

КОМПЛЕКСНАЯ ОТРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЖРД

Валентин Шерстянников, лауреат премии имени Н.Е. Жуковского, д.т.н.

К середине 60-х годов благодаря достигнутому прогрессу в понимании рабочего процесса ЖРД и большому опыту, накопленному при проектировании агрегатов и систем двигателей, огневой этап отработки динамических режимов ЖРД превратился в значительной степени из поискового в проверочный, имеющий своей целью подтверждение надежности решений, принимаемых на этапах проектирования и доводки агрегатов двигателя. В связи с этим важную роль стало играть совершенствование методов стендовой отработки двигателей, обеспечивавших повышение эффективности физического моделирования процессов и получение от каждого экземпляра испытываемого двигателя максимальной информации.

Далее рассматриваются сформулированные в 60-е годы автором и В.М. Калниным предложения, связанные с совершенствованием и дальнейшим развитием методики отработки переходных режимов ЖРД. Они основываются на накопленном отечественной промышленностью опыте создания ЖРД предшествовавшего поколения и их отработки в составе ракетных блоков при летных испытаниях ракет.

Цель выдвинутых предложений состояла в том, чтобы:

- обеспечить комплексное использование методов физического и математического моделирования при стендовой отработке двигателей;

- повысить достоверность физического моделирования "ракетных" условий;

- более эффективно применить современные вычислительные средства для отработки и анализа получаемой при испытаниях информации.

1. Физическое моделирование при огневых испытаниях направлено на то, чтобы максимально приблизить условия наземной отработки двигателей к условиям их работы в составе ракет. Имитация "ракетных" условий должна производиться по всем физическим факторам, характеризующим условия работы двигателей в составе ракет, в том числе: по условиям поступления топлива в двигатели - гидродинамическое подобие; по условиям закрепления двигателей - механическое подобие; по условиям высотности и тепловых режимов - газодинамическое и теплофизическое подобие и по условиям действия массовых сил - гравитационно-массовое подобие. На практике наиболее широко применяются методы моделирования гидродинамического, газодинамического и теплофизического подобия, реже - гравитационно-массового подобия. Разработанные критерии гидродинамического подобия, требующие равенства в стендовых условиях комплексов параметров $\Sigma(I_i/F_i)$, $\Sigma \Delta P_i$ и значений собственных частот колебаний жидкости, являются общепризнанными и широко применяются в практике стендовых испытаний. Их внедрение существенно сократило потери материальной части и сроки доводки двигателей, особенно при отработке запуска и других переходных режимов.

Значительный эффект дают также освоенные на практике методы моделирования теплофизического подобия на стендах, реализуемые путем термостатирования конструкции двигателей и компонентов топлива перед началом испытаний. Они обеспечивают близкое к штатному тепловое состояние элементов конструкции двигателей, особенно при проведении огневых испытаний ракетных блоков. Весьма сложными для реализации, и поэтому пока еще редко применяемыми, являются способы осуществления газодинамического и гравитационно-массового подобия условий работы двигателей на стендах и в составе ракет. Однако и в этом направлении имеется уже определенное продвижение: применяются разгонные тележки, летающие лаборатории, имитирующие невесомость, проводятся испытания двигателей со специальными преградами за соплом, имитирующими газодинамические условия старта и расцепки ракетных

блоков, условия возникновения дискретных составляющих акустического спектра и другие возмущения. Наименее разработанными и освоенными сегодня являются методы моделирования на стендах механического взаимодействия двигателей с конструкцией ракет.

Обеспечение механического подобия. Опыт отработки мощных ЖРД свидетельствует о том, что аномальное механическое взаимодействие двигателей с конструкцией ракет может приводить к потере работоспособности двигателей в полете. В связи с этим для повышения полноты физического моделирования ракетных условий при стендовых испытаниях двигателей целесообразно наряду с выполнением условий гидродинамического и теплофизического подобия обеспечивать также механическое подобие. Наиболее благоприятные условия для механического подобия могут быть созданы на крупных стендах, где испытываются двигатели в составе ракетных блоков. Приближенное воспроизведение механического подобия может быть обеспечено также и при стендовых испытаниях одиночных двигателей.

Проведенный анализ показывает, что из-за большой сложности процессов механического взаимодействия двигателей с конструкцией ракеты механическое подобие упругомассовых свойств стендовых и ракетных систем может выдерживаться лишь в ограниченных пределах.

В качестве критериев подобия могут быть приняты условия, необходимые для приближения в определенном частотном диапазоне комплексных частотных характеристик стендов и ракет по механическим перемещениям двигателей под действием колебаний силы тяги:

$$W_{ст}(i\omega) \sim W_{рак}(i\omega), \text{ при } \omega_{min} < \omega < \omega_{max}$$

где $W(i\omega) = \delta h_{x,y,z} / \delta R_{x,y,z}$ - соответствующие частотные характеристики;

$\delta R_{x,y,z}$ и $\delta h_{x,y,z}$ - малые колебания тяги и мест крепления двигателей к ракете по каждой из координатных осей;

ω_{min} и ω_{max} - нижняя и верхняя границы моделируемого частотного диапазона.

Из-за сложности решения задачи в полном объеме в качестве приближения может приниматься выполнение следующих более простых условий:

а) равенство полных статических перемещений двигателей в продольном и обоих поперечных направлениях под действием полной (номинальной) силы тяги;

б) равенство собственных частот первого тона продольных и поперечных колебаний двигателей на раме стенда и в силовом каркасе ракеты.

К этим условиям нужно добавить еще соблюдение равенства коэффициентов жесткости и собственных частот колебаний топливных трубопроводов, связывающих двигатели с ракетой, и имитацию вибровоздействия от работающих двигателей других ступеней.

В случае необходимости, при упрощенном моделировании механического подобия, вместо первого тона собственных колебаний двигателя в силовой системе ракеты может выбираться для воспроизведения на стенде какой-либо из более высоких тонов, представляющий наибольший интерес при проверке работоспособности данного двигателя. При рациональном проектировании схем стендов наличие жесткой броневой защиты, отделяющей огневой отсек от отсека топливных баков, не является принципиальным препятствием для выполнения указанных ранее условий подобия, поскольку элементы, моделирующие упругомассовые свойства конструкции ракеты, размещаются за броневой защитой.

Для выполнения указанных критериев механического подобия испытания двигателей целесообразно проводить на специальных упругих подвесах, осуществляемых на механических или на пневмогидравлических упругих элементах.



Рис. 1. Схема комплексного применения физического и математического моделирования при стендовой отработке ЖРД

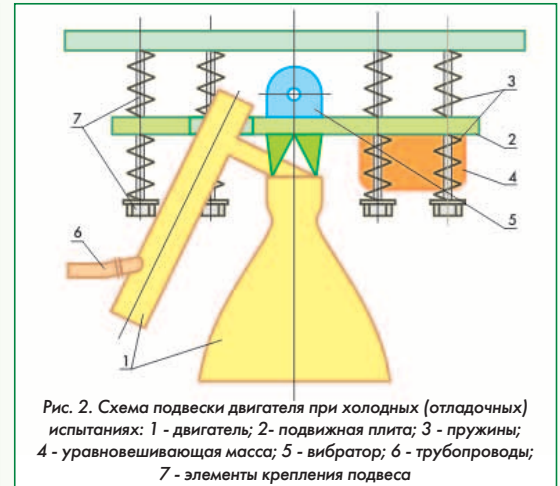


Рис. 2. Схема подвески двигателя при холодных (отладочных) испытаниях: 1 - двигатель; 2 - подвижная платформа; 3 - пружины; 4 - уравновешивающая масса; 5 - вибратор; 6 - трубопроводы; 7 - элементы крепления подвеса

В процессе создания двигателей для ракеты Н1 в ОКБ С.П. Королева и Н.Д. Кузнецова совместно с НИИ была разработана схема и методика специальных огневых испытаний ЖРД НК-33 на упругом подвесе с заданием дозированных низкочастотных (2...100 Гц) колебательных перегрузок в местах крепления двигателя к ракете (рис. 1).

Цель динамических испытаний состояла в:

- проверке работоспособности двигателя с имитацией осевых колебательных перегрузок, передаваемых на двигатель в полете через места крепления его к ракете;
- определении динамических (частотных) характеристик двигателя со штатной рамой по каналу "осевые колебательные перегрузки - тяга двигателя".

Проверка работоспособности двигателя включала в себя проверку прочности конструкции и подтверждение нормального функционирования всех систем двигателя в условиях динамических нагрузок. Необходимость экспериментального определения частотных характеристик по каналу "перегрузка - тяга" вытекала из результатов теоретических исследований, согласно которым механические колебательные движения двигателей, возникающие при их работе в условиях взаимодействия с упругой конструкцией ракеты, могут оказывать заметное влияние на тягу и другие параметры режима работы двигателей. При неблагоприятных условиях это может приводить к возникновению продольно-поперечной неустойчивости ДУ ракеты.

Схема испытаний (рис. 2) включала в себя двигатель 1, собранный по штатной технической документации и оборудованный специальными датчиками для измерения параметров при снятии частотной характеристики. Двигатель устанавливался на упругом подвесе, смонтированном на силовой балке огневой стеллы. Подвес представлял собой подвижную платформу 2, подвешенную на параллельно включенных пружинах 3 по типу пружинного матраца. Эта платформа вместе с двигателем могла совершать колебания в вертикальной плоскости. Дополнительная уравновешивающая масса 4, прикрепленная снизу к подвижной платформе, служила для совмещения центра тяжести подвеса с осью действия возбуждающей силы. К установленному на упругом подвесе двигателю подсоединялись штатные топливные магистрали 6.

Ограничение максимального осевого перемещения двигателя, регламентированное допускаемой деформацией трубопроводов ракеты (15 мм для ракеты Н1), обеспечивалось предварительной затяжкой пружин подвеса, осуществляемой до пристыковки трубопроводов к двигателю.

Для получения требуемых амплитуд колебательных перегрузок в диапазоне низких частот наряду с применением механических вибраторов направленного действия 5 было рекомендовано использование в качестве задатчика колебаний испытываемого двигателя, снабженного специальным пульсатором расхода в линии горючего газогенератора.

Динамические испытания должны были проводиться вблизи номинального режима и других режимов работы двигателей в диапазоне частот и перегрузок, характерных для ракеты Н1 ($f = 5...60$ Гц), включая собственную частоту корпуса ракеты, дискретную состав-

ляющую пульсаций донного давления, собственную частоту подвеса периферийных двигателей. Задаваемые перегрузки должны были быть близкими к предельно допустимым по ТЗ на двигатель. Максимальная продолжительность испытаний соответствовала полетному ресурсу работы двигателя в составе ракеты.

Была разработана методика расчета параметров упругого подвеса, обеспечивающих возможность получения требуемых амплитуд колебаний при ограниченной располагаемой величине возбуждающей силы.

Расчет носил оценочный характер и проводился при следующих основных допущениях: возбуждающая сила направлена вертикально, проходя через центры тяжести и жесткости подвижной части; двигатель вместе с подвижной частью рассматривался как единая масса-монолит; влияние жесткости коммуникаций, подсоединяемых к двигателю, не учитывалось; расчет проводился для некоторой области наиболее вероятных значений декремента затухания колебаний двигателя на подвесе в пределах $\delta = 0,06...0,6$. При указанных допущениях формулы для расчета ожидаемых амплитуд колебаний продольной перегрузки в местах крепления двигателя имеют следующий вид:

- при возбуждении механическими вибраторами

$$|n_x| = \frac{4\pi^2}{g C_{\text{подв}}} \frac{\delta R_{\text{вмакс}}}{f_{\text{вмакс}}^2} \frac{f^4}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_{\text{подв}}})^2]^2 + \frac{\delta_{\text{подв}}^2}{\pi^2} (\frac{f}{f_{\text{подв}}})^2}}$$

- при возбуждении пульсаторами расхода

$$|n_x| = \frac{4\pi^2}{g C_{\text{подв}}} \delta R_{\text{дв}}(f) \frac{\delta G_n}{C_n^*} \frac{f^2}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_{\text{подв}}})^2]^2 + \frac{\delta_{\text{подв}}^2}{\pi^2} (\frac{f}{f_{\text{подв}}})^2}}$$

где $|n_x|$ - амплитуда колебаний перегрузки (в единицах перегрузки);

$f_{\text{подв}}$ - собственная частота подвеса, Гц;

$C_{\text{подв}}$ - коэффициент жесткости подвеса, т/мм;

$\delta_{\text{подв}}$ - декремент колебаний подвеса;

$\delta R_{\text{вмакс}}$ и $f_{\text{вмакс}}$ - параметры вибратора (максимальная амплитуда возбуждающей силы, в тс, и максимальная частота, в Гц);

$\delta R_{\text{дв}}(f)$ - амплитуда колебаний тяги двигателя (тс), как функция частоты;

δG_n и G_n^* - амплитуда колебаний расхода и расход горючего в газогенераторе, обеспечиваемые применяемым при данных испытаниях пульсатором, с помощью которого снималась характеристика.

Расчеты показали, что для проверки работоспособности двигателя НК-33 в заданном диапазоне перегрузок требуется всего 4-5 огневых испытаний двигателя с заданием динамических возмущений по предложенной методике. Однако эти испытания не были проведены в связи с прекращением работ по ракете Н1.

Рекомендуемые испытания выходят за рамки обычной наземной отработки ЖРД и относятся к разряду специальных исследовательских работ, направленных на повышение эффективности функциональных стендовых проверок двигателей и их систем.

(Продолжение в следующем номере).

КОМПЛЕКСНАЯ ОТРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЖРД

Валентин Шерстянников, лауреат премии имени Н.Е. Жуковского, д.т.н.

(Окончание. Начало в № 1 - 2004)

2. Комплексное использование методов физического и математического моделирования

Накопленный к середине 60-х годов в НИИ и ОКБ опыт математического моделирования на ЦВМ процессов запуска и других переходных режимов ЖРД показал, что созданные методы позволяют математическим путем достаточно точно воспроизводить на ЦВМ практически весь цикл эксплуатационных режимов работы двигателей с отражением индивидуальных особенностей их сборки и условий испытаний. Эти методы применяются и в настоящее время для оптимизации параметров двигателей и их систем, главным образом, на этапе формирования штатного варианта конструкции. Они успешно используются также для проведения исследований некоторых аварийных ситуаций на этапе стендовых и летных испытаний. Однако регулярного применения при стендовой отработке двигателей методы математического моделирования в то время еще не получили.

Специалисты ЦИАМ определили примерный перечень задач, для решения которых в процессе стендовой отработки двигателей целесообразно использовать математическое моделирование. Необходимые для этого алгоритмы и программы в значительной части были уже разработаны и до некоторой степени апробированы при создании предыдущего поколения ЖРД. В целом методы математического моделирования, разработанные В.М. Калниным, оказались применимыми на всех этапах стендовой отработки двигателя, начиная от комплекса первоначальных испытаний двигателей, при которых формируется штатный вариант конструкции, и кончая контрольными испытаниями двигателей, при которых осуществляется контроль стабильности производства серийных двигателей. В соответствии с этапами отработки двигателя меняется и техническое содержание задач математического моделирования.

Начальному этапу в большей степени свойственно варьирование схемных и конструкторских решений. На этапе набора статистики испытаний основную роль играет исследование влияния внешних и внутренних факторов на запуск и точность настройки двигателя. Для этапа испытаний двигателей в составе ракетных блоков наиболее характерно решение различных задач, связанных с согласованием характеристик двигателей и ракетных систем (оптимизация демпфирования топливной системы, регламентация гидроударов и провалов давлений на входах в насосы, снижение механических и ударно-волновых нагрузок на конструкцию

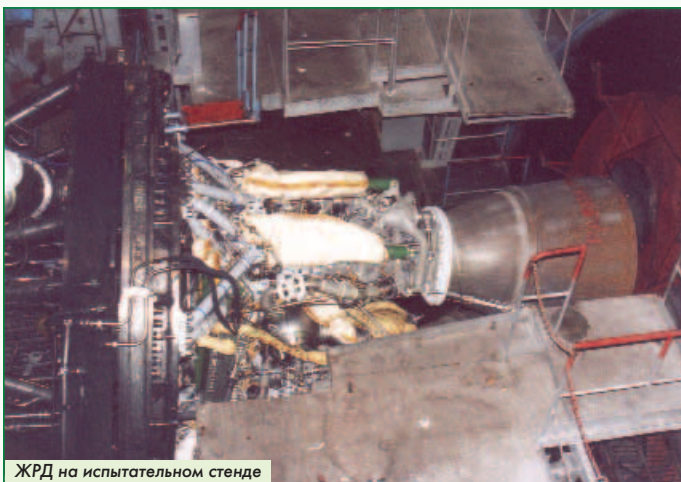
и др.). При контрольных испытаниях серийных двигателей и испытаниях ракетных блоков важную роль начинает играть анализ причин невыполнения программы испытаний и корректировка предстоящих летных пусков ракеты (см. табл.). Все эти задачи решаются методом прямого математического моделирования динамических режимов работы двигателей, включающим в себя воспроизведение на ЦВМ внешних и внутренних условий их работы, в том числе динамические возмущения, исходящие от ракетных и стендовых систем (горячая и холодная расцепка ступеней, переключение баков, аварийное выключение двигателей и др.). Необходимые для этого алгоритмы и программы в значительной части были уже разработаны и апробированы.

Преобладание в рассматриваемом перечне задач, связанных с анализом переходных режимов и статических характеристик двигателей, обусловлено тем, что соответствующие математические методы были более развитыми и могли быть охвачены единой программой моделирования на ЦВМ полного цикла эксплуатационных режимов двигателей. Имеющие большое значение при создании новых двигателей вопросы отработки работоспособности и надежности мощных высоконапорных ТНА, ресурса и экономичности двигателей, устойчивости рабочего процесса камер до сих пор еще в достаточной степени не поддаются математическому моделированию. Их приходится решать, в основном, экспериментальным путем. Поэтому эти вопросы не были включены в состав задач.

Важным достоинством метода математического моделирования является возможность расширения объема получаемой информации благодаря более полному исследованию влияния внутренних и внешних факторов на динамические режимы работы двигателей. Для реализации этой возможности по ходу основных пусков двигателей проводилась идентификация математической модели, обеспечивающая необходимую степень достоверности результатов, получаемых моделированием. Накопленный опыт показал, что при наличии достаточного числа экспериментальных пусков, проведенных в различных условиях, эта задача поддается удовлетворительному решению. Однако, чтобы реализовать преимущества, которые может дать регулярное сопровождение стендовых испытаний математическим моделированием, при наиболее крупных комплексах стендов ОКБ и НИИ должны быть организованы специальные вычислительные центры (ВЦ) и бригады специалистов, занимающиеся математическим моделированием. Комплектование этих бригад кадрами и вычислительная мощность используемых ими ЦВМ должна обеспечивать существенное превышение числа кондиционных "математических" пусков над огневыми. При меньшей производительности математического моделирования значительные потенциальные возможности, заложенные в комплексном применении методов физического и математического моделирования, могут оказаться существенно недоиспользованными в отношении уменьшения потерь материальной части двигателей и ускорения их доводки.

3. Применение современных вычислительных средств для обработки и анализа результатов испытаний

Последний из рассматриваемых вопросов связан с совершенствованием методов хранения, анализа и использования получаемой при стендовых испытаниях информации. В сложившейся в 50...60-х годах практике стендовой отработки двигателей полу-



ЖРД на испытательном стенде

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Этапы работы	Содержание задач	Цель
Формирование штатного варианта конструкции двигателя. Набор статистики испытаний.	Выбор схемы и циклограммы запуска и останова.	Исключение аварийных исходов.
	Оптимизация параметров системы регулирования.	Устойчивость и качество регулирования.
	Анализ причин наиболее типичных аварийных исходов испытаний.	Проверка рабочих гипотез.
	Проверка выполнения технических требований.	Корректировка характеристик агрегатов.
	Специспытания (частотные, кавитационные, вакуумные и др.).	Определение пределов работоспособности.
	Отработка эффективности системы аварийной защиты.	Уточнение параметров настройки каналов защиты.
	Влияние внутренних факторов на характеристики.	Оценка влияния производственных отклонений.
	Определение конструкторских запасов по внешним факторам.	Уточнение пределов работоспособности.
	Контроль крайних сочетаний внешних и внутренних факторов.	Выявление нежелательных режимов работы.
Испытания ракетных блоков.	Согласование характеристик двигателей и ракетных систем.	Оптимизация демпфирования топливной системы.
	Проверка программы летных испытаний.	Регламентация гидроударов и провалов давлений на входах.
	Коррекция взаимного влияния двигателей в связке.	Снижение вибрационных и газодинамических нагрузок.
Контроль серийного производства.	Контрольно-выборочные испытания.	Анализ причин невыполнения программ.
	Специальные испытания.	
	Контрольно-сдаточные испытания двигателей.	Корректировка условий летных пусков.

чил применение "архивный метод" хранения и использования информации. При этом методе после ручной или машинной обработки первичных материалов испытаний и выполнения их экспресс-анализа все материалы, относящиеся к данному пуску, подшиваются в "дела пусков" и в таком виде используются по мере надобности для составления статистических подборок и решения других вопросов, возникающих в процессе доводки двигателей. Такой метод позволяет успешно вести стендовую отработку двигателя, но является недостаточно производительным и становится неудобным при накоплении больших объемов информации, когда число "дел пусков" превышает несколько сотен.

Наиболее рациональным выходом из создавшегося положения являлся переход к машинному методу хранения и использования информации, то есть к созданию банка данных с помощью ЦВМ.

Основные требования к вычислительному центру, сформулированные в 60-х годах, сводились к следующему. В долговременной памяти стендового ВЦ должна была храниться вся статистика результатов испытаний двигателей независимо от того, на каких стендах она получена, а также все аварийные исходы испытаний с классификацией причин аварий и их последствий. Наряду с результатами огневых испытаний в памяти ВЦ должны храниться также процессы, полученные при математическом моделировании. Машинный метод включал в себя также построение обобщенных стандартизированных графиков и таблиц изменения параметров при основных переходных режимах двигателей (запуске, регулировании тяги и останове). Таблицы содержали полученные значения параметров установившихся режимов и основных показателей качества переходных процессов, а также данные, характеризующие фактические условия испытаний. Обобщенные графики переходных режимов представляли собой построенные в крупном масштабе, удобно расположенные и совмещенные по оси времени кривые изменения основных регистрируемых параметров двигателя с указанием моментов подачи всех команд управления. На кривые изменения параметров наносились контуры "трубок", соответствующие средне-статистическому разбросу процессов, и строились гистограммы отдельных показателей процессов. В ряде случаев на графиках указывались также величины "хлопков" давления при воспламенении и догорании топлива, а также величины максимальных амплитуд

пульсации давлений и вибраций элементов конструкции двигателей, зарегистрированные в характерные моменты переходных процессов. Машинный анализ результатов испытаний включал в себя углубленную обработку полученной информации по всем вопросам, возникающим при отработке двигателей.

Резюмируя изложенные выше рекомендации, разработанные ЦИАМ на основе анализа и обобщения накопленного отечественной промышленностью опыта по ракетному двигателестроению в 60-е годы и направленные на повышение эффективности методов натурной отработки ЖРД, можно отметить следующее.

1. Для повышения полноты физического моделирования ракетных условий при стендовых испытаниях двигателей целесообразно наряду с выполнением условий гидродинамического и теплофизического подобию обеспечивать также механическое подобие путем приближения в требуемом диапазоне частот комплексных частотных характеристик стенда и ракеты к каналу "сила тяги - перемещение мест крепления двигателя к ракете".

Для получения требуемых амплитуд колебательных перегрузок в диапазоне низких частот наряду с применением механических вибраторов направленного действия рекомендовано использовать в качестве задатчика колебаний испытуемый двигатель, снабженный пульсатором расхода в системе горючего газогенератора.

2. Эффективным средством для уменьшения потерь материальной части двигателей при стендовых испытаниях и ускорения темпов их доводки является комплексное использование методов физического и математического моделирования при стендовой отработке переходных процессов и систем управления ЖРД. Для решения этой задачи при крупных стендах ОКБ и НИИ должны быть организованы специальные вычислительные центры, осуществляющие регулярное сопровождение стендовых испытаний математическим моделированием и машинный анализ результатов огневых испытаний двигателей.

3. Внедрение указанных рекомендаций в практику обработки ЖРД связано с дополнительными расходами, однако ожидаемый от них эффект, проявляющийся в сокращении сроков создания двигателей и уменьшении затрат материальной части на их стендовую отработку, с большим превышением окупает эти затраты, что подтверждается практикой создания современных ЖРД. 