной смеси.

Детонация – самый эффективный из всех возможных способов прямого сжигания топливных смесей. Именно поэтому в настоящее время во всем мире активно разворачиваются научно-исследовательские работы по использованию управляемой детонации. Для процесса термоимпульсной очистки возможность управления процессом детонации непосредственно связана с качеством обработки, что делает эту задачу еще более актуальной.

С учетом вышеизложенного, целью настоящей работы является создание математических моделей

процессов горения предварительно перемешанной топливовоздушной смеси в камере сгорания термоимпульсной машины, исследование перехода горения из дефлаграционного в детонационный режим и выяснение условий, при которых данный переход возможен.

Описание решаемой задачи и используемых математических моделей

Объектом исследования являются процессы горения и детонации в цилиндрической камере сгорания термоимпульсной установки Т-15 высотой 441 мм и диаметром 280 мм с поджогом сверху камеры. В корпусе камеры выполнено отверстие для подачи топливной смеси. Камера снабжена электрическими свечами для поджога смеси, управляемым клапаном для выпуска продуктов сгорания.

С учетом условий практического применения термоимпульсных установок при задаче рассматривалось сгорание метан- и пропан-воздушных смесей. В ходе численного моделирования при помощи инструментов ANSYS CFX изучалось влияние значения начального давления в камере и типа горючего газа на переход сгорания топливной смеси из дефлаграционного в детонационный режим.

Считалось, что в момент перед зажиганием в камере находится неподвижная гомогенная смесь, с массовой концентрацией топлива в соответствии со стехиометрическим составом: на 1 кг воздуха – 17,2 кг метана или 15,6 кг пропана.

Для численного исследования поставленной задачи использовалась описанная в [2] модель, основанная на применении системы уравнений Навье-Стокса.

При исследовании горения, использовалась модель конечной скорости химических реакций, описанная в [3]. В этом случае химическая реакция горения описывается как совокупность элементарных реакций с количеством вовлеченных компонент.

С учетом сложности процессов, происходящих при термоимпульсной обработке, для оценки адекватности разработанных моделей была решена тестовая задача по моделированию горения метано-воздушной смеси в замкнутой цилиндрической камере. Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными и показаны в [3].

Для адекватного моделирования перехода горения в детонацию при построении сетки конечных элементов (рис. 1), она измельчалась в наиболее вероятных местах возникновения детонации, а также в зоне поджога смеси.

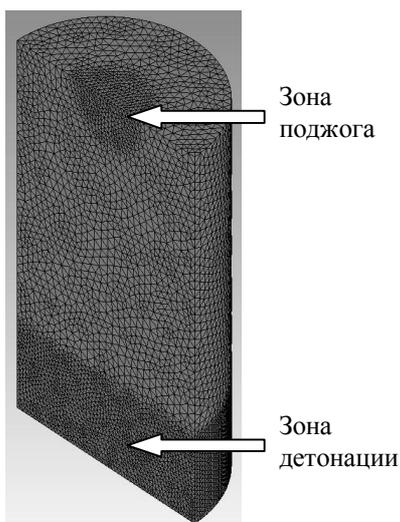


Рис. 1. Расчетная сетка конечных элементов

Анализ результатов моделирования

Моделирование проводилось для случаев горения метан- и пропан-воздушных смесей, с начальными давлениями 0,5, 0,8 и 1,25 МПа.

При моделировании горения исследовалось распространение фронта пламени и температурный режим в камере сгорания. Для получения информации об указанных объектах исследования, при помощи средств ANSYS CFD-Post проводился рендеринг по значению температуры по всему объему

камеры сгорания, что позволило комплексно оценивать температурный режим в камере в режиме реального времени.

Анализ результатов моделирования показывает, что уже с начальных моментов, пламя начинает интенсивно турбулизоваться, что сказывается на существенном завихрении поверхности фронта горения и увеличении площади его поверхности. Переход к детонационному режиму сгорания определялся по возникновению областей с повышенной температурой (с 2000 до 7000 К для случая метано-воздушной смеси – см. рис. 2).

Оставшаяся часть топливной смеси сгорала в детонационном режиме с резким увеличением скорости и температуры горения. Масса заряда, сгоравшая в режиме детонации, определялась следующим образом. Задавалось условие автоматической остановки расчета при возникновении точек с температурой, характерной для детонационного сгорания. После этого суммированием оставшегося в камере кислорода и горючего определялась детонирующая масса заряда.

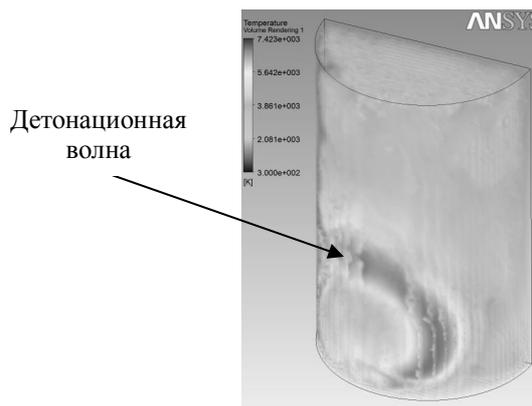
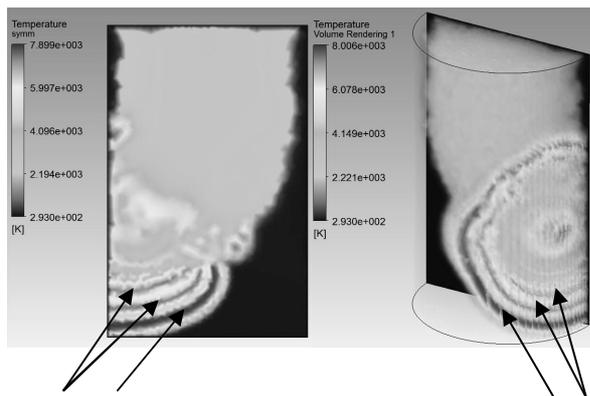


Рис. 2. Возникновение детонации при сгорании метано-воздушной смеси (начальное давление в камере – 1,25 МПа)

Качественных отличий в процессе сгорания метано-воздушной смеси различного давления при моделировании выявлено не было. Существенное отличие от описанного механизма наблюдалось для пропано-воздушной смеси, когда при переходе к детонационному режиму наблюдалось возникновение нескольких волн (рис. 3).

Такое явление может быть, по-видимому, связано с возникновением слоистой детонации, которая для пропано-воздушной смеси впервые описана в [4] для случая сгорания в перегородженном канале (рис. 4). Наблюдается формирование сложной волновой структуры течения. Процесс в целом носит периодический характер, отличный от обычной детонации в однородной среде.



Детонационные волны Детонационные волны

Рис. 3. Возникновение слоистой детонации при горении пропан-воздушной смеси

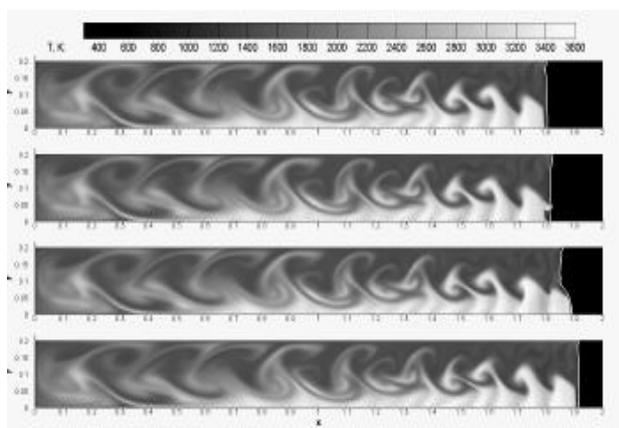


Рис. 4. Поля температуры при слоистой детонации в перегородженном канале [4]

При сгорании пропано-воздушной смеси существенно выше как общая энергия детонации, так и время затухания ударных волн (табл. 1), где

- P_0 – начальное давление, МПа;
- P_{max} – максимальное давление, МПа;
- n – коэффициент повышения давления;
- T – средняя температура в камере после затухания ударных волн, К;
- τ_3 – время затухания ударных волн.

Таблица 1

Результаты моделирования для $P_0=1,25$ МПа

P_0 , МПа	P_{max} , МПа		n		T , К		τ_3 , с	
	CH4	C3H8	CH4	C3H8	CH4	C3H8	CH4	C3H8
1,25	18,25	31,17	14,69	24,9	3551	4839	0.0053	0.0073

Горение в закрытых сосудах сопровождается повышением давления. Если в открытом пространстве нагреваемый при горении газ имеет возможность свободно расширяться и на работу расширения при постоянном объеме идет часть выделивше-

гося в химической реакции тепла, то в закрытых сосудах стенки препятствуют расширению газа и все тепло химической реакции идет только на увеличение внутренней энергии газа.

В ходе моделирования определялось значение давления в камере сгорания (для случая горения метан-воздушной смеси с $P_0= 1,25$ МПа график приведен на рис. 5). Аналогичный график для случая сгорания пропано-воздушной смеси приведен на рис 6.

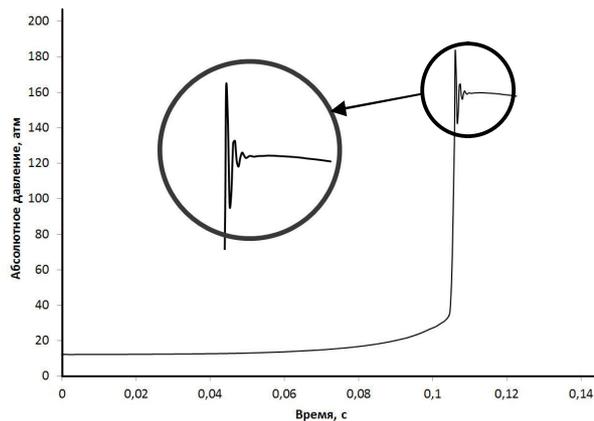


Рис. 5. Изменение давления по времени при сгорании метано-воздушной смеси

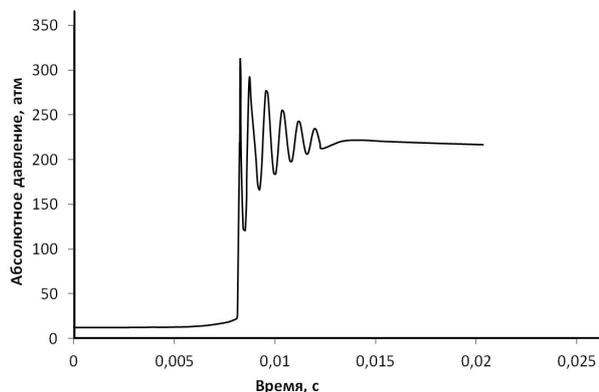


Рис. 6. Изменение давления по времени при сгорании пропано-воздушной смеси

Важным параметром при исследовании детонации является количество заряда (топливной смеси), которое сгорело в детонационном режиме. Этот параметр является определяющим при выборе режимов обработки деталей детонирующими газовыми смесями, так как именно количество заряда определяет выход энергии при детонации.

В исследуемой задаче определялась масса не-сгоревшей топливной смеси в момент перед возникновением детонации.

Также определялась относительная масса заряда по формуле:

$$\bar{m}_3 = m_3 / m_0$$

где \bar{m}_3 – относительная масса детонирующего заряда; m_3 – масса детонирующего заряда, кг; m_0 – начальная масса топливной смеси, кг.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Масса детонирующей смеси в зависимости от типа горючего и начального давления

P ₀ атм.	m ₃ , кг		m ₀ , кг		\bar{m}_3	
	СН4	С3Н8	СН4	С3Н8	СН4	С3Н8
2	0,023	0,015	0,0311	0,032	0,7395	0,469
5	0,0649	0,0629	0,078	0,0832	0,8342	0,756
8	0,1364	0,141	0,1557	0,1665	0,876	0,847
12,5	0,1659	0,145	0,195	0,208	0,8525	0,839

График зависимости относительной массы детонирующего заряда от начального давления в камере сгорания приведен на рис. 7. Более точная оценка влияния начального давления в камере на детонацию топливной смеси возможна при использовании моделей, учитывающих зависимость констант скоростей реакций от давления.

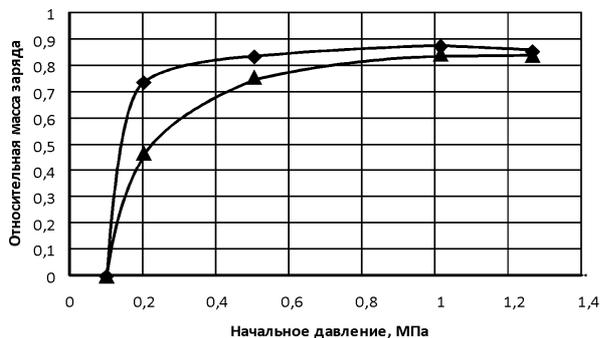


Рис. 7. Зависимость относительной массы детонирующего заряда от начального давления в камере: \blacklozenge – СН4; \blacktriangle – С3Н8

Для выбора режимов термоимпульсной обработки определяющим параметром является время затухания ударных волн после детонации заряда в камере. Результаты расчетов этой величины для рассмотренных случаев приведены на рис. 8.

Результаты моделирования показывают, что использование топливных смесей на основе пропана позволяет реализовать более интенсивные режимы термоимпульсной обработки – как за счет увеличения времени интенсивного теплообмена, определяемого временем затухания ударных волн, так и за счет большей температуры продуктов сгорания.

Представленные результаты получены при использовании упрощенной одностадийной модели горения. С целью получения более точных данных в

дальнейшем планируется использование более полного списка реакций горения метана и пропана с включением реакций, скорости которых зависят от давления. При определении времени затухания ударных волн в камере планируется выделение двух процессов – диссипации энергии детонации за счет вязкости и потери за счет теплообмена с корпусом камеры.

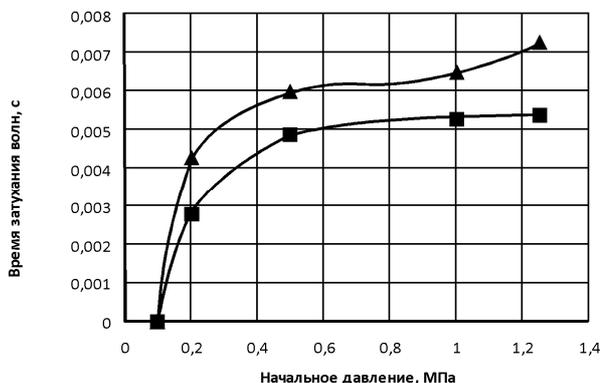


Рис. 8. Зависимость времени затухания ударных волн после детонации заряда от начального давления в камере: \blacksquare – СН4; \blacktriangle – С3Н8

Вторая составляющая может иметь существенное влияние при размещении в камере деталей с развитой поверхностью из материалов с высокой теплопроводностью.

Кроме того, в качестве дальнейших приоритетных задач следует рассматривать исследование возможности управления детонацией заряда в камере, а так же моделирование термонапряженного состояния тонкостенных деталей при термоимпульсной обработке с учетом детонационных процессов.

Выводы

1. Разработана математическая модель перехода процесса сгорания топливных смесей на основе метана и пропана в детонационный режим.
2. Показано, что использование в качестве горючего газа пропана позволяет реализовать более интенсивные режимы термоимпульсной обработки за счет повышения температуры продуктов сгорания и времени затухания ударных волн.
3. Установлено, что начальное давление топливной смеси оказывает существенное влияние на переход горения в детонацию, что является основным фактором при выборе параметров термоимпульсной обработки.
4. Предложены направления дальнейших исследований и совершенствования моделей термоимпульсной обработки с учетом детонационных процессов.

Литература

1. Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation. [Text] / Research reports 1999–2000. University of California, Berkeley. 2002. – P.4-9.

2. Мазниченко, С.А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования [Текст] / С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, О.С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал*. – 2007. – № 7 (44). – С. 45 – 52.

3. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси [Текст] / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В. Трифонов, О.С. Борисова // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 46. – X., 2010. – С. 75 – 87.

4. Мануйлович, И.С. Взрывные и детонационные процессы в каналах и открытом пространстве. [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Мануйлович Иван Сергеевич; МГУ. – М., 2010. – 27 с.

Поступила в редакцию 22.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии авиадвигателестроения, А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГОРІННЯ ПАЛИВНОЇ СУМІШІ В КАМЕРАХ ТЕРМОІМПУЛЬСНИХ МАШИН З УРАХУВАННЯХ ПЕРЕХОДУ ЗГОРАННЯ ДО ДЕТОНАЦІЙНОГО РЕЖИМУ

С.І. Планковський, О.В. Трифонов, О.В. Шипуль, В.Г. Козлов

Запропоновано математичну модель для розрахунку процесу горіння в замкнутій циліндричній камері постійного об'єму з урахуванням переходу згорання паливної суміші з дефлаграційного до детонаційного режиму. Модель враховує кінцеву, залежну від температури, швидкість хімічних реакцій при згоранні, процеси теплообміну конвекцією та випромінюванням. Показано, що початковий тиск паливної суміші, а також тип палива суттєво впливають на режими горіння, зокрема не перехід горіння до детонаційного режиму, що є основним фактором при виборі параметрів термоімпульсної обробки.

Ключові слова: термоімпульсна машина, горіння в камері, пропан, метан, детонація, перехід горіння до детонації, математичне моделювання.

SIMULATION OF FUEL COMBUSTION INTO THE THERMAL-PULSE CHAMBER TAKING INTO ACCOUNT DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION

S.I. Plankovsky, O.V. Trifonov, O.V. Shipul, V.G. Kozlov

Mathematical model for calculation of the fuel combustion into the constant volume cylindrical chamber taking into account deflagration to detonation transition are suggested. Model takes into account heat transfer, convection, irradiation and finite rate chemistry reactions depending on temperature and pressure. It was shown that initial pressure and fuel type exerts significant influence on the combustion mode, particularly on deflagration to detonation transition that plays key role in choosing regimes at thermal-pulse deburring.

Keywords: thermal-pulse equipment, combustion into the chamber, propane, methane, deflagration to detonation transition, mathematical simulation.

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

Трифонов Олег Валерьевич – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Шипуль Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Козлов Владислав Григорьевич – зав. отделом, ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина; соискатель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.