

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ ЗАВЕС В РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МАЛОЙ ТЯГИ

Дружин А.Н., Рыжков В.В., Старцев В.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

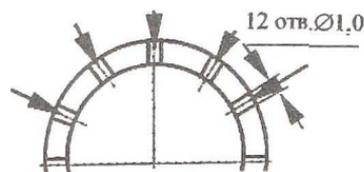
Использование в ракетных двигателях малой тяги (РДМТ) высокоэнергетических экологически чистых компонентов химического топлива не только позволяет существенно повысить удельный импульс тяги, но и предоставляет новые возможности для совершенствования рабочего процесса. При этом проблема надежной и эффективной тепловой защиты элементов конструкции от действия высокотемпературных продуктов сгорания может быть решена с помощью газовых завес.

Из известных в настоящее время способов отвода или поглощения тепла путем организации регенеративного, пленочного, транспирационного, абляционного или иного охлаждения, с успехом применяемых в ракетной технике [1], для условий РДМТ (малые габариты, небольшие расходы компонентов топлива и необходимость работы двигателя в непрерывном и импульсном режимах) перспективным представляется газозавесное охлаждение. Газовые завесы создаются путем вдува газообразного компонента через отверстия или щели в стенке изделия с таким расчетом, чтобы обеспечить пристенный низкотемпературный слой охлаждающего газа без нарушения оптимально организованного рабочего процесса в остальном объеме камеры [2].

Для определения влияния способа организации завесы, рода газа, подаваемого в завесу, и его расхода на энергетические параметры двигателя в лаборатории микроэнергетики СГАУ проведены исследования в высотных условиях РДМТ, работающего на несамовоспламеняющихся компонентах топлива (жидкий керосин + газообразный кислород), номинальной тягой 200 Н.

Экспериментальные образцы двигателей позволяли провести испытания с двумя типами смесительных головок (струйная схема – изделие М1 и вихревая схема – изделие М2) и четырьмя модулями газовой завесы, формирующими на входе в дозвуковую часть сопла следующие типы завес: радиальную незакрученную (РН), радиальную закрученную (РЗ), тангенциальную незакрученную (ТН) и тангенциальную закрученную (ТЗ).

На рис.1 приведены схемы модулей радиальных завес (РН и РЗ):



а - завеса

радиальная незакрученная



б - завеса

радиальная закрученная

Рисунок 1

Тангенциальные завесы (ТН и ТЗ) отличаются от радиальных наличием направляющего козырька, поворачивающего поток вдуваемого газа в сторону движения основного потока продуктов сгорания вдоль стенки камеры.

Модули незакрученных завес представляют собой вставки с 12-ю равномерно расположенными по окружности стенки радиальными отверстиями диаметром 1,0 мм, через которые охлаждающий газ поступает в камеру (рис.1а). Завеса РН обеспечивает подачу охладителя в поперечном направлении по отношению к основному потоку (от периферии к оси камеры).

Модули закрученных завес также имеют 12 равномерно расположенных по окружности отверстий, однако в отличие от незакрученных завес эти отверстия выполнены так, чтобы подаваемый в завесу газ поступал по касательной к образующей внутренней поверхности камеры (рис. 1б), обеспечивая закрутку завесного газа. Для завесы РЗ начальный угол закрутки равен 90° .

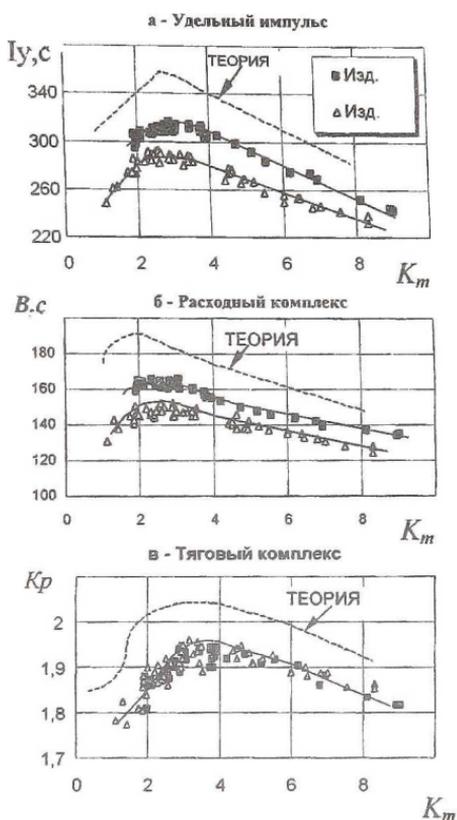
Энергетические характеристики изделий М1 и М2 при отсутствии завесы в виде зависимостей удельного импульса тяги I_u , расходного β и тягового K_p комплексов от коэффициента соотношения компонентов топлива K_m приведены на рис. 2. Теоретические значения параметров рассчитаны по материалам, изложенным в [3].

Анализ этих результатов показывает, что изделие М2 имеет более совершенную схему смесеобразования по сравнению с изделием М1. Количественно это выражается в повышении коэффициента полноты удельного импульса от 0,79...0,80 (изделие М1) до 0,86...0,88 (изделие М2). Величина тягового комплекса K_p для обеих схем смесеобразования одинакова во всем диапазоне K_m .

Предполагаемая сложная картина газодинамического и теплового взаимодействия закрученных потоков (один из которых формируется вихревой смесительной головкой изделия М2 и составляет основной поток в камере, а другой поступает через модули закрученных завес) могла создать дополнительные трудности при обработке и анализе получаемых результатов. Поэтому основная доля приведенных здесь данных по определению влияния газовой завесы на энергетические характеристики двигателя соответствует изделию М1, имеющему струйную смесительную головку и, следовательно, преимущественно осевое направление движения основного потока в камере.

На рис.3 показано влияние рода газа, подаваемого в завесу, на зависимость относительного удельного импульса тяги I_u (по отношению к импульсу тяги в беззавесном варианте) от относительного расхода газа в

завесу G_3 (по отношению к общему расходу газообразного компонента) при постоянном соотношении компонентов в камере.



Эксперименты проводились с подачей в завесу азота и кислорода. Эти газы близки по теплофизическим свойствам и отличаются прежде всего, химической нейтральностью азота в условиях камеры сгорания.

При вдуве азота во всем исследованном диапазоне изменения коэффициента соотношения компонентов топлива в камере Km_K (определяемого по расходам окислителя и горючего, поступающих в камеру через смесительную головку) отмечается некоторое уменьшение удельного импульса тяги по сравнению с подачей в завесу кислорода. Это уменьшение составляет от 5% (при $G_3 = 0,2 \dots 0,3$) до 12% (при $G_3 = 0,5$) и наиболее заметно в области малых значений Km_K .

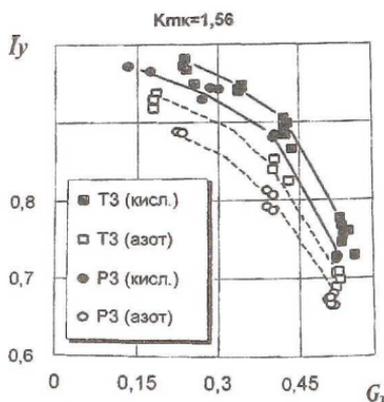
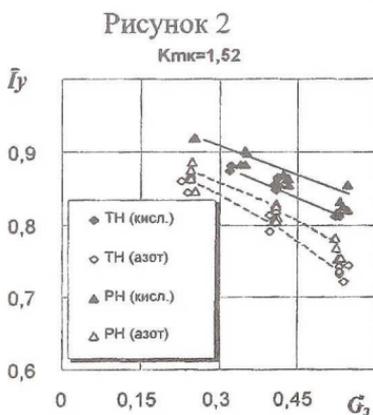


Рисунок 3

Смеси с высоким содержанием окислителя оказались в меньшей степени чувствительны к роду газа, подаваемого в завесу, они также практически автомодельны по его расходу. Очевидно, этот факт объясняется тем, что при подаче в завесу кислорода некоторая его часть участвует в процессе горения и повышает удельный импульс тяги, особенно в случае недостатка окислителя в основном потоке.

Влияние расхода кислорода, подаваемого в тангенциальные завесы, на зависимость \bar{I}_y от Km_k отображено на рис. 4:

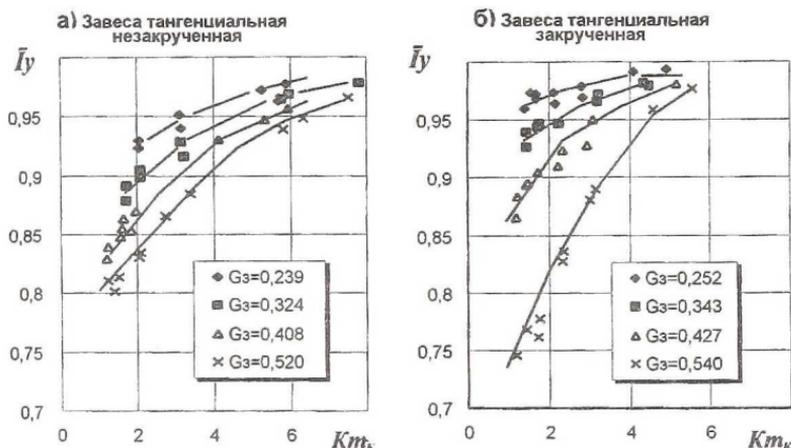


Рисунок 4

Отметим, что по мере увеличения расхода кислорода, подаваемого в завесу, удельный импульс тяги падает во всем диапазоне Km_k . При этом наибольшее падение удельного импульса наблюдается при стехиометрическом соотношении компонентов топлива.

При переходе в область смесей с переизбытком кислорода величина удельного импульса тяги в меньшей степени зависит от расхода вдуваемого газа.

На рис. 5 показано сравнение энергетической эффективности

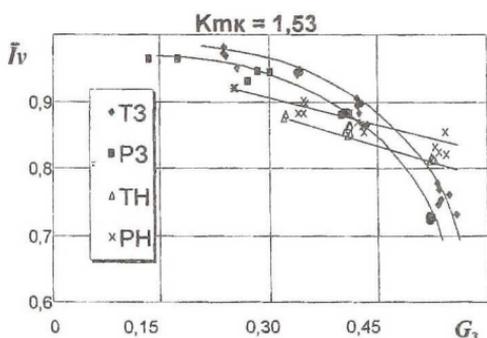


Рисунок 5

всех исследованных способов организации газовой завесы при постоянном соотношении компонентов топлива в камере. Для незакрученных завес зависимость относительного удельного импульса тяги от относительного расхода кислорода в завесу имеет линейный характер. Закрученные завесы

в большей степени чувствительны к расходу кислорода.

Как видим, начиная с некоторого расхода, закрученные завесы при прочих равных условиях уступают незакрученным по энергетической эффективности, однако эта область не представляет интереса с точки зрения охлаждения двигателей из-за недопустимо большого расхода охладителя. При $G_3 \leq 0,4$ удельный импульс тяги в случае закрученных завес (особенно для ТЗ) во всем диапазоне Km_k оказывается выше, чем в случае применения незакрученных завес.

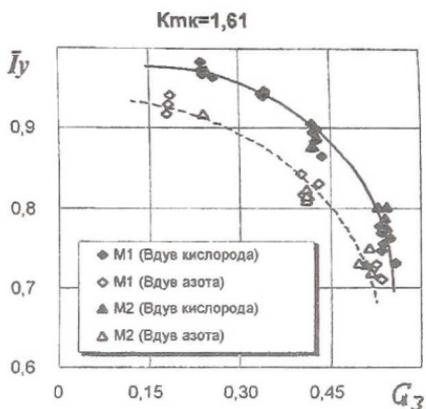


Рисунок 6

Анализ результатов по влиянию конструкции смесительной головки на зависимость удельного импульса тяги от расхода газа в завесу показывает, что более высокая экономичность изделия M2 по сравнению с изделием M1 сохраняется при наличии вдува газа (азота или кислорода) в завесу. Для примера на рис. 6 показаны эти данные для случая тангенциальной закрученной завесы.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты по исследованию энергетических параметров РДМТ с газовой завесой, подаваемой на входе в дозвуковую часть сопла, позволяют выбрать оптимальную (из четырех исследованных) конструкцию завесного узла и прогнозировать потерю экономичности двигателя в зависимости от расхода охладителя.

Список литературы

1. Основы теории и расчета ЖРД. Под редакцией Кудрявцева В. М. М.: Высшая школа, 1975.
2. Веялис С. А., Серпионова А. П., Линенко С. П. Завесное охлаждение. Газовая завеса. Обзор. Серия IV, № 41 (64), 1979.
3. Алемасов В. Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Том 1. Методы расчета / Под редакцией Глушко В. П. М.: ВИНТИ, 266 с.