

# КОНСТРУИРОВАНИЕ ЖРД И ИХ АГРЕГАТОВ

УДК 621.45

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ РД171М ПРИ ЕГО СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

*Академик РАН Б.И. Каторгин, докт. техн. наук В.К. Чванов,  
Вяч.М. Евграфов, докт. техн. наук В.И. Семенов,  
кандидаты техн. наук И.Ю. Фатуев, Ф.Ю. Челькис*

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования характеристик РД171М, полученных в процессе его сертификационных испытаний.

### Введение

В НПО Энергомаш начаты изготовление и товарные поставки двигателей РД171М [1] для эксплуатации в составе РН "Зенит".

Двигатель РД171М является модернизированным вариантом ранее изготавливавшегося двигателя РД171, имеет самую большую в мире тягу для жидкостных ракетных двигателей (на номинальном режиме – 740 тс на земле, 806,4 тс в пустоте). В двигателе РД171М реализованы более совершенные схемные и конструкторские разработки ряда основных агрегатов и систем и двигателя в целом на основе проведенных научно-технических разработок, опирающихся на накопленный опыт обеспечения требуемых ресурсов и режимов работоспособности ЖРД [1].

Для подтверждения основных характеристик данных двигателей требованиям технического задания (ТЗ) в НПО Энергомаш проведены сертификационные испытания двигателя РД171М № А138. Программой данных испытаний [1] преду-

смаatrивалось проведение семи испытаний двигателя, из которых первое проводилось по программе прямо-сдаточного испытания (программа КТИ), а все остальные – в соответствии с требованиями упомянутой программы, разработанной и утвержденной НПО Энергомаш и ГKB "Южное".

Было также проведено и дополнительное сверхплановое – восьмое испытание.

## 1. Краткая характеристика проведенных испытаний

Общий вид двигателя РД171М № А138 на стенде для проведения испытаний представлен на рис. 1.

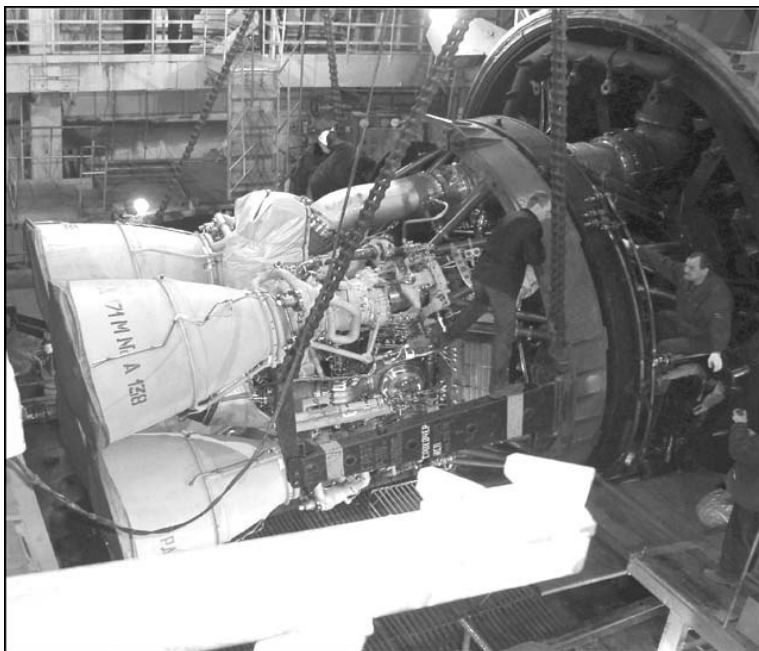


Рис. 1. Двигатель РД171М на стенде

На рис. 2 представлены профили изменения тяги  $R$  (кривая 1) и соотношения расходов компонентов топлива  $K_m$  (кривая 2), реализованные на первом испытании двигателя.

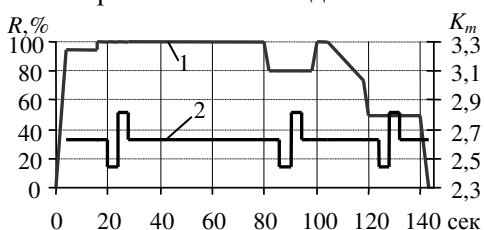


Рис. 2. Изменение тяги и  $K_m$  на первом испытании РД171М

Характер изменений параметров, зафиксированных в процессе испытания, свидетельствовал о соответствии выходных параметров и основных характеристик двигателя требованиям конструкторской документации (КД). По результатам испытания были определены индивидуальные коэффициенты настройки двигателя, позволяющие последующие испытания проводить по полетному алгоритму управления двигателем [2].

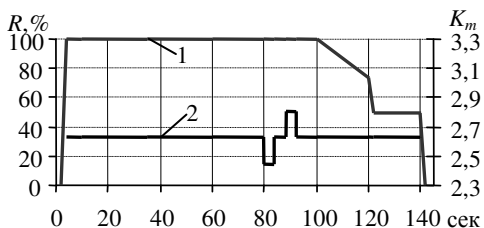


Рис. 3. Изменение тяги и  $K_m$  на втором испытании

На рис. 3 представлены профили изменения тяги и соотношения расходов компонентов топлива в соответствии с программой сертификации на втором испытании. Параметры и точность управления режимами соответствовали требованиям КД.

Третье испытание должно было проводиться при переменной температуре горючего (линия 2) на входе в двигатель с профилем изменения тяги (линия 1), представленном на рис. 4.

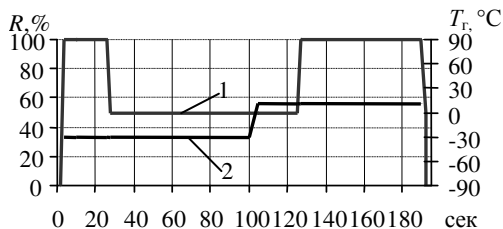


Рис. 4. Изменение тяги и температуры горячего на входе в двигатель

Программой предусматривалось первые 100 сек работать на горячем с температурой минус 30°С с последующим переходом на горячее с температурой плюс 10...15°С. Один из пяти расходных баков стенда захлаживался до требуемой температуры, двигатель заполнялся охлажденным горючим, далее должны были проводиться запуск и работа двигателя от этого бака в течение указанного времени с последующим подключением к работе остальных четырех баков.

Испытание завершилось преждевременным (на 100 сек) остановом двигателя по команде системы аварийной защиты стенда из-за опорожнения захлаженного бака ниже требуемого контрольного уровня. Останов реализован по штатной циклограмме.

Как было установлено, преждевременная выработка бака была обусловлена уменьшением объема заполнения из-за повышенного выброса горючего при барботировании его жидким азотом при охлаждении и работой двигателя на пониженном соотношении компонентов.

Основная цель испытания, заключающаяся в подтверждении работоспособности двигателя на переохлажденном горючем, была выполнена.

По результатам обсуждения материалов испытания были приняты решения:

- допустить двигатель № А138 к очередному испытанию;
- для восполнения ресурсной наработки, не реализованной на испытании №3, при проведении последующих испытаний

(№№ 4, 6, 7) увеличить продолжительность работы двигателя на режиме 100% тяги на 17 сек, на каждом.

На рис. 5 представлены реализованные профили изменения тяги и соотношения расходов компонентов топлива на четвёртом испытании (2 – линия  $K_m$ ).

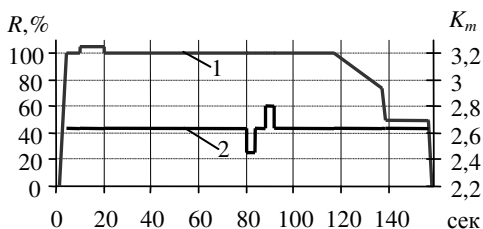


Рис. 5. Изменение  $R$  и  $K_m$  на четвёртом испытании

С 10 по 20 сек двигатель работал на режиме тяги 105%. Испытание прошло без замечаний.

На рис. 6 представлены аналогичные профили пятого испытания, отличавшегося от предшествующих большей продолжительностью (160 с). Испытание прошло без замечаний.

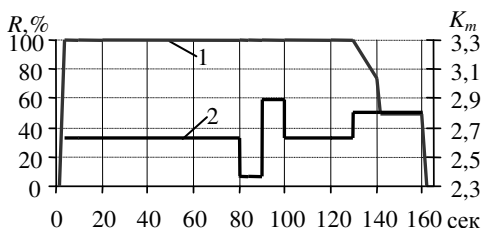


Рис. 6. Результаты пятого испытания

Учитывая запланированный демонтаж двигателя со стенда на период проведения КТИ товарного двигателя РД171М № А140, было предложено провести на двигателе обработку внутренних полостей демонтированного двигателя по штатной технологии обработки товарных двигателей. Такая обработка была проведена, и после завершения испытаний двигатель № А138 был установлен на стенд вновь.

На рис. 7 представлены профили изменения тяги и соотношения расходов компонентов при шестом испытании. Здесь также с 10 по 20 сек двигатель работал на режиме 105%. Испытание прошло без замечаний.

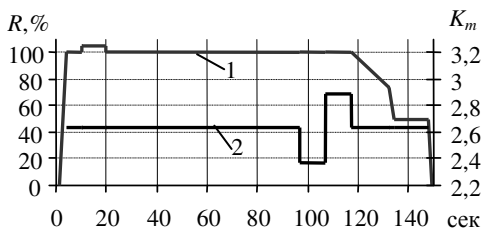


Рис. 7. Профили изменения тяги и  $K_m$ : 1 – тяга; 2 –  $K_m$

На рис. 8 представлены профили изменения тяги и соотношения расходов компонентов при завершающем, седьмом испытании. Испытание прошло без замечаний.

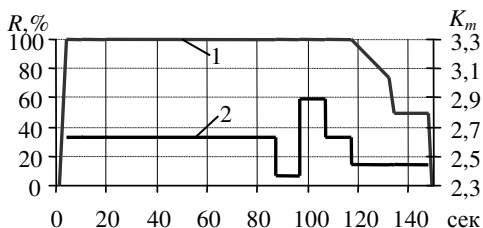


Рис. 8. Профили изменения тяги и  $K_m$ : 1 – тяга; 2 –  $K_m$

Вид двигателя после завершения сертификационных испытаний представлен на рис. 9.

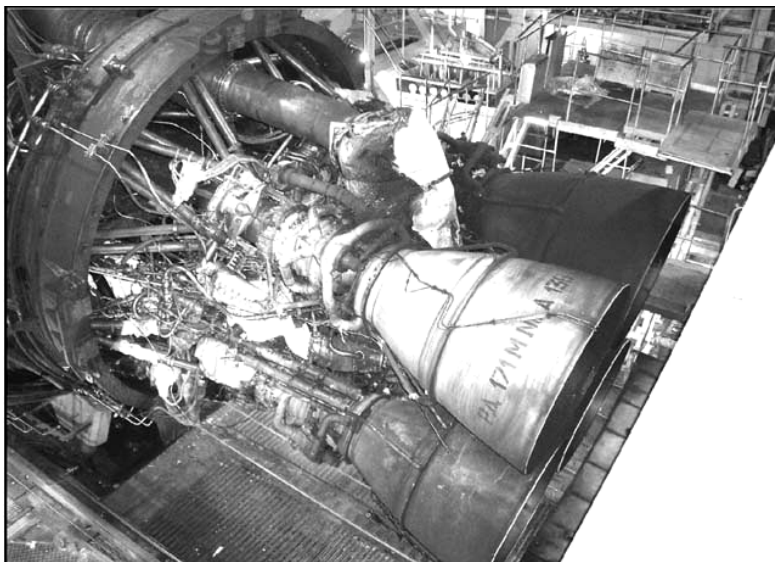


Рис. 9

После завершения сертификационных испытаний было рассмотрено предложение ГKB "Южное" и ПО ЮМЗ о проведении восьмого дополнительного испытания двигателя № А138 на режиме 105% тяги в течение 110 сек в целях демонстрации запасов работоспособности двигателя по тяге за пределами гарантированного ресурса, подтвержденного в процессе сертификации. В результате рассмотрения было отмечено следующее:

- двигатель РД171М № А138 прошел семь предусмотренных программой сертификации огневых стендовых испытаний. Замечаний по проведению, величинам зарегистрированных параметров и техническому состоянию материальной части нет;

- значения всех параметров, в том числе на режиме 105% тяги, полностью соответствуют расчётным значениям и требованиям конструкторской документации;

- испытания сертификационного двигателя № А138 и товарных двигателей №№ А139, А140, А141 подтвердили высо-

кую стабильность параметров при запуске на основном режиме и при останове;

– проведенная в 1988 году сертификация двигателя РД170, аналогичного двигателю РД171М, подтвердила работоспособность его конструкции в течение 17 ресурсов при 25 запусках, в том числе на режимах до 105% по тяге;

– проведенные совместно с ИПРОМАШПРОМ'ом дополнительные работы подтвердили возможность проведения огневого испытания на повышенных (до 105%) режимах по тяге на стенде НПО Энергомаш.

С учётом изложенного двигатель № А138 был допущен к проведению восьмого, дополнительного испытания на режиме 105% в течение 110 сек. Данное испытание было успешно проведено.

## **2. Результаты испытаний**

### **2.1. Исследование запуска**

Отличия системы регулирования двигателя РД171М от двигателя РД171 [1], а именно – регулятор с одним цифровым приводом вместо регулятора с двумя приводами (следающим и пневмоприводом), цифровой привод на дросселе горючего вместо следающего и отсутствие дросселей окислителя (тракт окислителя открыт изначально), а также новая характеристика регулятора – потребовали ввести частичные изменения в циклограмму запуска, касающиеся выдачи команд на цифровые приводы.

На рис. 10 – 12 представлены графики изменения основных параметров на запуске для всех сертификационных испытаний на фоне статистики двигателя РД171 (серый фон).



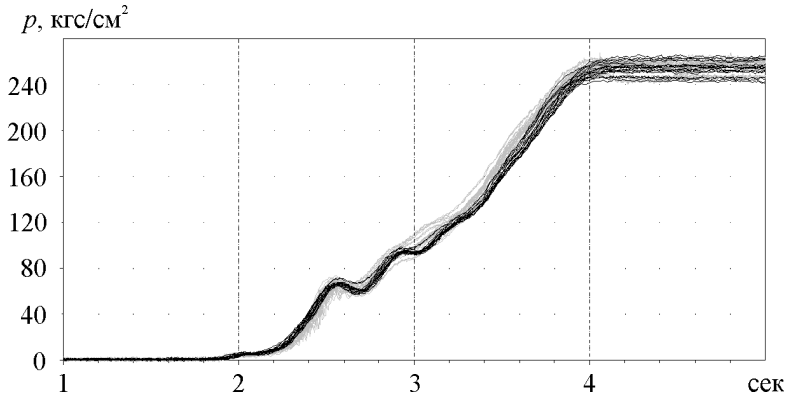


Рис. 10. Изменение давления перед форсунками камер на запуске

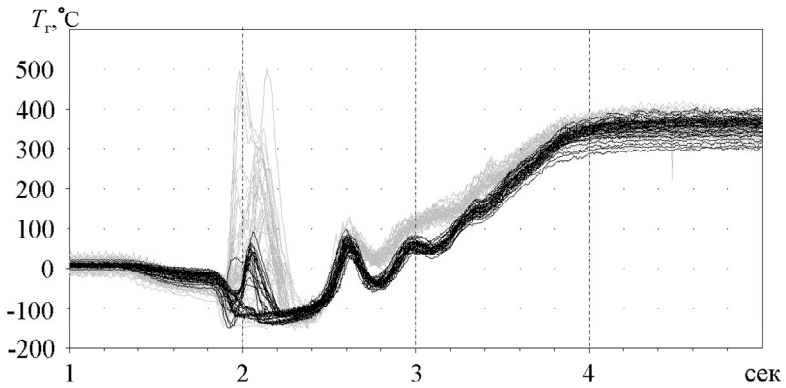


Рис. 11. Изменение температуры газа за турбиной на запуске

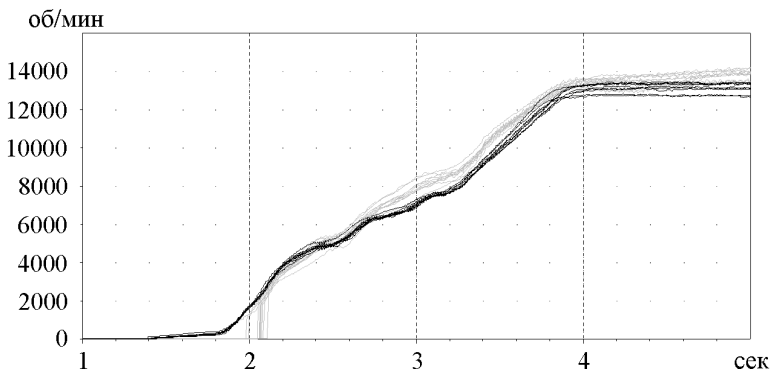


Рис. 12. Изменение оборотов ТНА

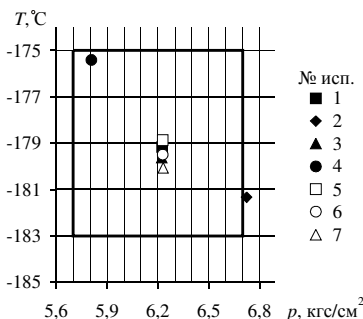


Рис. 13. Реализованные на испытаниях входные давления и температуры окислителя

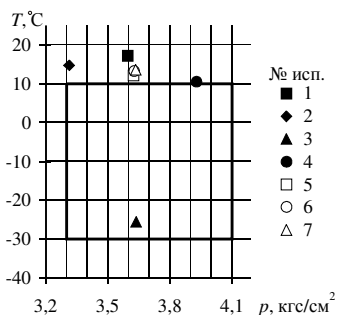


Рис. 14. Реализованные на испытаниях входные давления и температуры горючего

На рис. 13 и 14 реализованные входные давления и температуры компонентов показаны вместе с требуемыми по ТЗ эксплуатационными границами.

С учётом ограниченного числа испытаний "закрыты" наиболее неблагоприятные для запуска условия. Следует отметить воспроизводимость и высокую устойчивость запуска к изменению входных условий.

## 2.2. Исследование работы на режиме

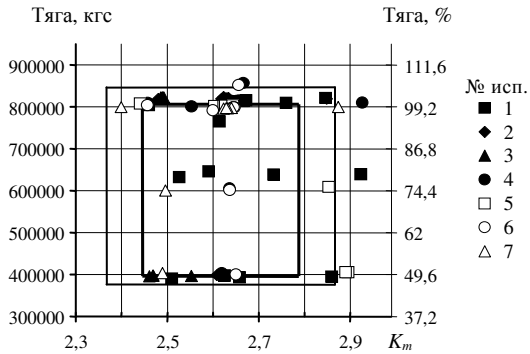


Рис. 15. Диапазоны изменения тяги и  $K_m$

В процессе работы на режиме основные параметры (тяга и соотношение расходов компонентов) были реализованы в диапазонах, представленных на рис. 15.

Значения входных давлений и температур компонентов по линиям окислителя и горючего представлены на рис. 16 и 17.

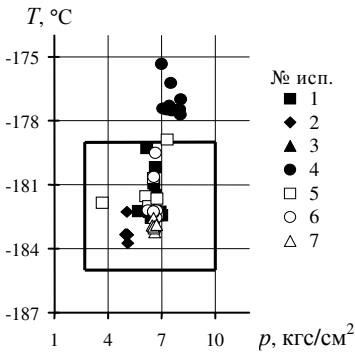


Рис. 16. Диапазоны изменения входного давления и температуры окислителя

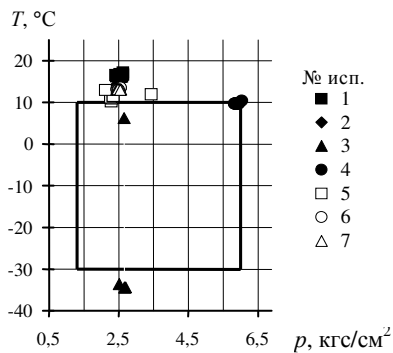


Рис. 17. Диапазоны изменения входного давления и температуры горючего

Точность настройки двигателя по тяге и соотношению компонентов с учётом погрешности измерений находятся в пределах требований основных характеристик (соответственно 2,5% и 4,2%) и составляют  $\leq 2,45\%$  и  $\leq 2,79\%$ .

Проведенный анализ параметров двигателя № А138, полученных при испытаниях и приведенных к номинальным значениям давления и температуры компонентов на входе, показывает, что параметры двигателя стабильны; их разброс по результатам шести испытаний (после КТИ) – в пределах 2...3%, соответствие параметров двигателя математической модели – в пределах 5%.

Среднее значение измеренных величин удельного импульса тяги на режиме 100% тяги – 337,2 сек, на режиме 50% тяги – 333 сек. Разброс величин удельного импульса не превышает 1 сек. Указанные значения соответствуют требованиям основных характеристик.

Из результатов определения амплитуд пульсаций тяги для основных режимов работы двигателя следует, что они составляют  $\leq 0,2\%$  (максимальные значения на частоте  $\approx 2$  Гц).

Диагностирование двигателя на основе анализа медленноменяющихся параметров показывает, что на всех испытаниях отклонений от нормального функционирования нет.

Анализ виброакустического состояния показывает, что

– диагностируемые пульсации давления в 1,5...2 раза, а вибрации в 4 раза ниже предельно допустимых уровней, которые были установлены по статистике испытаний двигателей РД171 и РД180,

– виброакустические процессы, протекающие в двигателе, обладают высокой стабильностью во всем диапазоне входных условий, который был проверен при сертификационных испытаниях.

### 2.3. Останов

На рис. 18 – 20 показано изменение основных параметров двигателя № А138 при останове в сравнении с КТИ двигателей РД171.

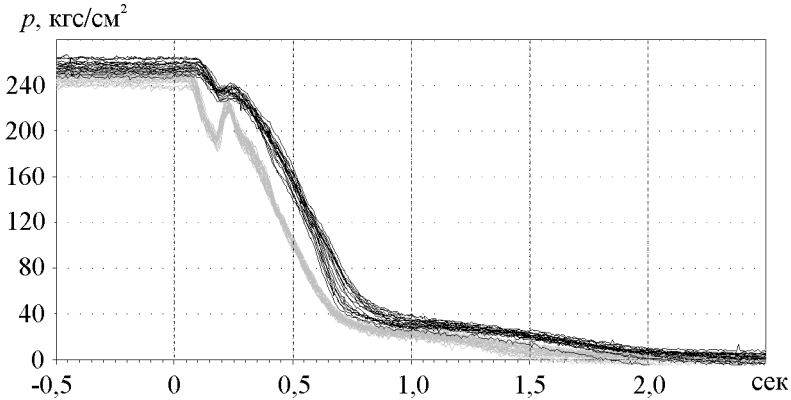


Рис. 18. Изменение давления перед форсунками камер на останове

Имеющиеся отличия, в первую очередь, по спаду давления в камерах (тяги) связаны с изменениями в системе регулирования. Снижение расхода через регулятор двигателя РД171М идет несколько медленнее, что в основном является результатом меньшей скорости перекладки цифрового привода по сравнению с пневмоприводом, который определял процесс закрытия регулятора на двигателе РД171. В основном, это отражается на увеличении импульса последствия (~ 20%); на ~ 0,03 сек увеличивается время от команды на выключение до начала спада тяги, что выходит на границу установленного интервала и требует корректировки ТЗ.

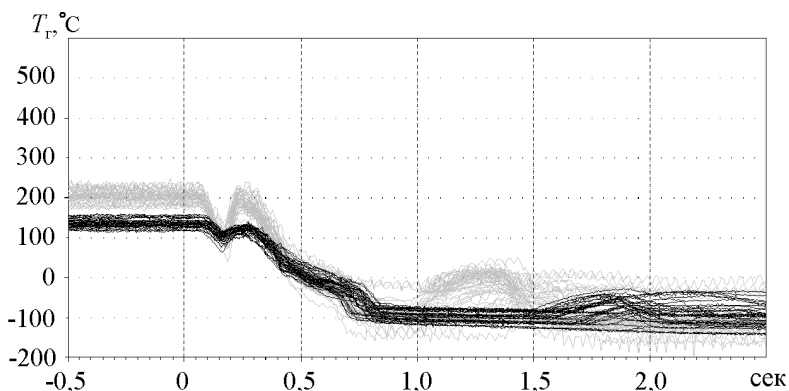


Рис. 19. Изменение температуры газа за турбиной на останове

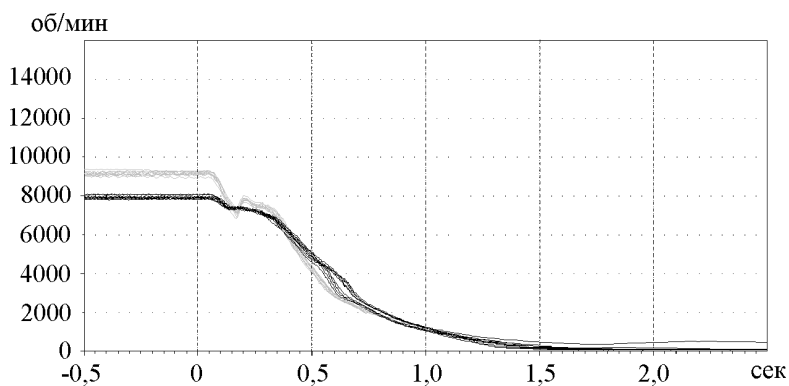


Рис. 20. Изменение оборотов ТНА на останове

Останов хорошо воспроизводится от испытания к испытанию. Имеющиеся небольшие отличия от останова двигателя РД171 являются несущественными.

### 3. Исследование состояния изменённых узлов и агрегатов двигателя после сертификационных испытаний

В двигателе РД171М № А138 сертифицировались две камеры из имеющегося задела камер двигателя РД170, которые дорабатывались для использования в двигателе РД171М (срезаны

и заварены лишние замерные штуцеры, срезаны рамы для крепления рулевых приводов двигателя РД170 и установлены рамы для рулевых приводов двигателя РД171М) и две вновь изготовленные камеры для двигателя РД171М.

Камеры в составе двигателя прошли испытания без замечаний при значениях основных параметров в следующих диапазонах:

- давление в камере ..... 114,6 ... 263,2 кгс/см<sup>2</sup>,
- соотношение расходов  
компонентов .....2,4 ... 3,01,
- температура горючего  
на входе в двигатель .....минус 34 ... плюс 17,4°С.

По результатам осмотра после испытаний состояние материальной части соответствует требованиям КД и не препятствует проведению дальнейших испытаний двигателя.

Особенностью газогенераторов двигателя РД171М по сравнению с газогенераторами двигателя РД171 является сварное соединение смесительной головки и корпуса вместо разъемного фланцевого [1]. Замечаний по работе газогенераторов в процессе испытаний (диапазон давлений в полости окислителя – 200...600 кгс/см<sup>2</sup>; соответственно соотношение компонентов – 92...52) не имеется.

Дефектация газогенераторов проводилась внешним осмотром, замечаний нет.

Конструктивные отличия насосов окислителя и горючего двигателя РД171М от насосов двигателя РД171 отражены в работе [1].

Насосы и бустерные насосные агрегаты не имели замечаний в процессе испытаний как по параметрам, которые соответствовали режимам работы, так и по результатам межпускового осмотра.

Турбина изготовлена со следующими особенностями по сравнению с турбинами двигателей РД171:

- увеличена высота лопаток соплового аппарата и рабочего колеса [1];
- межлопаточные каналы соплового аппарата и рабочего колеса выполнены методом электроэрозионной обработки на

станке "Робоформ" без последующей электрохимической обработки и слесарной зачистки, что позволило в два раза сократить допуски на размеры, определяющие проходные сечения межлопаточных каналов;

– никелевое покрытие нанесено ионно-плазменным способом на новой установке ВИТ-10.

В связи с переходом на новую технологию выполнения межлопаточных каналов более стабильными стали результаты их проливки водой, стабилизировались также характеристики турбины при модельных испытаниях.

Осредненные значения, зафиксированные при испытаниях двигателя № А138, по величинам оборотов и температуре газа за турбиной на режиме 100% тяги составили соответственно 13239 об/мин и 389 °С и достаточно близки к расчётным (по таблице энергоувязки): 13268 об/мин и 388 °С соответственно.

Визуальный контроль турбины проводился с помощью эндоскопа после каждого испытания. В результате осмотров дефектов не выявлено.

На двигателе РД171М используется теплообменник (ТО) с двигателя РД171.

Испытания ТО в составе двигателя проводятся с подачей в тракт гелия ТО газообразного азота с последующим пересчетом результатов испытания на параметры гелия. Полученные итоговые результаты соответствуют требованиям ТЗ.

ТО должен быть работоспособным при отключении подачи газа в любой момент работы двигателя. Для данной проверки на всех испытаниях проводилось отключение подачи азота на 75 сек с последующей подачей на 120 сек. Каких-либо замечаний по поведению параметров азота после повторных выключений не отмечено.

Система приводов автоматики (СПА) на двигателе РД171М отличается от аналогичной системы двигателя РД171 количеством приводов. В связи с этим изменилась конструкция коллектора блока гидравлического питания (БГП), входящего в СПА. БГП изменённой конструкции успешно прошел квалификационные испытания на предприятии-изготовителе (ПО "Полет"). Замечаний по функционированию БГП и СПА в целом в составе двигателя № А138 не отмечено.



На двигателе РД171М система обеспечения двигателя газом (гелием) высокого давления выполнена в виде единого пневмоблока, включающего кроме агрегатов автоматики два баллона емкостью 70 л для хранения гелия. Пневмоблок аналогичной конструкции ранее применялся в составе доводочных двигателей, где функционировал без замечаний в процессе ~ 100 огневых испытаний. При сертификационных испытаниях двигателя № А138 замечаний к работе пневмоблока не отмечено.

С помощью фиксатора дистанционного управления (ФДУ) проводится дистанционное управление фиксацией и расфиксацией камер двигателя. ФДУ заимствован с двигателя РД171. При испытаниях двигателя № А138 замечаний к работе ФДУ не отмечено.

В состав двигателя входят трубопроводы подачи, слива и дренажей компонентов, управления и продувок. В ходе испытаний двигателя № А138 замечаний по работоспособности трубопроводов всех наименований не было. При осмотре, пневмоиспытаниях и при дефектации двигателя после испытаний разрушений трубопроводов не выявлено.

По всем агрегатам автоматики отсутствуют замечания по их работе в процессе огневых испытаний. Однако при пневмоиспытаниях двигателя после огневых испытаний выявилась повышенная негерметичность управляющей полости клапана окислителя на первом газогенераторе. Указанная негерметичность не влияет на работу клапана и пневмосистемы, так как после открытия клапана и выхода двигателя на режим наддув управляющей полости прекращается.

Двигатель РД171М имеет большое число разъемных соединений и мест, герметичность которых обеспечивается различными типами уплотнений. Все уплотнения, в том числе и вновь установленные на двигатель РД171М, по сравнению с двигателем РД171 обеспечили проведение сертификационных испытаний без замечаний.

Документация на кабели телеметрии и контроля температур разработана НПО Энергомаш; данные кабели изготавливались в ПО "Полет", квалификационные испытания проведены в ПО "Полет" без замечаний.

Документация на кабели управления разработана в НПЦ АП; там же без замечаний проведены квалификационные испытания.

В процессе испытаний кабели обеспечивали надёжное функционирование всех систем двигателя.

#### **4. Проверка работоспособности бортового источника мощности (БИМ) в составе двигателя № А138**

БИМ создает давление в гидросистеме приводов качания камер и приводов регулятора и дросселя.

Разработчик БИМ – КБ "Южное" (г. Днепропетровск). Цель испытаний в составе двигателя – проверка работоспособности на режимах с тягой 105%.

Общий вид БИМ, смонтированного на двигателе, представлен на рис. 21.

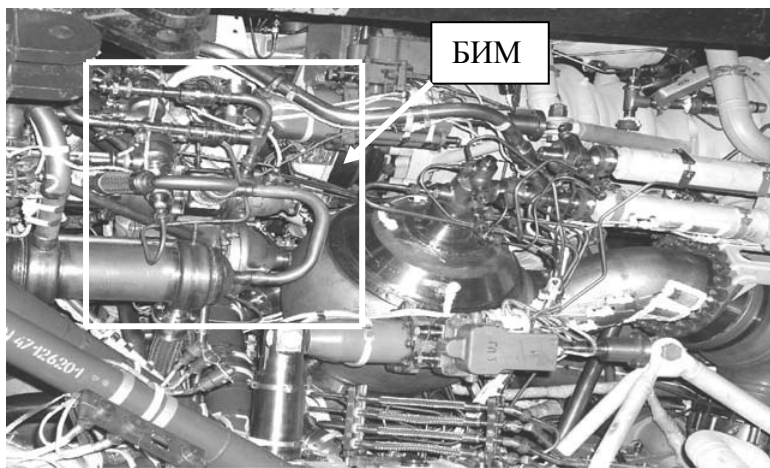


Рис. 21

При КТИ двигателя № А138 было отмечено anomальное поведение параметров БИМ: на 121 сек произошёл спад оборотов турбины и выходных параметров БИМ. До выяснения причин

отказа БИМ был оставлен на двигателе, но отсоединен от его систем по линиям питания и слива горючего. По заключению разработчика причиной спада параметров при переходе на режим конечной ступени явились нештатные условия в процессе работы (не производился отбор горючего из БИМ на рулевые приводы; запитка рулевых приводов осуществлялась от стендовой системы питания). Для имитации натуральных условий требовалось провести замену узла перепуска в БИМ, что и было сделано после планового демонтажа двигателя со стенда. После повторного монтажа двигателя на стенде два последующих испытания (№№ 6, 7) были проведены с задействованием БИМ. Замечаний по работе БИМ нет.

## **5. Оценка надёжности двигателя**

Общий объём огневых испытаний двигателей РД170, РД171 и РД171М составляет 959 испытаний 241 экземпляров двигателей, 10 наземных огневых испытаний (ОСИ) в составе ступени и 58 испытаний при полетах в составе носителей. Суммарная наработка двигателей – 118520 сек (846 полётных ресурсов).

Оценка надёжности выполнена по всей накопленной статистике испытаний с применением моделей роста надёжности двигателя РД171М и составляет (с учётом внедренных мероприятий по повышению запасов работоспособности) 0,9985 при доверительной вероятности 0,95, что соответствует требованиям ТЗ.

## **6. Дефектация материальной части**

В связи с принятием решения о проведении дополнительного (восьмого) испытания двигателя № А138 была согласована и утверждена программа его проведения.

По данной программе предусматривалось проведение огневого испытания на режиме 105% тяги в течение 100 сек.

При этом оговаривалось, что положительные результаты первых 30 сек работы двигателя подтверждают работоспособность двигателя после завершения всего цикла семи сертификационных испытаний. В связи с успешным завершением восьмо-

го испытания сертификационной комиссией был сделан вывод об отсутствии дефектной материальной части двигателя № А138 после завершения сертификационных испытаний.

Ниже представлены результаты данного испытания.

### 7. Дополнительное (восьмое) испытание двигателя № А138

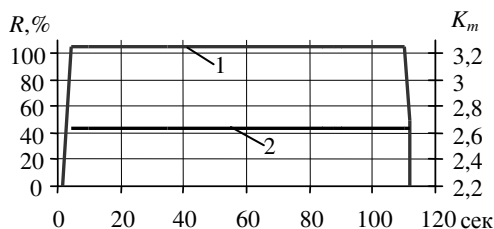


Рис. 22. Профили изменения тяги и соотношения компонентов: 1 – тяга; 2 – соотношение компонентов

На рис. 22 представлены профили изменения режима по тяге и соотношению расходов компонентов для данного испытания.

Испытание проводилось с подключением БИМ и рулевыми приводами с подачей на них "нулевого" командного сигнала (камеры не качались и удерживались в нулевом положении).

Подготовка двигателя к испытанию, запуск, выход на режим и работа на режиме до 109,8 сек прошли без замечаний.

Двигатель вышел на режим 106% тяги, соотношение компонентов соответствовало номинальному значению – 2,63. Полученное при испытании значение удельного импульса тяги – 337,4 сек. Колебания тяги – менее 0,2%. Выходные характеристики теплообменника соответствуют требованиям ТЗ. Вибрации и пульсации давления на режиме 106% практически не отличаются от режима 100%. Устойчивый характер виброакустических процессов в двигателе не нарушается. БИМ отработал ~ 110 сек на режиме 106% без замечаний.

На 109,8 сек двигатель был отключен системой аварийной защиты (САЗ) по каналу контроля верхнего предельного значения оборотов ТНА. Останов двигателя произведен с режима 106% тяги по штатной циклограмме останова.

Анализ телеметрической информации показал, что преждевременный останов произошел из-за ошибки, допущенной в таблице настройки каналов САЗ – время перестройки порогового значения оборотов было ошибочно указано раньше положенного, в связи с чем на 109,8 сек перестраиваемое пороговое значение оборотов сравнялось с оборотами нормально работающего двигателя.

Последующие, после останова двигателя, работы по осмотру его материальной части не выявили замечаний и дефектов. В связи с завершением намеченной программы двигатель был демонтирован со стенда.

## **Выводы**

1. В НПО Энергомаш успешно завершены сертификационные испытания двигателя РД171М, в процессе которых продемонстрированы и подтверждены требования ТЗ, включающие:

- временные и скоростные характеристики запуска;
- полётные алгоритмы управления режимами и регулирования;
- точности поддержания заданных режимов по тяге и соотношению расходов компонентов топлива;
- требуемые диапазоны регулирования;
- удельный импульс тяги;
- выходные параметры теплообменника;
- параметры пневмосистемы;
- запасы работоспособности по ресурсу, тяге и соотношению компонентов топлива.

2. Анализ медленно- и быстроменяющихся параметров не выявил замечаний и отклонений, свидетельствующих об изменениях выходных параметров, обусловленных работой на гра-

ницах гарантированных диапазонов внешних факторов и ресурсной наработкой.

3. После пятого испытания двигатель прошел обработку внутренних полостей по технологии товарного двигателя. Положительные результаты последующих испытаний позволили сертифицировать технологические процессы послепусковой обработки.

4. Успешное проведение дополнительного (восьмого) испытания на форсированном режиме свидетельствует, что конструкция и технология изготовления обеспечивают требуемые надёжность и работоспособность двигателя РД171М и подтверждают требуемое качество производства в соответствии ТЗ и КД на двигатель.

## Литература

1. *Каторгин Б.И.* и др. Двигатель РД171М // Труды НПО Энергомаш. М. 2004. № 22. С. 55–80.

2. *Колбасенков А.И.* и др. Методика настройки двигателя в процессе огневых испытаний, обеспечивающая его работу в полете в широком диапазоне тяги, температур компонентов топлива и плотности горючего // Труды НПО Энергомаш. М. 2002. № 20. С. 276–286.

Поступила 15.11.2004 г.