

УДК 621.454.2.015.4

Коваленко А. Н.

начальник отдела, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: kandesign8848@gmail.com;

Блишун Ю. В.

ведущий инженер-конструктор, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: yury.blishun@gmail.com.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ЖРДМТ ТЯГОЙ 400Н, ОРГАНИЗОВАННОЕ ПРИ ПОМОЩИ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ

Проведены экспериментальные исследования для подтверждения возможности работы ЖРДМТ по схеме с газовой завесой. Преимуществом данной схемы, в сравнении с другими, является упрощение конструкции – применяется только одна двухкомпонентная форсунка и отсутствуют малорасходные струйные форсунки для формирования завесного охлаждения. Всего было испытано четыре варианта опытных конструкций, отличающихся между собой материалом, длиной и толщиной экрана завесы, а также площадью перепускных отверстий/щели для отбора окислительного газа на охлаждение стенки корпуса камеры. На основании проведенных испытаний сделан вывод о принципиальной возможности реализации в ЖРДМТ схемы смесеобразования с газовой завесой. Но при этом ресурс и основные характеристики (в частности, расходный комплекс), полученные на опытных конструкциях с газовой завесой, уступают полученным на традиционных конструкциях. Анализ снижения расходного комплекса при реализации схемы смесеобразования с газовой завесой показал, что основной причиной является замедление химических реакций на холодной стенке экрана, а также дополнительная окружная неравномерность в пристеночной слое, образующаяся при реализации новой схемы.

Ключевые слова: ЖРДМТ, смесеобразование, огневые испытания.

Для теплозащиты современных ЖРДМТ применяют в основном внутреннее завесное и радиационное охлаждение. Использование проточного регенеративного охлаждения компонентами топлива крайне затруднительно из-за малых расходов компонентов топлива, при относительно большой поверхности охлаждения [1]. Внутреннее охлаждение создается путем организации низкотемпературного пристеночного слоя за счет создания избытка в этом слое одного из компонентов топлива. В зависимости от предельной допустимой температуры материала корпуса камеры ЖРДМТ и размерности (тяги) двигателя расход компонентов топлива на завесу может достигать 40%. В настоящее время в ЖРДМТ, работающих на топливе АТ + НДМГ, для формирования завесы преимущественно применяется окислитель. Это обусловлено несколькими факторами: расход окислителя для данной пары всегда больше расхода горючего, что позволяет легче сформировать равномерную по окружности жидкостную пленку; АТ обладает хорошими охлаждающими свойствами, обусловленными процессами диссоциации, а также низкой температурой кипения; НДМГ при нагреве подвергается коксованию и экзотермическим реакциям разложения.

© Коваленко А.Н., Блишун Ю.В., 2018

При разработке новых ЖРДМТ для материала корпуса ЖРДМТ наиболее доступным является ниобиевый сплав (например, Н65В2МЦ или С103) с защитным покрытием на основе MoSi_2 . Предельно допустимая температура ниобиевого сплава Н65В2МЦ в окислительной среде определяется характеристиками защитного покрытия MoSi_2 и составляет $1600\text{ }^\circ\text{C} \dots 1700\text{ }^\circ\text{C}$, при этом для гарантированного обеспечения работоспособности конструкции из этих материалов при проектировании рекомендуется не более $1450\text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Для ЖРДМТ на топливе АТ+НДМГ тягой до 500 Н смесеобразование может быть организовано при помощи одной центральной двухкомпонентной форсунки, а для создания завесы применяются специальные струйные форсунки (от 6 до 12), расположенные на периферии смесительной головки. Такая схема смесеобразования, представленная на рисунке 1, получила широкое распространение. При этом практически весь окислитель и горючее направляются на стенку камеры и участвуют в ее теплозащите, так как продукты первичных химических реакций горения имеют относительно низкую температуру [3].

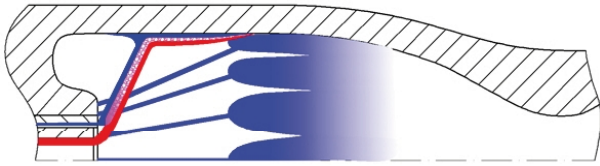


Рис. 1. Схема смесеобразования со струйно-центробежными форсунками

Исследования рабочего процесса в камерах ЖРДМТ на топливе АТ+НДМГ с монофорсункой и наружным конусом окислителя показали наличие подконусной зоны обратных токов, примыкающей к торцевой поверхности смесительной головки с температурой, не превышающей 400 К [4]. В состав газов этой зоны преимущественно входят пары окислителя. По мере накопления паров окислителя в подконусной зоне обратных токов происходит «прорыв» газов в основное огневое пространство, который сопровождается негативным воздействием на совместный конус распыла и может являться источником низкочастотных колебаний в камере сгорания. Специальная организация окислительной завесы при помощи дальнобойных струй, разрывающих пленку форсунки, позволяет обеспечить постоянный газообмен между подконусной зоной и основным огневым пространством, что повышает стабильность рабочих процессов [5]. Кроме того, дальнобойные струи подводят окислитель на стенку камеры в сечение перед соплом, обеспечивая тепловую защиту критического сечения. Это техническое решение реализовано в схеме смесеобразования, представленной на рисунке 1.

Таким образом, при использовании монофорсунки с наружным конусом окислителя в подконусной зоне имеется рабочее тело для окислительной завесы, которому необходимо организовать управляемый проход в основное огневое пространство. Для реализации этого варианта была разработана схема смесеобразования с газовой завесой (рисунок 2). Принцип работы следующий: совместный конус окислителя и горючего направляется на экран, при этом часть окислителя, испаряясь или отражаясь от экрана, попадает в подконусную зону обратных токов А, откуда через отверстия в экране (или щель между экраном и днищем смесительной головки) направляется в зазор между стенкой и экраном; основная часть топлива в виде пленки совместного конуса попадает на экран, охлаждает его продуктами первичных реакций горения и смешивается за торцом экрана с окислительной завесой. Величину расхода газа на завесу теоретически

можно регулировать, изменяя площадь окон в экране либо конфигурацией экрана в районе контакта совместного конуса распыла с экраном (введение ограничивающего бурта или наклонной канавки). Основное достоинство новой схемы – упрощение конструкции, так как в ней применяется только одна двухкомпонентная форсунка и отсутствуют малорасходные струйные форсунки для формирования завесы.

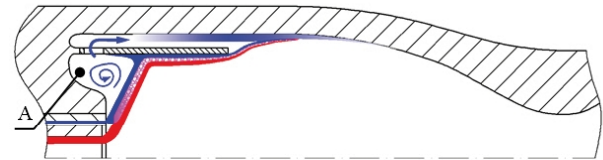


Рис. 2. Схема смесеобразования с газовой завесой

Для экспериментального подтверждения возможности работы ЖРДМТ по схеме с газовой завесой были подготовлены экспериментальные узлы, полученные доработкой имеющихся опытных конструкций (ОК). Первоначальная конструкция имела двухкомпонентную коаксиальную форсунку с наружным конусом окислителя и восемь периферийных струйных форсунок окислительной завесы с защитным экраном. При доработке струйные форсунки завесы не устанавливались, экран заменен на модернизированный с перепускными отверстиями, форсунка окислителя заменена на аналогичную форсунку с увеличенным расходом. Общий вид ОК после доработки представлен на рисунке 3. Для повышения качества экспериментальных результатов корпус камеры и смесительная головка не менялись. ОК состоит из смесительной головки, имеющей двухкомпонентную форсунку с наружным конусом окислителя, и технологического стального корпуса камеры, в котором участок около критического сечения охлаждается водой. Цилиндр и начальный участок сопла не имеют наружного охлаждения для того, чтобы по температурам наружной поверхности ТПЦ1-3 была возможность производить оценку равномерности теплового состояния конструкции, которое характеризует качество организации завесы. В ОК-1 экран изготавливался из стали 12Х18Н10Т, имел длину 47 мм и на торце со стороны критического сечения имел центровочное кольцо с четырьмя ребрами шириной 0,5 мм. Крепление экрана к смесительной головке осуществлялось при помощи сварочных прихваток. В начальной зоне экрана, контактирующей с зоной обратных токов, были выполнены 16 перепускных отверстий $\varnothing 7$ мм.

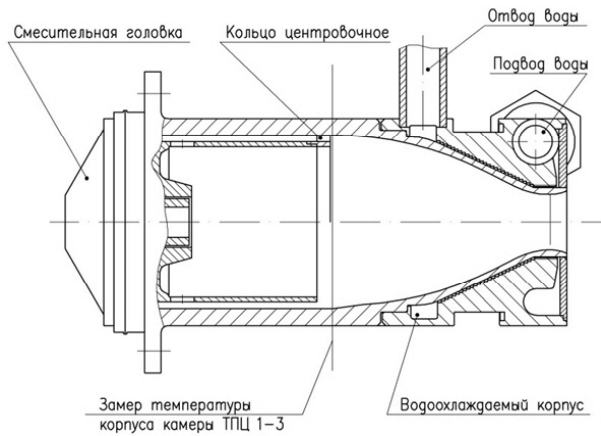


Рис. 3. Общий вид ОК-1 камеры ЖРДМТ

Основные результаты испытаний приведены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1. Результаты испытаний

№ ОК	ТПЦ1 (max), °C	ТПЦ2 (max), °C	ТПЦ3 (max), °C	ТПЦ4 (max), °C	β, с	T _{ст.н'} , °C
ОК-1	210	320	370		157,6	1495
ОК-1А	700	540	780	740	156,5	1530
ОК-2	360	410	350		142,2	1401
ОК-2А	410	390	430	750	146,0	1436

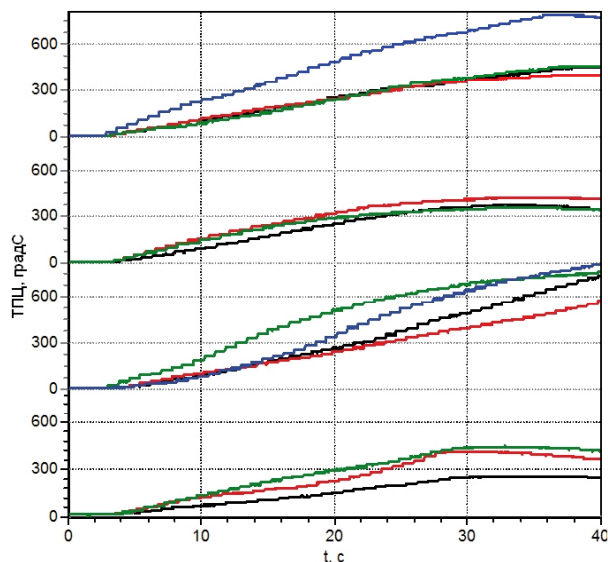


Рис. 4. Результаты замера температуры стенки корпуса камеры

При проведении огневого испытания ОК-1 на 25 секунде за срезом сопла появились яркие вспышки, поэтому было произведено аварийное выключение. Дефектация показала, что причиной вспышек явилось подгорание торца экрана в районе одного из центрирующих ре-

бер на глубину до 4 мм и в ширину до 10 мм, кроме того, на поверхности экрана на участке от перепускных отверстий до торца имелись цвета побежалостей от светло-желтых до темно-фиолетовых. Анализ результатов показал, что одной из возможных причин локального подгара экрана могло быть возмущение в пристеночном слое, вызванное ребром, а также, возможно, недостаточное количество окислителя в газовой завесе. Поэтому в ОК-1А центровочное кольцо не устанавливали, а для увеличения площади перепуска отверстия выполнили продолговатыми (8 отверстий 7x15 мм), что привело к увеличению площади перепускных отверстий на 23% и уменьшению длины экрана на 4 мм. При проведении огневого испытания ОК-1А на 38,5 секунде было произведено аварийное выключение из-за превышения показаний одной из термопар ТПЦ предельной величины 750 °C. Дефектация ОК показала наличие подгорания торца экрана в плоскости входов окислителя и горючего на глубину до 4 мм и в ширину до 8...15 мм, кроме того, на поверхности стенки за местами подгаров имелись интенсивные цвета побежалостей. Аналогично первому испытанию на поверхности экрана на участке от перепускных отверстий до торца имелись цвета побежалостей от светло-желтых до темно-фиолетовых (рисунок 5).

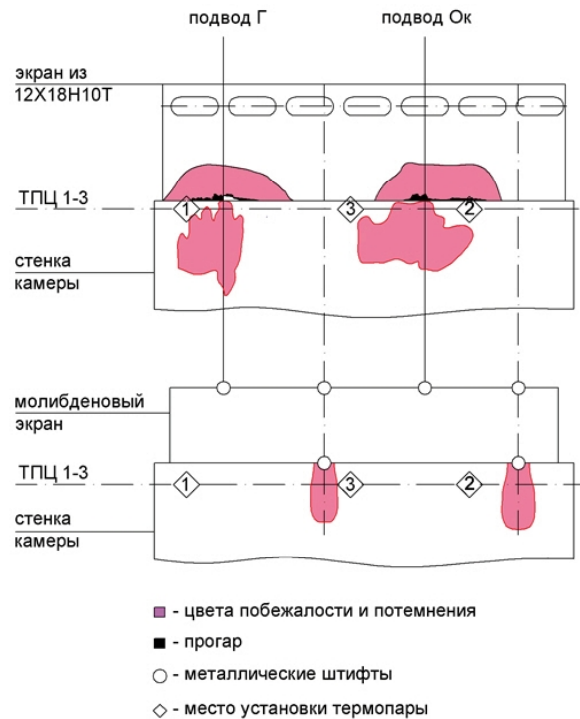


Рис. 5. Состояние внутренней поверхности после испытания (развёртка)

Анализ результатов огневых испытаний ОК-1 и ОК-1А показал, что схема смесеобразова-

ния с газовой завесой весьма чувствительна к равномерности подвода компонентов топлива - так все подгары экранов были расположены в плоскости подвода окислителя и горючего. Поэтому для дальнейшей проверки возможности реализации схемы с газовой завесой необходимо обеспечить работоспособность экрана в процессе испытания, что может быть осуществлено за счет уменьшения его длины и применения более жаростойкого материала.

С этой целью была разработана и изготовлена ОК-2, в которой экран был выполнен из молибденового сплава ВМ-1 с силицидным покрытием, а его длина уменьшена на 12 мм (рисунок 6). ОК-2 так же как и ОК-1, получена доработкой существующей материальной части.

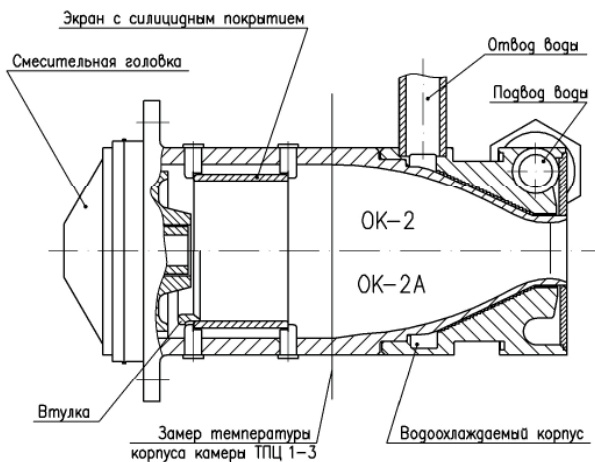


Рис. 6. Общий вид ОК-2 и ОК-2А камеры ЖРДМТ

Экран из молибдена имел толщину 2 мм, это обусловлено особенностями технологии получения защитного покрытия, для исключения острых кромок на торцах. Так как молибден и сталь имеют сильно различающиеся коэффициенты температурного расширения, то крепление экрана выполнялось при помощи штифтов, которые допускали небольшой люфт экрана относительно стальных штифтов, соединенных сваркой с корпусом камеры. Всего было применено шесть штифтов: четыре входных со стороны смесительной головки и два выходных - со стороны критического сечения. Ожидалось, что выходные штифты могут внести негативное влияние на пристеночный слой, поэтому их количество выбрано минимально возможным и размещены они, с учетом результатов предыдущих испытаний, в наименее напряженном месте - в плоскости перпендикулярной плоскости входных патрубков окислителя и горючего. Было проведено два огневых испытания (смотри таблицу 1). По результатам анализа первого испытания ОК-2 из-за низкой

величины полученного расходного комплекса было принято решение ограничить поступление окислителя под экран. Для этого на торец экрана со стороны форсунки была установлена втулка (смотри рисунок 6). Состояние поверхности молибденового экрана после проведения серии огневых испытаний не изменилось: на наружной и внутренней поверхностях отсутствуют следы эрозии и цветов побежалостей (рисунок 7).

При использовании экранов из молибдена сохранялась целостность конструкции, однако отмечались более низкие значения расходного комплекса по сравнению с ОК со стальными экранами, а также относительно других схем смесеобразования (160,8 с). Наиболее вероятной причиной снижения полноты сгорания является замедление рабочих процессов на холодной поверхности молибденового экрана. В традиционной схеме смесеобразования теплота из теплонапряженной области (критическое сечение и зона втекания) переносится по материалу корпуса камеры на цилиндрическую часть и в сопло. Горячая поверхность интенсифицирует химические реакции горения топлива, холодная наоборот - замедляет. При использовании схемы смесеобразования с газовой завесой экран не имеет эффективного контакта с корпусом камеры и не получает тепла, а соответственно, хуже охлаждает теплонапряженную область. Однако, при этом снижение полноты сгорания компенсирует ухудшение охлаждения, что сохраняет тепловое состояние корпуса камеры на том же уровне.



Рис. 7. Фотография молибденового экрана после огневых испытаний

Дополнительными факторами, способствующими снижению полноты сгорания при использовании газовой завесы являются: наличие «резкого», ступенчатого перехода пристеночного слоя с экрана на стенку камеры, который из-за влияния дополнительных факторов (несоосность экрана относительно стенки; состояние выходной кромки экрана; взаимодействие с потоком газа из-под экрана и т.п.) приводит к дополнительным возмущениям, переменным в окружном направлении; неравномерное те-

чение газов из зоны обратных токов, которое зависит от множества геометрических параметров и фактического температурного состояния конструкции, при этом малый располагаемый перепад давлений между зоной обратных токов и основным огневым пространством не позволяет обеспечить равномерность по окружности; выходные штифты крепления экрана вызывают дополнительную неравномерность из-за локального разрушения пристеночного слоя.

Кроме того, возможно, отбор газа из подконусной зоны оказывал негативное влияние на совместную жидкостную пленку топлива.

Молибденовый экран имеет в 10 раз меньшее тепловое сопротивление в осевом направлении, чем стальной, и короче на 12 мм. Эти факторы и обусловили более низкую температуру молибденового экрана. В таблице 1 приведена расчетная оценка ожидаемой температуры внутренней стенки в критическом сечении (параметр $T_{ст.н}$), полученная по величине подогрева воды в технологическом корпусе камеры. Сравнительный анализ результатов огневых испытаний со стальными и молибденовыми экранами (смотри таблицу 1 и рисунок 4) показал, что ожидаемая $T_{ст.н}$ для ОК с молибденовым экраном на 100 °С меньше, чем для ОК со стальным экраном – что хорошо коррелируется с величиной расходного комплекса; окружная температурная равномерность заметно лучше у ОК с молибденовым экраном – так как молибденовый экран короче, поэтому пристеночный слой успевает лучше выровняться после слияния потоков за торцом экрана.

На основании проведенных работ можно сделать следующие выводы:

- подтверждена принципиальная возможность реализации в ЖРДМТ схемы смесеобразования с газовой завесой;
- ресурс и основные характеристики (расходный комплекс) ОК с газовой завесой уступают традиционным конструкциям;
- основной причиной снижения расходного комплекса при реализации схемы смесеобразования с газовой завесой является замедление химических реакций на холодной стенке экрана, а также дополнительная окружная неравномер-

ность в пристеночной слое, образующаяся при реализации новой схемы;

- для формирования равномерной в окружном направлении завесы предпочтительней и эффективней использовать жидкостные струи или пленки, чем газ.

Следует отметить, что для проверки схемы с газовой завесой ОК были получены доработкой существующих узлов. Это существенно ограничило разработку и применение новых конструкторских решений, что в значительной степени повлияло на полученные результаты.

Литература

1. Алемасов В. Е. Теория ракетных двигателей [Текст]/ В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А.П. Тишин. – М. «Машиностроение», 1980. – 314-316 с.
2. Бешенев Ю. А. Экспериментальные исследования возможности адаптации ЖРДМТ разработки ФГУП «НИИМАШ» под топливную пару МОН-3 + ММН с обеспечением удовлетворительного теплового состояния двигателей [Текст]/ Ю. А. Бешенев, С. А. Булдашев, Ф. А. Казанкий, Н. В. Лемский, Е. В. Семкин.//Вестн. СГАУ. – 2011. – № 3(27) часть 1. – С. 267-270.
3. Хватов Ю. А. Взаимодействие НДМГ с N_2O_4 в газовой фазе [Текст]/ Ю. А. Хватов, Г. С. Маркевич, Б. И. Броунштейн и др.// Сборник трудов ГИПХ. – 1980. – № 23. – С. – 17-22.
4. Силютин М.В. Физическая модель рабочих процессов в камере сгорания ЖРДМТ со струйно-центробежными форсунками на самовоспламеняющихся компонентах топлива [Текст]/ М.В. Силютин, С.А. Шустов.//Вестн. СГАУ. – 2011. – № 3(27) часть 3. – С. 205-212.
5. Пат. 2319863 Российская Федерация, МПК F02K 9/52. Способ организации рабочего процесса в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги [Текст]/Ф.А. Казанкин, Е.Г. Ларин, Ю.А. Бешенев, Р.Х.Кутуев, Л.В. Салич; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт машиностроения». – №2005137619/06; заявл. 02.12.2005; опубл. 20.03.2008, Бюл. №8. – 5-7 с.

Поступила в редакцию 01.08.2018

А. Н. Коваленко, Ю. В. Блішун. Експериментальне дослідження робочого процесу в РРДМТ тягою 400Н, організоване за допомогою газової завіси

Проведені експериментальні дослідження для підтвердження можливості роботи РРДМТ за схемою з газовою завесою. Перевагою даної схеми, в порівнянні з іншими, є спрощення конструкції – застосовується тільки одна двокомпонентна форсунка і відсутні маловитратні струменеві форсунки для формування зависного охолодження. Всього було випробувано чотири варіанти дослідних конструкцій, які відрізняються між собою матеріалом, довжиною і товщиною екрану завіси, а також площею перепускних отворів/щілини для відбору окислювального газу на охолодження стінки корпусу камери. На

підставі проведених досліджень зроблено висновок про принципіальну можливість реалізації в РРДМТ схеми сумішоутворення з газовою завісою. Але при цьому ресурс і основні характеристики (зокрема, витратний комплекс), отримані на дослідних конструкціях з газовою завісою, поступаються отриманим на традиційних конструкціях. Аналіз зниження витратного комплексу при реалізації схеми сумішоутворення з газовою завісою показав, що основною причиною є уповільнення хімічних реакцій на холодній стінці екрану, а також додаткова колода нерівномірності у пристінковому шарі, яка утворюється при реалізації нової схеми.

Ключові слова: РРДМТ, сумішоутворення, вогневі випробування.

A. N. Kovalenko, Y. V. Blishun. The experimental research of low thrust LRE with of 400n thrust in-chamber process formed by a gas screen

The experimental researches to confirm the possibility of low thrust LRE with gas screen operating are carried out. In traditional chambers for organization of the internal cooling usually used the oxidizing screen, formed by jet injectors of low mass flow rate. In this case there is observed the low-temperature, saturated with oxidant vapors zone between mixing head and outer propellant cone. The researched scheme assumed to use gas from zone between mixing head and outer propellant cone for forming of the gas screen. In comparison with the others schemes this scheme is simpler – a single two-component injector without jet injectors of low flow mass rate for screen forming is used. There were tested four variants of pilot chamber differing from each other by the sleeve material, length and thickness of the sleeve for screen forming and intake holes/gap area through which oxidizing gas supplied for chamber body cooling. The sleeves were made of 12X18H10T stainless steel and BM-1 molybdenum alloy with silicide coating. Pilot chambers were obtained by modification of the exiting chambers. For the quality increasing of the research results, chamber body and mixing head were not changed. Cylindrical part of the chamber and nozzle initial section have no external cooling for the possibility to estimate the chamber thermal state uniformity, which is characterizing quality of screen forming, by the temperature of the external wall. The performed tests shows possibility of the usage in low thrust LRE the mixing scheme with gas screen. But at the same time the operational time and main characteristics (in particular flow-rate complex) of pilot chambers with gas screen are lower than same parameters of the traditional chambers. The analysis of flow-rate complex decrease in the pilot chamber with gas screen shows that main cause is deceleration of chemical reactions at cold sleeve wall and additional circumferential unevenness of the parietal layer introduced by new scheme. Therefore for forming of the uniform in the circumferential direction screen more preferable and effective is usage of liquid jets or films than gas.

Key words: small thrust LRE, mixing, fire tests.

References

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F. Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigatelei [The rocket engine theory]. Moskva, Mashinostroenie Publ., 1980, pp. 314-316.
2. Besenev Yu. A., Buldashev S. A., Kazankii F. A., Lemskii N.V., Semkin E. V. Eksperimental'nye issledovaniya vozmozhnosti adaptatsii ZHRD-MT razrabotki FGUP "NIIMASH" pod toplivnyu paru MON-3 + MMH s obespecheniem udovletvoritel'nogo teplovogo sostoyaniya dvigatelei [The experimental investigations of LREST developed by FSUE «RINC» adaptation for propellants MON-3+MMH with acceptable engine thermal condition providing]. Vestnik SGAU, 2011, no. 3(27) part 1, pp. 267-270.
3. Khvatov Yu. A., Markevich G. S., Brounshtein B. I. i dr. Vzaimodeistvie NDMG s N_2O_4

v gazovoi faze [The interaction of UDMH and nitrogen tetroxide at gas phase]. Sbornik trudov GIPKH, 1980, no. 23, pp. 17-22.

4. Silyutin M. V., Shustov S. A. Fizicheskaya model' rabochikh protsessov v kamere sgoraniya zhrdmt so struino-tsentrobezhnyimi forsunkami na samovosplamenyayushikhsya komponentakh topliva [The physical model of LREST combustion chamber completed with centrifugal-jet injectors working on hypergolic propellants working processes]. Vestnik SGAU, 2011, no. 3(27) part 3, pp. 205-212.

5. Kazankin F.A., Larin E.G., Beshenev, Ju.A., Kutuev L.V., Salich L.V. Sposob organizacii rabochego processa v kamere sgoraniya zhidkostnogo raketnogo dvigatelja maloj tjagi [Metod for organization of operating process in combustion chamber of low-thrust liquid-propellant rocket engine]. Patent RF, №. 2319863, 2008, pp. 5-7.