

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ С ДОЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСОЙ

Винокуров М. В., Дружин А. Н., Рыжков В. В., Старцев В. В.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В статье обсуждаются экспериментальные результаты по определению теплового состояния высокотемпературного ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) с газовой завесой, подаваемой в пристенный слой на входе в дозвуковую часть сопла. Описание экспериментальных образцов, имеющих два типа смесительных головок (изделие М1 и изделие М2) и четыре различных по конструкции модуля газовых завес, а также принятые условные обозначения приведены в статье тех же авторов, помещенной в настоящем сборнике.

Температура стенки измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, которые расположены пятью поясами (по две термопары диаметрально противоположно в каждом поперечном сечении) в области сопла, наиболее подверженной воздействию тепловых потоков. Схема размещения термопар показана на рис. 1.

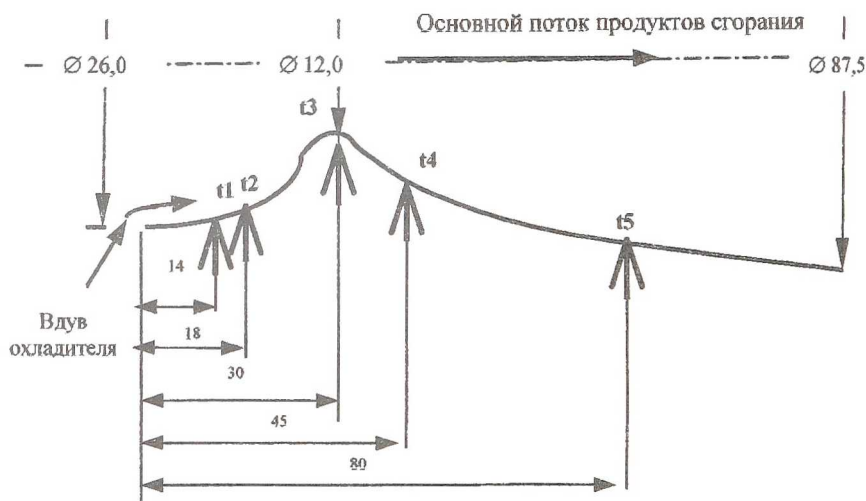


Рисунок 1 – Схема размещения термопар

В качестве измеренного значения температуры в каждом из пяти поперечных сечений принималось среднее между показаниями термопар данного пояса.

Для РДМТ с газовой завесой, работающего на топливе жидкий керосин + газообразный кислород и являющегося объектом данного исследования, в качестве охладителя использовался газообразный компонент. В отдельных случаях в завесу также подавался азот.

В практике исследований завесного охлаждения общепринятым [1] является определение тепловой эффективности завесы с помощью некоторого безразмерного параметра θ , который зависит от температур основного и завесного потоков при условии адиабатности (тепловой непроницаемости) стенки. Однако при огневых испытаниях РДМТ стенки изделия нельзя считать адиабатическими. Кроме того, экспериментальное определение температуры основного потока продуктов сгорания затруднительно из-за ее неравномерности в поперечном сечении. Поэтому в качестве критерия тепловой эффективности завесного охлаждения для условий эксперимента был выбран безразмерный аналог, определяемый по соотношению:

$$\theta = \frac{T_{бз} - T_z}{T_{бз} - T_0},$$

где $T_{бз}$ - температура стенки без вдува завесы;

T_z - температура стенки при вдуве завесы;

T_0 - температура газа, вдуваемого в завесу ($T_0=298$ К).

Следует заметить, что оцениваемая подобным образом эффективность завесного охлаждения легко находится по результатам опытов и прямо характеризует тепловое состояние конструкции. Правомочность такого подхода в определении эффективности завесы подтверждается качественной сравнимостью полученных результатов с данными других авторов [2].

Ниже приведены основные результаты исследования теплового состояния экспериментальных образцов, показывающие влияние рода газа, вдуваемого в завесу, величины его расхода и способа подачи на эффективность завесного охлаждения при изменении режимных параметров.

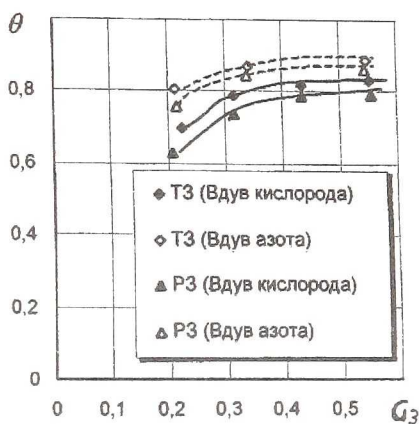
С целью определения возможного участия в рабочем процессе подаваемого в завесу газообразного кислорода проведены исследования с использованием в качестве завесного газа кислорода и азота. Оба этих газа близки по своим теплофизическим свойствам, последний отличается, прежде всего, химической пассивностью в условиях камеры сгорания.

Влияние рода газа, подаваемого в завесу, на тепловую эффективность для незакрученных и закрученных завес оказалось различным.

Экспериментально получено, что незакрученные завесы независимо от рода вдуваемого газа имеют практически одинаковую эффективность вдоль стенок сошла во всем диапазоне расходов охладителя.

Закрученные завесы в области дозвуковой части сопла при вдуве азота имеют большую эффективность, чем при вдуве кислорода.

а) Пояс термпар t_1



б) Пояс термпар t_3
(критическое сечение)

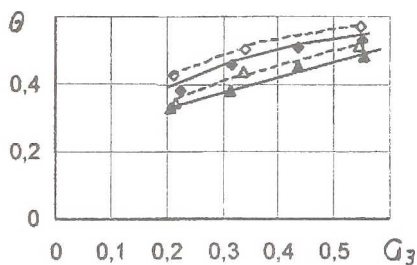


Рисунок 2 – Эффективность завесы

Для примера на рис. 2 показана зависимость эффективности завесы, определенная в сечениях t_1 и t_3 (см. рис.1), от относительного расхода охладителя G_3 (по отношению к общему расходу газообразного компонента) для закрученных завес.

Факт более высокой эффективности завесы на участке дозвуковой части сопла при вдуве азота по сравнению с кислородом можно объяснить частичным участием вдуваемого кислорода в процессе горения топлива в камере, что подтверждается также полученными ранее результатами по определению энергетических характеристик двигателя. В таком предположении уменьшение эффективности завесы происходит как за счет уменьшения доли кислорода, остающегося в завесе, так и за счет интенсификации рабочего процесса в камере, что приводит к соответствующему росту температуры основного потока.

В сверхзвуковой части сопла влияние завесы существенно снижается независимо от рода завесного газа и способа его подачи.

Получено распределение эффективности завесы при различных расходах кислорода, подаваемого в завесу, по длине сопла. Относительное расстояние по длине сопла L (по отношению к диаметру критического сечения) отсчитывалось от места вдува в завесу вниз по потоку. Определено, что для всех видов завес величина эффективности довольно быстро уменьшается по мере удаления сечения от места вдува, причем темп падения θ замедляется после прохождения трансзвуковой части сопла, после которой влияние завесы постепенно нивелируется.

Наиболее чувствительной к величине расхода охладителя оказалась завеса ТН, а наименее чувствительной - ТЗ (рис. 3).

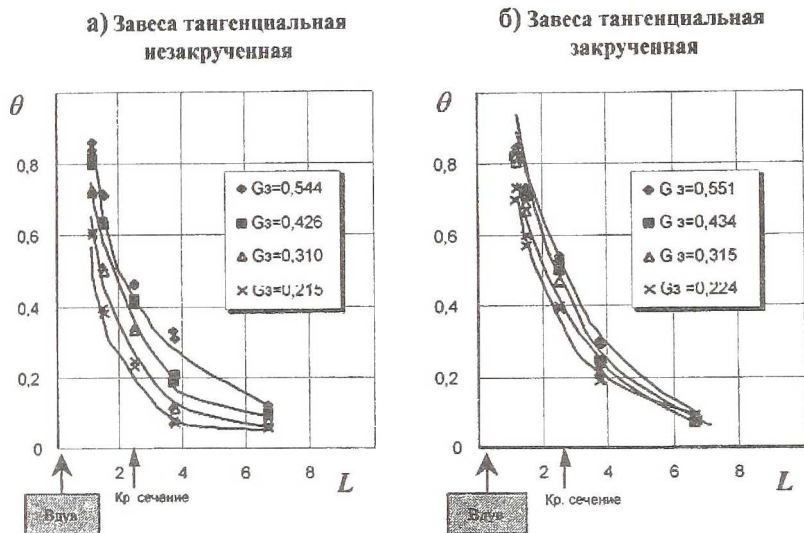


Рисунок 3 – Расход охладителя на завесу

Завесы РН и РЗ имеют сходные зависимости тепловой эффективности от расхода кислорода вдоль сопла во всем исследованном диапазоне.

В области сравнительно небольших расходов охладителя ($Gz \leq 0,4$), представляющих интерес с учетом оценки экономичности двигателя с газовой завесой, заметно некоторое преимущество закрученных завес по сравнению с незакрученными по тепловой эффективности вдоль всего сопла.

Исследованные способы подачи охладителя в завесу можно расположить в порядке убывания эффективности следующим образом: ТЗ-РЗ-РН-ТН (рис.4а). При больших расходах охладителя разница между завесами, организованными различными способами, практически исчезает (рис. 4б).

Абсолютная температура стенки в любом сечении сопла зависит не только от способа подачи газа в завесу и схемы смесеобразования, но и от коэффициента соотношения компонентов топлива в камере Km_K (определяемого по расходам окислителя и горючего, поступающих через смесительную головку), косвенно характеризующего интенсивность рабочего процесса.

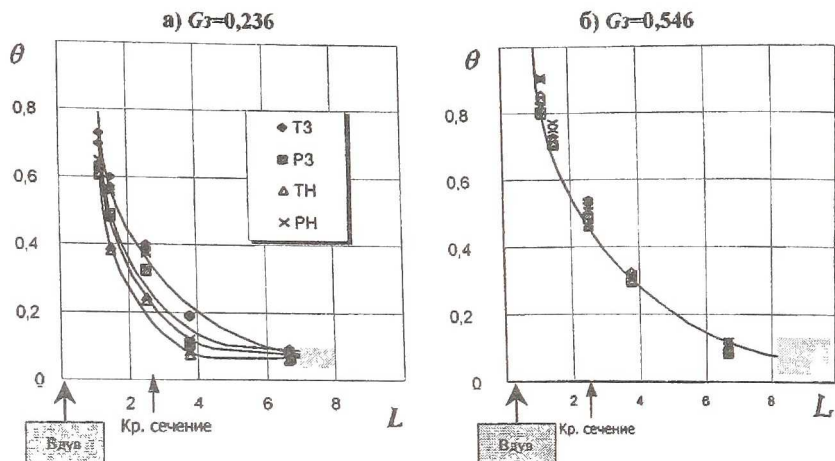


Рисунок 4

Для иллюстрации на рис. 5а показаны результаты измерения температуры в критическом сечении в зависимости от Km_K для изделия М1 в беззавесном варианте и при вдуве кислорода в завесу ТЗ.

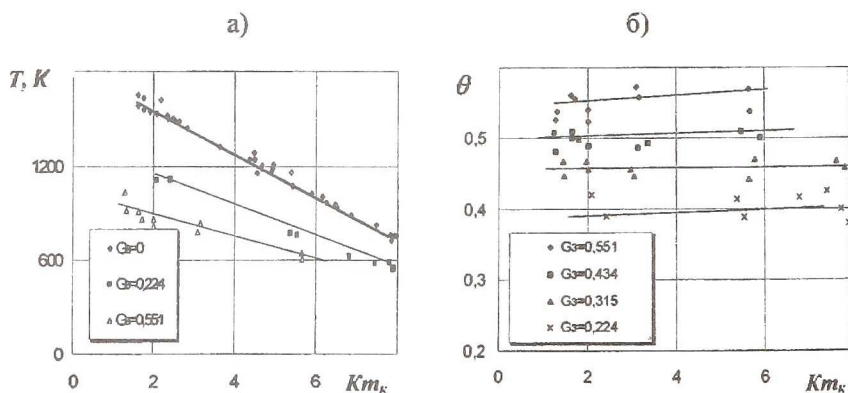
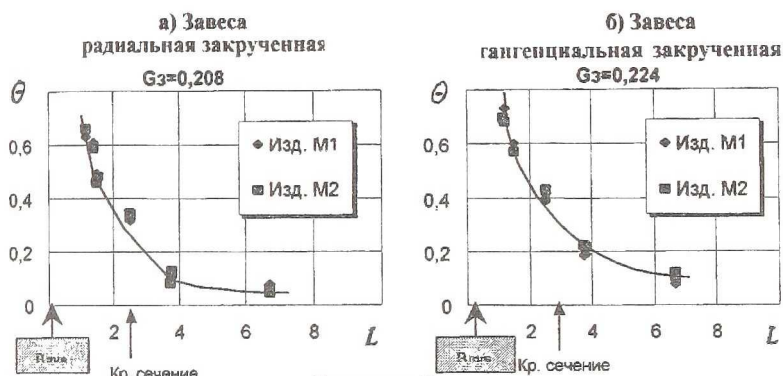


Рисунок 5

Однако тепловая эффективность всех завес при прочих равных условиях оказывается автомодельной по Km_K . Это подтверждается рис.5б, на котором приведена зависимость эффективности завесы в критическом сечении изделия М1 от коэффициента соотношения компонентов топлива в камере.

Схема смесеобразования также практически не влияет на эффективность завесного охлаждения независимо от способа его организации. На рис. 6 приведены данные по определению эффективности завесы по длине сопла для изделий М1 и М2, полученные при одинаковых относительных расходах кислорода в завесы РЗ и ТЗ. Подобный же результат получается как при больших, так и при меньших расходах завесного газа, в том числе в условиях незакрученных завес.



По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для всех исследованных способов организации завесного охлаждения его эффективность уменьшается по мере удаления сечения от места вдува охладителя, причем темп падения эффективности замедляется после прохождения трансзвуковой части сопла. Далее вниз по потоку тепловая эффективность завесы существенно снижается.

2. В диапазоне расходов кислорода в завесу, представляющих практический интерес для целей охлаждения двигателя, заметно некоторое преимущество по тепловой эффективности закрученных завес по сравнению с незакрученными вдоль всего сопла. Наиболее перспективной из исследованных завес представляется тангенциальная закрученная.

3. Тепловая эффективность завесного охлаждения для всех способов его организации при прочих равных условиях не зависит от предыстории продуктов сгорания в камере.

Список литературы

1. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск. Наука, 1983, 208 с.
2. Веялис С. А., Серпионова А. П., Линенко С. П. Завесное охлаждение. Газовая завеса. Обзор. Серия IV, № 41 (64), 1979.