

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОТРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И АМЕРИКАНСКИХ ЖРД

Геннадий Самарин

Военная академия РВСН им. Петра Великого

Создание жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) осуществляется, как правило, в два этапа. На первом проводятся научные и экспериментальные работы, обосновывается возможность создания основных систем и агрегатов двигателя, подтверждается правильность принятых технических решений. Итогом первого этапа, в лучшем случае, является демонстрационный образец нового ЖРД и результаты, полученные при проведении его испытаний.

На втором этапе разрабатываются рабочие чертежи и технологии, изготавливаются экспериментальные двигатели, предназначенные для опытной отработки. На этом этапе производится "предварительное" определение вероятности безотказной работы двигателя, которая является показателем уровня отработанности ЖРД. Увеличение объема опережающих научных и экспериментальных исследований, связанных с демонстрацией оптимальности принимаемых новых технических решений в разрабатываемых и модернизируемых ЖРД, является одним из основных факторов, способствующих снижению суммарных затрат на создание двигателей и их отработку. Второй этап является наиболее трудоемким и дорогостоящим, поэтому важной задачей для конструкторов ЖРД является выявление способов снижения материальных затрат.

К основным характеристикам, используемым при анализе уровня отработанности ЖРД, относят суммарное количество испытанных двигателей, количество циклов испытаний, а также суммарную наработку двигателей в процессе их доводки. Другими характеристиками, определяющими затраты материальной части, являются, прежде всего, среднее количество повторных испытаний двигателя (отношение количества испытаний к количеству испытанных двигателей), средняя наработка двигателя в ходе летных испытаний и средняя плотность испытаний за цикл летного ресурса (отношение количества испытаний к количеству полетных циклов).

Очевидно, что увеличение кратности повторных запусков и средней наработки ЖРД ведет к сокращению количества двигателей, затрачиваемых на отработку. Влияние средней плотности испытаний за один полетный цикл работы на потребное количество двигателей при отработке является более сложным. С одной стороны, увеличение средней плотности испытаний при определенной наработке для данного двигателя сопряжено с увеличением кратности испытаний, а также с ростом затрат на обслуживание испытаний. С другой стороны, повышение средней плотности испытаний должно вести к сокращению потребного количества двигателей для отработки.

Следует отметить, что завершению этапа конструкторской доводки ЖРД, вообще говоря, могут соответствовать заметно отличающиеся значения суммарной огневой

наработки. Так, при испытаниях двигателя SSME (США) потребовалось 183 полетных цикла, а для конструкторской доводки двигателя 15Д117 (Россия) - 458 циклов. При этом на отработку было затрачено разное количество двигателей - от 17 (SSME) до 325 экземпляров (11Д43, Россия). Средняя наработка единичного двигателя, характеризующая его ресурсные возможности, также различна: от 1,07 полетных циклов для двигателя 11Д43 до 10,77 для двигателя SSME.

Следует отметить, что у отечественных ЖРД среднее количество повторных испытаний единичного доводочного двигателя характеризуется относительно низким значением в диапазоне 1,3...3,2, в то время как у американских ЖРД значение этого параметра на порядок выше и составляет 16,2...41. Средняя плотность испытаний двигателей изменяется от 0,6 (15Д113) до 6,35 (J-2).

Сравнительный анализ параметров отработки отечественных и американских ЖРД показывает, что в США отработка проводится на меньшем количестве доводочных двигателей. При этом средняя наработка и среднее количество повторных испытаний единичного доводочного двигателя для американских ЖРД значительно превышают соответствующие характеристики для отечественных ЖРД.

Практика летных испытаний отечественных ЖРД предусматривает совмещение их начала с завершающим этапом доводочных стендовых испытаний. Обычно проводятся так называемые межведомственные испытания (МВИ), в ходе которых стремятся подтвердить работоспособность двигателя, достаточную для начала летных испытаний, хотя полное соответствие его требованиям технического задания, как правило, еще не достигнуто. Окончательная доводка двигателя, результатом которой является полное удовлетворение требованиям технического задания, обычно проводится параллельно с летными испытаниями. В практике создания американских ЖРД летные испытания обычно начинаются только после полного завершения цикла конструкторской отработки и проведения подтверждающих испытаний.

Не оспаривая преимуществ американского подхода с точки зрения обеспечения безопасности полетов на начальном этапе отработки, следует отметить, что опыт начала летных испытаний ракет-носителей с двигателями 11Д520, 11Д43, 11Д123 до завершения окончательной доводки ЖРД подтверждает допустимость отечественной практики. Ее определенные преимущества связаны с сокращением продолжительности доводки ракеты-носителя в целом. Вместе с тем, летные испытания не следует начинать прежде, чем подтвержден необходимый уровень надежности двигателя.

Анализ процессов отработки ЖРД показывает, что для окончания этапа завершающих доводочных испытаний с использованием 50-60 двигателей необходимо планировать среднюю наработку на уровне 4...5 циклов, а при средней наработке 1,5...3 цикла потребное количество двигателей для отработки возрастает до 150 экземпляров. Разница очень существенная.

Выше уже отмечалось, что количество повторных испытаний отечественных ЖРД характеризуется диапазоном 1,3...3,2, в то время как у американских двигателей - 16...41. Такая разница отражает специфику отработки отечественных и американских ЖРД, заключающуюся, прежде всего, в том, что при отработке двигателей в США в основу

положено проведение коротких (намного меньше одного ресурса) испытаний, а при отработке отечественных ЖРД назначаются, в основном, полноресурсные испытания.

Наиболее трудоемкими задачами при доводке ЖРД являются:

- обеспечение оптимальных внутрикамерных процессов при надежном охлаждении камеры сгорания;
- обеспечение работоспособности турбонасосного агрегата (ТНА) при высоком коэффициенте полезного действия;
- отработка переходных процессов (запуск, дросселирование, выключение).

Характерно, что при приблизительно идентичной по динамике отработке двигателей J-2, SSME и 11Д122 имеет место существенное отличие расхода экспериментальных двигателей. Так, на завершение конструкторской отработки двигателя J-2 было израсходовано 39 экземпляров, SSME - 17 экземпляров, а отечественных ЖРД 11Д122 - более 150 экземпляров.

К основным недостаткам организации работ по доводке ЖРД 11Д122 по сравнению с доводкой американского двигателя SSME следует отнести:

- недостаточный объем автономной отработки агрегатов и неполное воспроизведение натуральных условий их работы;
- неоправданно большой задел заранее изготовленных двигателей и невозможность своевременного проведения доработок на них.

Передовое оснащение стендовой базы способствовало тому, что автономная отработка основных агрегатов американских ЖРД проводилась в условиях, максимально приближенных к натурным, и в более полном объеме благодаря хорошей ремонтпригодности ЖРД и возможности замены, вышедших из строя агрегатов (тем самым обеспечивались восстанавливаемость ЖРД и увеличение его ресурса). При испытаниях широко использовалась система технической диагностики, созданная на базе цифровой управляющей вычислительной машины, которая практически исключала полный выход из строя экспериментального двигателя при возникновении аварийной ситуации. В ходе отработки практиковалась поэтапная система испытаний, при которой после выявления неисправностей в конструкцию ЖРД вводились необходимые изменения перед каждым последующим испытанием.

Известно, что ЖРД является одной из наиболее энергетически напряженных тепловых машин. Отказы ЖРД обычно развиваются быстротечно, приводят к обширным разрушениям, а зачастую и к полной потере работоспособности двигателей. Для предотвращения разрушений и сохранения работоспособности узлов и агрегатов ЖРД применяют так называемые средства аварийной защиты (САЗ), состоящие из датчиков, сравнивающих устройств и исполнительных органов. Одной из характеристик САЗ является коэффициент охвата аварийных ситуаций, который характеризует способность САЗ обеспечивать выключение ЖРД до момента, когда двигатель начинает разрушаться. Значение этого коэффициента задается равным 0,8, т.е. система должна парировать около

80 % потенциально возможных отказов.

Статистические данные, характеризующие процессы отработки американских и отечественных ЖРД, позволяют сделать вывод о том, что реализация оптимальных программ доводки позволяет снизить материальные затраты на 18 %, а увеличение огневой наработки единичного изделия позволяет сократить расходы материальных средств на 63 %.

Результаты проведенного анализа позволяют сформулировать следующие рекомендации по экспериментальной отработке ЖРД ракет-носителей:

- при наличии ограничений на выделяемые средства и время для отработки двигателя программа испытаний должна предусматривать наибольшую кратность повторных испытаний с одновременным увеличением относительной средней продолжительности одного испытания;
- увеличения количества повторных испытаний двигателя можно достичь не только путем повышения его конструктивного совершенства, но и путем восстановления двигателя после каждого испытания с обязательным устранением выявленных дефектов;
- для достижения высокого уровня надежности ЖРД (более 0,99) необходимо начинать летную отработку только после получения соответствующих значений параметров надежности агрегатов двигателя.

Объемы испытаний ЖРД на этапе доводки до межведомственных испытаний

Изделие	Суммарная наработка, с	Количество испытаний	Количество испытанных ЖРД	Суммарное количество полетных циклов	Средняя наработка одного ЖРД, циклов	Количество повторных испытаний	Средняя плотность испытаний	Средний ресурс, полетных циклов
SSME	95 000	643	17	183	10,77	37,8	3,51	17,3
J-2	110 621	1462	39	230	5,9	37,5	6,35	8,0
F-1	40 130	838	34	267	7,86	24,6	3,13	14,1

Объемы испытаний ЖРД до начала летных испытаний

Изделие	Суммарная наработка, с	Количество испытаний	Количество испытанных ЖРД	Суммарное количество полетных циклов	Средняя наработка одного ЖРД, циклов	Количество повторных испытаний	Средняя плотность испытаний
SSME	128 500	700	17	247	14,5	41,1	2,83
J-2	127 962	1645	43	267	6,2	38,2	6,16
F-1	122 130	1638	57	814	14,28	28,7	2,01