

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ НЕСТАЦИОНАРНО-ТЕПЛОВОЙ ЭКЗЕРЦИС ЖРДМТ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ)
Александр Иванович Бажанов, академик МИА

Представлены результаты целенаправленных систематических исследований особенностей процессов, происходящих в ЖРДМТ. Рассмотрены важные отличия по сравнению с маршевыми ЖРД, такие как нестационарность, возникающая из-за циклического характера работы, неравновесность химических и термодинамических процессов, а также сильное влияние в этих условиях эффектов сжимаемости и вязкости. Показана прямая сильная зависимость этих параметров между собой. Особое внимание уделено такому свойству ЖРДМТ как неравномерность распределения тепловых и термодинамических параметров. Представлены новые экспериментальные результаты по структуре потоков вблизи стенок модельных двигателей. Сделаны количественные оценки неравномерности распределения в пространственно-временном континууме основных тепловых параметров.

The results of targeted systematic studies of the features of the processes occurring in the LRDMT are presented. Important differences in comparison with marching LRE are considered, such as unsteadiness arising from the cyclical nature of work, non-equilibrium of chemical and thermodynamic processes, as well as the strong influence of compressibility and viscosity effects in these conditions. The direct strong dependence of these parameters on each other is shown. Special attention is paid to such a property of LRDMT as uneven distribution of thermal and thermodynamic parameters. New experimental results on the structure of flows near the walls of model engines are presented. Quantitative estimates of the unevenness of the distribution of the main thermal parameters in the space-time continuum are made.

Ключевые слова: турбулентность, метод горячей визуализации, нестационарность, неравновесность.
Keywords: turbulence, hot method of visualization, non-stationarity, non-equilibrium.

ЖРД малой тяги в настоящее время являются основным типом исполнительных органов в системе коррекции, стабилизации и ориентации космических аппаратов различного назначения. Более пятидесяти типов ЖРДМТ, разработанных в отрасли, успешно эксплуатируются в космосе. В зависимости от выполняемых задач и условий эксплуатации ЖРДМТ одной и той же тяги могут существенно отличаться друг от друга по своим параметрам: ресурсу, динамике выхода на режим и спада тяги и циклограмме работы [1, 2].

Поскольку ЖРДМТ являются чрезвычайно энерго- и теплонапряженными аппаратами, одновременное выполнение максимально возможных требований по этим основным параметрам и обеспечение длительного ресурса и надежности - невозможно. Аналогичная несовместимость существует между требованиями высокой динамики двигателя и произвольной циклограммой его включений, из-за явления теплового удара, который возникает, когда тепловой поток от камеры сгорания в паузах между включениями разогревает смесительную головку и топливные клапаны до недопустимо высоких температур.

Поскольку камера сгорания ЖРДМТ работает, как правило, без регенеративного охлаждения, то охлаждение стенок обеспечивается либо излучением тепла от нагретой стенки, либо созданием жидкой пленки одного из компонентов топлива и пристеночного слоя газа с относительно низкой температурой, формируемой на внутренней поверхности стенок камеры с помощью специальных схем смесеобразования. Во всех этих случаях возникает осевая и окружная неравномерность теплового потока. Ограниченная возможность использования периферийных форсунок охлаждения создает условия непостоянного подвода тепла из потока к стенке, что приводит к локальным прогарам.

Наличие противоречивых условий при разработке ЖРДМТ формирует особенности внутренних процессов, которые существенно отличаются от процессов маршевых ЖРД.

1. Процессы в ЖРДМТ являются сугубо нестационарными, так как маршевые режимы в них соизмеримы с переходимыми.

2. Процессы в таких двигателях (ЖРДМТ) сопровождаются сильной химической неравновесностью, возникающей из-за циклической работы. При этом деформируется импульс и отношение расхода окислителя к расходу горючего из-за этого сильно изменяется и отличается от номинальной величины, что приводит к сниже-

нию ожидаемого значения удельного импульса тяги.

3. Из-за малых размеров камеры ограничено количество топливных форсунок, размеры которых соизмеримы с самой камерой, что приводит к неравномерности распыляемых потоков продуктов горения и, как следствие, к неравномерности термодинамических параметров и теплообмена.

В работе показано, что нестационарность, неравновесность, а также сжимаемость и вязкие эффекты взаимно связаны. Эти вопросы актуальны для ЖРДМТ. Они будут кратко отмечены в начале работы с приведенными результатами теоретических вкладок. А вот вопросы неравномерности потоков, в том числе тепловых, в поперечном сечении сопла, а также в осевом направлении предсказать теоретически весьма затруднительно. Поэтому очевидным решением является эмпирический метод - метод, когда с помощью экспериментальных исследований возможно получить качественные картины турбулентного течения, а также количественные оценки уровней неравномерностей.

О влиянии на процессы в ЖРДМТ нестационарности, неравновесности, сжимаемости и вязкости

Само построение уравнения движения с учетом химической неравновесности [5] отражает существо происходящих процессов. Уравнения движения в форме Коши с учетом неравновесного члена [6, 7]

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = \text{div}\Pi - \frac{k+1}{k-1} P \text{grad} \ln K_p,$$

где K_p - константа равновесия в законе действующих масс, говорит о прямой связи названных выше эффектов. На формирование члена слева от равенства напрямую оказывает влияние неравновесный член, второй справа. Этот член учитывает деформацию структуры потока и опосредованно, через давление, влияет на субстанциональную производную. Если бы его не было, то уравнение приняло бы вид уравнения Навье-Стокса. А оно, как известно, содержит члены, определяющие сжимаемость и вязкость. Для ламинарного замороженного течения [8] член, содержащий одновременно сжимаемость и вязкость, выглядит весьма эффектно:

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\text{grad} \left(P + \frac{4}{3} \frac{v}{a^2} \frac{dP}{d\tau} \right).$$

Ранее было показано, что ламинарное течение реализуется в двигателях в местах непосредственной близости от стенки (ламинарный подслои) и в сверхзвуковом потоке. Поэтому задача определения газового поля для практически важных ситуаций в общем случае может быть поставлена как ламинарная с учетом граничных условий прилипания и сопровождения [9].

Наличие в конструкции двигателей, в частности ЖРДМТ, различных особенностей, связанных с изменением идеальных обтекаемых форм (форсунки, завесные устройства, уступы, выступы и т.д.) могут сильно влиять на газовую динамику. Они искривляют линии тока, способствуют возникновению вихрей и жгутов. Они деформируют профиль сопла у стенки. Делают поток из осесимметричного сильно пространственным, стратифицированным.

Все это вносит огромные трудности в расчет, а главное - в задание граничных условий. Расчетные методы и современная электронная техника не справляются с такой проблемой. Поэтому нужен эксперимент. Такой эксперимент, который позволил бы, во-первых, понять газодинамическую картину и, во-вторых, получить количественные значения. Пожалуй, единственным экспериментальным методом, позволяющим разрешить поставленную задачу, является метод горячей визуализации или, как его чаще называют, метод уноса массы. Этот метод позволяет проводить многочисленные экспериментальные исследования при различных параметрах процессов и на различных конструкциях ракетных двигателей с бесконечным многообразием форм.

Применение метода горячей визуализации к исследованию неравномерности потока в ЖРД МТ

Метод горячей визуализации ассоциируется с методом фотографии высокоэнтальпийного потока, с фотокарточкой, в результате воздействия которого появляется отпечаток (след) потока на внутренней оmyиваемой стенке камеры и сопла в виде рельефных узоров. Метод позволяет выявить особенности сложных турбулентных течений, и поэтому он уникален. С помощью этого метода можно получить качественную картину течения, подчеркивающую все тонкие нюансы "горячего" потока, развивающуюся и изменяющуюся во времени. Основная ценность этого метода заключается именно в том, что он передает объективную картину газового поля в процессе работы установки. Если на метод горячей визуализации смотреть с практической точки зрения, то есть смотреть на него как на инструмент получения количественных результатов (величин) уносов, усредняемых тепловых потоков и даже температур стенок, то этому методу больше подходит другое историческое название - метод уноса массы. Его разрабатывали различные ученые-экспериментаторы, в том числе и советские: А.И. Федоров, М.М. Бенилова, Н.В. Ильин и другие. Метод уноса массы основан



А.И. Федоров

М.М. Бенилова

Н.В. Ильин

на обратной тепловой задаче, задаче пересчета унесенной с поверхности стенки за определенное время части материала, масса которого затем пересчитывается в тепло. При этом предполагается линейная зависимость величины скорости линейного уноса и соответствующего ему теплового потока. Этот процесс называется линейным пиролизом. Механизм линейного пиролиза чисто тепловой [10] и работает в условиях высокотемпературного разложения органических полимеров. Но не все полимеры пригодны для использования их в условиях высокотемпературных потоков. Нап-

пример, полиэтилен в процессе воздействия на него высокотемпературного потока в процессе работы не только "сухо" уносится (сублимирует), но и плавится. А полиметилметакрилат хотя и сублимирует без плавления, но после выключения установки продолжает еще долгое время гореть в атмосфере, нарушая рельефные следы от потока, полученные в период ее работы.

Наиболее подходящим для этих целей оказался фторопласт. Он хорошо подчиняется закономерностям разрушения и мгновенно "отключается от сублимации" без догорания и оплавления после останова двигателя. Основные тепловые свойства фторопласта [11]: температура разложения 688К, теплопроводность 0,34 Вт/М·К, теплоемкость 1046,7 Дж/кг·К, плотность 2200 кг/м³.

При пересчете скоростей линейных уносов обычно используется формула для коэффициентов теплообмена:

$$\frac{\alpha}{c_p} = \frac{1}{B_0} \dot{m}_n,$$

где B₀ - безразмерный коэффициент (параметр ддува), и для фторопласта его экспериментальное значение составляет B₀ = 2,2; $\dot{m}_n = \rho u_n$ - плотность оттока продуктов разложения.

После подстановки значений получаем, что рабочая формула для фторопласта приобретает наиболее простой вид. Величина коэффициента теплообмена $[\alpha/c_p] = \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ численно равна линейной скорости уноса $[u_n] = \text{мм}/\text{с}$:

$$\frac{\alpha}{c_p} = u_n.$$

Методически работа была поставлена следующим образом. Была изготовлена модельная установка, работающая на компонентах жидкого топлива азотный тетроксид и несимметричный диметилгидразин (свойства в [11]).

Установка (рис. 1) содержала в своем составе корпус, гайку и вкладную втулку из фторопласта.



Рис. 1 Модельная установка: 1 - вкладная втулка, 2 - корпус, 3 - гайка

Внутренняя поверхность втулки моделировала цилиндрическую камеру сгорания (D_к = 20 мм) и коническое сверхзвуковое сопло (d_{кр} = 6 и 12 мм).

Эксперименты проводились для различных времен работы двигателя с диаметром критического сечения 6 мм времена работы были в диапазоне τ_р = 0,5...1,5 с, а для d_{кр} = 12 мм соответственно τ_р = 0,4...2,0 с.

Различные времена работы давали возможность проследить за динамикой разгара внутренней части двигателя и изменением поверхностных следов, оставленных потоком.

В табл. 1 представлены точные времена работы (разгара) в соответствии с последовательностью проведения экспериментов.

Таблица 1

Эксперимент, №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
τ _р при d _{кр} = 12 мм, с	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	2,0	-	-	-	-
τ _р при d _{кр} = 6 мм, с	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,6	1,0	1,5

Тепловой экерцис ЖРДМТ

Слово экерцис означает многократное повторение в целях овладения новыми навыками, знаниями, свойствами. В переводе с французского "exercice" означает: упражнять, развивать путем многочисленных повторений, испытаний. В экспериментальной науке под этим словом понимают многочисленные систематические эксперименты, проводимые для установления закономерностей и глобальной верификации процесса.

В этих целях было проведено одиннадцать экспериментов по исследованию картины течения внутри ЖРДМТ и определения коэффициентов тепломассообмена вдоль камеры сгорания и сверхзвукового сопла. Важным аспектом было установление неравномерности разгаров, а значит тепловых потоков в окружающем направлении. На рис. 2 и 3 последовательно представлены фотографии разрезанных втулок, сделанных после экспериментов. Условные номера втулок соответствуют номерам проведенных экспериментов. На всех поверхностях в зависимости от времени отпечатались общие следы воздействия высокоэнэальпийного потока, поэтому во всех опытах в той или иной мере присутствуют одинаковые виды турбулентности. Это - следы от воздействия струй из форсунок, гофрообразные следы от волн Толмина- Шлихтинга в камере и в критической области, и чередующиеся в шахматном порядке ячеистые структуры потока в виде следов жгутовых образований. В сверхзвуковой части сопла по аналогии с результатами, полученными ранее [12], были отмечены "расплетающиеся" потоки, переходящие в ромбовидные узоры, характерные для скачков уплотнений (ударных волн). Полученные качественные результаты соответствуют теоремам турбулентности [13] и общей новой торсионно-волновой парадигме турбулентности. [14].



Рис. 2 Разрезанные втулки с $d_{кр} = 12$ мм

В результате обработки экспериментов были получены следующие количественные результаты:

- по распределению средних линейных уносов вдоль камеры сгорания;
- по распределению коэффициентов тепломассообмена [15];
- по определению окружной неравномерности тепловых и температурных полей.

Распределение средних линейных уносов вдоль камеры сгорания модельного ЖРДМТ представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что унос увеличивается в направлении к

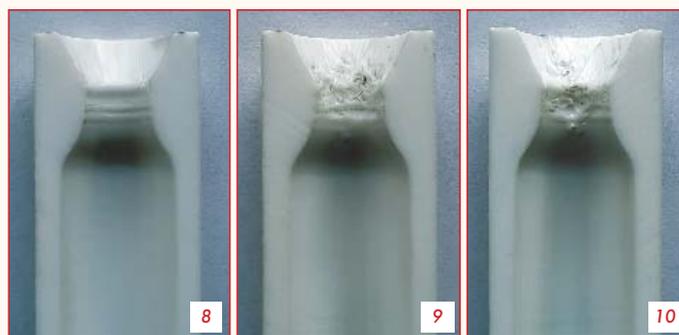


Рис. 3 Разрезанные втулки с $d_{кр} = 6$ мм



срезу сопла и в зависимости от времени его абсолютная величина пропорционально увеличивается. Представленный вариант распределения соответствует времени работы двигателя 0,6 с.

Для анализа полученных распределений величин уносов в окружающем направлении по аналогии [16] было выбрано 2880 дискретных точек (16 поперечных сечений и 180 продольных образующих). Технология

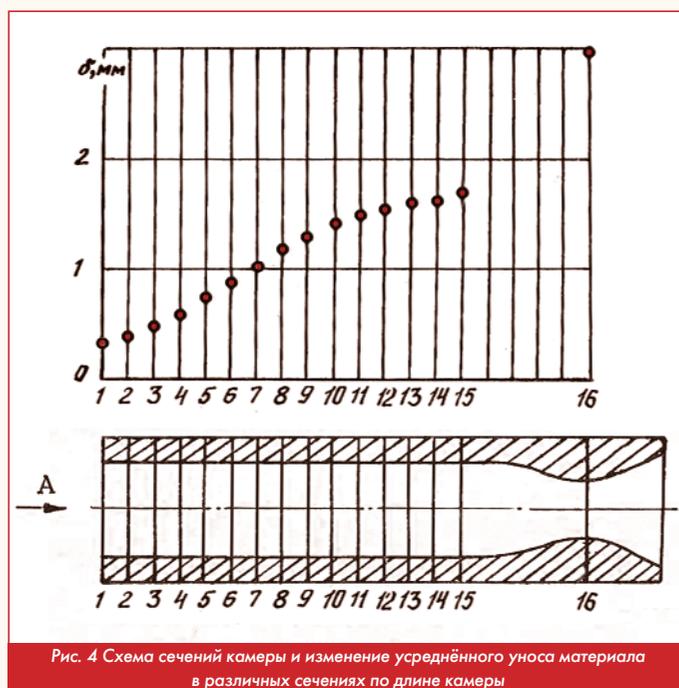


Рис. 4 Схема сечений камеры и изменение усреднённого уноса материала в различных сечениях по длине камеры

обработки информации состояла из следующих этапов:

- разрезки вкладыша на кольца;
- фотографирования колец с последующим увеличением изображения;
- копирования внутреннего контура колец (с помощью компьютерной приставки "планшет") на магнитный носитель;
- получения трехмерных массивов данных (величины уноса и координат точки);
- анализа информации по величине уноса с применением пакетов "Grapher" и "AutoCad".

Экспериментальная информация представлялась в виде внутренних контуров колец, совмещенных со схемой расположения форсунок (рис. 5).

Окружная неравномерность полей в соответствии с этой информацией по оценкам составила величину 30 %.

На основании экспериментальных значений по линейным уносам (разница толщин стенок до и после испытаний) производился пересчет на величины коэффициентов тепломассообмена. Значения этих коэффициентов для варианта № 5 представлены в табл. 2 в зависимости от длины сопла.

Таблица 2

X, мм	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	72	76	80
$\alpha/C_p, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,32	0,35	0,46	0,54	0,72	0,86	0,99	1,16	1,27	1,4	1,47	1,51	1,6	1,62	1,53	2,3	3,0	2,24

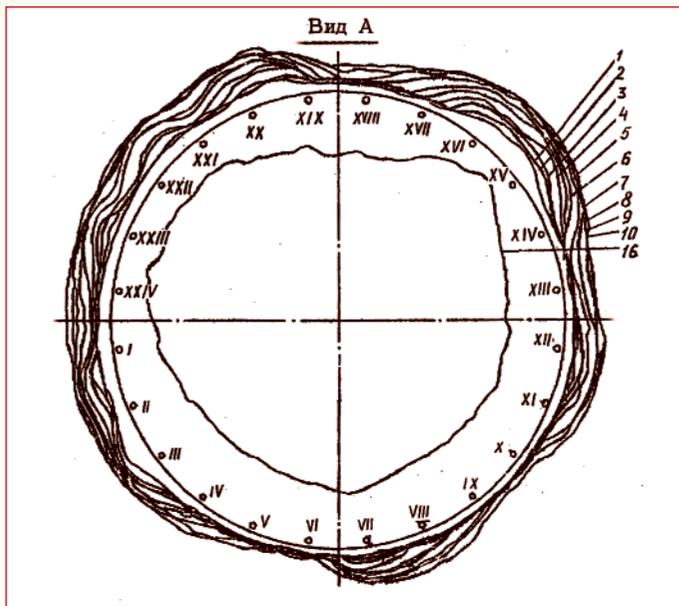


Рис. 5 Вид внутренних контуров колец, совмещенных со схемой расположения форсунок, и расположение периферийных форсунок I - XXIV

Очевидно, что значения коэффициентов теплообмена численно совпадают со значениями линейных скоростей уносов материала в каждом сечении. И тот и другой параметр в зависимости от координат имеет распределение в форме шляпы. Максимальное значение распределений находится в области критического сечения сопла, восходящая и ниспадающая ветви зависят от крутизны контура сопла.

Таким образом, с помощью экспериментов, проведенных на модельном ЖРДМТ, была определена пространственно-временная картина - распределение тепловых полей вблизи стенок камеры сгорания и сопла. Результаты этой работы могут быть использованы для решения самых разнообразных задач ракетной техники, в частности более точного определения потерь удельного импульса тяги ЖРДМТ.



Литература

1. С.П. Павлов. Проблема и перспективы развития ЖРД малой тяги // Сборник РКТ №3, М. НИИТП, 1992 г.
2. А.А. Козлов, А.Г. Воробьев, И.Н. Боровик. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги // М. Изд. МАИ. 2013 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность при нестационарных процессах в РД // Двигатель №6, 2019 г.
4. Ю.М. Кочетков, Т.Н. Кравчик, О.А. Подымова. Пять теорем турбулентности и их практические приложения // Вестник машиностроения №7, 2019 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Неравновесные течения в двигателях летательных аппаратов // Двигатель №1, 2018 г.
6. Дж. Серрин. Математические основы классической механики жидкости // М. Изд. Иностранной литературы, 1963 г.
7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность вывод уравнения импульсов из начал термодинамики // Двигатель №3, 2016 г.
8. Ю.М. Кочетков. Турбулентность сверхзвуковых течений. Памяти Гилевича // Двигатель №2, 2013 г.
9. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Фундаментальное граничное условие сопровождения и новая постановка краевой задачи вязкой газовой динамики // Двигатель №5, 2015 г.
10. С. Мадорский. Термическое разложение органических полимеров // М. МКР, 1967 г.
11. Справочник по пластическим массам. Под ред. М.И. Гарбара, М. Химия, 1967 г.
12. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и математическое доказательство о ее невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель №3, 2018 г.
13. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Пять теорем как инструмент глобального преобразования уравнений сохранения в целях разработки новых подходов и вычислительной газовой динамики // Двигатель №4, 2019 г.
14. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Торсионно-волновая парадигма // Двигатель №4, 2011 г.
15. Г.П. Кочеткова, Ю.М. Кочетков. Экспериментальные исследования особенностей теплообмена при несимметричных течениях в соплах методом уноса массы // М. Гаити-8, 1990 г.
16. Ф.П. Хистанов, В.Д. Грачев. Исследования теплового состояния камеры сгорания ЖРД МТ методом уноса массы // сборник РКТ №3, М. НИИТП, 1992 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ - НАНОРЕШЕТКА, КОТОРАЯ ПРОЧНЕЕ АЛМАЗА

Алмаз, являющийся на Земле одним из самых твердых материалов естественного происхождения, уже давно выступает в роли своего рода эталона в материаловедении и других связанных с этим областях науки. Но ученые и инженеры постоянно ищут возможности создания новых искусственных материалов, которые по параметрам должны превосходить самое лучшее из того, что может предложить нам природа. И не так давно группа ученых из Калифорнийского университета в Ирвине создала новый тип углеродной нанорешетки, которая обладает гораздо большим показателем прочности к плотности, чем алмаз.

Новый материал представляет собой типичную нанорешетку, пористую упорядоченную структуру, состоящую из вертикальных, горизонтальных поперечин и наклонных распорок, сделанных из углерода, вещества, из которого состоят и алмазы. Создание подобных нанорешеток практикуется учеными уже достаточно давно, но все подобные материалы, созданные ранее, имели элементы решетки цилиндрической формы,

производство которых намного проще, чем производство элементов другой формы. Именно формой элементов решетки и отличается материал, созданный калифорнийскими учеными, эти элементы представляют собой плоские пластины определенной толщины.

Новый класс пластинчатых нанорешеток более прочен и более жесток по сравнению со всеми другими типами подобных материалов.

Помимо новой структуры нанорешетки, исследователи использовали новый метод ее производства. Очень тонкий лазерный луч был сфокусирован внутри капли специального вязкого полимерного материала, чувствительного к ультрафиолетовому свету. Свет лазера заставляет материал полимеризоваться (затвердеть) в точке фокусировки луча, а перемещение луча позволило сформировать пластины, толщиной 160 нанометров. После создания структуры нанорешетки при помощи лазера, материал был помещен в печь, где при температуре в 1650 °С из него были удалены остатки неис-

пользованного полимера, а затвердевший полимер в результате процесса пиролиза превратился в чистый углерод.

В результате получился материал, который превосходил аналогичный материал с цилиндрическими элементами решетки на 639 % по прочности и на 522 % по жесткости.

Одной из областей применения нового материала является, безусловно, область конструирования и производства космической техники и другие области, в которых ключевым требованием является использование легких материалов, обладающих малой плотностью, но обеспечивающих прочность и твердость на уровне обычных монолитных материалов естественного или искусственного происхождения.

