

УДК 629.196.3

Канд. техн. наук А.И. Логвиненко

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ РН

Проанализированы основные направления развития пневмогидравлических систем. Рассмотрены методы повышения их работоспособности и надежности.

Проаналізовано основні напрями розвитку пневмогідравлічних систем. Розглянуто методи підвищення їх працездатності і надійності.

Main trends of pneumatic-hydraulic systems are analyzed. Approaches to improvement of their efficiency and reliability are considered.

Одной из важных и ответственных систем ракет-носителей является пневмогидравлическая система подачи компонентов топлива (ПГС) в двигательные установки, представляющая собой многофункциональную систему с большим количеством агрегатов автоматики. Работа системы характеризуется многими сложными физическими процессами. ПГС во многом определяет технический облик, массовые и эксплуатационные характеристики ракетно-космического комплекса, она функционально взаимосвязана с другими системами и подсистемами [1]. Ее разработке с использованием комплексного подхода уделяется тщательное внимание. Разнообразие ПГС обусловлено спецификой каждого нового проекта.

На основании опыта разработки, изготовления и эксплуатации ПГС кратко рассмотрим основные направления их совершенствования.

Это проведение так называемых холодных технологических испытаний (ХТИ) после сборки систем ПГС, например, РН "Зенит": заправки-дренажа топливных баков, зарядки баллонов гелием, управления элементами автоматики, предварительного и основного наддувов топливных баков, захлаживания кислородных расходных магистралей ЖРД, обдувки азотом дренажей топливных баков, газового демпфера, блоков сигнализаторов давления топливных баков.

На специальном пневмостенде, включающем в себя системы управления элементами автоматики ПГС и измерения и ре-

гистрации контролируемых параметров, при испытаниях регистрируются до 20 параметров и более 60 сигналов срабатывания. В цеховых условиях указанные системы автономно подвергаются продувке с замером потерь давления, проверке на степень герметичности и срабатывание отдельных электропневмоклапанов (ЭПК), проверке правильности установки соответствующих жиклеров и состояния проходимости подводных трактов в целом. Накопленная по результатам ХТИ статистика позволяет своевременно выявлять производственные дефекты и неисправности. Так, при проведении некоторых испытаний ПГС был обнаружен перепут подсоединения магистралей, отсутствие подсоединения управляющих магистралей, выход из строя ЭПК системы наддува, завышенные расходы через пакеты жиклеров или отдельные жиклеры, негерметичность отдельных стыков тракта подачи гелия. Большинство из этих неисправностей являлись дефектами операций сборки изделий. Проведение ХТИ позволило существенно повысить надежность изготовления РН.

Те контуры ПГС, которые невозможно проверить в цеховых условиях, подвергаются тщательному предстартовому контролю. Перед стартом РН проводятся комплексные проверки, во время которых с помощью дополнительных технологических элементов (штуцеров, клапанов, измерительной техники) фиксируются параметры, свидетельствующие об уровне работоспособности рассматриваемых подсистем. Благодаря такому комплексному контролю

но-проверочному методу существенно была повышена надежность ПГСП РН "Зенит". Так, например, во время первых пусков по программе "Морской старт" на старте удалось выявить несанкционированное открытие штатного ЭПК, обусловленное воздействием на него электромагнитного поля смежных узлов.

Системы наддува топливных баков занимают важное место в составе ПГСП. Их совершенствование оказывает существенное влияние на характеристики ПГСП в целом.

Так, внедрение генераторных систем наддува (РН на компонентах АТ-НДМГ) на смену газобаллонных существенно упростило эксплуатацию РН, снизило массу ПГСП как минимум в два раза, а их стоимость – в пять раз. Если для наддува баков с АТ температура окислительного газа ~500 °С приближается в настоящее время к максимально допустимой для применяемых в баках материалов, то для восстановительного газа (наддув баков с НДМГ) этот предел значительно выше: 800-1100 °С, когда его газовая постоянная возрастает в 1,5-2,5 раза с одновременным повышением работоспособности газа. Из-за существенного уменьшения доли паров НДМГ в газе наддува в 2-3 раза уменьшается прогрев верхнего слоя горючего. Высокие характеристики таких систем подтверждены многочисленными экспериментальными данными, полученными в наземных и летных условиях.

Для баков с АТ целесообразен поиск методов повышения удельной работоспособности их генераторного газа наддува. Например, применение восстановительного генераторного газа с температурой 800-1100 °С в сочетании с химическими реагентами, которые бы нейтрализовывали или поглощали при этом возможное образование взрывоопасных составляющих. Кроме того, надо научиться рационально использовать диссоциацию паров АТ в баке, сопровождаемую интенсивным выделением тепла.

Совершенствование генераторных систем наддува проводится также за счет уменьшения разбросов параметров генераторного газа (на входе в бак) путем учета их корреляционной зависимости. В целом все это позволяет найти границы и схемы

оптимального применения регулируемых систем наддува [10].

Для наддува баков с жидким кислородом нашли применение исследованные паровые, смесевые и генераторные системы. Для баков горючего (с керосином) используются системы с третьим компонентом, хранящимся на борту в сжиженном или газообразном виде (гелий, азот). Причем на входе в бак этот компонент, как правило, предварительно нагревается в специальном теплообменнике. Такой подход далеко не полностью отвечает современным требованиям, например, из-за конструктивной сложности, незначительности подогрева в теплообменнике (возможности которого ограничены температурой генераторного газа ТНА), сложности проведения автономных испытаний и др. Эти недостатки практически устранены "сверххолодной" системой наддува, в которой газ (гелий) вводится в бак горючего с температурой 50-90 К [3]. Эта система показала высокую эффективность в составе РН "Зенит", обеспечивая (при прочих равных условиях) тот же уровень давления, что и горячая система.

Для наддува бака с керосином перспективно применение генераторных систем. Но основная проблема их внедрения заключается в устранении сажеобразования (в газогенераторе), например, путем соответствующей организации процессов непосредственно в генераторах, а также подавлением этого механизма путем использования различных присадок, широко применяемых для этих целей в смежных областях техники.

Применение генераторных систем для наддува баков ракет-носителей на жидком кислороде и керосине приведет к полному исключению на борту баллонов с газом наддува – существенному упрощению стартового комплекса и обслуживания ракеты.

На внутрибаковые процессы существенное влияние оказывает конструкция устройств ввода газа наддува в бак (так называемых распылителей). Опыт показывает, что более 50 % объема экспериментальной отработки посвящено выбору конструкции распылителей. Из-за сложности внутрибаковых процессов до сих пор не получено приемлемого решения этой задачи. "Радиальный" тип распылителей (ввод газа пер-

пендикулярно продольной оси бака) дает значительную температурную стратификацию газа наддува (с температурой более 300 °С) по высоте бака, что может вызвать недопустимый нагрев конструкции бака. Этот тип распылителей широко применяется для наддува баков с малым удлинением верхних ступеней и космических аппаратов. Распылители "осевого" типа (ввод газа параллельно продольной оси бака) способствуют интенсивному теплообмену по объему бака с образованием дальноточности струи, соизмеримой с высотой бака, когда скорость вводимого газа составляет от нескольких десятков до сотен метров в секунду.

Эти распылители успешно применяются в ряде отечественных ракет-носителей с высококипящими компонентами топлива даже при высокотемпературном (до 1100 °С) газе наддува, обеспечивая при этом приемлемые прогревы верхних днищ баков и компонентов топлива. Высокую эффективность они показали и в системах с жидким кислородом. В зависимости от конкретных условий такие распылители уменьшают расход паров кислорода (гелия) для поддержания требуемого давления в баке по сравнению с "радиальными" распылителями на 5-20 %.

Задача замены однорежимных распылителей многорежимными, обеспечивающими плавное регулирование температуры и расхода газа, скорости и направления струи за счет изменения ее формы (от радиально-вверной до осевой), остается актуальной. По мере опускания уровня топлива в баке направление вводимого газа наддува изменяется на осевое. Скорость газа возрастает. И за счет его перемешивания существенно уменьшаются прогревы верхней части бака при увеличении среднemasсовой температуры газа наддува.

Переключение распылителей с одного режима работы на другой можно осуществлять при помощи:

- подачи команды от СУ в заданные моменты времени полета;
- теплового воздействия от горячего газа наддува;
- газодинамических сил или воздействия кинетической энергии потока газа;

- воздействия перегрузки или вибрационно-динамических сил;
- изменения уровня компонента топлива в баке;
- комбинированного сочетания указанных выше и других эффектов.

Таким образом, на современном этапе наиболее оптимальными являются многорежимные распылители, сочетающие в себе достоинства как осевых, так и радиальных. Их применение позволит улучшить параметры системы наддува, упростить и уменьшить объем экспериментальной отработки систем питания.

Одной из проблем криогенных, а в ряде случаев и высококипящих компонентов топлива является уменьшение последствий их температурной стратификации в баках, возникающей от аэродинамических тепловых потоков, горячего газа наддува и двигательной установки. Очевидно, целесообразно выравнивать температурный профиль топлива в баке при помощи так называемых дестратификаторов, принудительно перемешивающих жидкий компонент в баке. По принципу действия их можно подразделить на газовые (барботажные), насосные (жидкостные) и механические.

Барботажные системы нашли широкое применение в различных конструкциях. При работе жидкостных дестратификаторов компонент, отбираемый за ТНА, вводится в районе нижнего днища бака струей, направленной вверх, к свободной поверхности жидкости, параллельно оси бака. Возможно также применение диафрагменного (пассивного) дестратификатора в виде поперечной перегородки с центральными отверстиями, установленной в баке ниже уровня прогретого слоя компонента [2]. Интересно отметить, что на РН "Циклон", "Зенит" и "Днепр" применен весьма эффективный способ дестратификации топлива в баках [4] путем динамического воздействия, получаемого последовательным выключением сначала маршевой, а затем (через некоторый промежуток времени) рулевой двигательной установки ступени.

В общем случае для каждого конкретного бака с учетом определенных рабочих условий и использованием сопутствующих физических эффектов (вибрации, колеба-

ний, перегрузки, акустики, вихревых колец и т.п., что можно использовать и для работы распылителей) надо выбрать рациональную систему дестратификации, которая была бы минимальной по массе и габаритам, обладала максимальной интенсивностью перемешивания и была бы удобной в эксплуатации.

Теория моделирования параметров систем наддува топливных баков в настоящее время разработана еще недостаточно [5], в отдельных работах [6] затронуты лишь частные вопросы, и она находится в стадии развития. Для системы наддува одного из баков с жидким кислородом было применено приближенное моделирование исходя из требования равенства давления газа (и его скорости изменения) в натурном и модельном баках по времени работы системы наддува. Для конкретных условий были определены режимы испытаний и параметры модели.

Одной из эффективных мер борьбы с космическим мусором при помощи ПГСП служит пассивация отработавших верхних ступеней РН в виде проведения комплекса различных мероприятий. Так, например, на РН "Зенит" была установлена система программированного сброса остатков жидкого кислорода и давления газа наддува из бака окислителя 2-й ступени, проведена минимизация остатков компонентов топлива, а также выбрано благоприятное время ("окно") пуска и необходимая траектория полета (с уменьшенной солнечной освещенностью). Их эффективность подтверждена успешными пусками РН.

В случае применения самовоспламеняющихся компонентов топлива с целью получения дополнительного источника энергии можно организовать самоуправляемое дожигание компонентов топлива в специальной камере или непосредственно в одном из баков. Такой рациональный вариант весьма перспективен и нашел практическое применение, например, в химических системах предварительного наддува топливных баков и при работе газореактивных систем отделения объекта или разделения ступеней [7, 8].

В заключение следует отметить, что ПГСП – это неисчерпаемый источник луч-

шения и совершенствования эксплуатационных и энергомассовых характеристик РН [9]. Не останавливаясь на таких важных направлениях ее развития, как автоматизация выполнения предпусковых операций, резервирование срабатывания элементов автоматики, разработка новых, более совершенных элементов автоматики, в статье кратко отмечены не менее важные и актуальные направления, которые внедрены или находятся на этапе реализации, либо требуют дальнейших исследований.

Список использованной литературы

1. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет. – М.: Машиностроение, 1976.
2. Козлов А.А., Новиков В.Н., Соловьев Е.В. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок. – М.: Машиностроение, 1988.
3. Пат. 51806 Украины. Способ наддува топливного бака ракеты/ Шевченко Б.А., Митилов Ю.А., Логвиненко А.И. – Оpubл. 15.03.2002.
4. Пат. 72330 Украины. Способ выработки компонентов топлива в двигательной установке жидкостной ракеты/ Иваницкий Г.М., Кубанов С.Н., Логвиненко А.И., Юшин Г.И. – Оpubл. 15.02.2005.
5. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. – М.: Наука, 1982.
6. Эйгенсон Л.С. Моделирование. – М.: Сов. наука, 1952.
7. Логвиненко А.И. Тенденции развития систем наддува топливных баков РН// Тез. докл. Межд. астронавт. конгр. IAC-05-S4.1.10, IAC-56, Фукуоки, Япония, окт. 2005.
8. Мащенко А.Н., Логвиненко А.И. Пассивация топливных систем верхних ступеней РН – эффективное средство борьбы с космическим мусором// Тез. докл. Межд. астронавт. конгр. IAA A.6.3, IAC-58, Хайдерабад, Индия, окт. 2007.
9. Логвиненко А.И. Основные направления совершенствования ПГС современных РН// Тез. докл. Межд. астронавт. конгр. IAA. S4.1 IAC-63, Неаполь, Италия, окт. 2012.
10. Logvinenko A. Gas-generation pressurization system experimental development method of the LV propellant tanks// Acta J. Astronautica. – 2009. – AA3161. – №64. – P. 84–87.

Статья поступила 20.01.2014