

Б.И. КАТОРГИН, академик РАН,  
В.И. СЕМЁНОВ, д-р техн. наук,  
В.К. ЧВАНОВ, д-р техн. наук,  
Ф.Ю. ЧЕЛЬКИС, канд. техн. наук

## Двигатель РД171М

В НПО Энергомаш разработан и запущен в производство двигатель РД171М для первой ступени РН «Зенит», представляющий более совершенную модификацию двигателя РД171, использовавшегося ранее. В статье представлены основные конструктивные особенности двигателя РД171М.

### ВВЕДЕНИЕ

Кислородно-керосиновый двигатель РД171М представляет собой модификацию двигателя РД171, отличающуюся от базового варианта упрощенной схемой регулирования и рядом мероприятий, направленных на повышение запасов работоспособности. Двигатель РД171М сохранил внешний интерфейс двигателя РД171, имеет идентичную эксплуатационную документацию, одинаковые характеристики запуска, основного режима и останова.

Разработанная конструкция двигателя РД171М (рис. 1) позволяет применять его на первых ступенях ракеты-носителя (РН) «Зенит» для программ морского и наземного стартов без каких-либо изменений и доработок.

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ РД171М

Компоненты топлива: окислитель - жидкий кислород, горючее - керосин РГ-1 (допускается использование керосина Т-6 и американского керосина RP-1).

Режимы работы:

- предварительная ступень с тягой 200 - 350 тс;
- основной режим с участком плавного дросселирования;
- конечная ступень с тягой 396 тс.

Зажигание топлива при запуске - химическое, с использованием пускового горючего ПГ-2.

Двигатель на основном режиме развивает, как и прототип, самую большую в мире номинальную тягу: на земле - 740 тс; в пустоте - 806,4 тс.

Номинальное массовое соотношение компонентов топлива на всех режимах составляет 2,63.

Погрешность обеспечения системой регулирования двигателя на основном режиме номинальных значение при воздействии внешних факторов: по тяге -  $\pm 2,0\%$  по отношению расходов компонентов  $\pm 3,0\%$ ; с учетом погрешности измерений при стендовых испытаниях соответственно,  $\pm 2,5$  и  $\pm 4,2\%$ .

Номинальные массовые расходы компонентов топлива на основном режиме и конечной ступени, соответственно: окислителя - 1732,7 и 857,2 кг/с; горючего - 658,8 и 325,9 кг/с.

Номинальный удельный импульс: на основном режиме на земле - 309,5 кгс·с /кг; в пустоте - 337,2 кгс·с /кг; в конце участка плавного дросселирования - 335,9 кгс·с/кг на конечной ступени - 334,7 кгс·с/кг.

Номинальное давление в камерах: на основном режиме - 250 кгс/см<sup>2</sup>; на конечной ступени - 123,3 кгс/см<sup>2</sup> Номинальный импульс последействия - 200 тс·с.

Время работы двигателя на основном режиме (с участком плавного дросселирования до 20 с) составляет 135 с, на конечной ступени - 16 с.

Масса двигателя в состоянии поставки (без учета массы донного экрана, теплообменника, системы приводов автоматики, датчиков и кабельной сети телеизмерений): сухого - 9300  $\pm$  100 кг; залитого - 10300  $\pm$  100 кг.

### ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ

Основными системами двигателя являются:

- система подачи компонентов топлива;
- система зажигания топлива в газогенераторах и камерах;
- система запуска и останова двигателя;
- система регулирования и управления режимами работы;
- пневмосистема, обеспечивающая продувки и управление агрегатами автоматики;
- система прогрева гелия для наддува бака окислителя;
- элементы систем межпусковой обработки полостей

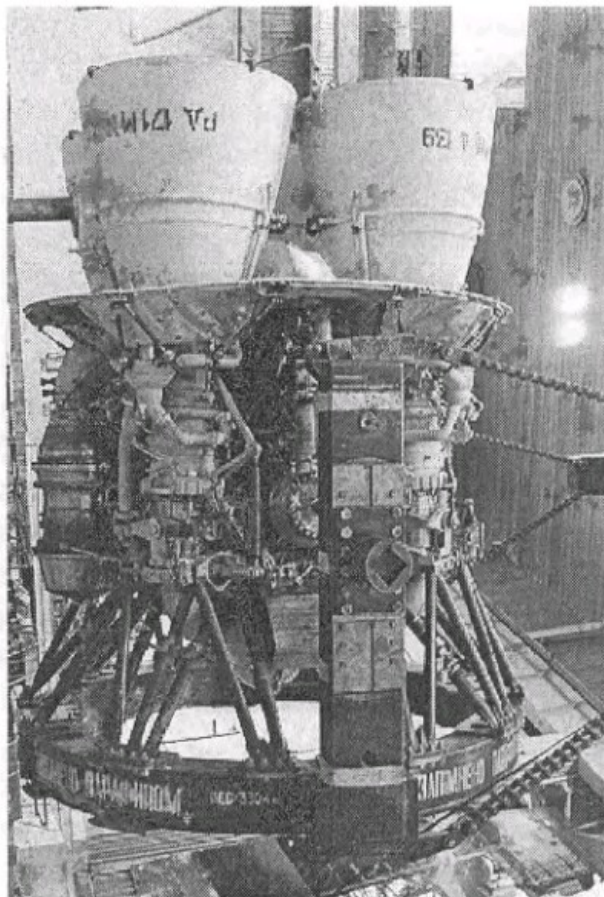


Рис. 1. Первый серийный двигатель РД171М

двигателя, управления вектором тяги.

Система подачи компонентов топлива включает в себя бустерные насосные агрегаты окислителя и горючего, основной турбонасосный агрегат и два газогенератора.

Система зажигания компонентов топлива - химическая, с использованием пускового горючего ПГ-2, которое содержится в ампулах одноразового использования.

В процессе работы двигателя топливные клапаны удерживаются в открытом положении давлением в магистралях, предотвращая тем самым несанкционированное выключение двигателя при негерметичности в пневмосистеме. В процессе останова, при уменьшении давления, клапаны автоматически закрываются.

Для обеспечения работы регулирующих органов используются два электрогидравлических привода, управляемых по семиразрядному цифровому коду, и блок гидравлического питания данных приводов.

Изменение режимов работы двигателя обеспечивается регулятором расхода и дросселем горючего, которые регулируют подачу горючего в газогенераторы и камеры. Управление двигателем производится от системы управления ракеты-носителя посредством подачи команд на электрогидравлические приводы.

Пневмосистема обеспечивает управление агрегатами автоматики двигателя, а также продувки заклпанных полостей горючего газогенераторов и камер. Она включает в себя баллоны с газообразным гелием, электропнеumo-

клапаны, обратные клапаны и магистрали.

Предпусковые продувки двигателя производятся от наземных систем через магистрали ракеты-носителя.

В состав двигателя входит теплообменник для подогрева гелия, подаваемого на наддув бака окислителя. Подогрев осуществляется генераторным газом, отбираемым за турбиной основного турбонасосного агрегата для привода бустерного насоса окислителя.

Двигатель содержит элементы системы управления вектором тяги, обеспечивающие крепление рулевых приводов, имеет элементы, обеспечивающие поворот камер, и обеспечивает питание горючим гидротурбины бортового источника мощности.

Для фиксации камер в процессе транспортирования и хранения двигателя в составе ракетной ступени в двигателе используются пневмоуправляемые фиксаторы.

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

### Исключение дросселей окислителя

В конструкции двигателя РД171 в магистралях, подводящих жидкий кислород от двух выходов насоса окислителя к газогенераторам, установлены два дросселя, управление которыми осуществляется цифровыми электрогидроприводами (рис. 2). При разработке конструкции двигателя считалось, что данные дроссели должны обеспечивать надежное управление запуском двигателя и устойчивость работы газогенераторов (ГГ) при работе на пониженных режимах.

В процессе эксплуатации двигателя, при контрольно-технологических испытаниях (КТИ) и летных испытаниях (ЛИ) отмечались случаи самопроизвольного перемещения вала привода при повышенном уровне вибраций газогенераторов при запуске и на стационарном режиме. Было установлено, что приводы дросселей обладают повышенной чувствительностью к вибрациям в диапазоне частот 850-1000 Гц, вызываемым пульсациями в ГГ (первая тангенциальная мода).

В процессе отработки экспериментальных образцов двигателя РД171М, в которых дроссели окислителя не использовались, было подтверждено, что запуск двигателя,

его работа на всех предусматриваемых режимах («вырезка» тяги, дросселирование, режим конечной ступени) характеризуются устойчивой работой всех агрегатов и систем. При этом обеспечивался заданный в ТЗ на двигатель закон изменения тяги при запуске и останове.

Результаты указанных работ послужили основанием для исключения из состава двигателя РД171М дросселей окислителя (с соответствующими приводами), что одновременно с повышением надежности двигателя позволило снизить его массу на ~ 65 кг.

### Исключение регулятора командных давлений

Необходимость регулирования двигателя РД171 по трем каналам (регулятор расхода горючего в газогенератор, дроссель горючего и дроссели окислителя), имеющим сложное взаимное влияние, потребовала введения в систему регулирования внутриводящих обратных гидравлических связей и обеспечивающего их функционирование регулятора командных давлений (РКЦ). Использование такой системы позволяло на момент разработки двигателя РД171 упростить алгоритм управления двигателем, снизить влияние внешних факторов на точность обеспечения режимов работы двигателя.

РКЦ управляется двумя цифровыми электрогидравлическими приводами, один из которых задавал необходимое значение давления в камере, второй - перепад давления на мерном устройстве, обеспечивающий требуемый расход горючего. Два следящих гидропривода, имеющие гидравлические сравнивающие устройства, управляя, соответственно, регулятором и дросселем, перемещая каждый до тех пор, пока фактические значения давления в камере и перепада давления на мерном устройстве не становились равными значениям, задаваемым РКЦ.

Следует отметить, что, несмотря на эффективное управление двигателем, система характеризуется сложностью задействованных агрегатов (РКЦ, следящие приводы со сравнивающими устройствами для управления регулятором и дросселем горючего), в связи с чем повышаются требования к обеспечению надежного функционирования всех входящих в систему элементов. В

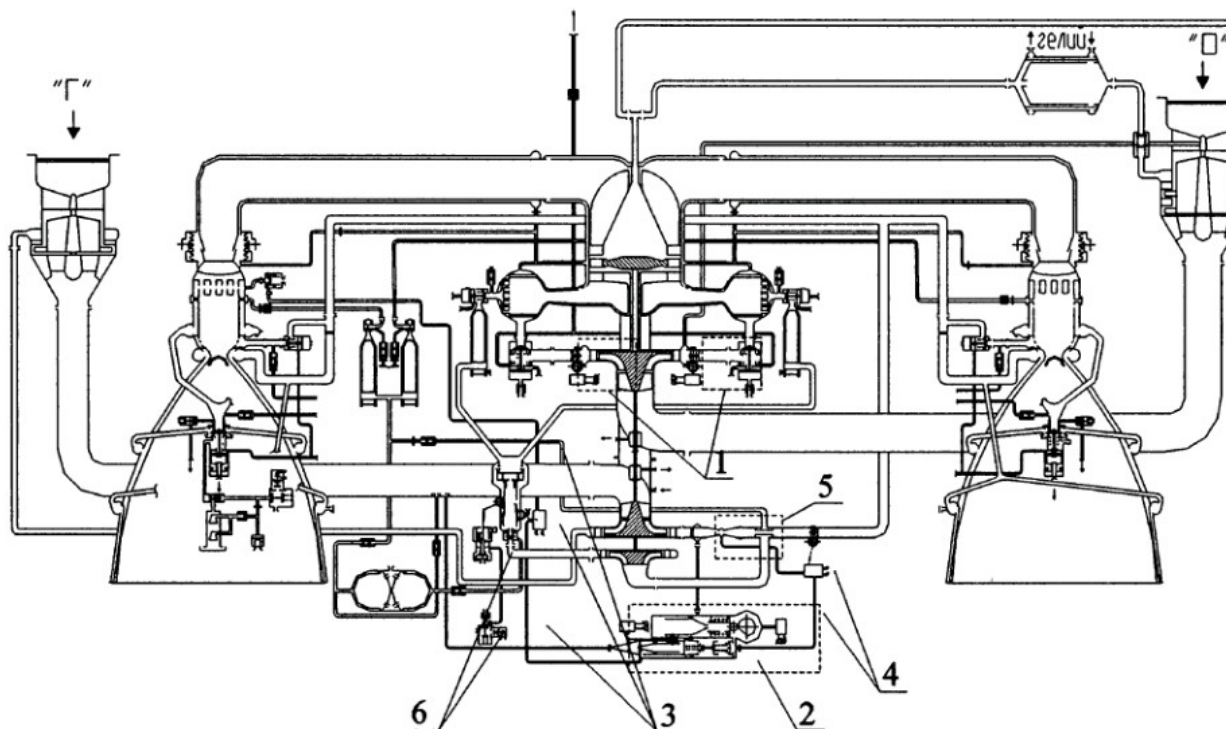


Рис. 2. Пневмогидросхема двигателя РД171. Агрегаты двигателя РД171, исключенные из конструкции двигателя РД171М:

1 - дроссель окислителя с приводами; 2 - регулятор командных давлений; 3 - следящий привод регулятора с трубопроводами; 4 - следящий привод дросселя с трубопроводами; 5- мерное устройство; 6- пневмопривод регулятора с электропневмоклапаном (ЭПК)

частности, повреждение любого из трубопроводов, идущих к сравниваемым устройствам следящих приводов, выводит двигатель из строя.

Отказ от использования дросселей окислителя, накопленный опыт настройки системы управления двигателя в процессе КТИ с использованием внешних обратных связей позволили перейти в процессе отработки экспериментальных образцов двигателя РД171М к существенно более простой системе управления, состоящей из двух цифровых приводов, управляющих непосредственно регулятором и дросселем. Отработка такой системы показала, что на всех рабочих режимах обеспечивается требуемая точность поддержания задаваемых величин тяги и соотношения компонентов.

Упрощение системы (исключаются два сложных следящих привода, РКД, трубопроводы), безусловно, увеличивает надежность двигателя и снижает его массу на ~ 85 кг.

Следует отметить, что подобная схема управления (без РКД и дросселей окислителя) была использована и подтвердила свою эффективность на двигателе РД180, имеющем многорежимный профиль тяги и такие же, как для РД171, требования по точности регулирования.

Введение рассматриваемой схемы управления в конструкцию двигателя РД171М приводит к необходимости корректировки алгоритма управления и к изменению программного обеспечения в системе управления ракеты-носителя. Следует отметить, что отработанный на двигателях РД171М и РД180 алгоритм является более простым, чем используемый в настоящее время.

#### МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ АГРЕГАТОВ ДВИГАТЕЛЯ

НПО Энергомаш после сдачи в эксплуатацию двигателя РД171 продолжало работы по усовершенствованию его модификации - двигателя многофазового использования РД170 и его модифицированного варианта, который в дальнейшем получил индекс РД171М. После завершения отработки двигателя РД171 были найдены и внедрены в конструкцию указанных двигателей конструкторские решения и технологические мероприятия, направленные на повышение ресурса их работы, улучшение эксплуатационных качеств.

Внедрение комплекса мероприятий позволило снизить скорость вращения турбонасосного агрегата (ТНА) с 13900 до 13500 об/мин и, соответственно, уменьшить динамические нагрузки на элементы двигателя. За счет более широкого использования никелевых сплавов (вместо стали) в напряженных трактах ТНА повышена стойкость системы подачи к возгораниям, существенно повышены запасы работоспособности крыльчатки насоса окислителя и рабочего колеса турбины в плане многоцикловых усталостных нагрузений.

#### Турбонасосный агрегат

С целью дальнейшего совершенствования в конструкцию ТНА двигателя РД171М внедрен ряд решений, направленных на:

- повышение запасов статической и динамической прочности конструкции для обеспечения возможности работы на форсированных режимах двигателя;
- упрощение конструкции и технологии изготовления в целях снижения трудоемкости и стоимости изготовления.

Представленные ниже изменения прошли проверку в составе экспериментальных двигателей РД171М и

подтвердили свою эффективность при многократных испытаниях двигателей.

#### Турбина

Были увеличены площади проходного сечения рабочего колеса турбины и соплового аппарата за счет изменения высоты лопаток (рис. 3) соплового аппарата с 58 до 63,5 мм и рабочего колеса с 33 до 69,5 мм. Указанное изменение направлено на обеспечение возможности форсирования двигателя за счет снижения силовых нагрузок на турбину (уменьшения перепада давления на турбине и частоты вращения ТНА).

Вместо «петлевого» уплотнения в радиальном зазоре

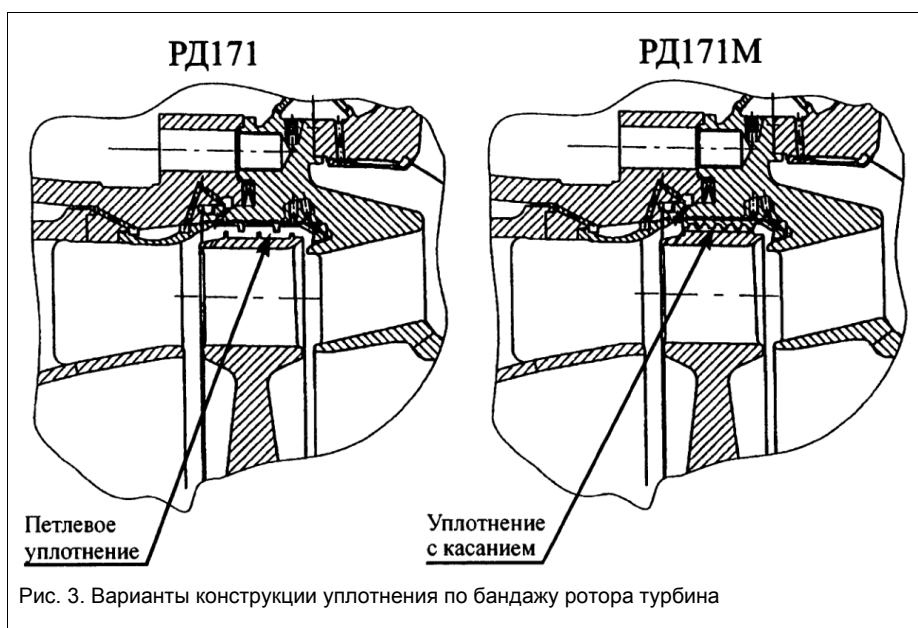


Рис. 3. Варианты конструкции уплотнения по бандажу ротора турбина

турбины, в котором обеспечивается отсутствие касания рабочим колесом корпуса, вводится уплотнение, допускающее такое касание при работе. В экспериментальных двигателях РД171М, проходивших испытания с этим уплотнением, отмечалось легкое касание бандаж рабочего колеса бронзовой стенки в статоре турбины, которое выглядело как засветление на бронзе и натир с металлическим блеском на бандаже. Каких-либо почернений, подплавлений и других негативных явлений не отмечалось.

Указанное изменение направлено на повышение к.п.д. турбины (за счёт снижения утечек над бандажом рабочего колеса).

Аналогичное уплотнение используется ТНА двигателя РД180, при этом фактическое притирание там заметно больше, чем в двигателе РД171М.

#### Насос окислителя

В направляющем аппарате каналы прямоугольного сечения заменяются каналами круглого сечения (рис. 4).

Это изменение позволяет:

- снизить амплитуду пульсаций давления на выходе из насоса на ~20%;
- повысить динамическую прочность направляющего аппарата за счет исключения протяженных, относительно тонких кромок;
- улучшить технологичность изготовления.

Аналогичный направляющий аппарат применен на обоих насосах двигателя РД180, где подтвердил свою эффективность.

Уплотнение на переднем бурте крыльчатки насоса выполнено притирающимся, это изменение увеличивает к.п.д. насоса на 0,02 ед., а напор насоса - на 150 м. Кроме того, на 5000 кгс увеличивается положительная составляющая осевой силы, что обеспечивает полную разгрузку радиально-упорного подшипника на всех режимах работы двигателя, включая режим конечной ступени.



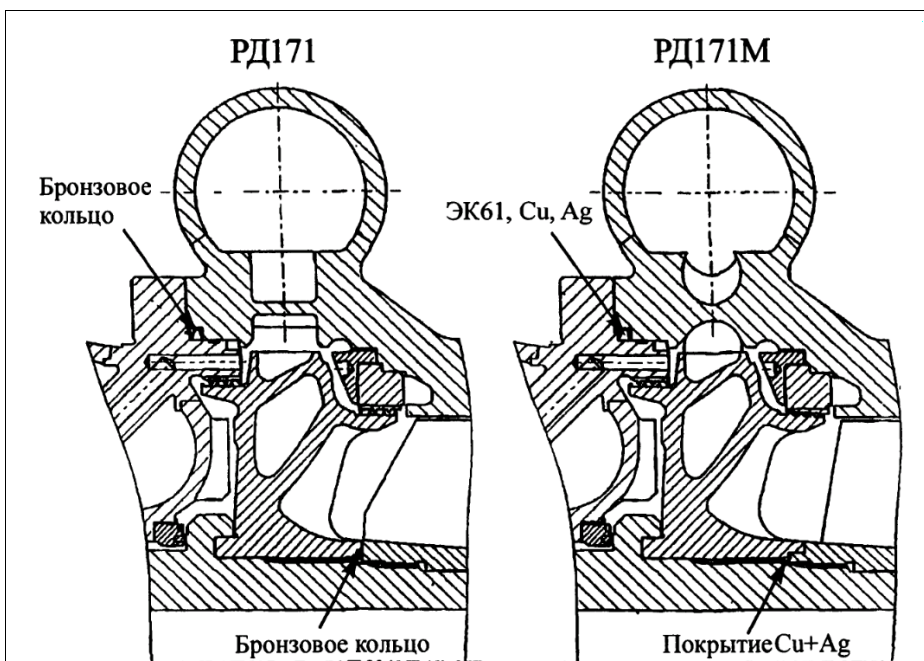


Рис.4. Варианты конструкции направляющего аппарата насоса окислителя

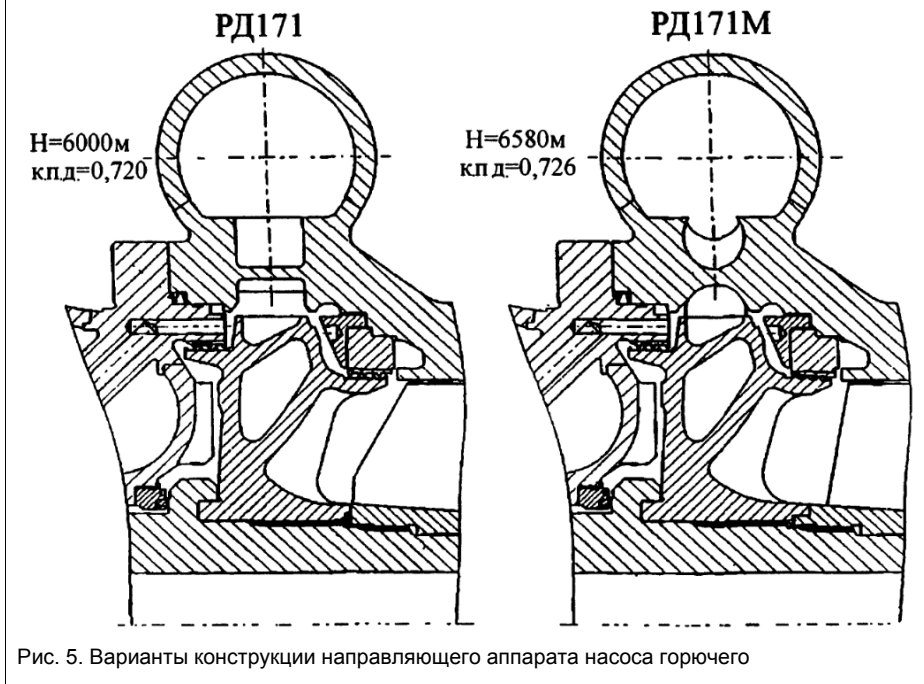


Рис. 5. Варианты конструкции направляющего аппарата насоса горючего

В двигателе РД180 на обоих буртах крыльчатки используются притирающиеся уплотнения аналогичной конструкции.

Увеличены углы установки лопаток шнека (угол на входе и угол на выходе) для обеспечения оптимального угла атаки на входе в шнек и напора шнека на форсированном режиме работы двигателя при сниженном уровне частоты вращения.

Кроме того, изменено место соединения крыльчатки и шнека при посадке на вал - выполнена беззазорная посадка шнека в крыльчатку, что уменьшает эксплуатационный дисбаланс, и вместо промежуточного кольца из бронзы нанесено толстослойное медно-серебряное покрытие на торец шнека.

В уплотнении стыка корпуса насоса со статором изменен материал: вместо бронзы БрБ2 используется никелевый сплав с медно-серебряным покрытием, что повышает стабильность обеспечения герметичности.

На двигателе РД180 используется аналогичное уплотнение в стыке статора с корпусом насоса окислителя.

(двенадцать) выполняются из листов нержавеющей стали Х18Н1 ОТ толщиной 0,35 мм.

Сплав ЭИ435 (основа - никель 78%) характеризуется высокой пластичностью ( $\delta = 40\%$ ); из него изготавливается внутренняя стенка охлаждаемых газодоводов двигателя РД171. Сплав имеет хорошие характеристики по свариваемости со сталями.

Работоспособность узла подтверждена автономными испытаниями на циклическую прочность. Программа указанных испытаний включала циклы качания в соответствии с табл. 2. При автономных испытаниях узла качания подтверждена его циклическая прочность при ресурсе, равном десяти эксплуатационным с четырехкратным запасом.

Использование модифицированного узла качания обеспечивает максимальную приемственность со штатной конструкцией (узлы полностью взаимозаменяемы), повышает надежность двигателя (снижает чувствительность по отношению к случайным загрязнениям в процессе производства).

### Насос горючего

В направляющем аппарате каналы прямоугольного сечения заменены на каналы круглого сечения (рис. 5), что позволило:

- существенно снизить амплитуду пульсаций давления на выходе из насоса;
- повысить динамическую прочность направляющего аппарата;
- улучшить технологичность изготовления.

Понижение частоты вращения ротора ТНА за счет изменений в насосе окислителя и в турбине потребовало увеличения диаметра крыльчатки в насосе горючего с 405 до 410 мм (для соответствующего повышения напора насоса).

### Эффективность мероприятий по снижению нагрузок в ТНА

Реализация в ТНА двигателя РД171М указанных выше мероприятий наряду с другими изменениями позволила снизить определяющие нагрузки на его элементы. В частности, на 6% уменьшены нагрузки от центробежных сил.

Уменьшение напряженно-деформированного состояния внутренних элементов конструкции ТНА для режима 100% по тяге обеспечивает потенциальную возможность форсирования двигателя.

В табл. 1 приведена наработка экспериментальных двигателей РД171М на форсированных режимах огневых испытаний (ОИ).

В конструкцию двигателя РД171М внедрен 10-слойный сальфон узла качания камеры. Девять слоев изготовлены из нержавеющей стали Х18Н10Т толщиной 0,35 мм, один слой (внутренний) выполнен из никелевого сплава ЭИ435 толщиной 1мм (рис.6). В существующей конструкции двигателя РД171 все слои сальфона узла качания

Таблица 1

Наработка экспериментальных двигателей на форсированных режимах ОИ

№ двигателя	№ ОИ	% форсирования	$\tau_c, c$	$\tau_{\Sigma c}, c$
B019	755	5,0	7,0	371,0
	757	6,3	91,0	
	842	6,5	91,0	
	844	6,3	91,0	
	849	5,6	91,0	
B020	806	3,9	65,0	410,0
	808	4,9	65,0	
	810	4,7	65,0	
	811	4,9	65,0	
	815	5,4	75,0	
	816	5,1	75,0	
B023	838	6,1	84,0	-
B024	889	5,1	91,0	-
B027	899	6,5	14,0	119,0
	901	6,5	14,0	
	904	6,7	91,0	

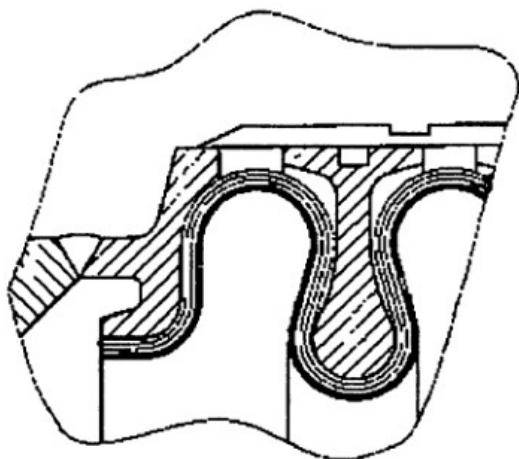


Рис. 6. Фрагмент конструкции узла качания камеры

Таблица 2

Результаты испытаний узла качания на циклическую прочность

Условия испытания	Частота, Гц	Амплитуда, град.	Число циклов качания
Без давления во внутренней полости	0,5	$\pm 1^{\circ}24'$	24
	0,35	$\pm 8^{\circ}12'$	166
	1,2	$\pm 0^{\circ}42'$	60
	0,3	$\pm 1^{\circ}42''$	60
	5,0	$\pm 0^{\circ}48'$	120
Давление во внутренней полости $p=295 \text{ кгс/см}^2$	0,3	$\pm 1^{\circ}42'$	14
	0,3	$\pm 8^{\circ}12'$	20
	5,0	$\pm 0^{\circ}45'$	70
	1,5	$\pm 2^{\circ}00'$	270
	15,0	$\pm 0^{\circ}15'$	150

## Система запуска и останова

### Исключение пневмопривода регулятора тяги

В двигателе РД171 для обеспечения переключения регулятора тяги в процессе запуска и останова применен пневмопривод (см. рис. 2), управляемый двумя электропневмоклапанами (ЭПК). Применение в двигателе РД171 специального пневмопривода обусловлено необходимостью обеспечения высоких скоростей переключения регулятора тяги в процессе запуска и останова, которые не могут быть обеспечены следящим приводом, управляющим регулятором в процессе полета РН.

Принятая для двигателя РД171М замена на регуляторе тяги следящего привода на цифровой позволило исключить из состава двигателя пневмопривод и управляющие им ЭПК.

Установленный на регуляторе тяги цифровой привод за счёт выдачи на него «жесткой» последовательности дискретных команд (указаны в «Алгоритме регулирования») обеспечивает требуемый закон изменения тяги двигателя, который полностью соответствует закону, принятому для РД171. При этом обеспечиваются все характеристики запуска, определенные в ТЗ на двигатель.

Следует отметить, что отказ от пневмопривода потребовал доработки формы окон дроссельной части регулятора тяги. Доработка окон связана с необходимостью обеспечения требуемого диапазона по расходу через регулятор, часть из которого (диапазона) в двигателе РД171 обеспечивалась пневмоприводом.

В остальном конструкция регулятора тяги осталась без изменений, что обеспечивает преемственность результатов его отработки в составе двигателя РД171.

Останов двигателя РД171М производится посредством выдачи команды на цифровой привод регулятора тяги, обеспечивающий его полное закрытие с максимальной скоростью. При этом за счёт того, что максимальная скорость цифрового привода меньше, чем у пневмопривода, несколько увеличился импульс последствия тяги при останове. Вместо указанного в настоящее время для двигателя РД171 значения импульса последствия  $200 \pm 80$  т·с предлагается для двигателя РД171М установить значение  $250 \pm 50$  т·с.

Исключение из состава двигателя РД171М пневмопривода и управляющих им ЭПК безусловно способствует повышению надежности двигателя.

### Контроль хода запуска

Применение цифровых приводов для управления регулятором тяги и дросселем требует изменения порядка контроля подготовки РН к пуску и хода запуска двигателя РД171М. Вместо принятого для РД171 контроля исходного положения следящих приводов, осуществляемого до команды «Пуск» РН, вводится контроль функционирования цифровых приводов (на том же этапе подготовки РН). Контроль заключается в переключении указанных приводов последовательно из одного крайнего положения в другое с фиксацией выполнения команд по контактам (ламелям) исходного и конечного положений.

В процессе запуска двигателя контроль функционирования привода регулятора тяги осуществляется с помощью сигнализаторов давления в камерах, замыкание которых к моменту времени 3,0 с от команды на запуск подтверждает факт переключения привода (регулятора тяги).

Контроль функционирования привода дросселя горючего осуществляется по его ламели исходного положения, которая должна разомкнуться (свидетельствует о начале переключения привода) к моменту 3,1 с от момента команды на запуск двигателя.

Таким образом, переход на использование цифровых приводов позволяет в полном объеме контролировать функционирование системы регулирования двигателя РД171М в ходе его запуска.

## Газогенератор

В двигателе РД171 используются газогенераторы, в которых установка смесительных головок (СГ) осуществляется через мощное фланцевое соединение. Подобное конструктивное решение позволяет по результатам КТИ проводить замену СГ в случае превышения установленных значений динамических параметров (пульсаций, вибраций). Необходимость такой замены

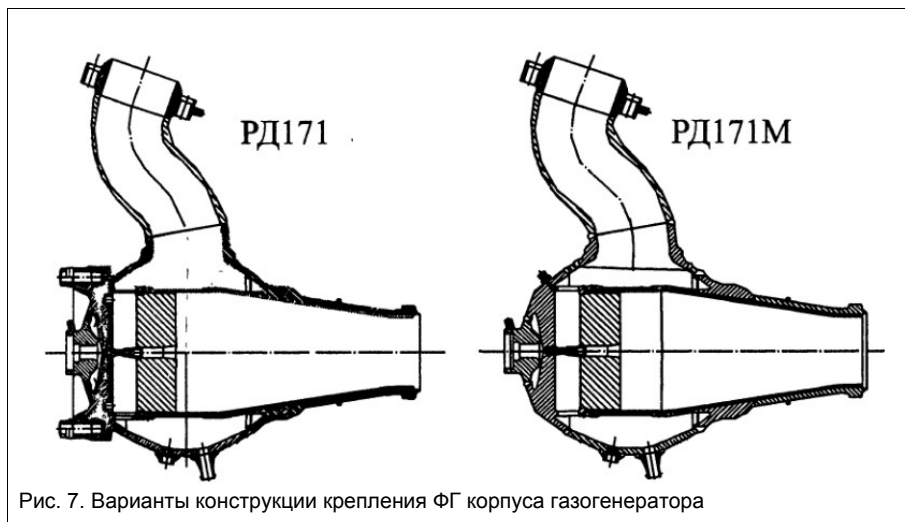


Рис. 7. Варианты конструкции крепления ФГ корпуса газогенератора

обусловлена ограничениями по уровню виброперегрузок, допускаемых для приводов дросселей окислителя.

Для двигателя РД171М, где дроссели окислителя отсутствуют, с учетом возможности некоторого увеличения предельно допустимых значений пульсаций давления в полостях ГГ (до ~ 1 % от уровня давления) реализовано решение, по которому СГ приваривается к корпусу ГГ (рис. 7).

Следует также отметить, что ГГ аналогичной конструкции (и размерности) используются в составе двигателя РД180, где прошли большой объем отработки, обеспечивая устойчивую работу в широком диапазоне режимов по тяге (105 - 47%).

Применение цельно сварной конструкции газогенератора позволяет получить ряд преимуществ:

- существенно (на ~ 70 кг) уменьшается масса каждого газогенератора;
- упрощается конструкция ГГ, а трудоемкость его изготовления, по сравнению с разъемным, снижается на ~16%;
- повышается надежность конструкции ГГ.

Следует отметить, что газогенераторы разъемной конструкции не изготавливались с 1994 г., в то время как сварные ГГ с указанного момента времени изготавливались практически без перерыва в объеме 3-5 агрегатов в год. Все изготовленные сварные ГГ прошли периодические испытания с положительными результатами.

Данное обстоятельство позволяет при начале производства двигателей РД171М со сварными газогенераторами не проводить их установочные испытания.

Сравнительный анализ работоспособности газогенераторов разъемной и сварной конструкций показывает, что динамические параметры обоих ГГ практически не отличаются по амплитудам характерных частот.

Таким образом, применение в двигателе РД171М сварного газогенератора повышает надежность двигателя и позволяет сократить затраты на изготовление газогенератора (в том числе за счет исключения его установочных испытаний).

## Блок автоматики

### Новая конструкция электропневмоклапанов

В пневмосистеме двигателя РД171 применено дублирование ЭПК, отказ которых в процессе запуска может приводить к разрушению двигателя. Дублирование осуществляется с помощью специального пневмоклапана, обеспечивающего отсечку отказавшего ЭПК.

В двигателе РД171М вместо прямого дублирования ЭПК применен специально разработанный ЭПК, в котором дублируется только электромагнитный клапан, входящий в его состав. Такой подход обусловлен тем, что именно электромагнитный клапан (в составе ЭПК) наиболее часто приводит к возможным отказам, связанным с «заеданием» или с нарушением электрической цепи. При этом следует отметить, что усилие, приложенное к электромагнитному клапану при срабатывании ЭПК, на порядок ниже, чем усилие, перемещающее пневматическую часть ЭПК, где «заедание» практически невозможно.

Применение новой конструкции ЭПК позволило существенно уменьшить габариты пневмосистемы.

### Гелиевые баллоны

Результаты отработки двигателя РД171 выявили возможность снижения запаса гелия, размещенного в восьми 20-литровых баллонах пневмосистемы.

В целях оптимизации компоновки на двигателе РД171М применены два баллона для хранения гелия объемом 70 л каждый. Баллоны разработаны и изготовлены РКК «Энергия» (для других задач), их работоспособность в составе двигателя подтверждена в процессе огневых испытаний экспериментальных экземпляров РД171М.

### Компоновка пневмоблока

На двигателе РД171 агрегаты пневмосистемы разбиты на три блока, два из которых (блоки автоматики) монтировались на пусковых ампулах, а блок гелиевых баллонов - на раме двигателя.

Сокращение количества ЭПК (за счет отказа от их полного дублирования), применение двух гелиевых баллонов вместо восьми позволили всю пневмосистему двигателя РД171М (включая гелиевые баллоны) скомпоновать в виде единого блока (пневмоблок), который монтируется на раме двигателя. Такое решение сократило количество деталей пневмоблока (трубопроводы, арматура), а также позволило дополнительно защитить его элементы от воздействия окружающей среды специальным кожухом.

Работоспособность пневмоблока подтверждена при огневых испытаниях экспериментальных экземпляров двигателя РД171М.

В целом применение пневмоблока новой конструкции повышает надежность двигателя РД171М, улучшает его эксплуатационные свойства.

### Соединение привода с дросселем горючего

Учитывая ограничения по допустимому уровню виброперегрузок на цифровой привод, выявленные в процессе эксплуатации двигателя РД171 (отмечались сбои в работе приводов дросселя окислителя в процессе запуска двигателя), соединение привода с дросселем горючего двигателя РД171М будет осуществляться через специальное демпфирующее устройство (далее просто «демпфер»). Такое решение признано оправданным несмотря на то, что уровень виброперегрузок, фиксируемый на дросселе горючего, существенно ниже, чем на приводах дросселей окислителя РД171.

Демпфирование осуществляется за счет податливых элементов (рессор), через которые производится крепление фланца привода к фланцу дросселя (рис.8).

Эффективность такого решения подтверждена огневым испытанием двигателя № В028, где отмечено снижение виброперегрузок на приводе дросселя горючего примерно в два раза.

Следует отметить, что демпфер аналогичной конструкции используется для соединения привода с дросселем горючего



на двигателе РД180.

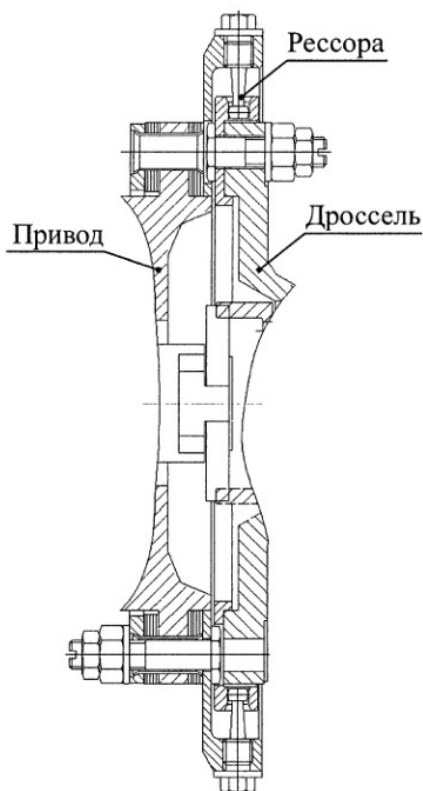


Рис. 8. Фрагмент конструкции соединения привода с дросселем горючего

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ДВИГАТЕЛЯ К ПОСТАВКЕ ПОСЛЕ КТИ

В настоящее время для подготовки двигателя РД171 к поставке после КТИ производится демонтаж его камер. Это обусловлено необходимостью качественной очистки внешних поверхностей двигателя от сажи, оседающей на них в процессе огневого испытания. Следует отметить, что известные способы очистки элементов двигателя от сажи достаточно трудоемки, и произвести качественную очистку без демонтажа камер не представляется возможным.



Рис. 9. Двигатель с сажезащитными чехлами на стенде

Вместе с тем демонтаж камер повышает риск попадания во внутренние полости двигателя случайных загрязнений при возможных нарушениях технологии работ. В связи с этим для двигателя РД171М принята технология подготовки к поставке без демонтажа камер. При этом защита внешних поверхностей двигателя от сажи обеспечивается за счет установки на его элементы защитных технологических чехлов (рис. 9). Последующая обработка внутренних полостей

двигателя от остатков компонентов топлива (термовакuumная сушка и т.д.) без демонтажа камер производится по ранее разработанной технологии.

Опробование указанного способа защиты двигателя было осуществлено при проведении КТИ двигателя РД171 № А136 и испытаний двигателя № В028/2, после которых следы сажи на поверхностях двигателя отсутствовали.

Защита поверхностей двигателя от сажи с помощью технологических чехлов и последующая обработка внутренних полостей без демонтажа камер используется на двигателе РД180, где она подтвердила свою высокую эффективность.

### СЕРТИФИКАЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ

В 2004 г. НПО Энергомаш начало товарные поставки двигателей РД171М. В этой связи проведены сертификационные испытания двигателя по согласованной с Заказчиком программе. В соответствии с этой программой двигатель прошел семь полноресурсных испытаний, из которых первое - по циклограмме приемосдаточного (КТИ) испытания, в процессе которого проводится автоматическая настройка двигателя на штатные режимы полета и определяются формулярные данные для полетного алгоритма регулирования двигателя, а последующие шесть испытаний - по типовым полетным циклограммам изменения тяги и соотношения расходов компонентов с управлением по полетному алгоритму.

На рис. 10 представлены профили изменения тяги при КТИ, в процессе полета РН и при сертификационных испытаниях.

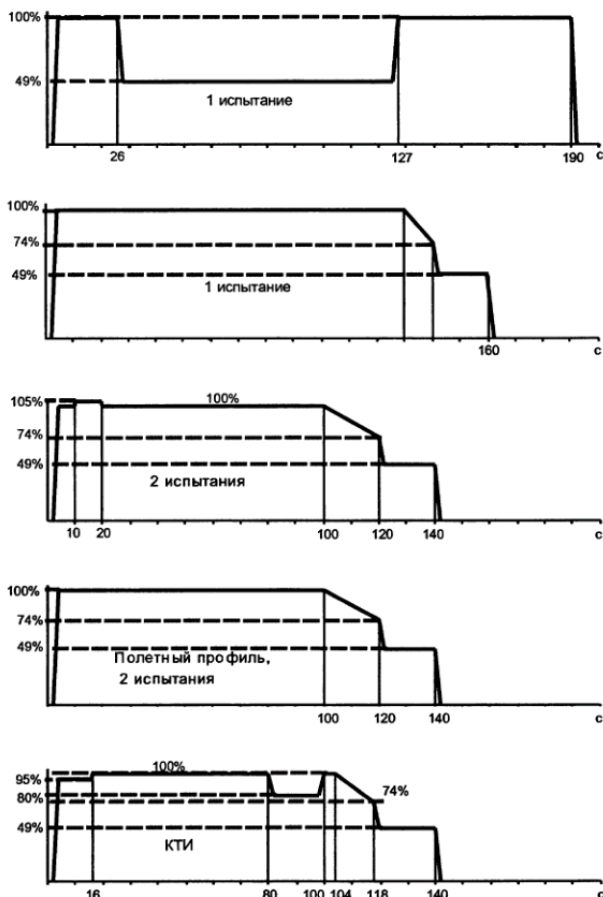


Рис. 10. Профили тяги при сертификационных испытаниях

Двигатель РД171М № А138 успешно прошёл указанные сертификационные испытания, в процессе которых было продемонстрировано нормальное функционирование двигателя на указанных режимах при различных (в соответствии с ТЗ) значениях соотношения компонентов топлива, температур и давлений компонентов на входе в

двигатель.

### ПЕРВЫЙ ТОВАРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ РД171М №А139

В соответствии с согласованным решением первый товарный двигатель был изготовлен и поставлен заказчику с опережением.

Двигатель прошел КТИ без замечаний, далее были выполнены послепусковая обработка и комплекс заключительных проверок. Двигатель был принят представителями заказчика и поставлен на предприятие-изготовитель РН.

В табл. 3 представлены полученные при КТИ основные параметры этого двигателя.

Таблица 3

Параметры двигателя РД171М № А139 после КТИ

Основные параметры двигателя	Режим главной ступени	Режим конечной ступени
Давление в камере, кгс/см <sup>2</sup>	251	123
Давление горючего перед форсунками камеры, кгс/см <sup>2</sup>	265	127
Давление окислителя перед газогенератором, кгс/см <sup>2</sup>	534	208
Давление горючего на выходе насоса горючего второй ступени, кгс/см <sup>2</sup>	716	266
Температура генераторного газа за турбиной, °С	360	131
Частота вращения ТНА, об/мин	13100	7800
Удельный импульс, кгс·с/кг	337	332

Параметры с учётом погрешности измерений соответствуют ожидаемым значениям, вытекающим из результатов предшествующих испытаний агрегатов данного двигателя.

В.Г. Полушина, В.И. Семёнова, А.А. Тюрин, К.П. Хапланова, И.И. Хренова, Ф.Ю. Челькиса.

### ВЫВОДЫ

1. В НПО Энергомаш разработан и начато серийное изготовление двигателя РД171М, в конструкцию которого внесены ряд изменений по сравнению с двигателем РД171, направленных на повышение надежности, обеспечение запасов по форсированию, улучшение эксплуатационных свойств. Все внесенные изменения прошли проверку на экспериментальных двигателях и двигателях РД180 и подтвердили свою эффективность.

2. Разработанная конструкция двигателя РД171М позволяет использовать его на первой ступени ракеты космического назначения «Зенит» вместо двигателя РД171, изготовление которого прекращено.

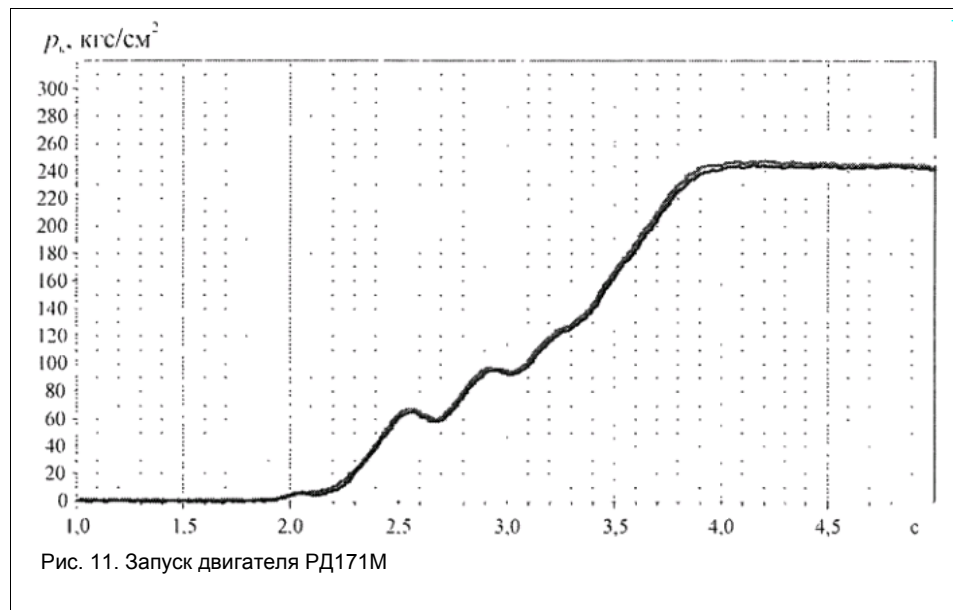


Рис. 11. Запуск двигателя РД171М

Особое внимание было уделено выбору исходных параметров для новых агрегатов управления двигателя РД171М (регулятора, дросселя, цифровых приводов) в первую очередь в плане обеспечения запуска, идентичного запуску двигателя РД171. На рис. 11 показано изменение давления в камерах двигателя РД171М (жирная линия) в процессе запуска на фоне имеющейся статистики аналогичных изменений для двигателя РД171. Видно, что получено хорошее соответствие параметров.

Более низкий уровень тяги при выходе на стационарный режим объясняется тем, что при КТИ двигателя РД171М этот режим соответствует уровню тяги 95% от тяги на режиме главной ступени тяги.

Разработка указанных выше мероприятий по совершенствованию конструкции двигателя проведена под руководством и при активном участии В.Ю. Богушева, Э.П. Гавриленко, Б.М. Громыко, Ю.Ю. Иванова, Ю.И. Каналина, А.М. Кашкарова, В.Н. Кухарева, А.В. Малинина, В.С. Мухина,