



Р и с. 8. Давление в пневмоцилиндре отвода (1, 2) и давление в пневмоцилиндре обезвреживания (3)

Указанные рекомендации реализованы в конструкторской документации на ферму и системы отвода и обезвреживания.

Результаты расчета по наиболее характерным параметрам для штатной реализации исходных данных (одно из максимальных отклонений по разбросу начального вектора состояния системы) приведены на рис. 4-8.

#### Библиографический список

1. Бранец В.И., Шимлевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.
3. Гладкий В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата. М.: Наука, 1969. 496 с.

УДК 629.84.063.017.1

С.А.Петренко, Ю.Г.Кирсанов

#### ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО БЛОКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ "ЭНЕРГИЯ"

Изложены основные проблемы обеспечения надежности центрального блока ракеты-носителя "Энергия" и показаны пути их решения на этапах изготовления, экспериментальной отработки и эксплуатации.

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

Создание сверхтяжелой универсальной ракеты-носителя (РН) "Энергия", способной выводить на околоземную орбиту полезные нагрузки массой более 100 т, является новым этапом в развитии ракетно-космической техники.

Актуальность разработки РН такого класса определяется реализацией перспективных задач освоения космоса:

- развертывание тяжелых орбитальных станций и комплексов космического производства на орбите искусственных спутников Земли (ИСЗ);
- создание геостационарных платформ, обеспечивающих глобальную связь с помощью мощных ретрансляторов;
- осуществление запуска уникальных крупногабаритных объектов (крупного оптического телескопа) на орбиту ИСЗ;
- проведение летной отработки образцов космической техники с возвращением их на Землю;
- проведение аварийно-спасательных и профилактических работ с космическими объектами на низких околоземных орбитах;
- введение и оборка на околоземной орбите пилотируемого комплекса для межпланетных перелетов.

Особенностью РН "Энергия", как и других ракет-носителей нового поколения, является применение в них топлива, дающего экологически чистые продукты сгорания. При этом из-за отсутствия в продуктах сгорания хлористого водорода и окиси алюминия РН "Энергия" является более экологически безопасной, чем МТКК "Space Shuttle."

РН "Энергия" может являться базовой в целом семействе ракет-носителей грузоподъемностью от 35 до 200 т. Гибкость транспортной системы, основой которой является РН "Энергия", достигается за счет использования в различном сочетании как имеющихся, уже отработанных блоков, так и введением в "пакет" новых модулей. Изменение грузоподъемности РН может достигаться путем уменьшения или увеличения количества боковых блоков и использования различных модификаций центрального блока.

За счет введения в пакет нового модуля - грузового транспортного контейнера (ГТК) вместо орбитального корабля - многоразовая система "Энергия-Буран" трансформируется в грузовую транспортную систему. При этом РН "Энергия" остается практически неизменной. Такое построение системы делает ее не только более универсальной в сравнении с МТКК "Space Shuttle" но и потенциально более надежной за счет независимой отработки блоков, входящих в систему.

Создание "Энергии", относящейся к РН нового поколения, сопряжено

с решением комплекса принципиально новых задач, непосредственно влияющих на надежность изделия. В то же время разработка такой РИ была бы невозможна без научно-технического задела, созданного во многих отраслях промышленности, вузах, отраслевых и академических институтах.

Проблемы, стоящие в процессе разработки центрального блока РИ "Энергия", решение которых определяет ее надежность, можно обобщенно представить следующим образом:

пожаровзрывоопасность, связанная с применением водорода как компонента топлива;

обеспечение безотказной работы (в том числе герметичности) элементов пневмогидравлической системы (ПГС) (арматуры и трубопроводов), использующих в качестве рабочего тела криогенные компоненты;

обеспечение заданных параметров компонентов топлива с учетом процессов тепломассообмена в баках и тепломассопередачи;

обнаружение и индикация паров водорода в различных средах;

обеспечение безотказной работы шаров-баллонов, погруженных в бак горючего;

работоспособность разнородных материалов в сварных соединениях при криогенных температурах;

работоспособность конструкции баков и отсеков при криогенных температурах, в том числе при наличии дефектов на поверхности оболочек;

физико-химическое взаимодействие на границе "газ-жидкость" при воздействии виброударных нагрузок;

создание новых конструкционных материалов, работающих в высоконагруженных узлах (в том числе в условиях низких температур);

создание эффективной теплоизоляции и теплозащиты;

создание эффективных неразрушающих методов контроля;

создание испытательных стендов, обеспечивающих проведение испытаний в условиях, близких к натурным;

создание эффективного метода обмотки баков и трубопроводов от коррозии.

Одной из главных проблем создания водородно-водородного блока РИ "Энергия" являлось обеспечение высокого массового совершенства. Достижение заданных массовых характеристик стало возможным благодаря совершенной конструктивно-силовой схеме и применению уникального оборудования, обеспечившего высокую точность изготовления и качества сварки.

Хорошие массовые характеристики в сочетании с эффективной и мощной двигательной установкой и использованием переохлажденных компонентов топлива позволили обеспечить высокую энерговооруженность РИ.

Благодаря этому была реализована возможность выполнения задачи пуска при одном отказавшем двигателе или, в крайнем случае, спасения полезной нагрузки. Высокая энерговооруженность и, как следствие этого, некоторый "избыток" компонентов топлива обеспечили запуск двигательной установки второй ступени (кислородно-водородного блока) на стартовом комплексе, что существенно повысило вероятность безотказной работы блока.

Новой при создании РН такого класса являлась проблема транспортировки блоков к месту проведения испытаний и стартовому комплексу. Решение этой проблемы было найдено в использовании авиационных средств транспортирования. Использование самолета-транспортировщика позволило осуществлять перевозки крупных модулей блока, а в перспективе возможна перевозка и всего изделия в целом. Сборка и испытания полублоков изделия на заводе-изготовителе, а не на полигоне, обеспечили их более высокое качество, а значит и надежность.

Решение всего комплекса перечисленных проблем начинается на самой ранней стадии создания изделия. Важнейшая роль в этом отводится комплексной программе экспериментальной отработки (КПОС), разработка которой начинается на этапе эскизного проектирования.

КПОС разрабатывается параллельно с программой обеспечения надежности на основе анализа влияния критичных элементов на надежность изделия. КПОС непосредственно увязывается с перечнем критичных элементов, перечнем нештатных ситуаций и программой обеспечения надежности. Все вместе они дают полную картину функционирования изделия с точки зрения надежности. Структурная схема надежности, входящая в программу обеспечения надежности, показывает укрупненно основные критичные элементы и их влияние на надежность изделия в целом.

На основе структурной схемы надежности и показателей надежности изделия, заданных в техническом задании, до начала разработки конструкции проводится нормирование показателей надежности для отдельных элементов изделия. Нормируемые показатели в дальнейшем обеспечиваются конструктивными решениями и подтверждаются при экспериментальной отработке.

При создании кислородно-водородного блока РН "Энергия" экспериментальная отработка проводилась в три этапа: этап НИР; автономная отработка систем, узлов и агрегатов блока; комплексная отработка блока.

На этапе НИР были проведены следующие работы:

исследованы свойства конструкционных материалов, включая материалы теплоизоляции и теплозащиты;

отработаны и усовершенствованы технологии;  
исследованы гидродинамические характеристики топливных баков;  
исследованы внутрибаковые процессы на мелкомасштабных моделях;  
разработаны методики проверки герметичности ЦС в заоложенном состоянии;

разработаны методики по пожаровзрывобезопасности;

исследованы газодинамические характеристики при старте изделия на действующей модели в масштабе М1:10;

исследованы аэрогазодинамические и тепловые характеристики на мелкомасштабных моделях;

Исследованы динамические характеристики на конструктивноподобных и динамических моделях в масштабе М1:5 и М1:10.

Проведенные НИР позволили выбрать материалы, удовлетворяющие необходимым требованиям, разработать технологии, принять принципиальные схемные решения и разработать методики, обеспечивающие выполнение требований надежности.

При проведении автономной отработки были определены границы работоспособности опытных изделий, достигнуты и подтверждены характеристики и требования к системам, агрегатам и узлам, заданные в технических заданиях (в том числе требования по надежности во всем диапазоне эксплуатационных условий и факторов, включая технологию серийного изготовления, сборки и испытаний).

При проведении экспериментальной отработки одним из основных реализованных принципов являлся иерархический. Суть его заключалась в том, что испытания вышестоящего уровня не начинались, как правило, без анализа результатов испытаний нижестоящего уровня. При этом в процессе планирования испытаний допускалось применение "лестничного" принципа последовательности отработочных испытаний. Суть этого метода заключалась в проведении испытаний, находящихся на разных иерархических уровнях не в строгой последовательности, а с некоторым наложением по времени.

При этом испытания высокого уровня начинались до полного окончания испытаний предшествующего уровня, но на тех режимах (сочетания факторов, условий и т.д.), которые уже были проведены на более низком уровне. Использование указанных принципов позволило достигнуть заданных требований надежности и подтвердить их при существенном сокращении сроков отработки.

Автономная отработка включала следующие типовые испытания: макетирование; конструкторско-доводочные испытания; зачетные прочностные;

специальные (климатические, транспортировочные, ресурсные и т.д.); испытания на комплексном стенде.

Подтверждение заданного уровня надежности при испытаниях в условиях, близких к штатным, требует настолько большого количества испытаний, что выполнение этой задачи становится нереальным из-за стоимости и сроков выполнения работ. Поэтому практически все системы, агрегаты и узлы кислородно-водородного блока РН "Энергия" проходили "утяжеленные" испытания, что позволило подтвердить заданную надежность при минимальных затратах и в поставленные сроки.

Автономную отработку кислородно-водородного блока РН "Энергия" проходили следующие системы, агрегаты и узлы:

- маршевый двигатель с элементами системы аварийной защиты;
- автоматика и другие элементы, входящие в ПС блока (бортовые баллоны, коллекторы, трубопроводы, сильфоны и демпферы, элементы распределителей газов и наддува и др.), узлы и механизмы разделения конструкции;

- рулевые приводы качания маршевого двигателя с системой гидротоптания;

- система бортового электропитания;
- измерительная аппаратура внутрибаковых систем (датчики, кабели, преобразующая аппаратура);

- системы радиоконтроля траектории;

- антенно-дидерные устройства;

- комплекс аппаратуры системы аварийной защиты;

- бортовые приборы автоматики и датчики системы пожаровзрывопре-  
дупреждения.

Проведение автономных испытаний указанных систем, узлов и агрегатов осуществлялось по отдельным программам экспериментальной отработки и программам конструкторско-доводочных испытаний (КДИ).

В соответствии с перечнем программ КДИ автономную отработку прошли около 200 наименований узлов, механизмов, включая арматуру.

Так, для монтажных сварных стыков была разработана программа испытаний для подтверждения их работоспособности, которая предусматривала проведение экспериментальных работ на специальных образцах сварных монтажных стыков трубопроводов из сталей ЭП-810 и ДИ-52 при воздействии вибрационных, ударных, квазистатических нагрузок и внутреннего давления в условиях нормальных, криогенных и высоких температур. Предусматривались и были проведены испытания с целью определения максимально допустимых нагрузок на стык и относительного предела

прочности сварного соединения. Нагружение проводилось при постоянных максимальных эксплуатационных нагрузках (внутреннем давлении, осевой силе и изгибающем моменте) одновременно с нагружением расчетными (нормативными) виброн нагрузками. Количество типоразмеров трубопроводов и количество каждого типоразмера было принято минимально необходимым в соответствии с отраслевой нормативно-технической документацией.

Были проведены испытания на воздействие ударных нагрузок, по завершении которых были проведены испытания трубопроводов на прочность и герметичность, а затем - на имитацию транспортирования. По завершении испытаний на имитацию транспортирования были вновь проведены испытания на прочность и герметичность, а затем испытания до разрушения гидравлическим давлением. Конструкция монтажных стыков дорабатывалась по результатам испытаний.

Проведенный объем наземной экспериментальной отработки монтажных стыков трубопроводов подтвердил высокую степень надежности принятых при проектировании решений - правильность выбора применяемых материалов, конструктивного исполнения монтажных стыков.

В результате предварительной отработки монтажных стыков и других основных элементов трубопроводов испытания, в том числе ДКИ, прошли без разрушения элементов ПГС.

На первом этапе прочностной отработки проводились экспериментальные работы в подтверждение принятых механических характеристик материала, конструктивных особенностей сборок и принятых критериев прочности.

По отдельным техническим заданиям было проведено 14 видов испытаний, среди них:

испытания образцов основных полуфабрикатов из сплава ИЗОТ;

испытания типовых сварных соединений;

статические испытания баковых и карданных панелей натурной конструкции;

статические испытания экспериментальных узлов;

испытания образцов, армированных борнитридом.

Второй этап включал в себя прочностные испытания отдельных узлов при проведении их автономной отработки.

На третьем этапе проводились следующие работы:

зачетные испытания в подтверждение прочности транспортируемых авиагрузов (27 сборок);

зачетные испытания в подтверждение прочности изделия, предназначенного для макетирования "холодных" и динамических испытаний;

зачетные испытания в подтверждение прочности изделия, предназначенного для "холодных" и огневых испытаний;

зачетные испытания в подтверждение прочности изделия огневых испытаний и экспериментального пуска.

Таким образом, все основные элементы конструкции прошли отработку на прочность как в виде отдельных узлов, так и сборок, что позволило подтвердить правильность конструктивных решений и расчетов.

Проведенная автономная отработка элементов блока позволила довести уровень их надежности до заданного и сделать оценку надежности блока в целом.

Комплексная отработка кислородно-водородного блока РН "Энергия" проводится с целью проверки совместного функционирования всех систем, агрегатов и узлов блока, их взаимодействия, взаимовлияния и стыкуемости в условиях, близких к реальным. Была проведена проверка работоспособности систем и агрегатов блока при имитации нештатных ситуаций. По результатам комплексной отработки была сделана оценка выполнения требований по надежности блока, обеспечения заданного ресурса работы и дан допуск к проведению летно-конструкторских испытаний.

Комплексная отработка включала в себя:

объемное макетирование;

совместные испытания транспортируемых авиатранспортов блока и самолета-транспортировщика;

динамические испытания и механические примерки блока;

"холодные" стендовые испытания блока;

огневые стендовые испытания.

В процессе "холодных" испытаний, проводимых на изделиях, осуществлялась проверка технологического цикла подготовки блока к огневым стендовым испытаниям. В обеспечение надежности блока были проведены следующие работы:

отработаны технологические операции, проводимые перед заправкой штатными компонентами (продувка, вентиляция и т.д.);

отработаны технологии заправки баков штатными компонентами, стоянки и слива топлива;

уточнены параметры, характеризующие основные процессы подготовки блока к огневому запуску (давление и температурное состояние компонентов в баках и расходных магистралях, режимы работы систем подкачки, дренажа, термостатирования и т.д.);

отработаны технологии профилактических операций (выпаривание, отогрев, осушка баков и трубопроводов);



проверены режимы работы системы термостатирования бортовых при-  
боров;

отработаны зарядка и разрядка бортовых баллонов;

проверены характеристики теплоизоляции топливных баков и расход-  
ных магистралей при многократной заправке и длительной стоянке блока  
с заправленными баками;

проверены в комплексе работоспособность штатных бортовых внутри-  
баковых систем, арматуры и качество их автономной отработки;

проверено напряженно-деформированное состояние бака, заправленно-  
го криогенными компонентами;

проведена комплексная отработка циклограммы подготовки блока к  
огневому запуску и др.

Основной целью огневых испытаний являлась проверка работоспособ-  
ности и взаимодействия всех систем и агрегатов в условиях многократ-  
ной подготовки и проведения огневого запуска. При этом на одном из  
изделий испытания проводились с двигателем, отработанным на режимах  
до 70% номинальной тяги.

На изделия, используемом в дальнейшем для летных испытаний, от-  
гневные испытания были проведены с двигателем, отработанным на режимах  
до 100% номинальной тяги. Отработка двигательной установки проводилась  
в течение 5 с, после чего был осуществлен экспериментальный пуск из-  
делия.

При осуществлении огневых испытаний были проведены следующие ра-  
боты:

проверена циклограмма запуска, выхода на режим и выключения дви-  
гательной установки, в том числе при аварийном выключении двигатель-  
ной установки;

подтверждена работоспособность элементов ЭС при штатных расхо-  
дах компонентов;

проверена система управления расходом топлива;

отработана система аварийной защиты;

отработаны в условиях огневого пуска система управления и систе-  
ма измерения;

проверена эффективность средств и мер, обеспечивающих пожаро-  
взрывобезопасность в условиях огневого пуска;

проверена эффективность средств нейтрализации выбросов водорода  
при включении и выключении двигательной установки;

проверена эффективность средств вольного охлаждения стартово-  
пускового устройства и лотка стенда.

По результатам огневых испытаний была подтверждена заданная надежность блока как самостоятельного изделия.

Проведение огневых стендовых испытаний позволило проверить качество "холодных" испытаний и автономной отработки систем, узлов, агрегатов блока и завершить наземные испытания блока.

Надежность блока обеспечивается не только на этапе экспериментальной отработки, но и при изготовлении, а также эксплуатации штатных изделий. Производственно-технологическая надежность блока обеспечивается контрольно-выборочными испытаниями систем, узлов и агрегатов. Все работы по монтажу и испытаниям элементов блока выполнялись в строгом соответствии с цикловыми графиками при периодическом проведении аттестации оборудования, оснастки и исполнителей.

Особенностью кислородно-водородного блока РН "Энергия" является возможность многократного задействования автоматики ПЭС. Это делает возможным на штатном изделии проводить как "холодные", так и огневые испытания в подтверждение его надежности.

Таким образом, возможность многократного задействования автоматики ПЭС и, как следствие, проведение "холодных" и огневых испытаний позволяет без снижения надежности блока модернизировать его конструкцию и проводить доработки по результатам летно-конструкторских испытаний.

Обеспечение заданной надежности блока осуществляется с помощью комплексной системы управления качеством продукции. В рамках этой системы разрабатывается программа повышения качества и надежности изделия, которая, начиная с этапа выпуска КД, предусматривает разработку проектно-схемных, конструкторских и других мероприятий, направленных на совершенствование конструкции и повышение ее надежности.

С целью конструктивного совершенствования проводится анализ результатов испытаний и телеметрической информации, полученной при проведении пусков.

Для оперативного решения вопросов, связанных с обеспечением надежности и качества изделия, на заводе-изготовителе блока и в КБ работает совместная постоянно действующая комиссия по качеству.

Таким образом, комплекс организационно-технических мероприятий и предусматриваемые испытания позволяют обеспечить заданный уровень надежности блока.