

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

АКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НЕРАВНОВЕСНОСТИ В ЖРДМТ

ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ):

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор

Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель

На базе уравнения сохранения импульсов применительно к неравновесным процессам получена универсальная зависимость, отражающая динамику релаксационных процессов в реальных ситуациях работы ЖРДМТ и других двигателей на химическом принципе работы. Разработан инженерный метод расчета и создана программа определения термодинамических параметров для неравновесных процессов. Программа адаптирована для автоматизированного расчета термодинамических параметров продуктов сгорания в зависимости от значения функции нормального насыщения $\psi(\xi)$ и позволяет оценить степень неравновесности рабочего процесса.

On the basis of the equation of conservation of momentum applied to nonequilibrium processes, a universal dependence is obtained that reflects the dynamics of relaxation processes in real situations of operation of liquid-propellant rocket engines and other engines on the chemical principle of operation. An engineering calculation method has been developed and a program for determining thermodynamic parameters for nonequilibrium processes has been developed. The program is adapted for automated calculation of thermodynamic parameters of combustion products depending on the value of the normal saturation function $\psi(\xi)$ and allows you to estimate the degree of non-equilibrium of the working process.

Ключевые слова: турбулентность, неравновесная термодинамика, программный продукт.

Keywords: turbulence, nonequilibrium thermodynamics, a software product.

В настоящее время основным аппаратом термодинамического расчета являются программы, написанные для равновесных случаев, замороженного и равновесного, которые предполагают неизменность энтропии [1 - 4]. Имеется ограниченное число работ, затрагивающих тему неравновесности в практическом ее приложении, например [5, 17], что объясняется недостаточной ее проработанностью в теоретическом плане [6, 22]. Более того, многие аспекты проблемы неравновесной термодинамики находятся ещё в зачаточном состоянии. Положения, отмеченные в последних двух работах, пока еще не до конца доказаны и в отдельных случаях являются просто гипотетическими. Доведенные до расчетных продуктов, программы ограничены по возможностям и практически не верифицированы. Такая ситуация во многом объясняется и тем, что пока еще недостаточно начальных и граничных условий для решения общей задачи. Актуальными становятся методы, основанные на предельных приближениях [3, 12] и интегральные инженерные подходы.

Излишне говорить о необходимости решать именно неравновесные задачи химической термодинамики. Ведь разница замороженных и равновесных значений достигает двукратной и более величин, что может приводить, да и приводит к существенным ошибкам в расчетах теплообмена, удельного импульса тяги и проектных параметров.

Неравновесную термодинамику, очевидно, следует учесть применительно к энергетическим двигательным установкам. Процессы, происходящие в камерах тепловых энергетических машин, всегда являются нестационарными, и, как правило, неравновесными, однако для упрощения расчетов их рассматривают равновесными. Актуальной проблемой является учет неравновесности для ракетных двигателей малой тяги в связи с их малым временем работы, работе в импульсном режиме, малыми объемами камеры сгорания и большим расслоением термодинамических параметров в поперечном сечении. Учет неравновесности позволяет рассчитать удельный импульс тяги двигателя при выходе на режим и на режиме его остановки для единичного и многократных импульсов.

Нестационарные процессы в двигательных и энергетических установках

Неравновесность напрямую связана с нестационарностью. Но не всегда нестационарный процесс влечет появление неравновесности. Все зависит от соотношения скорости химической

реакции и скорости диффузии. Часто эти характеристики представляют через характерные времена: время химической реакции и характерное время процесса. Отношение этих времен известно, как критерий Герхарда Дамкёлера. В работе [10] был дан алгоритм вычисления реальной скорости реакции, который был разработан на примере гетерогенной реакции газообразного горячего водорода и твердого графита (рис. 1) и универсализирован:

$$\frac{W}{W_{кин}} = 0,4 \ln \frac{p}{p_0} - 0,2 \ln Da. \quad (1)$$

Здесь:

- W - скорость химических реакций (кинетическая или диффузионная);
- p/p_0 - отношение рабочего давления и давления внешней среды;
- Da - число Дамкёллера, зависит от давления, температуры и вычисляется по формуле [10]:

$$\ln Da = 26,6 - \ln p - 0,5 \ln T - 50400/T. \quad (2)$$

Было показано, что существенным параметром при его вычислении является отношение p/p_0 и в диапазоне крайних значений $Da_{кин}$ и $Da_{диф}$ оно является определяющим. Поэтому, говоря о нестационарности, следует понимать динамику изменения давления.

Зависимость (1) от числа Da при разных давлениях представлена на рис. 1. Зависимость $W/W_{кин}$ от температуры при разных давлениях представлена на рис. 2.

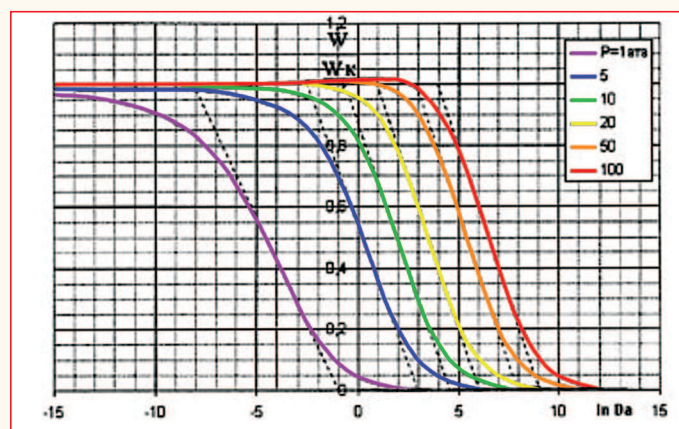


Рис. 1 Зависимость отношения реальной скорости реакции W к кинетической скорости реакции $W_{кин}$ от давления

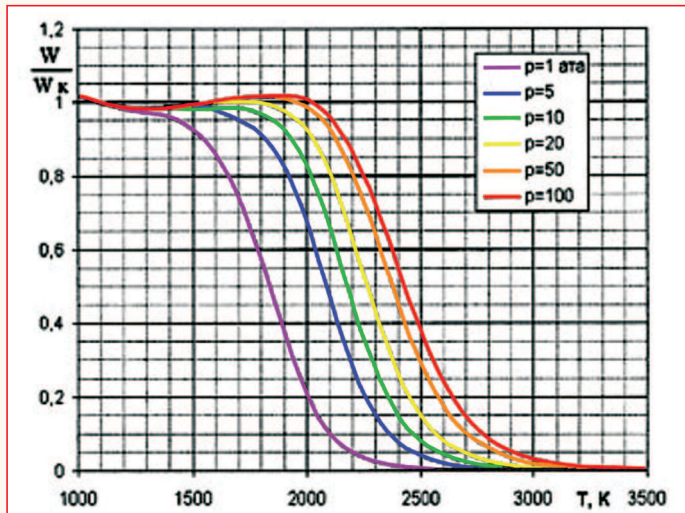


Рис. 2 Зависимость отношения реальной скорости реакции W к кинетической скорости реакции $W_{кин}$ от температуры

Если теперь учесть, что число Дамкеллера есть к тому же отношение времени диффузии окисляющего компонента к стенке ко времени химической реакции [18], то с учетом градиента давления и применительно к камере ракетного двигателя можно записать:

$$p_k = \frac{dp_k}{d\tau} \cdot \tau_{диф} \quad (3)$$

$$Da = \frac{\tau_{диф}}{\tau_{хим}} = \frac{p_k}{dp_k/d\tau} \cdot \tau_{хим} \quad (4)$$

Текущий градиент давления можно приблизительно представить в виде касательной, проведенной через точку перегиба циклограммы $p_k(\tau)$ выхода двигателя на режим: $dp_k/d\tau = \text{const}$. Далее неравновесность можно оценивать по этой величине.

Очевидно целесообразно классифицировать эту динамику применительно к энергетическим двигательным установкам (ЭДУ). Нестационарные процессы в ЭДУ по характеру нестационарности чаще всего встречаются в следующих случаях:

1. В процессе выхода двигателя на режим ($dp_k/d\tau > 0$);
2. Спад давления после работы ДУ ($dp_k/d\tau < 0$);
3. Перекладки с режима на режим;
4. Неустойчивости, которые могут возникнуть в процессе работы - это НЧ- и ВЧ-неустойчивости ($p_k = \text{var}$);
5. Отдельно можно отметить работу РДТТ, где в процессе меняется свободный объем и даже при $p = \text{const}$ газодинамический процесс является нестационарным;
6. Авария и взрыв.

Но особым случаем нестационарного процесса является работа ЖРДМТ. Это работа в импульсном режиме с высокой частотой включений, которая сопровождается многократным воспламенением топлива в камерах двигателей и последующим отключением.

Выделяя режим работы ЖРДМТ как исключительный нестационарный случай, сопровождающийся очевидной неравновесностью параметров, сосредоточимся на проблеме расчета его неравновесных термодинамических свойств, и это не случайно. Процессы в ЖРДМТ идут, как правило, с недогоранием и существенной неравновесностью такого важного параметра процесса, как k_m или α - коэффициента избытка окислителя. Реальные k_m и α будут отличаться от заданных в ТЗ. Понятно, что недостаточно проводить их расчет для двух крайних случаев, у которых скоростей реакций либо совсем нет, либо они бесконечны (замороженный и равновесный случаи соответственно).

Поймем отличие определений кинетический и диффузионный режимы и замороженное и равновесное течения, обратимся к [19]. В том случае, когда скорость химической реакции в потоке мала по сравнению со скоростью диффузионного переноса, течение считается замороженным. Если скорость реакции в газовой фазе

велика и концентрация каждой компоненты однозначно связана с локальными значениями давления и температуры (кинетический случай), то течение равновесное. В первом приближении можно считать, что при диффузионном режиме реакции вообще не идут и течение является замороженным. А равновесное течение, у которого формально по определению скорость реакции равна бесконечности, можно относить к кинетическому режиму. Кинетический режим можно локально относить к стехиометрическому случаю, после которого все исходящие химические компоненты реагируют при совершенно конкретной скорости, именно конечной скорости. Поэтому можно считать, что с точностью до нюансов замороженное течение является диффузионным, а равновесное - кинетическим.

Для нашего анализа эти два течения являются ограничениями, внутри которых реализуется истинное неравновесное течение реального газа. Именно это течение необходимо определить по параметрам нестационарности.

Перед тем, как изложить инженерный метод расчета неравновесных термодинамических параметров, качественно проанализируем циклограммы работы ЖРДМТ.

Характерные реальные циклограммы работы ЖРДМТ

ЖРДМТ в настоящее время являются основным типом исполнительных органов в системах коррекции, стабилизации и ориентации КА, а также в управлении РБ. Более 50 конструкций отечественных ЖРДМТ эксплуатировались и эксплуатируются в составе объектов указанных классов. ЖРДМТ подразделяются на однокомпонентные (топливо - гидразин), имеющие тягу 0,1...50 Н и двухкомпонентные с тягой 6...400 Н на самовоспламеняющихся компонентах в составе азотного тетроксид (АТ) - несимметричного диметилгидразина (НДМГ). В зарубежной практике горючим является, как правило, монометилгидразин (ММГ). Гидразин и его производные НДМГ и ММГ являются высокотоксичными веществами, однако высокие энергетические, динамические и эксплуатационные характеристики двигателей на данных компонентах топлива указывают на устойчивую перспективу их дальнейшего применения.

Наиболее широко применяются двухкомпонентные ЖРДМТ на долгохранимом топливе АТ+НДМГ, в частности для управления КА дистанционного зондирования Земли, межпланетных КА, РБ типа ДМ и "Бриз", космических кораблей серии "Союз", "Прогресс", международной космической станцией. На высокоорбитальных КА серий "ГЛОНАСС", "Экспресс" и многих других, а также для управления РБ "Фрегат" используются однокомпонентные ЖРДМТ на гидразине.

В последние годы отмечается интерес к использованию ЖРДМТ на экологически безопасном топливе, например, в системах управления РБ возможно применение двухкомпонентных ЖРДМТ на компонентах топлива маршевого ЖРД (O_2-H_2 , O_2 -керосин и пр.).

Требования к точности ориентации аппарата на орбите в свою очередь предъявляют высокие требования к исполнительным системам ЖРДМТ ориентации и стабилизации КА в части минимизации суммарного импульса тяги за включение (до 10^{-3} Н) и обеспечения высокой стабильности параметров двигателя от включения к включению.

Для ЖРДМТ, применяемых в системах ориентации и стабилизации основным режимом работы является импульсный режим, когда времена переходных процессов на пуске и останове сопоставимы с временем включения, и при максимальной частоте работы двигателя стационарный режим работы по давлению в камере сгорания может и не достигаться [4].

Однокомпонентные термокаталитические двигатели на гидразине отличаются большими минимальными временами включения и пауз на уровне 0,1...0,5 с и большей длительностью переходных процессов.

Минимальная длительность включения и минимальное время паузы для современных двухкомпонентных ЖРДМТ в основном на

ходятся на уровне 0,03...0,05 с, а максимальная частота включений при этом составляет 10...15 Гц. А время выхода ЖРДМТ на режим находится в пределах $\tau_{0,9} = 0,018...0,06$ с, время останова - $\tau_{0,1} = 0,015...0,065$ с. Динамические параметры ЖРДМТ зависят главным образом от объема камеры сгорания, объемов закладанных полостей смесительной головки, эффективности смесеобразования, быстродействия топливных ЭК [8]. Так, например, двигатель 17Д58Э разработки ФГУП "НИИМашиностроения" тягой 12 Н имеет минимальное время огневой работы 0,007 с, минимальное время паузы между включениями 0,015 с и максимальную частоту срабатываний 25 Гц.

Характерными показателями импульсного режима работы являются [7] (рис. 3): $\tau_{вкл}$ - время включения ЖРДМТ; $\tau_{п}$ - время паузы между одиночными включениями ЖРДМТ; T - время цикла между одиночными включениями, $T = \tau_{вкл} + \tau_{п}$. Временные параметры, отнесенные к времени чередования импульсов, образуют безразмерные показатели импульсного режима ЖРДМТ: $k_3 = \tau_{вкл}/T$ - коэффициент заполнения; $S = \tau_{п}/T$ - скважность; $f = 1/T$ - частота включения ЖРДМТ.

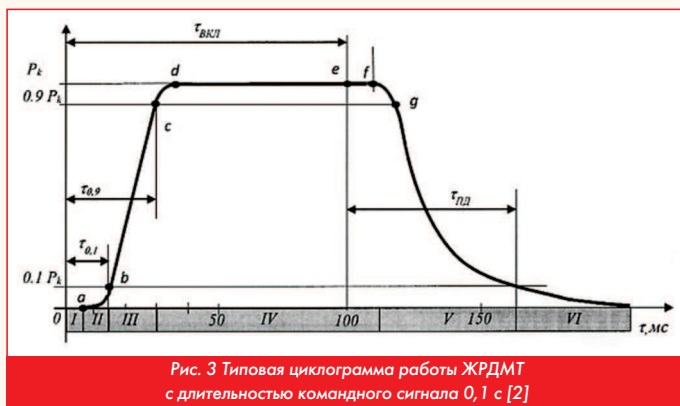


Рис. 3 Типовая циклограмма работы ЖРДМТ с длительностью командного сигнала 0,1 с [2]

Работа ЖРДМТ (рис. 4) сопровождается пульсациями давления в камере сгорания. Ввиду низкого рабочего давления в камере ЖРДМТ, не более 5...10·10⁵ Па, пульсации не представляют опасности для работоспособности конструкции двигателя, однако они также вносят вклад в нестационарность рабочего процесса.

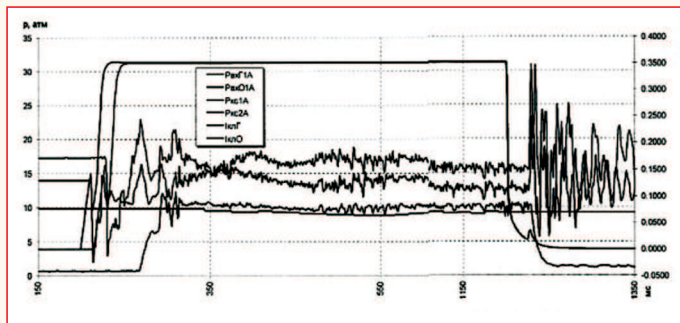


Рис. 4 Результаты экспериментов одиночного запуска ЖРДМТ МАИ-200 длительностью 1 с [4]

Нестационарность процессов тем выше, чем меньше время работы двигателя за один импульс, т.к. относительное время выхода на режим и время последствия сопоставимо со временем работы на режиме.

Моделирование неравновесных течений

Моделировать неравновесные течения будем, опираясь на уравнение Навье-Стокса. Но это уравнение получим из условий сохранения законов термодинамики. Это 1-й и 2-й [19] законы, а также 4-й [13] закон термодинамики, доказывающие идентичность движения как понятия.

Итак, 1-й и 2-й начала термодинамики в самом общем виде записываются следующим образом:

$$dQ > dU + p dV + dq_{внутр} + dq_{внешн} \quad (5)$$

Здесь $dq_{внутр}$ и $dq_{внешн}$ - соответственно внутренние диссипа-

тивные энергии, связанные с выделением тепла из-за вязкости и трения и внешние, поступающие извне энергии химического, ядерного и другого рода происхождения.

По аналогии с [14] и [11] будем записывать этот объединенный закон в следующем виде:

$$\text{grad}(Q) = \text{grad}(U) + p \cdot \text{grad}(V) + \frac{1}{\rho} \text{div} \Pi + RT \cdot \text{grad} \left(\frac{Q_p}{RT} \right). \quad (6)$$

Здесь Π - тензор Коши, Q_p - поток извне.

Опуская для краткости преобразования и с ссылкой на [17], запишем с учетом раскрытия тензора Коши [19]:

$$\frac{dj}{d\tau} = -\text{grad}(p) + \frac{4}{3} V \cdot \text{grad}(\text{div} j) - V \cdot \text{rot} \text{rot}(j) - p \cdot \text{grad} \left(\ln p^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot e^{\left(\frac{Q_p}{RT} - \frac{ST}{RT} \right)} \right). \quad (7)$$

Здесь $j = pV$, $\text{grad}(Q) = T \cdot \text{grad}(S)$.

Очевидно, что полученное уравнение (7) отличается от уравнения Навье - Стокса последним членом. Это неравновесный (релаксационный) член и отражает закон действующих масс.

Для удобства анализа проделаем преобразования. Рассмотрим подробно релаксационный член в уравнении импульсов. Сделаем преобразования, понимая под разностью в показателе энергию активации:

$$p \cdot \text{grad} \left(\ln p^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot e^{\left(\frac{Q_p}{RT} - \frac{ST}{RT} \right)} \right) = p \cdot \text{grad} \left(\frac{p^{\frac{k+1}{k-1}}}{RT^{\frac{k+1}{k-1}}} \cdot e^{\left(\frac{E}{RT} \right)} \right). \quad (8)$$

Преобразуем это равенство и обезразмерим его:

$$\frac{k+1}{k-1} \cdot p \cdot \text{grad} \left(\frac{p}{RT} \cdot e^{\left(\frac{E}{RT} \cdot \frac{k+1}{k-1} \right)} \right) = \frac{k+1}{k-1} \cdot p \cdot \ln \left(\frac{p}{\xi} \cdot e^{\frac{1}{\xi}} \right). \quad (9)$$

Получим далее неравновесный член в уравнении движения в виде:

$$\frac{k+1}{k-1} \cdot p \cdot \text{grad} \ln p \cdot \psi(\xi). \quad (10)$$

Здесь $\psi(\xi)$ - функция нормального насыщения [9], является универсальной нормальной функцией насыщений и годится для многих физических процессов. Эта функция в данном случае отражает динамику релаксационного процесса, а произведение $p \cdot \psi(\xi)$ является константой равновесия.

Полученная функция при $\xi = 0$ характеризует замороженный процесс, а при $\xi = 1$ - равновесный. Любое промежуточное значение характеризует неравновесность. Таким образом в случае замороженного течения значение под логарифмом обнуляется, градиент от константы становится равным нулю и в результате получается уравнение Навье-Стокса в традиционном виде. Но если течение равновесное, то член под логарифмом не постоянен и равен p , а само уравнение движения получает дополнительный член:

$$\frac{k+1}{k-1} \cdot p \cdot \text{grad} \ln p. \quad (11)$$

Внутри этих границ очевидно будет чисто неравновесное течение и видимо оно будет определяться функцией $\psi(\xi)$, где

$$\xi = \frac{E}{R} \cdot \frac{k+1}{k-1}. \quad (12)$$

Тогда логичным является построение приближенной (инженерной) методики, которая основывается на расчетах параметров по традиционным программам, где в качестве результатов выдаются крайние значения реакций: замороженной и равновесной.

Зная граничные значения и безразмерную функцию $\psi(\xi)$, с помощью неё можно выразить любую теплофизическую характеристику: $h - p$, μ , λ и др.:

$$h = h_{зам} + \psi(\xi)(h_{равн} - h_{зам}). \quad (13)$$

Значения функции $\psi(\xi)$ затабулированы и могут быть использованы для расчетов. На основании полученных соотношений в данной работе была создана программа термодинамических расчетов для получения неравновесных параметров.

Программа термодинамического расчета параметров истечения

В настоящее время существует большое число готовых программ по расчету термодинамических параметров рабочего тела (Astra, CEA, RPA) [20, 21, 23]. Трудности их применения связаны с наличием интерфейса и ограниченными возможностями модульного включения этих программ в другие программы. В связи с этим была доработана процедура расчета в плане неравновесности и перекодировки дискретных табличных значений. Был заимствован специальный программный модуль (автор А.Г. Воробьев [4]) и встроен в общую программу. Разработанный программный модуль расчета термодинамических параметров продуктов сгорания для равновесного течения представляет собой динамически подключаемую библиотеку с интерфейсом, представленным, в среде Microsoft Excel (или в другой среде, поддерживающей вызовы функций из DLL модулей) (рис. 5). Для нахождения компонентов состава, давления и температуры смеси в камере сгорания составляется и решается система алгебраических уравнений химического равновесия: используется математическая модель расчета компонентного состава смеси согласно закону действующих масс, закону химического равновесия, закону сохранения энергии в камере сгорания и закону Дальтона. В термодинамическом модуле рассматривается четырехэлементное топливо, состоящее из H, C, N, O. Этими элементами можно задать подавляющее большинство топлив, применяемых в ЖРД.

Термодинамический анализ параметров течения продуктов сгорания в сопле основывается на допущении об изоэнтропическом характере процессов, протекающих при расширении [1]. Энтропию продуктов сгорания определяют по базе данных стандартной энтропии вещества с учетом температуры и изменившегося давления. Расчет термодинамических параметров ведется итерационно: для камеры сгорания - по условию сходимости энтальпии ПС и энтальпии топлива, варьируя температуру в КС: для критического сечения - по условию минимального проходного сечения сопла, варьируя критическое давление; для среза сопла - по условиям сходимости энтропии в КС и на срезе сопла, варьируя температуру на срезе.

Модуль позволяет оперативно проводить большое количество расчетов, анализировать результаты в табличном виде любого формата, а с помощью среды Excel - переводить результаты в графический вид. Интерфейс программного модуля представляет собой набор функций, исходные данные для которых передаются как аргументы из соответствующих ячеек Excel. Модуль так же включает базу данных исходных веществ, базу данных топлива, алгоритмы численных методов и другой вспомогательный функционал. Помимо базовой функции GetTDParm, интерфейс которой приведен рис. 5, в программе имеются функции для нахождения

экстремума термодинамического параметра при выполнении серии расчетов для определенного диапазона входного параметра, функции перевода полученных табличных данных в форму аналитической зависимости, функции нахождения нужного решения по одному из параметров и другие. Возможно применение математического и статистического функционала Excel для обработки результатов расчетов.

Входными параметрами функции GetTDParm являются химические формулы окислителя и горючего с указанием их энтальпий (в другой виде функции можно указать набор химических соединений с указанием относительного содержания и энтальпией каждого соединения), давление в камере реактора, давление на выходе из сопла, давление окружающей среды, коэффициент избытка окислителя (или соотношение компонентов), относительную площадь расширения (если давление на выходе из сопла не задано), функция нормального насыщения $\psi(\xi)$, степень расширения сечения в котором происходит внезапное замораживание потока и идентификатор выходного параметра.

Полученные расчётные характерные зависимости расходного комплекса β и удельного импульса тяги I_y в пустоте от коэффициента избытка окислителя α для ЖРДМТ МАИ-200 тягой 200 Н [4], работающего на компонентах АТ+НДМГ, с рабочим давлением 10 атм в случае равновесного и замороженного течения приведены на рис. 6 и 7. Значения I_y и β имеют максимумы, равновесные значения выше, чем замороженного, потому что часть выделившейся при рекомбинации (для случая равновесного течения) теплоты превращается в кинетическую энергию продуктов сгорания, увеличивая скорость и удельный поток. Разница в показателях при равновесном и замороженном течении в первую очередь зависят от рода топлива. Для топлив с высокой температурой горения эта разница может достигать 5...10 %. На рис. 8 показано, что равновесная температура в камере сгорания и выходном сечении сопла также больше, чем замороженная. При этом разница в выходном сечении сопла доходит до 50 %.

Реальные характеристики ЖРДМТ из-за несовершенства рабочих процессов, происходящих в камере двигателя, отличаются от значений, полученных для идеальной, равновесной модели течения. Наиболее значительны эти отличия именно для ЖРДМТ, т.к. степень незавершенности процессов в двигателях малой тяги больше, чем в маршевых двигателях. Время пребывания топлива в КС и ПС в сопле двигателя меньше для ЖРДМТ из-за значительно меньших габаритов, но соизмеримых скоростях течения. Так же существенный вклад в неравновесность оказывает большая доля холодного пристеночного слоя, по сравнению с ЖРД больших тяг. Степень неравновесности процессов в КС и сопле ЖРДМТ в поперечном сечении будет различной для зоны ядра потока и пристеночного слоя, поэтому расслоение параметров будет еще су-

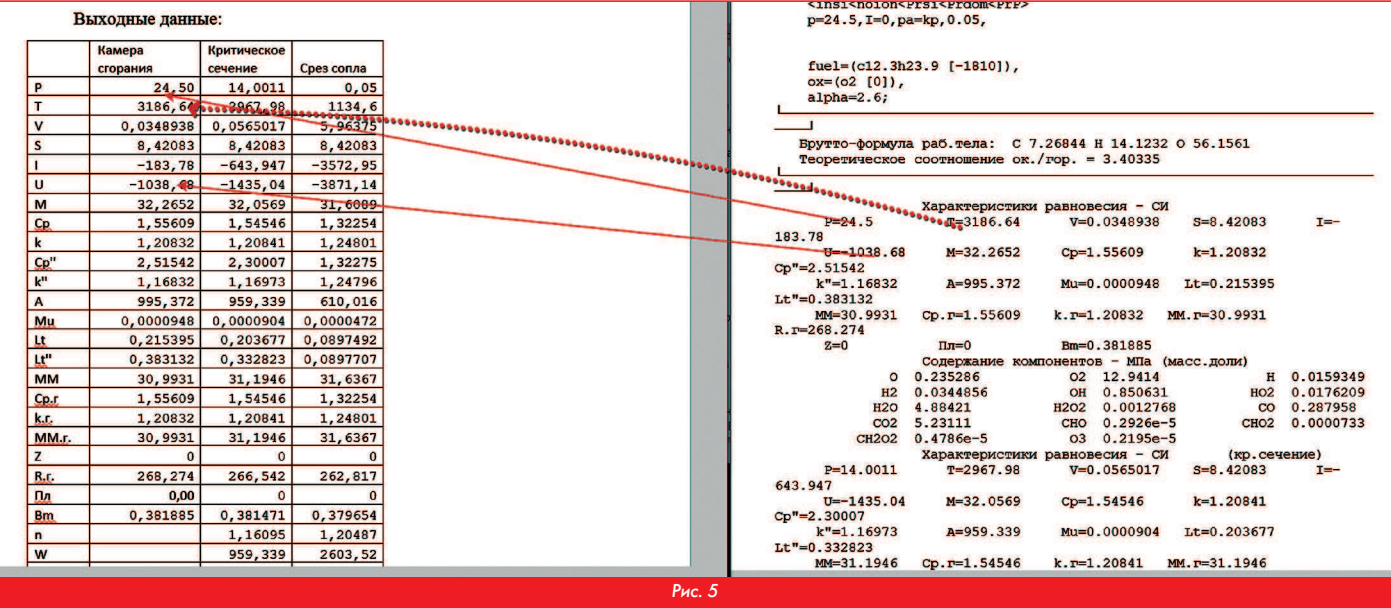


Рис. 5

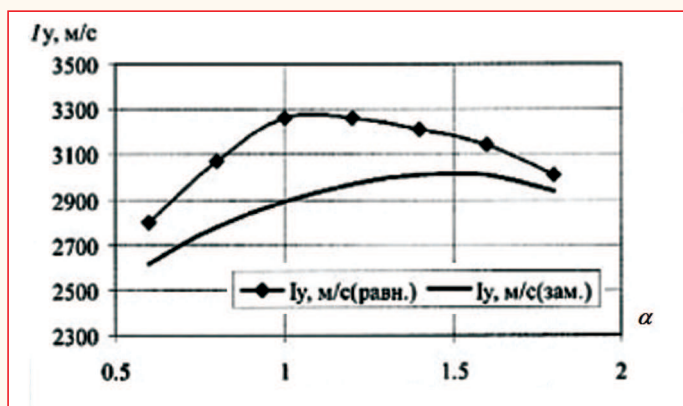


Рис. 6 Расчетная зависимость $I_{уд}$ от α при равновесном и замороженном течении

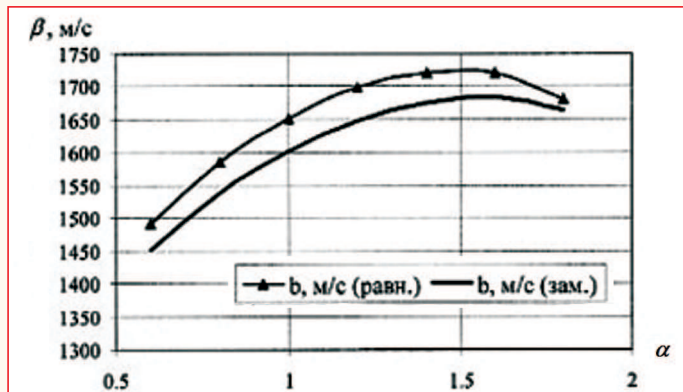


Рис. 7 Расчетная зависимость β от α при равновесном и замороженном течении

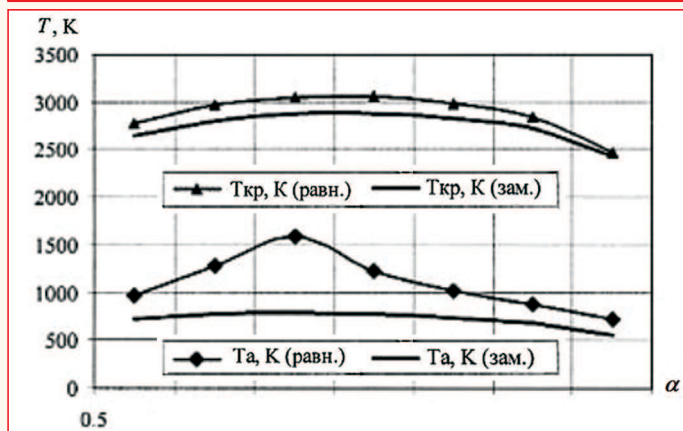


Рис. 8 Расчетная зависимость T в критическом и выходном сечениях от α при равновесном и замороженном течении

щественнее. Роль трения ПС о стенку КС и сопла для ЖРДМТ так же более значительна, чем для ЖРД больших тяг. Все эти особенности течения в ЖРДМТ позволяют сделать вывод о наличии большой степени неравновесности как в продольном, так и в поперечном сечении. Предложенную методику планируется использовать для расчёта удельного импульса тяги ЖРДМТ, работающего на установившемся или неустановившемся режимах работы при единичном или импульсном включении.

Заключение

С помощью уравнения сохранения импульсов применительно к неравновесным процессам получена универсальная зависимость, отражающая динамику релаксационных процессов в реальных ситуациях работы ЖРДМТ и других двигателей на химическом принципе работы. На ее основе разработан инженерный метод расчета и создана программа определения термодинамических параметров для неравновесных процессов. Приведены результаты расчетов основных параметров ЖРДМТ для случая равновесного и замороженного течения. Результаты показывают

большую разницу в значениях параметров для этих случаев. Разработана программа для автоматизированного расчета термодинамических параметров продуктов сгорания в зависимости от значения функции нормального насыщения $\psi(\xi)$. С учетом параметров двигателя в зависимости от режимов его работы, программа позволяет оценить степень неравновесности рабочего процесса и определить термодинамические параметры по предложенному инженерному методу.

Литература

1. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Черенков А.С. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках: Учебное пособие для вузов. - М.: Химия, 2000. - 520 с.
2. Безменова Н.В. Численное моделирование сопряженного теплообмена в ЖРД малых тяг в целях повышения их эффективности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Самара: СГАУ, 2001, 76 с.
3. Бирюков В.И., Кочетков Ю.М., Зенин Е.С. Определение потерь удельного импульса тяги из-за химической неравновесности в энергоустановках летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института 2017. Т. 24. № 2. С. 42-49.
4. Воробьева С.С., Воробьев А.Г. Анализ теплового состояния камеры сгорания ракетного двигателя малой тяги с внутренним завесным охлаждением // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 45-54.
5. Гидаспов В.Ю. Численное моделирование химически неравновесного течения в сопле жидкостного ракетного двигателя / 1 Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 90 - 95.
6. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статической физики // М. Высшая школа, 1981. г.
7. ГОСТ 22396-77 Двигатели ракетные жидкостные малой тяги. Термины и определения. 17 с.
8. Егорычев В.С., Сулинов А.В. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики. Электронное учебное издание. - Самара: СГАУ, 2010 г, 103 с.
9. Кочетков Н.Ю. Разработка математического аппарата для расчета двухсоставных зарядов перспективных твердотопливных двигателей установок космического назначения. Журнал РТИК, ч. 1. 2010 г.
10. Кочетков Ю.М. Турбулентность в СЭДУ // Двигатель. 2011. № 2. С. 44 - 45.
11. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Вывод уравнения импульсов из начал термодинамики // Двигатель. 2016. № 3. С. 18 - 20.
12. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Закон пси от кси // Двигатель. 2017. № 2. С. 12 - 15.
13. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Четвертое начало термодинамики или первое начало термогазодинамики // Двигатель. 2016. № 4-5. С. 24-26.
14. Липман Г.В., Рошко А. Элементы газовой динамики. М. Изво иностранной литературы, 1960 г.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. Дрофа, 2003 г.
16. Назырова Р.Р., Пономарев Н.Б. IT-технологии моделирования реальности рабочих тел в процессах жидкостных ракетных двигателей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 4. С.69-85.
17. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. - М.: Наука, 1990. - 368 с.
18. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. М.- Энергия, 1976 г.
19. Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. М. - Наука, 1981 г.
20. Трусев Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах АСТРА.4 версия 1.06, январь 1991 г.
21. Chemical Equilibrium with Applications. //https://www.grc.nasa.gov/www/CEAWeb/
22. Prigogine, I. Stengers. Jrder Quit of Chaos // New York. Bantam Books, 1984.
23. Rocket propulsion Analysis http://www.propulsion-analysis.com

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com