

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ «СОЮЗ-2» В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Я. Андриенко, Е.И. Тропова, А.И. Чадаев

Предложены принципы совершенствования управления расходом топлива ракеты-носителя «Союз-2», обеспечивающие повышение экологичности ее эксплуатации посредством снижения остатка экологически неблагоприятного компонента топлива в ее баках.

Ключевые слова: управление расходом топлива, экологичность эксплуатации, снижение остатков горючего.

ВВЕДЕНИЕ

Ракета-носитель «Союз», на основе модернизации которой создается РН «Союз-2», считается в ряду российских РН («Космос», «Циклон», «Днепр», «Протон») наиболее благополучной по экологичности эксплуатации, главным образом, в силу двух факторов:

— на РН «Союз» не применяются токсичные компоненты топлива,

— по совокупности эксплуатационных показателей (средней частоте успешных пусков, числу продолжительных серий безаварийных пусков) РН «Союз» оказалась наиболее надежным в мире одноразовым средством выведения на орбиту; следовательно, экологический ущерб от аварийных запусков РН был минимальным.

Однако достигнутый уровень экологичности эксплуатации при переходе от РН «Союз» к «Союз-2», по-видимому, будет недостаточным: в XXI веке требования по экологичности РН несомненно ужесточатся (в частности, рамками нормативно-правового обеспечения ракетно-космической деятельности).

Ожидаемое повышение интенсивности запусков ракет-носителей с российского космодрома Плесецк приведет к возрастанию нагрузок на слабо самовосстанавливаемую природную среду русского Севера: в условиях Севера один из компонентов топлива РН «Союз-2» — керосин — становится экологически неблагоприятным.

Поэтому возникает проблема снижения остатков *горючего* в баках I и II ступеней РН «Союз-2», прежде всего:

— на отработавших боковых блоках ракет-носителей, запускаемых (с космодрома Плесецк) в северо-восточном и северном направлениях при выведении полезных грузов на орбиты наклонением $i \in (67; 98,7)^\circ$,

— на отработавших центральных блоках ракет-носителей, запускаемых в северо-восточном направлении при выведении полезных грузов на орбиты наклонением $i \in (67; 75)^\circ$.

Далее рассматриваются некоторые возможности решения этой проблемы.

Принятые сокращения:

ББ — боковые блоки;
БПВС — блок прогнозирования момента времени и кажущейся скорости при выработке топлива II ступени;
ПВ — полная выработка;
ПМО — программно-математическое обеспечение;
РКС — регулирование кажущейся скорости;
РН — ракета-носитель;
СВОГ — система временного регулирования опорожнения бака горючего;
СОБ — система внутриблочного регулирования опорожнения баков;
СУРТ — система управления расходом топлива;
СУРТ — СПВГ, в которой реализован принцип полной выработки горючего;
ЦБ — центральный блок;
ч. э. — чувствительный элемент.



1. ПРИНЦИП ПОЛНОЙ ВЫРАБОТКИ ОДНОГО КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА

В традиционных, широко применяемых в отечественной ракетно-космической технике, системах внутриблочного регулирования опорожнения баков непосредственная цель регулирования состоит в синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего данного ракетного блока, а точнее, синхронизации израсходования рабочих запасов компонентов топлива. В результате такой синхронизации снижается разброс остатка каждого из компонентов топлива после выключения двигателя, что позволяет уменьшить гарантийный запас и окислителя, и горючего, тем самым повысить грузоподъемность РН [1].

Известно, что дальнейшее снижение разброса остатков компонентов топлива (а, следовательно, и гарантийных запасов) может быть достигнуто посредством реализации, так называемой полной выработки топлива — выключением двигателя ступени в прогнозируемый (по информации с датчиков СОБ) момент времени израсходования рабочих запасов топлива. Однако при этом возникает разброс в конечном значении кажущейся скорости ступени, который приходится компенсировать дополнительным расходом топлива на последующих (или последней) ступенях для обеспечения заданных параметров целевой орбиты. Поэтому энергетическая эффективность (в смысле повышения грузоподъемности) полной выработки топлива невысока (по сравнению с эффективностью применения СОБ), но остается существенным эффектом сокращения загрязняющих экосферу остатков топлива в отработавших блоках.

К сожалению, реализация полной выработки топлива на I ступени РН «Союз-2» недопустима из-за практической невозможности обеспечения (посредством управления углом тангажа РН) при ПВ необходимой по техническому заданию точности падения отработавших боковых блоков (ББ) в заданные районы — т. е. двигатели ББ должны выключаться по функционалу от траекторных параметров РН.

Существует, однако, техническая возможность снижения остатков горючего в ББ при сохранении неизменным принятого на РН «Союз-2» способа выключения двигателей (по «функционалу») — возможность, реализуемая на основе принципа полной выработки *одного* компонента топлива.

Согласно этому принципу, целью внутриблочного регулирования опорожнения баков, осуществляемого посредством управляемого изменения соотношения расходов компонентов топлива, вместо традиционной синхронизации израсходования рабочих запасов окислителя и горючего становится

синхронизация момента израсходования рабочего запаса одного из компонентов (в данном случае — горючего) с моментом достижения траекторным функционалом заданного конечного его значения. И тогда обеспечивается выработка всего запаса горючего в момент выключения двигателей ступени «по функционалу». В дальнейшем рассмотрении под «функционалом» будем понимать текущее значение продольной составляющей кажущейся скорости РН (сокращенно: кажущаяся скорость РН).

В соответствии с устанавливаемой целью регулирования в качестве текущих значений регулируемой координаты на каждом боковом блоке вместо рассогласований объемов компонентов топлива (измеряемых в виде временных отклонений моментов t_{oi} срабатывания i -го, $i = 1, 2, \dots, I$, чувствительного элемента уровнемера окислителя от моментов t_{ti} срабатывания ч. э. уровнемера горючего) принимаются временные отклонения моментов t_{wi} достижения функционалом (кажущейся скоростью) заданных пороговых значений W_i от моментов t_{ti} срабатывания ч. э. уровнемера горючего.

Пороговые значения W_i кажущейся скорости задаются из условия, что при невозмущенных полете РН и ходе опорожнения баков и при начальной выставке дросселя в положение, обеспечивающее полную выработку горючего в номинальный момент времени выключения двигателей ступени, сигналы t_{wi} и t_{ti} поступают синхронно: $t_{wi} = t_{ti}$. И тогда для формирования и реализации управляющих сигналов внутриблочного регулирования опорожнения баков с полной выработкой горючего могут использоваться те же самые алгоритмы внутриблочного регулирования опорожнения баков с заменой t_{oi} на t_{wi} ; принцип и алгоритмы [1, 2 и др.] межблочной синхронизации опорожнения баков окислителя в системе управления расходом топлива остаются неизменными.

Традиционная СУРТ и СУРТ, в которой реализован принцип полной выработки горючего эквивалентны в смысле выигрыша в энергетике РН (от их применения) — но только в идеализированном случае предельно высокой терминальной точности регулирования: тогда при переходе от одной системы к другой масса суммарных (окислителя и горючего) гарантийных запасов топлива не изменяется, хотя масса гарантийного запаса горючего уменьшается («в идеале») до нуля. В остальных же случаях более экологичная в эксплуатации СПВГ несколько уступает по энергетической эффективности обычной СУРТ.

Нетрудно заметить, что для реализации принципа полной выработки горючего в представлен-

ном здесь виде необходимо несколько расширить функции системы управления РН «Союз-2» для формирования в ней — в соответствии с программой полета — сигналов t_{wi} , подаваемых на вход СУРТ.

Возможность реализации в бортовом программно-математическом обеспечении системы управления расходом топлива РН «Союз-2» приближенного воспроизведения принципа полной выработки горючего доставляет наличие системы регулирования кажущейся скорости I ступени. При идеализированно высокой точности исполнения системой РКС заданной временной программы набора кажущейся скорости выключение двигателей ББ («по функционалу») происходит в практически неизменный момент времени T_f . А это означает, что каждый внутриблочный регулятор опорожнения баков бокового блока при реализации принципа полной выработки горючего превращается в так называемую систему временного регулирования опорожнения [1, 2] бака горючего в заданный момент времени T_f .

В реальных же условиях действия системы РКС возникает некоторый разброс момента времени выключения двигателей боковых блоков относительно заданного терминального момента T_f , что несколько ухудшает точность выработки горючего при работе СВОГ.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛНОЙ ВЫРАБОТКИ ГОРЮЧЕГО БОКОВЫХ БЛОКОВ

Сколь-нибудь обоснованный анализ возможностей повышения экологичности эксплуатации РН «Союз-2» при реализации полной выработки горючего ББ может быть проведен только на основе оценивания всех последствий этой реализации — как в экологическом, так и энергетическом отношениях: стало уже почти закономерностью, что любое повышение экологичности техносферы

происходит за счет каких-либо затрат — либо экономических, либо энергетических.

Такое оценивание было выполнено посредством статистического моделирования совместной работы СУРТ и системы РКС I ступени РН «Союз-2» для двух вариантов (см. таблицу):

— штатный вариант (вариант 1) управления выработкой топлива I ступени: регулирование кажущейся скорости, межблочная синхронизация расхода топлива боковых и центрального блоков, внутриблочное регулирование опорожнения баков для синхронизации расхода окислителя и горючего на каждом блоке, выключение двигателей в момент T_f достижения заданного значения траекторного функционала;

— доработанный вариант (вариант 2) управления выработкой топлива I ступени, в котором предусматривается корректировка штатного бортового ПМО в части трансформации традиционного алгоритма СОБ в алгоритм СВОГ, обеспечивающий (посредством изменения внутриблочного соотношения расходов компонентов топлива) выработку горючего ББ к заданному (единому для всех ББ) моменту времени T_f .

Данные двух последних столбцов таблицы характеризуют экологическую эффективность полной выработки горючего (остатки горючего при выключении двигателей ББ) и сопутствующие потери в энергетике носителя (снижение грузоподъемности при выведении полезного груза на низкие орбиты).

Из этих данных следует, что переход на боковых блоках от СОБ к СВОГ позволяет в ~2,4 раза сократить остатки горючего, так что статистически предельное значение массы керосина (в четырех отработавших ББ I ступени), выпадающего на поверхность Земли (или акваторию Белого моря) на дальности ~350 км от Плесецка, уменьшается на ~600 кг. При этом, однако, суммарные (окислителя и горючего) остатки топлива в баках ББ не-

Эффективность реализации различных вариантов управления выработкой топлива

Вариант	Ракетный блок РН «Союз-2»	Вариант управления выработкой топлива	Статистически предельное значение массы m упорядоченного остатка*		Прирост грузоподъемности** РН «Союз-2», кг
			окислителя, кг	горючего, кг	
1	Боковой	Проектный	511	257	—
2		Полная выработка <i>горючего</i> ББ	710	109	-7,6
3	Центральный	Проектный	345	176	—
4		Полная выработка <i>топлива</i> ЦБ	107	98	+24,2

* Приводится большее из двух статистически предельных значений $m \pm 3\sigma$ остатка компонента топлива; упорядочение остатка производится выбором гарантийного запаса компонента из условия, чтобы меньшее статистически предельное значение равнялось остатку незабора в баке (58 кг горючего и 45 кг окислителя на ББ, 55 кг горючего и 54 кг окислителя на ЦБ).

** По сравнению с исходно-проектным вариантом управления выработкой топлива на блоке.



сколько возрастают, что приводит к снижению, правда, весьма незначительному, грузоподъемности РН «Союз-2» (см. вариант 2, последний столбец в таблице).

Возможности дальнейшего улучшения экологичности эксплуатации РН «Союз-2» средствами управления расходом топлива I степени ограничиваются, в основном, наличием конечного нерегулируемого участка опорожнения баков ББ и остатками в них незабора горючего.

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛНОЙ ВЫРАБОТКИ ТОПЛИВА ЦЕНТРАЛЬНОГО БЛОКА

Воспроизведение (по аналогии с ББ) полной выработки *горючего* на центральном блоке РН «Союз-2» априори оказывается нецелесообразным, хотя бы в силу двух причин:

— отсутствия РКС на II ступени РН «Союз-2» и, соответственно, большого объема доработки программно-математического обеспечения, необходимого для реализации полной выработки горючего на ЦБ,

— дальнейшего (относительно варианта 2, см. таблицу) усугубления потерь в грузоподъемности РН, возникающего при реализации полной выработки горючего на ЦБ.

Но главное: на II ступени РН «Союз-2», запускаемой с Плесецка, имеются условия для перехода к полной выработке *топлива* ЦБ, позволяющей повысить не только экологичность эксплуатации РН, но и ее грузоподъемность.

Действительно, уже с начального этапа разработки СУРТ для РН «Союз-2» была предусмотрена возможность управления моментом времени выключения двигателя ЦБ на основе формируемой в СУРТ информации о прогнозируемом моменте времени выработки топлива ЦБ. Для этого в бортовое ПМО был введен программный блок прогнозирования момента времени и кажущейся скорости при выработке топлива II ступени.

Однако позднее, при анализе условий пусков РН «Союз-2» с космодрома Байконур, выявились трудности в обеспечении высокоточного приведения отработавших (с реализацией полной выработки топлива) ЦБ в штатные районы их падения. В порядке разрешения этих трудностей был разработан вариант комбинированной схемы наведения отработавшего ЦБ в заданную точку падения — наведения посредством изменения как траекторных углов РН в конце полета I ступени, так и момента времени выключения двигателя ЦБ. При этом управление выключением двигателя производится с использованием как траекторной информации системы управления, так и прогнозной информации СУРТ (поступающей из БПВС). Эта схема легла в основу штатного варианта управле-

ния выработкой топлива ЦБ, обеспечивающего, в частности, почти двукратное снижение разброса остатков топлива в ЦБ (см. таблицу, вариант 3) по сравнению с остатками топлива ЦБ в базовой РН «Союз».

Для РН «Союз-2», запускаемых с Плесецка в северо-восточном и северном направлениях, проблема приведения отработавших ЦБ в заданные районы тундры и Северного Ледовитого океана, по-видимому, не доставляет трудностей; становится возможной реализация полной выработки топлива ЦБ — посредством корректировки параметрического обеспечения в рамках штатного ПМО. В результате не только улучшается экологичность эксплуатации ЦБ, но и возрастает грузоподъемность РН «Союз-2» на величину, с лихвой перекрывающую потери от реализации полной выработки горючего на ББ (см. таблицу, вариант 4).

Возможности дальнейшего снижения остатков горючего в баке отработавшего ЦБ средствами управления расходом топлива ограничиваются наличием равномерных ошибок измерения в СУРТ и остатком незабора горючего в баке ЦБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация в обеспечение экологической безопасности эксплуатации ракеты-носителя «Союз-2» в бортовом программно-математическом обеспечении СУРТ принципа полной выработки горючего позволит обеспечить предельное снижение остатков горючего I и II ступеней — посредством управления расходом топлива с реализацией принципов полной выработки горючего на боковых блоках и полной выработки топлива (окислителя и горючего) на центральном блоке ракеты-носителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко А.Я., Иванов В.П. Совершенствование энергетических характеристик жидкостных ракет средствами автоматического управления. Ч. I. Физико-технические основы управления расходом жидкого топлива ракет // Проблемы управления. — 2009. — № 1. — С. 66—71.
2. Андриенко А.Я., Иванов В.П. Совершенствование энергетических характеристик жидкостных ракет средствами автоматического управления. Ч. II. Бортовые системы управления расходом топлива // Там же. — № 2. — С. 59—65.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Анатолий Яковлевич Андриенко — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник,

Елена Ивановна Тропова — науч. сотрудник,

Александр Иванович Чадаев — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-88-71, ✉ vladguc@ipu.rssi.ru.