

подтверждает предположение о слабом взаимодействии газа завесы и продуктов сгорания основного потока в этой части сопла Лавалья.

Таким образом, в работе показано, что основными факторами, определяющими экономичность ракетных двигателей со сверхзвуковой газовой завесой, следует считать величину расхода охладителя и способ его подачи. Род завесного газа, структура потока и состав рабочего тела практически не влияют на энергетическую эффективность завес.

Полученные результаты свидетельствуют о незначительной интенсивности массообменных процессов, сопровождающих взаимодействие завесного и основного потоков, и слабом влиянии факторов, отражающих эти процессы, на энергетические характеристики двигателя.

Список литературы

1. Винокуров М.В., Дружин А.Н., Рыжков В.В., Старцев В.В. Исследование теплового состояния высокотемпературного ракетного двигателя малой тяги с дозвуковой газовой завесой //Вестник СГАУ. Сер. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. -Вып. 3, ч.1 -1999. - С. 98-103.
2. Дружин А.Н., Рыжков В.В., Старцев В.В. Энергетическая эффективность дозвуковых газовых завес в ракетных двигателях малой тяги //Вестник СГАУ. Сер. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. -Вып. 3, ч.1 -1999. -С. 104-108.

ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА В ТЕРМОДИНАМИКЕ ТЕЛА ПЕРЕМЕННЫХ МАССЫ И СОСТАВА

Егорычев В.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Рабочее тело в камере ракетных двигателей малой тяги, а также в камерах сгорания различных типов двигателей и энергетических установок представляет собой с точки зрения термодинамики рабочее тело переменных массы и состава.

Построение замкнутой контрольной поверхности, ограничивающей такое рабочее тело, совершенно произвольно. Оно в каждом конкретном случае определяется задачами исследования, удобством и простотой построения математической модели процесса и оперирования этой моделью. Вне границ рабочего тела располагается окружающая среда, с которой рабочее тело обменивается массой и энергией.

Изменение массы рабочего тела обусловлено приходом в контрольный объем исходных веществ и расходом из него действующих элементов рабочего тела. При внутреннем приходе исходные вещества

образуются внутри контрольного объема с поверхностями горения, испарения или сублимации продуктов, находящихся там в конденсированном состоянии. Эти конденсированные вещества не включаются в состав рабочего тела и их объемом пренебрегают.

Миграционное или расходное изменение состава рабочего тела обусловлено приходом исходных веществ по различным каналам приходной миграции, имеющих химический состав, отличный от состава рабочего тела.

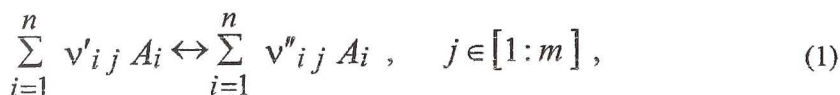
Состав рабочего тела может изменяться также из-за протекания химических реакций между отдельными его компонентами, фазовых и полиморфных превращений. Такое, называемое химическим, изменение состава рабочего тела сопровождается поглощением или выделением тепла, которое необходимо учитывать.

Процессы, протекающие в таком рабочем теле при высокой температуре, сопровождаются различными неравновесными эффектами. Основное значение среди них имеет неравновесное изменение состава газовой фазы рабочего тела. Оно обусловлено конечными скоростями протекания химических реакций. Именно этим объясняется образование экологически вредных примесей продуктов сгорания. Учет конечных скоростей химических реакций необходим для определения химически неравновесного состава продуктов сгорания и рабочего тела, их термодинамических и теплофизических свойств. Без знания этих параметров невозможно использование методов расчета термодинамики тела переменных массы и состава, особенно на переходных и импульсном режимах работы двигателей и энергетических установок.

Для математического моделирования таких процессов требуется привлечение уравнений и соотношений химической кинетики.

Химически неравновесные явления описываются обычно в рамках формальной химической кинетики [1,2]. Согласно ей все превращения в газовой фазе могут осуществляться только в результате элементарных протекающих в одну стадию реакций. Любые же химические взаимодействия могут быть представлены совокупностью этих элементарных процессов. Наиболее вероятными являются элементарные реакции трех типов: мономолекулярные, бимолекулярные и тримолекулярные.

Рассмотрим рабочее тело, состоящее из n компонентов A_i ($i \in [1:n]$), между которыми протекает m обратимых реакций вида



где v'_{ij} и v''_{ij} – стехиометрические коэффициенты j -й химической реакции.

Основным законом формальной химической кинетики является закон действующих масс, согласно которому скорости изменения содержания i -го компонента по прямому и обратному направлениям j -й реакции запишутся соответственно

$$W_{ij}^+ = (v''_{ij} - v'_{ij}) k_j^+ \prod_{k=1}^n C_k^{v'_{kj}}, \quad (2)$$

$$W_{ij}^- = (v'_{ij} - v''_{ij}) k_j^- \prod_{k=1}^n C_k^{v''_{kj}}, \quad (3)$$

где k_j^+ , k_j^- – константы скорости j -й реакции в прямом и обратном направлениях соответственно, $C_k = n_k/V$ – парциальная мольная концентрация в рабочем теле объемом V , k -ой компоненты.

Константы скоростей как прямых, так и обратных химических реакций обычно представляют в аррениусовой форме

$$k_j^+ = A_j^+ T^{n_j^+} \exp \left(-\frac{E_j^+}{R_0 T} \right), \quad (4)$$

$$k_j^- = A_j^- T^{n_j^-} \exp \left(-\frac{E_j^-}{R_0 T} \right), \quad (5)$$

где A_j^+ , A_j^- , n_j^+ , n_j^- , E_j^+ и E_j^- – предэкспоненциальные множители, температурные коэффициенты и энергии активации прямого (+) и обратного (-) направлений протекания реакции соответственно. Эти коэффициенты обычно определяют эмпирически. Они зависят от конкретных условий протекания реакции и способа их определения [3]. Поэтому в различных источниках информации для одних и тех же реакций данные могут сильно отличаться, особенно по предэкспоненциальному множителю A_j .

Иногда зависимости (4) и (5) представляют в виде

$$k_j = p \cdot Z \cdot \exp \left(-\frac{E}{R_0 T} \right), \quad (6)$$

где Z – частотный множитель, определяемый числом столкновений за 1 с в единице объема, содержащего по одному молю каждого из реагирующих веществ, p – «стерический множитель», представляющий долю столкновений, при которых реагирующие частицы ориентированы в пространстве так, что они могут объединиться с образованием активного комплекса. Для большинства реакций величины p и Z практически не зависят от температуры, поэтому зависимость $\ln k_j$ от $\frac{1}{T}$, как правило, линейна.

Константы скорости прямого и обратного направления протекания реакции связаны через константу равновесия следующим образом

$$K_{pj} = k_j^+ / k_j^- . \quad (7)$$

Являясь функцией температуры, константа равновесия K_{pj} определяет вместе с тем отношение равновесных значений концентраций реагирующих компонентов, при которых $W_j^+ = W_j^-$. В этом случае можно записать

$$K_{pj} = \prod_{k=1}^n C_k^{v''kj} / \prod_{k=1}^n C_k^{v'kj} . \quad (8)$$

Уравнение, связывающее скорость химической реакции с концентрациями всех веществ, влияющих на эту скорость, называют кинетическим уравнением или уравнением химической кинетики.

Формальная химическая кинетика предусматривает принцип независимости протекания элементарных химических реакций в рабочем теле. В соответствии с ним общая скорость изменения содержания любого компонента в рабочем теле (реагирующей смеси) равна алгебраической сумме скоростей его изменения по всем протекающим элементарным реакциям. Тогда для рассматриваемого рабочего тела переменных массы и состава уравнения химической кинетики можно записать

$$\frac{dC_i}{d\tau} = W_i = \sum_{j=1}^m W_{ij}^+ + \sum_{j=1}^m W_{ij}^-, \quad i \in [1:n] , \quad (9)$$

где n – число индивидуальных веществ рабочего тела, между которыми протекает m химических реакций.

Учитывая выражения (2) и (3) систему уравнений (9), можно записать

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^m (v''_{ij} - v'_{ij}) k_j^+ \prod_{k=1}^n C_k^{v'_{kj}} + \sum_{j=1}^m (v'_{ij} - v''_{ij}) k_j^- \prod_{k=1}^n C_k^{v''_{kj}}, i \in [1:n], \quad (10)$$

Система кинетических уравнений (9) или (10) позволяет в любой момент времени определить концентрацию тех веществ, относительно которых они записаны, т.е. рассчитать неравновесный химический состав продуктов реакции, а значит и рабочего тела в термодинамике тела переменных массы и состава.

Наиболее целесообразно состав рабочего тела представлять не парциальными мольными концентрациями C_i , а мольными (объемными) r_i или массовыми g_i долями. Эти величины остаются постоянными при изменении основных параметров состояния рабочего тела: p – давления, V – объема и T – температуры. Они изменяются лишь при расходном или химическом изменении состава рабочего тела. Для идеальных газов эти величины определяются по уравнениям

$$r_i = \frac{C_i}{C} = \frac{n_i}{N} = \frac{p_i}{p}, \quad (11)$$

$$g_i = \frac{\rho_i}{\rho}, \quad (12)$$

где ρ – плотность смеси продуктов реакции, N – общее число молей газовой фазы продуктов реакции, $C = N/V$ – общая мольная концентрация.

Для определения термодинамических и теплофизических свойств продуктов реакции необходимо определить частные производные неравновесного состава по давлению p , температуре T и составу топливной смеси $\alpha_{ок}$. Системы уравнений для определения частных производных неравновесного химического состава получают продифференцировав уравнения химической кинетики (10) по каждому из перечисленных параметров, считая другие постоянными.

Приведенные уравнения химической кинетики позволяют определять состав рабочего тела при химическом его изменении в термодинамике тела переменных массы и состава, а значит моделировать процессы изменения состояния такого рабочего тела.

Список литературы

1. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. – М.: Высш. шк., 1984.
2. Горение и течение в агрегатах энергоустановок: моделирование, энергетика, экология /В.Г. Крюков, В.И. Наумов, А.В. Демин, А.Л. Абдуллин, Т.В. Тринос. – М.: «Янус-К», 1997.
3. Кондратьев В.Н. Константы скоростей газофазных реакций: Справочник. – М.: Наука, 1974.

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОДИНАМИКЕ ТЕЛА ПЕРЕМЕННЫХ МАССЫ И СОСТАВА

Егорычев В.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Объектом настоящего термодинамического исследования является рабочее тело переменной массы и переменного химического состава, например, продукты сгорания в камере ракетных двигателей или агрегатов и энергетических установок, где протекают физико-химические процессы при высоких температурах, сопровождаемые различного рода неравновесными эффектами.

Способ построения замкнутой поверхности, ограничивающей рабочее тело, совершенно произволен. В каждом конкретном случае он определяется задачами исследования, удобством и простотой построения математической модели процесса и оперирования этой моделью. Все, что расположено вне его границ, представляет собой окружающую среду, с которой рабочее тело обменивается массой, т.е. различными исходными веществами, и энергией.

Масса и состав выделенного таким образом рабочего тела изменяются из-за прихода через контрольную поверхность, ограничивающую рабочее тело, исходных веществ, перемещения действующих элементов рабочего тела за его пределы, а также поступления компонентов с поверхности горения, испарения или сублимации жидких и твердых топлив, расположенных внутри полости. Конденсированные вещества, находящиеся в пределах контрольной поверхности, не включаются в состав рабочего тела.

Изменение массы рабочего тела обусловлено приходом через контрольную поверхность и расходом вещества. Приход вещества вызывает увеличение массы рабочего тела, а расход – уменьшение. Приход вещества может быть внешним и внутренним. При внутреннем приходе вещества образуются в рабочей полости, т.е. внутри выделенной контрольной поверхностью объема, из продуктов, находящихся там в конденсированном