

УДК 621.455: 629.7.036.5

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО
ПРОЦЕССА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖРД РД-107, РД-108 ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ
ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКИ¹**

© 2003 А.А. Ганин,² С.Д. Каменский, Б.И. Каторгин, И.Ю. Фатуев,
В.К. Чванов³

Новая смесительная головка с однокомпонентными форсунками позволяет повысить устойчивость рабочего процесса в камере двигателей РД-107, РД-108 и увеличить ее удельные характеристики по сравнению с двигателем-прототипом. Заложенные технические решения полностью подтверждены результатами огневых испытания двигателей РД-107, РД-108. Мероприятия по повышению теплостойкости внутренней стенки камеры и выступающих в огневое пространство форсунок обеспечили надежную работу камер и двигателя в целом на всех режимах работы. Двигатели РД-107, РД-108 с новой смесительной головкой внедрены в штатную эксплуатацию в составе РН "Союз ФГ" в грузовом и пилотируемом вариантах.

В ходе многолетнего серийного изготовления маршевых кислород-керосиновых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) для I и II ступеней РН типа "Союз" (рис. 1, см. в конце статьи) выявилась чувствительность запаса устойчивости рабочего процесса в их камерах на режиме главной ступени к нарушениям при изготовлении двухкомпонентных центробежных форсунок. Периодически имели место как отдельные случаи, так и групповые проявления высокочастотной неустойчивости при технологических испытаниях двигателей в процессе их изготовления.

Проводившиеся в этих случаях исследования показывали, что снижение запаса устойчивости являлось, как правило, следствием нарушений при изготовлении тангенциальных отверстий в форсунках и нарушения из-за этого стабильности гидравлических характеристик смесительных головок.

¹Представлена доктором технических наук профессором Ю.Н. Гореловым.

²Ганин А.А., Приволжский филиал ОАО "НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко".

³Каменский С.Д., Каторгин Б.И., Фатуев И.Ю., Чванов В.К., ОАО "НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко".

Следует отметить, что указанные нарушения, в силу специфики технологии изготовления и контроля, носят трудновыявляемый и трудновоспроизводимый характер.

Поэтому в ОАО "НПО Энергомаш" на базе смесительной головки камеры двигателя 8Д716 была спроектирована смесительная головка для использования в камерах ЖРД РН "Союз" (рис. 2).

В новой смесительной головке использованы однокомпонентные центробежные форсунки горючего и окислителя, часть из которых выдвинута в огневое пространство на 30 мм и образует антипульсационные перегородки в виде замкнутого четырехугольного контура в центре смесительной головки с расходящимися к периферии восемью лучами.

Таким образом, начальная зона горения в камере разделяется на девять участков, что препятствует развитию радиальных и тангенциальных поперечных колебаний давления и обеспечивает устойчивость рабочего процесса.

В качестве дополнительной меры для повышения устойчивости рабочего процесса форсунки окислителя и горючего смесительной головки разбиты по расходам на три класса с разбросом расходов для первого и третьего классов относительно второго на $\pm 10\%$.

Для улучшения условий охлаждения камеры с разработанной смесительной головкой было принято решение каналы тракта охлаждения в ней от критической части сопла до входа в смесительную головку выполнить не прямыми, а спиральными с углом наклона спирали к оси камеры 15 градусов.

Произведенные при проектировании смесительной головки расчеты смеобразования показали, что при использовании ее в унифицированной камере для серийных двигателей РД-107, РД-108 за счет более высокой полноты сгорания при неизменных секундных расходах компонентов топлива обеспечивается повышение давления в камерах двигателя РД-108 с 54,2 кгс/см² абс. до $\sim 55,5$ кгс/см², а в камерах двигателя РД-107 с 59,7 кгс/см² абс. до $\sim 61,2$ кгс/см².

За счет улучшения полноты сгорания, а также частично за счет уменьшения доли суммарного расхода, подаваемого в пристеночный слой с низкими значениями соотношения компонентов топлива, планировалось повышение удельного импульса тяги двигателей.

Проведенный расчетно-статистический анализ показал, что удельный импульс тяги двигательных установок I и II ступеней может быть повышен также за счет увеличения удельного импульса тяги камер рулевых агрегатов (РА), использующихся в составе ДУ вместе с двигателями. Это повышение достигается небольшим перераспределением расхода компонентов, подаваемого в двигатели и РА, для изменения весового соотношения компонентов в камерах РА с $2,06 \div 2,08$ до $\sim 2,4$, что и обеспечивает прирост удельного импульса камер РА на $2,3 \div 3,3$ с. Ввиду незначительности,

указанное перераспределение расхода на удельные характеристики камер двигателей практически не влияет.

Этапу доводочных испытаний двигателей с новыми камерами предшествовал этап экспериментального подтверждения ожидаемого повышения устойчивости рабочего процесса и прироста удельного импульса тяги, проведенный на вертикальном стенде испытательного комплекса ОАО "Моторостроитель" (г. Самара) в период 1991–1993 г.

На данном этапе было проведено 34 испытания 6 двигателей РД-107 и 6 испытаний одного двигателя РД-108, при которых была подтверждена устойчивая работа камер при запуске, выключении и на режиме главной ступени с форсированием по давлению в камерах до $67,9 \text{ кгс/см}^2$ абс., дросселированием до $49,5 \text{ кгс/см}^2$ и подтверждены ожидаемые уровни удельного импульса тяги двигателей.

Повышение давления в камерах модернизированных двигателей потребовало перенастройки номинальных значений давления датчиков обратной связи, а на двигателе РД-108 и смещения диапазона его измерений в сторону больших значений. На двигателе РД-108 в связи с невозможностью полностью компенсировать увеличение гидросопротивления охлаждающего тракта камер (из-за введения спиральных каналов охлаждения) снижением перепада давления на дросселе горючего за насосом, для сохранения величины соотношения компонентов топлива за счет уменьшения диаметра расходной шайбы окислителя за насосом было увеличено гидросопротивление магистрали окислителя на $4,8 \text{ кгс/см}^2$. Для обеспечения же требуемого суммарного расхода компонентов дополнительно была увеличена частота вращения ротора насосов на 100 об/мин за счет увеличения расхода пара газа через турбину ТНА на $0,1 \text{ кг/с}$.

Кроме того, если серийные двигатели настраиваются на номинальный режим по величине суммарного расхода компонентов топлива, то на модернизированных двигателях предусмотрена настройка на номинальное давление в камерах, что повышает точность настройки и ее технологичность.

В связи с требованиями технического задания о сохранении неизменной тяги двигателя РД-108 на промежуточной ступени давление в камерах на этом режиме было понижено на $1,4 \text{ кгс/см}^2$.

Помимо отмеченного выше повышения соотношения компонентов в камерах РА до $\sim 2,4$, в соответствии с требованием технического задания в РА, устанавливаемых в двигательную установку II ступени, исключен пироклапан отсечки окислителя, которая в составе ДУ обеспечивается закрытием клапана окислителя двигателя при выключении.

В связи с этим при последующей отработке потребовалось проведение экспериментально-расчетных оценок увеличения импульса последействия РА и соответствия его заданным требованиям.

Доводочные испытания модернизированных двигателей I и II ступеней с РА проводились на стенде с вертикальным положением оси двигателя по комплексной программе экспериментальной отработки, которая была пол-

ностью выполнена, а после завершающих доводочных и межведомственных испытаний двигатели были допущены к проведению летно-конструкторских испытаний (ЛКИ), успешное проведение которых позволило перейти к этапу серийной эксплуатации.

С целью сокращения затрат доводочные испытания проведены на ограниченном количестве экземпляров вновь изготавливаемой матчасти.

Так, для проведения всего объема испытаний, включая ЗДИ, были изготовлены 64 смесительные головки и 16 нижних частей (цилиндрическая часть и сопло). Для сборки большинства камер были использованы нижние части камер одного из типов маршевого ЖРД II ступени РН "Союз", снятого с производства.

В процессе проведения испытаний были реализованы изменения величин давления в камере и массового соотношения топлива, существенно превышающие заданные в документации (рис. 3, 4).

С использованием указанной матчасти:

- работоспособность двигателя II ступени проверена 67 пусками 16 сборок двигателей с суммарной наработкой на режиме главной ступени тяги 5225 с, при которых диапазон изменения давления в камерах составил $84,7 \div 109,9\%$ от номинального значения при допустимом эксплуатационном диапазоне $90 \div 105\%$, а диапазон весового соотношения компонентов топлива через насосы ТНА составил $2,11 \div 3,07$ при эксплуатационном диапазоне $2,08 \div 2,71$;
- работоспособность двигателя I ступени проверена 68 пусками 13 сборок двигателей с суммарной наработкой на режиме главной ступени тяги 4094 с, при которых изменение давления в камерах составило $85 \div 110,3\%$ от номинального значения, а диапазон изменения весового соотношения компонентов топлива через насосы ТНА составил $2,08 \div 2,88$ при допустимом эксплуатационном диапазоне $2,16 \div 2,76$;
- максимальная наработка одной камеры на режиме главной ступени в составе двигателей II ступени составила 980 с (продолжительность работы в полете ~ 290 с), в составе двигателей I ступени 1050 с (продолжительность работы в полете 120 с), а камер, использовавшихся при испытаниях обоих типов двигателей, 1670 с (975 с в составе двигателя II ступени и 695 с в составе двигателя I ступени).

Удельный импульс тяги, полученный при этих испытаниях, соответствует требованиям технического задания. Значения удельного импульса тяги камер и двигателя в целом приведены в таблице.

На этапе предварительной проверки работоспособности камеры с новой смесительной головкой после испытаний на значительном количестве выступающих форсунок горючего отмечалось обгорание торцев на величину до ~ 17 мм. И хотя влияния обгорания выступающих форсунок на удельные

Таблица

№ п/п	Объект	Наименование характеристик	Удельный импульс тяги в пустоте, кгс·с/кг
1	Камера	Среднее значение для камеры в составе модернизированного двигателя II ступени, полученное при доводочных испытаниях	326,28
2		Номинальное значение для камеры модернизированного двигателя II ступени по основным характеристикам	326,5
3		Номинальное значение для камеры серийного двигателя II ступени по основным характеристикам	321,8
4		Среднее значение для камеры в составе модернизированного двигателя I ступени, полученное при доводочных испытаниях	326,56
5		Номинальное значение для камеры модернизированного двигателя I ступени по основным характеристикам	326,8
6		Номинальное значение для камеры серийного двигателя I ступени по основным характеристикам	320,2
7	Двигатель	Для модернизированного двигателя II ступени по результатам доводочных испытаний	$320,5^{+1,43}_{-0,71}$
8		Для модернизированного двигателя II ступени по основным характеристикам	$320,6 \pm 5$
9		Для серийного двигателя II ступени по основным характеристикам	316 ± 5
10		Для модернизированного двигателя I ступени по результатам доводочных испытаний	$320,42^{+0,06}_{-1,68}$
11		Для модернизированного двигателя I ступени по основным характеристикам	$320,2 \pm 5$
12		Для серийного двигателя I ступени по основным характеристикам	314 ± 5

параметры и устойчивость рабочего процесса не отмечено, учитывая, что при обгорании сопел форсунок непредсказуемым образом меняется факел распыла горючего, для его устранения было предложено несколько вариантов мероприятий.

При экспериментальной проверке наиболее эффективной и простой мерой оказалось введение запайки зазоров между выступающими форсунками окислителя и горючего, в т.ч. с закладкой при больших зазорах пластин из бронзы.

Введение запайки зазоров резко сократило количество и интенсивность обгорания форсунок, а по мере отработки и стабилизации технологии запайки в ходе доводочных испытаний данный дефект был практически полностью устранен.

Второй особенностью состояния материальной части в процессе отработки явились деформация и эрозия огневой стенки в районе коллектора тракта охлаждения, расположенного непосредственно перед критическим сечением в сужающейся части сопла, и сварного шва в критическом сечении.

Т.к. изготовление большинства камер для доводочных испытаний производилось с ранее использовавшимися нижними частями, то первоначально причина дефектов огневой стенки связывалась с большой суммарной наработкой этих нижних частей при огневых испытаниях, которая достигала 1200 с.

Однако дополнительные исследования материальной части и проведенные расчеты показали, что проявление дефектов связано с резким торможением жидкости в коллекторе тракта охлаждения и снижением ее скорости у шва критического сечения при максимальных зазорах между зубом соединительного кольца стальной рубашки и сварным швом (рис. 5).

По результатам расчетных и конструкторских проработок было решено (см. рис. 6):

- исключить коллекторы тракта охлаждения в зоне втекания в критическое сечение;
- уменьшить зазор между выступом зуба кольца стальной рубашки и сварным швом критического сечения до величины $1,3 \div 1,7$ и в связи с этим изменить оребрение охлаждающего тракта в зоне втекания в критическое сечение таким образом, чтобы обеспечить некоторое повышение местной скорости охлаждающей жидкости.

Кроме того, были введены более жесткие требования к стыковке, выполнению и зачистке сварного шва критического сечения.

С учетом этих мероприятий было изготовлено 8 камер, которые прошли по 4 испытания в составе 2-х двигателей II ступени.

Суммарная наработка при этих испытаниях составила 680 с, из них 580 с на термостатированном до $+40 \div 45$ °С горючем. Продолжительность работы при соотношении компонентов в камерах 2,76 составила 60 с, а при соотношении 2,85 — 120 с, т.е. при этих испытаниях были реализованы более жесткие относительно эксплуатационных условия работы охлаждающего тракта.

При осмотре камер после испытаний замечаний по состоянию огневой стенки, кроме незначительных следов эрозии в зоне втекания, не было.

Двигатели I и II ступеней для проведения завершающих доводочных и межведомственных испытаний были собраны с камерами, изготовленными с указанными мероприятиями. Замечаний по состоянию огневой стенки камер после их проведения не было.

Таким образом, подтверждены достаточный запас по охлаждению и работоспособность камер, изготовленных с дополнительными мероприятиями по улучшению условий работы охлаждающего тракта.

Поскольку камера модернизированных двигателей РД-107, РД-108 унифицирована, то пределы диапазонов изменения указанных факторов, в которых проверена устойчивость рабочего процесса, приведены ниже по обобщенным результатам испытаний обоих типов двигателей.

Анализ результатов примерно 100 испытаний двигателей РД-107, РД-108, при которых было реализовано изменение давления в камерах от 47,1 кгс/см² абс., что составляет 84,7% от номинального давления для двигателей II ступени (55,5 кгс/см²), до 67,5 кгс/см² (110,3% от номинального давления для двигателя I ступени — 61,2 кгс/см²), в диапазоне изменения соотношения компонентов в камерах 2,08 ÷ 3,07 (2,08 ÷ 2,76) и изменения температуры горючего на входе в двигатель от -51,5 °С до +51,3 °С, показал, что рабочий процесс при всех испытаниях был устойчив и характеризуется невысокими средними уровнями виброускорений и пульсаций давления в диапазоне частот 400 ÷ 8000 Гц, которые почти на всех частотах значительно ниже уровней виброускорений и пульсаций в камерах серийных двигателей.

Проведенная стендовая отработка, межведомственные и летные испытания полностью подтвердили заданные техническим заданием удельные параметры и устойчивость рабочего процесса в камерах двигателей РД-107, РД-108 с новой смесительной головкой.

Выводы

- Разработана и внедрена в конструкцию двигателей РД-107, РД-108 новая смесительная головка с однокомпонентными форсунками, позволяющая повысить устойчивость рабочего процесса в камере и увеличить ее удельные характеристики.
- Заложенные технические решения полностью подтверждены результатами 131 испытания 23 двигателей РД-107, РД-108 с общей наработкой 8715 с.
- При всех испытаниях рабочий процесс в основных и рулевых камерах устойчив.
- Удельный импульс тяги по результатам испытаний составил для двигателя РД-107 — 320,45 кгс·с/кг, для двигателя РД-108 —

320,46 кгс·с/кг, что по сравнению с двигателем-прототипом обеспечивает прирост удельного импульса тяги 6,45 кгс·сек/кг для двигателя РД-107 и 4,46 кгс·с/кг для двигателя РД-108.

- Мероприятия по повышению теплостойкости внутренней стенки камеры и выступающих в огневое пространство форсунок обеспечили надежную работу камер и двигателя в целом на всех режимах работы.
- Успешно проведенный цикл наземных стендовых испытаний обеспечил внедрение модернизированных двигателей РД-107, РД-108 с новой смесительной головкой в штатную эксплуатацию в составе РН "Союз ФГ" в грузовом и пилотируемом вариантах.

Поступила в редакцию 20/X/2003;
в окончательном варианте — 20/X/2003.

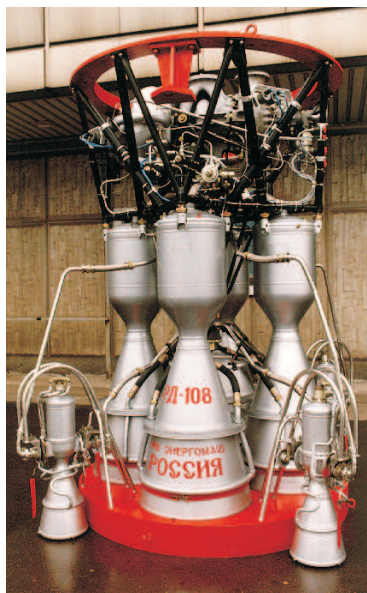


Рис.1. Двигатель РД-108

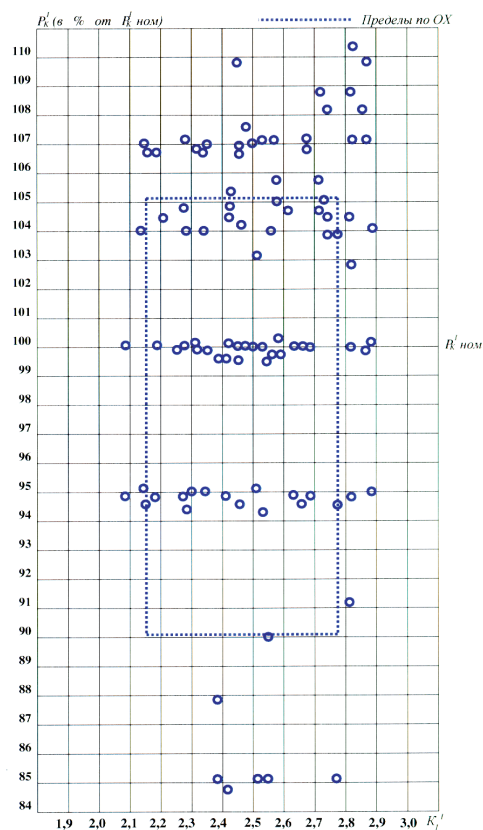


Рис. 3. Диапазон изменения давления в камере и соотношения компонентов топлива при испытаниях двигателя РД-107

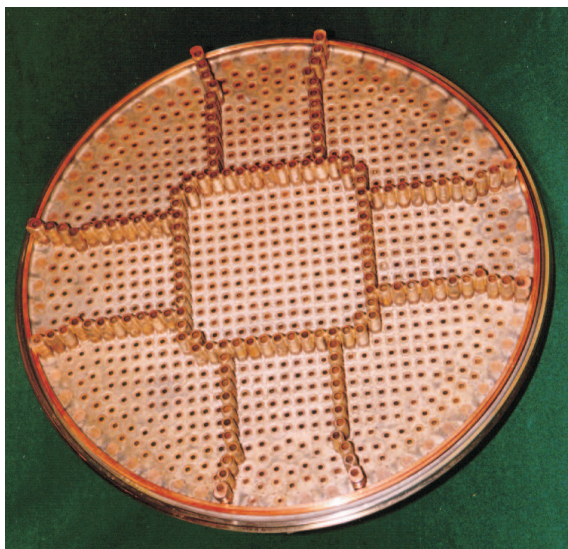


Рис. 2. Смесительная головка с однокомпонентными форсунками

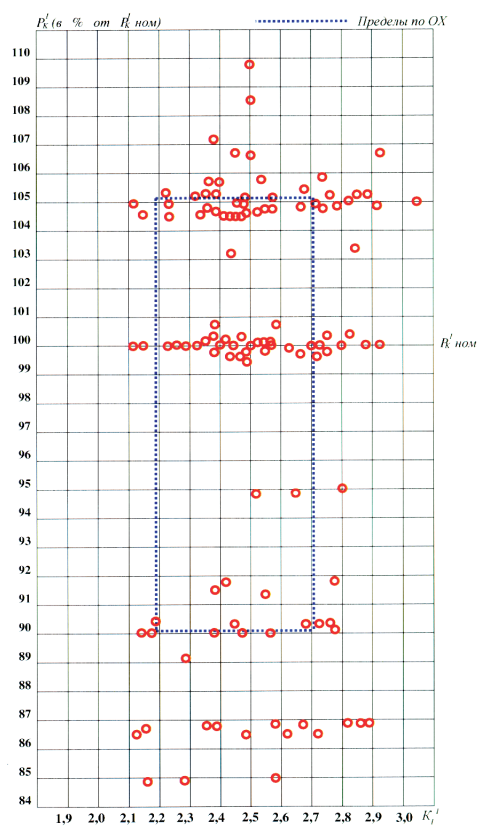


Рис. 4. Диапазон изменения давления в камере и соотношения компонентов топлива при испытаниях двигателя РД-108

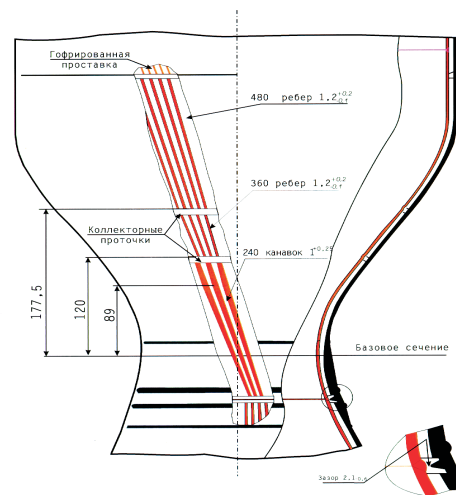


Рис. 5. Штатная схема охлаждения камеры

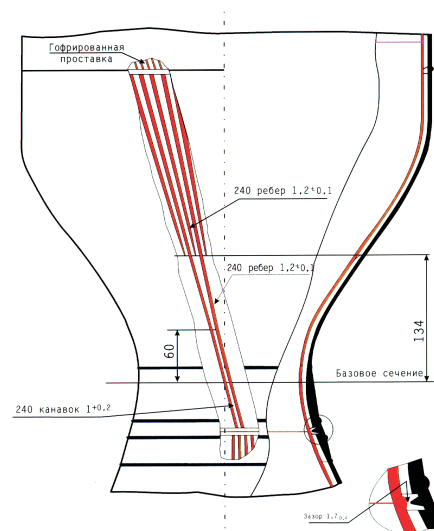


Рис. 6. Усовершенствованная схема охлаждения камеры

**PROCESS STABILITY INCREASE AND POWER
CHARACTERISTICS OF LIQUID JET ENGINE RD-107,
RD-108 BY A NEW INJECTOR HEAD**

© 2003 A.A. Ganin,⁴ S.D. Kamensky, B.I. Katorgin, I.Y. Fatuev,
V.K. Chvanov⁵

A new injector head based on a new mixing element proposed by Energomash's engineers provides an increase of the process stability in the jet engines RD-107, RD-108, comparing to a prototype engine. New technological improvements are tested on the jet engines. An increase of thermoresistance of camera inner walls and injectors ensures reliable work of engine in different modes of operation. These jet engines have been already exploited as the component in RN "Soyuz FG" in the both variants — load carrying and piloted.

Paper received 20/X/2003;

Paper accepted 20/X/2003.

⁴A.A. Ganin, OAO "Acad. V.P. Glushko NPO Energomash", Privolzhskii Regional Branch.

⁵S.D. Kamensky, B.I. Katorgin, I.Y. Fatuev, V.K. Chvanov, OAO "Acad. V.P. Glushko NPO Energomash".