

УДК 621.454.2.015.4

А. Н. КОВАЛЕНКО, А.В. ПАВЛОВ, Ю.В. БЛИШУН, А.А. ОСЕЦКАЯ

ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля», Днепр, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ ЖРДМТ ТЯГОЙ 400Н

Проведена оценка влияния шероховатости и температуры стенки корпуса камеры на тепловое состояние камеры и величину расходного комплекса при испытании ЖРДМТ тягой 400Н. Представлены результаты огневых испытаний, подтверждающие рост удельных характеристик при прогреве корпуса камеры, имеющего шероховатую внутреннюю поверхность: расходный комплекс с или без отвода тепла из зоны критического сечения; прирост расходного комплекса при прогреве ниобиевого корпуса камеры; распределение поля температур по записи тепловизора при испытании ниобиевого корпуса; равномерность поля температур корпуса с шероховатой внутренней поверхностью и отводом тепла из зоны критического сечения.

Ключевые слова: ЖРДМТ, смесеобразование, огневые испытания.

Одной из особенностей большинства современных ЖРДМТ является организация смесеобразования при помощи одной двухкомпонентной, как правило, центробежно-центробежной форсунки в сочетании с завесой, создаваемой при помощи нескольких струйных форсунок, расположенных в пристеночной зоне смесительной головки. Смесеобразование организовывается таким образом, чтобы обеспечить, в том числе и приемлемое тепловое состояние корпуса камеры. Для этого практически все горючее и окислитель направляются на стенку камеры, так как продукты первичных химических реакций горения имеют относительно низкую температуру и могут с успехом использоваться для теплозащиты стенки [1].

При такой схеме смесеобразования максимальная полнота сгорания при заданной

предельной температуре материала корпуса достигается в случае обеспечения максимальной окружной равномерности подачи окислителя и горючего на стенке камеры. Принципиальная схема смесеобразования такого типа представлена в [2]. В несколько измененном (уточненном) виде схема смесеобразования исследуемой камеры ЖРДМТ представлена на рисунке 1. Взаимодействие компонентов топлива происходит путем взаимного внедрения нескольких жидкостных пленок: конусов распыла форсунок окислителя и горючего между собой (в том числе взаимодействие пленок с подконусной зоной обратных токов и ядром потока), а также частично прореагировавшего совместного конуса распыла форсунок, стекающего с экрана, и завесной пленкой на внутренней поверхности стенки камеры.

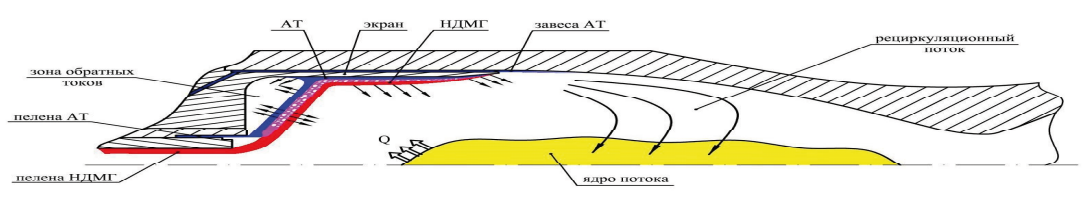


Рис. 1. Принципиальная схема смесеобразования в исследуемом ЖРДМТ

Существует несколько факторов, влияющих на процесс взаимодействия пленок на стенке. Одним из таких факторов является шероховатость поверхности. Традиционно, в

камерах ЖРД и ЖРДМТ, контактирующие с продуктами сгорания поверхности внутренних стенок из жаростойких сталей или никелевых сплавов полируются. Еще одним из таких фак-

торов является температура стенки, на которой происходит течение и взаимодействие пленок. Температура стенки и теплофизические свойства компонентов топлива влияют на характер течения и кипения пленки, ее взаимодействие с ядром потока.

Влияние шероховатости и температуры стенки на тепловое состояние корпуса камеры и величину расходного комплекса исследовалось при проведении огневых испытаний ЖРДМТ тягой 40 кгс, работающего на компонентах топлива АТ и НДМГ. Отработочные испытания этого ЖРДМТ проводились с использованием съемных корпусов камер: водоохлаждаемого корпуса из жаростойкой стали 12Х18Н10Т, неохлаждаемого корпуса из хромоникелевого сплава ХН60ВТ и корпуса из ниобиевого сплава Nb5В2МЦ с защитным покрытием MoSi₂ (рис. 2). Водоохлаждаемый корпус камеры имеет проточное охлаждение водой входной части сопла в районе критического сечения и неохлаждаемый цилиндрический участок. Внутренние поверхности водоохлаждаемого корпуса камеры и неохлаждаемого из сплава ХН60ВТ были отполированы. Поверхность корпуса камеры из ниобиевого сплава Nb5В2МЦ с защитным покрытием MoSi₂ имела однородную шероховатость, обусловленную технологией нанесения защитного покрытия.

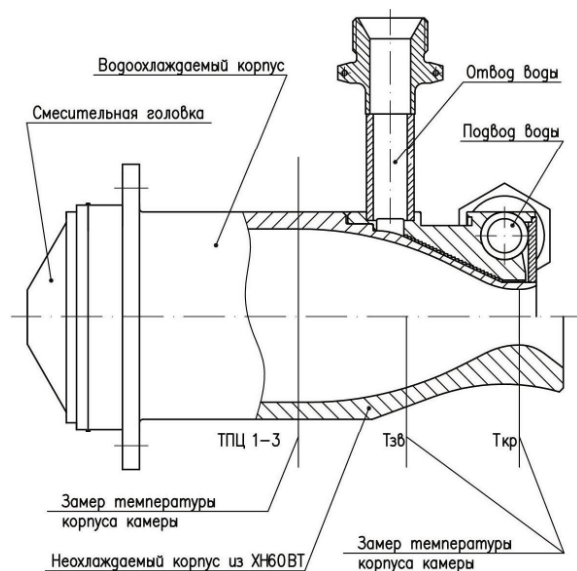


Рис. 2. Корпус экспериментальной камеры ЖРДМТ

Сравнительный анализ результатов испытаний двух пар ЖРДМТ, укомплектованных попарно одной и той же смесительной головкой, с водоохлаждаемым корпусом камеры и неохлаждаемым из сплава ХН60ВТ, показал, что расходный комплекс (β) на испытаниях с

водоохлаждаемым корпусом ниже на 3 с...4,5 с (рис. 3). Снижение β при наличии внешнего теплоотвода происходит из-за снижения общей (термодинамической) температуры продуктов сгорания и из-за замедления рабочих процессов вблизи холодной стенки. Для оценки влияния внешнего теплоотвода на термодинамическую температуру при проведении огневых испытаний выполнялся замер подогрева и расхода воды в тракте водоохлаждаемого корпуса (рис. 2). Расчетная оценка, выполненная по методике, изложенной в [3], показала, что за счет отбора тепла водяным охлаждением β уменьшается на 0,4 ... 0,5 с. Следует отметить, что при уменьшении расхода воды суммарный тепловой поток увеличивался. Таким образом, основной причиной снижения величины расходного комплекса при использовании водоохлаждаемого корпуса является снижение скорости химических эндотермических реакций вблизи холодной стенки.

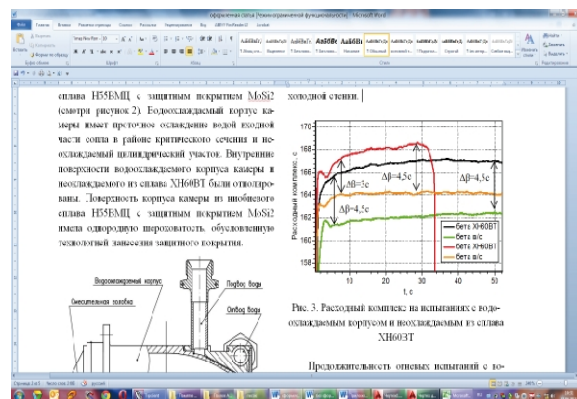


Рис. 3. Расходный комплекс на испытаниях с водоохлаждаемым корпусом и неохлаждаемым из сплава ХН60ВТ

Продолжительность многорежимных огневых испытаний с водоохлаждаемым корпусом составляла 260 с, с корпусом из сплава ХН60ВТ – 33 ... 53 с (только номинальный режим), при этом останов выполнялся после достижения наружной температуры корпуса в районе критического сечения 900 ... 950 °С. Согласно расчетной оценке на стабильном режиме эта температура должна быть 1300 ... 1500 °С. Поэтому можно ожидать, что при достижении стабильной температуры теплоотвод в стенку еще уменьшится и это приведет к дополнительному росту β .

В следующей серии огневых испытаний были проведены испытания смесительной головки аналогичной конструкции с водоохлаждаемым корпусом и корпусом камеры из ниобиевого сплава. Расходные комплексы на номинальном режиме, полученные при этих испытаниях, представлены на рисунке 4. Ана-

лиз этих испытаний показывает следующую картину: в начальный период времени расходные комплексы примерно одинаковы, но после прогрева конструкции расходный комплекс камеры с ниобиевым корпусом плавно повышается на 3,5 с.

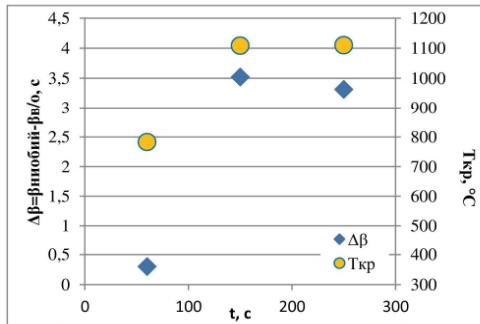


Рис. 4. Зависимость приращения от нагрева конструкции

Таким образом, нагретая до высокой температуры стенка корпуса камеры ЖРДМТ способствует интенсификации рабочих процессов в пристеночном слое, но по-разному для ниобиевого и нихромового корпусов камер ЖРДМТ. Для нихромового корпуса камеры повышение β относительно испытания с водоохлаждаемым корпусом происходит практически сразу после включения, в то время как на ниобиевом корпусе только после прогрева цилиндрической части камеры через 70 с. Контроль теплового состояния ниобиевого корпуса производился при помощи тепловизора Flir A655sc. Анализ результатов наблюдений показал, что сначала происходит интенсивный нагрев зоны критического сечения, а затем в течение 40...70 секунд постепенное растекание температуры по входной части сопла, при этом максимум наружной температуры перемещается из критического сечения на вход в сопло (рис. 5). Аналогичная ситуация наблюдалась при испытаниях ЖРДМТ 11Д458М на топливе атин и ММГ [4].

Корпус камеры из нихрома и ниобия имеет одинаковую геометрию и отличается только теплопроводностью и шероховатостью поверхности. Для оценки влияния шероховатости на рабочие процессы в ЖРДМТ внутренняя поверхность водоохлаждаемого корпуса камеры (уже проходившего огневые испытания) была подвергнута пескоструйной обработке с целью имитации шероховатости поверхности защитного покрытия MoSi₂ на ниобиевом корпусе. Далее было проведено огневое испытание по стандартной циклограмме с использованием тех же поверхностных термопар. Результаты

испытания показали, что β опескоструенного корпуса возрос в среднем на 0,5 с. При этом отмечается важная особенность: замена полированной поверхности на опескоструенную привела к заметному изменению теплового состояния камеры.

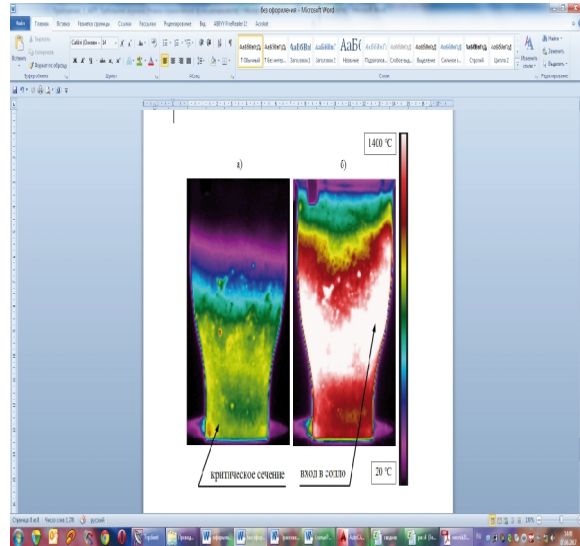


Рис. 5. Распределение поля температур по записи тепловизора при испытании ниобиевого корпуса
а) максимальная температура в зоне критического сечения 40 с испытания; б) максимальная температура на входе в сопло 80 с испытания

На рисунке 6 представлены результаты огневых испытаний одного и того же двигателя, с одним лишь отличием — перед испытанием №856 внутренняя поверхность корпуса была пропесочена. Равномерность оценивалась на участке входа в сопло (см. рис. 2) по трем, равнорасположенным в одном сечении, термопарам ТПЦ1-3.

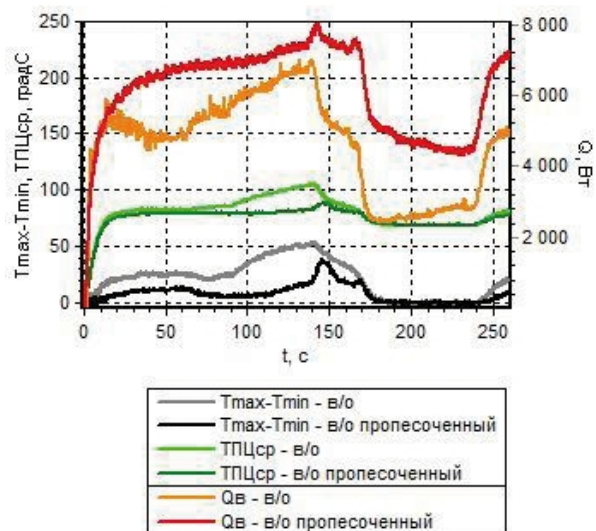


Рис. 6. Равномерность поля температур на участке входа в сопло

Как следует из рисунка 6, появление шероховатости поверхности привело к снижению средней температуры на входе в сопло на 5°C , при этом наблюдается существенное улучшение окружной равномерности температур, которая в значительно меньшей степени зависит от режима работы двигателя. Одновременно на шероховатой поверхности увеличился на 30% тепловой поток, уносимый водяным охлаждением из зоны критического сечения. Причина этой особенности может быть следующей. При организации рабочего процесса в камере ЖРДМТ всегда присутствует некоторая неравномерность, вызванная индивидуальными особенностями форсунок и других элементов, определяющих смесеобразование. Изначально нагрев конструкции происходит в зоне критики, далее наблюдается кондуктивный перенос тепла по стенке в зону втекания. В результате этого, во входной части сопла появляются зоны (одна или несколько) с повышенной температурой поверхности. На полированной поверхности, при натекании пленки охладителя на эти зоны, постепенно образуется устойчивое паровое «пятно», вызванное кипением жидкости преимущественно на пленочном режиме. Наличие этого «пятна» (одного или нескольких) приводит к окружному перераспределению (обтеканию) набегающего потока непрореагировавшего топлива и промежуточных продуктов сгорания, что еще в большей степени способствует увеличению температурной неравномерности. На шероховатой стенке реализуется преимущественно режим пузырькового кипения, из-за наличия большого количества микро впадин и микро выступов [5], что приводит к увеличению теплового потока в стенку. Кроме того, шероховатость поверхности и пузырьковый режим кипения ограничивают окружное перетекание жидкости.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для ЖРДМТ, имеющего схему смесеобразования с одной форсункой, повышение температуры корпуса камеры и незначительная равномерная шероховатость внутренней поверхности стенки корпуса камеры приводят к интенсификации рабочих процессов, тем самым повышая удельные характеристики двигателя.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Алемасов В. Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. – М. «Машиностроение», 1980. – 253-255 с.
4. Бешенев Ю. А. Экспериментальные исследования возможности адаптации ЖРДМТ разработки ФГУП «НИИМАШ» под топливную пару MON-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.
5. Дзюбенко Б.В. Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике [Текст] / Б.В. Дзюбенко, А.М. Кутепов, И.П. Свириденко, И.И. Федик, В.В. Харитонов, Л.П. Холпанов – М. ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2003. – С. 16-18.

Поступила в редакцию 13.06.2017 г.

А.Н. Коваленко, О.В. Павлов, Ю.В. Блішун, О.О. Осецька. Експериментальне дослідження параметрів сумішоутворення РРДМТ тягою 400Н

Проведено оцінку впливу шорсткості та температури стінки корпусу камери на тепловий стан камери та величину витратного комплексу при випробуванні РРДМТ тягою 400Н. Представлено результати вогневих випробувань, що підтверджують зростання питомих характеристик при прогріві корпусу камери, що має шорстку внутрішню поверхню: витратний комплекс з або без відводу тепла з зони критичного перетину; приріст витратного комплексу при прогріві ніобієвого корпусу камери; розподіл поля температур по запису тепловізора при випробуванні ніобієвого корпусу; рівномірність поля температур корпусу з шорсткою внутрішньою поверхнею та відводом тепла із зони критичного перетину.

Ключові слова: РРДМТ, сумішоутворення, вогневі випробування.

A.N. Kovalenko, A.V. Pavlov, Y.V. Blishun, A.A. Osetskaya. Experimental research of small thrust LRE with 400N of thrust mixing

The influence of roughness and wall temperature of the chamber body on the chamber thermal condition and flowrate complex value during tests of small thrust LRE with thrust 400N was estimated. The firing tests results are shown which confirm increase of specific parameters during chamber body with rough inner surface heating: flowrate complex with or without heat removing from critical section; flowrate complex increasing during niobium chamber body heating; temperature field distribution during niobium chamber body tests, according to records of thermal imager. The temperature field uniformity of the chamber body with rough inner surface and heat removing from critical section.

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