

4. Юлдыбаев Л.Х., Гумеров Х.С., Алаторцев В.П., Ахмедзянов А.М. Оценка рассеивания коэффициентов потерь газозвдушного тракта серийных ВРД.//Межвуз. научный сборник Испытания авиационных двигателей: вып.4.УАИ. Уфа, 1976. С.100-105.
5. V. Alatorsev, M. Alatorsev, H.Gumerov. Inheritance of thermodynamic parameters in a gas turbine engine. Proceedings of 14-th International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE). AIAA, 1999.
6. Гумеров Х.С., Алаторцев В.П., Горюнов И.М. Оценка и отладка параметров турбореактивного двигателя на самолете // Изв. вузов. Авиационная техника.1998.№3. С.72-77.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КАМЕР ЖРД

Шнякин В.Н., Переверзев В.Г., Коваленко А.Н.
ГКБЮ им. М.К. Янгеля, г. Днепропетровск

Совершенствование камер ЖРД верхних ступеней ракетопосителей (как правило, малоразмерных по тяге) осуществляется в настоящее время по пути повышения основных удельных параметров, повышения надежности работы и расширении эксплуатационных диапазонов.

Применительно к малоразмерным камерам ЖРД основным ограничивающим фактором является охлаждение корпуса камеры ЖРД. Это обусловлено действием масштабного фактора (относительно большой поверхностью охлаждения и малым расходом охладителя), а также снижением охлаждающих возможностей компонентов топлива, обусловленных снижением давления и, соответственно, температур кипения охладителей и допустимой температуры внутренней стенки со стороны охладителя.

Кроме того, масштабный фактор повышает влияние внутреннего охлаждения на потери удельного импульса. Так, в малоразмерных камерах ЖРД количество периферийных форсунок составляет ~ половину всего количества форсунок, что делает практически невозможным создание пристеночного периферийного низкотемпературного слоя от форсунок для защиты внутренней стенки при одновременном обеспечении высоких удельных энергетических параметров.

Возможности наружного регенеративного охлаждения малоразмерных высотных камер ЖРД, даже в случае применения радиационно-охлаждаемых сопловых насадков и использования двух компонентов топлива, ограничены допустимым подогревом охладителей, что требует для обеспечения надежного охлаждения совершенствования внутреннего завесного охлаждения.

Организация защитного низкотемпературного пристеночного слоя около внутренней стенки корпуса камеры проводится путем создания в пристеночной зоне избытка одного из компонентов топлива и приводит, как следствие, к потерям удельного импульса за счет неполноты сгорания топлива. Величина этих потерь зависит от размеров пристеночного слоя и определяется способом его организации, поэтому использование поясов завесного охлаждения, как правило, предпочтительней периферийного ряда форсунок, создающих пристеночный слой от смесительной головки.

Организация внутреннего завесного охлаждения одним компонентом всегда приведет к образованию пристеночного низкотемпературного защитного слоя относительно большой толщины. Это обусловлено характером тепломассопереноса в пристеночном слое под воздействием неравномерного турбулентного основного потока от ядра, что приводит к формированию относительно небольшого градиента изменения температуры продуктов сгорания в зоне размыва. Требование к обеспечению температуры огневой стенки не выше предельно допустимой приводит к необходимости создания пристеночного низкотемпературного слоя, защитное действие которого должно сохраняться до критического сечения камеры двигателя.

Для организации внутреннего завесного охлаждения при помощи однокомпонентных поясов завес в малоразмерных камерах требуется значительный расход компонента, используемого для этой цели. Так, для двухрежимной камеры ЖРД с традиционной организацией внутреннего завесного охлаждения тягой $\sim 500/200$ кг (основной режим/дросселированный режим), работающей на высококипящих компонентах топлива, требуемый расход горючего на завесы составляет $\sim 5/14$ % от суммарного расхода топлива. Отсюда очевидно, что в этой камере потери из-за неполноты сгорания топлива весьма значительны.

Снижение потерь на неполноту сгорания топлива в малоразмерных камерах ЖРД возможно при использовании разнокомпонентных завес для внутреннего охлаждения. В этом случае организация внутреннего охлаждения происходит следующим образом: первоначально пристеночный слой формируется из конусов распыла периферийных однокомпонентных форсунок или наружных гидравлических трактов периферийных двухкомпонентных форсунок (как правило – горючего). При попадании на огневую стенку перемешивание этой части компонентов с другим, несколько удаленным от стенки, затрудняется, что обеспечивает тепловую защиту внутренней стенки на относительно небольшую длину при незначительной толщине пристеночного слоя. Далее через первый пояс завесного охлаждения подается компонент, которого недостаточно в сформированном от смесительной головки пристеночном слое (в нашем случае - окислитель). вновь образованный пристеночный слой имеет неоднородную в радиальном направлении структуру: низкотемпературную периферийную часть – для защиты внутренней стенки и обращенную к

ядру потока зону размыва, в которой происходит догорание первичного (от смесительной головки) пристеночного слоя при оптимальном соотношении компонентов топлива. За счет размыва основным потоком защитные свойства низкотемпературного пристеночного слоя снижаются. Для восстановления защитного низкотемпературного пристеночного слоя, а также для организации догорания сформированного после первой завесы избытка в периферийной зоне одного из компонентов через второй пояс завесного охлаждения подается компонент, находящийся в пристеночном слое в недостатке (в нашем случае – горючее).

Расположение разнокомпонентных поясов завесного охлаждения и расходы через них выбираются таким образом, чтобы обеспечить непрерывное существование в зоне высоких тепловых потоков защитного низкотемпературного пристеночного слоя и организованное последовательное догорание "отработанного" размытого пристеночного слоя новым.

Периферийное пристеночное догорание определяет больший градиент изменения температур продуктов сгорания на поверхности размыва разнокомпонентных пристеночных слоев, что уменьшает количество (толщину слоя) низкотемпературного не полностью прореагировавшего газа и снижает потери на неполноту сгорания.

Эффективность применения разнокомпонентных завес для организации внутреннего охлаждения экспериментально подтверждена при отработке камеры двигателя РД864. Четырехкамерный двухрежимный двигатель РД864 суммарной тягой ~ 2000 (800) кгс (основной / дросселированный режим) на высококипящих компонентах топлива, выполнен по схеме без дожигания генераторного газа с турбонасосной системой подачи компонентов топлива. Давление продуктов сгорания в камере – 41,8 (17,3) кгс/см², коэффициент соотношения топлива 1,92 (2,0).

Камера двигателя паяно-сварной конструкции состоит из отдельных блоков, соединенных между собой при помощи сварки. В процессе отработки внутреннего охлаждения камеры двигателя были опробованы два варианта конструкции:

- первой, традиционной на то время конструкции, с одной или двумя поясами завес горючего;
- второй, экспериментальной конструкции с двумя разнокомпонентными поясами завесного охлаждения (первый пояс – окислительный, второй – горючего).

Огневые испытания, проведенные в широких диапазонах изменения основных параметров, показали существенные преимущества двухкомпонентной схемы внутреннего охлаждения относительно существующей.

Применение разнокомпонентных завес значительно (~50°С) снизило подогрев горючего в трактах охлаждения, что позволило увеличить коэффициент соотношения топлива в ядре и в целом по камере двигателя.

Организация последовательного догорания пристеночного слоя, приближение коэффициента соотношения топлива к оптимальному позволило ~ на 3 % повысить величину удельного импульса на основном режиме и ~ на 10 % на дросселированном режиме. Кроме того, появилась возможность применять одну настройку завесного охлаждения для обоих режимов, что позволило существенно упростить схему двигателя за счет исключения из схемы клапана-переключателя, обеспечивающего два режима работы завес, и связанную с ним разводку трубопроводов и соответствующую часть системы управления.

Как показали эксперименты, применение разнокомпонентных завес повышает устойчивость рабочего процесса в камере двигателя. Так, при испытаниях на форсированных режимах граница высокочастотной устойчивости не была достигнута. Проверенный диапазон высокочастотной устойчивости рабочего процесса в камере составляет не менее 50 % от максимального давления в камере сгорания.

Запас низкочастотной устойчивости, проверявшийся при испытаниях на пониженных режимах, характеризует отсутствие порога по давлению в камере при проверке до $12,9 \text{ кг/см}^2$, что соответствует 25 % запаса от минимального рабочего давления.

На некоторых испытываемых узлах при переходе с основного режима на дросселированный при достижении минимального давления в провале, кратковременно в течение 0,1...0,4 с в камерах возникали низкочастотные колебания давления, которые не влияли на работоспособность и параметры двигателя. Максимальные уровни параметров, характеризующих устойчивость рабочего процесса в камере, в период запуска, останова и установившихся режимов значительно меньше методически допустимых.

При отработке камеры двигателя RD869, имеющей сходные с камерой RD864 параметры, система внутреннего охлаждения с разнокомпонентными завесами была усовершенствована путем изменения расходов через завесы (см. табл. 1).

При отработке однорежимной камеры двигателя RD866, имеющей сходную конструкцию с RD864 и RD869, и однорежимной камеры двигателя RD868 аналогичной конструкции, но большей размерности, за счет модернизации системы завесного охлаждения (изменения расходов через завесы) и повышения коэффициента соотношения компонентов топлива энергетические характеристики еще более улучшились (см. табл. 1).

Эксперименты с различными расходами на завесы показали, что с увеличением расхода окислителя, как и с уменьшением расхода горючего, экономичность камеры растет. Предельные значения расходов окислителя и горючего, ограничивающих рост экономичности, определились появлением поверхностной эрозии на внутренней стенке в районе минимального сечения при повышенном соотношении компонентов топлива.

Таблица 1

Камера двигателя	Режим	P, кг	p_k , кгс/см ²	p_a , кгс/см ²	K	I, с
RD864	ОР	504	41,8	0,0266	1,92	314
	ДР	208	17,3	0,0106	2,0	305,5
RD869	ОР	514,5	41,8	0,0266	1,92	318
	ДР	213,3	17,3	0,0106	2,0	310
RD866	ОР	513,5	41,5	0,0242	2,31	323,1
RD868	ОР	2328	93,3	0,028	2,4	331,5

Поэтому при отработке камер двигателей RD866 и RD869, создаваемых на базе камеры двигателя RD864, модернизировалась средняя часть камеры (район минимального сечения) в части увеличения скорости охладителя и уменьшения толщины внутренней стенки.

Двигатели RD864, RD866 и RD869 изготавливались серийно.

Камера двигателя RD868 отработывалась только автономно.

Использование разнокомпонентных завес позволило создать семейство камер ЖРД, имеющих одни из самых высоких удельных энергетических параметров в своем классе, обеспечивающих стабильную устойчивую работу в широких эксплуатационных диапазонах.

В табл. 2 представлены проверочные диапазоны изменения основных параметров, в которых камера двигателя работоспособна.

Таблица 2

Двигатель	Режим	P_k , кг/см ²	K	$t_{вхг}$, °C	$t_{вход}$, °C
RD864	ОР	31,5...65,6	1,29...3,31	-13...+41 *	-10,8...+43*
	ДР	12,9...24,6	1,35...3,08	-13...+41 *	-10,8...+43*
RD869	ОР	32,5...51,9	1,48...2,05	-1... +45 *	-6... +41,4 *
	ДР	12,6...20,1	1,44...2,09	-1... +45 *	-6... +41,4 *
RD866	ОР	15...65,1	1,6...3,03	-6... +63	-4... +63

* температура на входе в двигатель.

Как видно, применение системы внутреннего охлаждения с разнокомпонентными поясами завес в камерах ЖРД позволяет повысить надежность работы, экономичность и устойчивость рабочих процессов в широких эксплуатационных диапазонах.