

УДК 629.196.3

Канд. техн. наук А. И. Логвиненко

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ РН ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

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

Розглянуто основні напрямки вдосконалювання пневмогідролічних систем. Проаналізовано деякі методи підвищення їх працездатності та надійності.

The main directions of upgrading the pneumohydraulic systems are considered. Some methods of increasing their operability and reliability are analyzed.

Пневмогидравлическая система подачи компонентов топлива (ПГС) в двигательные установки ракет-носителей – это одна из важных и ответственных систем. ПГС во многом определяет облик, энергетические и эксплуатационные характеристики ракетно-космического комплекса, функционально взаимосвязана со многими другими системами и подсистемами. Ее разработке с учетом комплексного подхода уделяется тщательное внимание, и разнообразие ее конструкций обусловлено спецификой каждого нового проекта. Причем ПГС – это неисчерпаемый источник совершенствования энергомассовых и эксплуатационных характеристик РН. Ниже на примере опыта КБ "Южное" рассмотрены некоторые основные направления совершенствования ПГС.

Общеизвестна важная роль начального газового объема (подушки) в топливных баках, обеспечивающего:

- надежный запуск двигателя (без "провалов" давления);
- сохранение допустимых давлений в баках при хранении и стоянке заправленной РН с учетом изменения температуры;
- избежание заливки жидким топливом клапанов, распылителя системы наддува и других элементов.

В отличие от штатного применения базовой РН при ее коммерческом использовании баки заправляют жидкими компо-

нентами топлива непосредственно перед пуском с возможной стоянкой изделия до 20-30 сут. С учетом длительной стоянки (до нескольких лет) базового изделия в баках необходимо было поддерживать более широкий диапазон изменения объема подушек по сравнению с коммерческим применением РН.

В результате путем оптимального выбора дозы заправки, учета значений статистических температур заправляемых компонентов топлива в соответствующий сезон и фактического объема начальных подушек в баках при коммерческих пусках представляется возможность дозаправить дополнительное топливо в баки, назначив более высокий (относительно штатного) уровень заправки по соответствующему датчику. Характерно, что при этом параметры ПГС (температура топлива, начальный газовый объем бака и давление в нем), условия работы устройств и предохранительных клапанов не выходят за допустимые штатные пределы.

В свою очередь, внедрение дозаправки взаимосвязано с решением таких вопросов, как определение:

- пониженной исходной температуры заправляемого топлива для доработанной технологии заправки;
- допустимого прогрева компонентов в баках за заданный период стоянки;

– допустимых объемов дозаправки компонентов топлива (относительно штатных значений), при которых гарантируется запуск двигателя и работа ряда систем (наддува, контроля уровня заправки и опорожнения баков).

Выбор оптимальных объемов подушек в баках V_i и их зависимость от температуры для нескольких вариантов реперных уровней заправки проводится по формулам

$$V_i = V_w - \frac{G}{\gamma_i} + \Delta V_w;$$

$$V_i = V_{\max} + \Delta V_w - \left[G \left(\frac{1}{\gamma_k} - \frac{1}{\gamma_n} \right) + \Delta V \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_k} - 1 \right) \right].$$

Рассчитывается предельное значение давления в подушке бака за счет изменения температуры по выражению

$$P = P_3 \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \frac{T}{T_3} + \Delta P_s \leq P_{CD},$$

где V_w – объем топливного бака;

$$\Delta V_w = \frac{dV_w}{dt} (t_i - t_3) - \text{приращение объема}$$

бака после нагрева его конструкции (до текущей температуры t_i);

$$\frac{dV_w}{dt} - \text{градиент приращения объема}$$

бака, рассчитываемый для каждой конкретной конструкции и колеблющийся в пределах 1,5-6 л/град;

γ_n, γ_k – начальный и конечный удельный вес компонента для соответствующей (i -той) температуры t_i ;

V_{\max}, V_{\min} – объемы подушки при максимальном уровне дозаправки (для каждого из баков) и после расширения компонента в баке соответственно;

G – масса заправляемого компонента;

ΔV – объем дозаправки (на 1-3 уровня датчика);

P_3 – давление в баке после заправки;

P_{CD} – настройка (аварийного) сигнализатора давления;

ΔP_s – разность давления насыщенных

паров компонента при температурах $T_3(t_3)$ заправки и $T(t_i)$, достигаемая от момента заправки до момента старта РН.

В итоге комбинацией одновременного понижения температуры заправляемых компонентов топлива и увеличением их заправляемых объемов повышается на 5-10 % масса выводимого полезного груза.

Важное место в составе ПГС занимают системы наддува (СН) баков. Так, внедрение более совершенных генераторных систем наддува (РН на компонентах АТ+НДМГ) на смену газобаллонным существенно упростило эксплуатацию РН, снизило массу ПГС как минимум в два раза, а их стоимость – в пять раз (рис. 1).

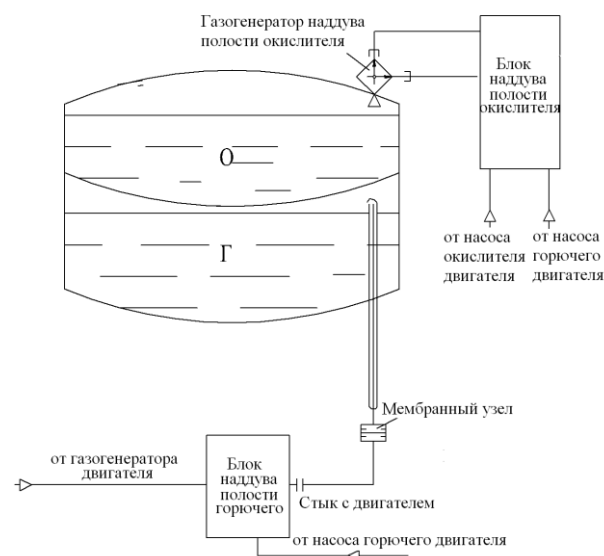


Рис. 1. Схема генераторной полетной системы наддува

Если для окислительного газа температура ~ 500 °С приближается в настоящее время к максимально допустимой для применяемых в баках материалов, то для восстановительного газа 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.

Экспериментально установлена зависимость температуры генераторного газа наддува T_{zz} от расхода \dot{G}_{zz} (рис. 2), обусловленная конструктивными особенностями двигателя и его динамическими свойствами.

Применение корреляции $\dot{G}_{zz} T_{zz} = f(\dot{G}_{\Sigma})$ в качестве критерия выбора режима испытания существенно снизило объем экспериментальной отработки и уменьшило разброс конечной массы газа наддува в баке. В результате применения предложенной методологии для одной из СН был снижен расход газа наддува на 10 % и на ~1 % уменьшены потери удельного импульса тяги ΔI двигателя за счет сокращения потери массы газа наддува через предохранительный клапан топливного бака. Оценка потери ΔI проводилась по формуле

$$\Delta I = \frac{GI}{\tau \dot{G}_{\Sigma}},$$

где G – масса сброшенного через предохранительный клапан газа из бака за время τ работы СН;

I – удельный импульс тяги двигателя при суммарном расходе топлива \dot{G}_{Σ} .

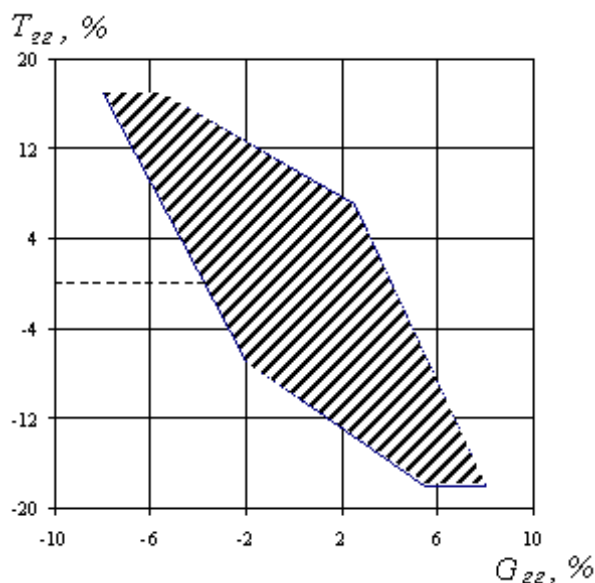


Рис. 2. Корреляционные зависимости расхода и температуры генераторного газа наддува бака окислителя

В целом все это позволило найти границы и схемы оптимального применения регулируемых СН.

Эффективность работы СН существенно зависит от конструкции устройств ввода газа наддува в бак (распылителей). Их радиальный тип (при перпендикулярном к продольной оси бака направлению ввода газа) дает значительную стратификацию газа наддува по высоте бака (до 300 °С), что может вызвать недопустимый нагрев конструкции бака. Этот тип широко применяется для наддува баков верхних ступеней и космических аппаратов, имеющих малое удлинение.

Осевой тип распылителей (ввод газа параллельно продольной оси бака) способствует интенсивному теплообмену по объему бака. Скорость вводимого газа достигает сотни и больше метров в секунду, образуя дальнобойность струи, соизмеримую с высотой бака.

Благодаря этому по сравнению с радиальными распылителями на 5-20 % удалось уменьшить расход газа при прочих равных условиях (рис. 3).

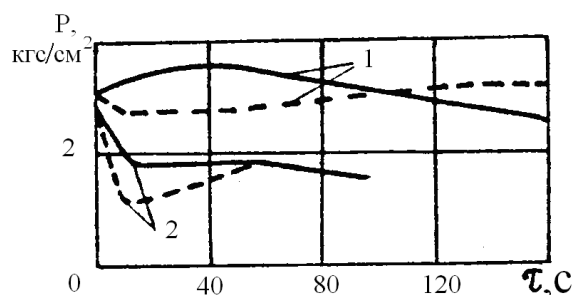


Рис. 3. Изменение давления в баках при использовании осевых и радиальных распылителей:
1 – бак с жидким кислородом;
2 – бак с азотным тетроксидом;
— радиальный распылитель;
— — осевой распылитель

Установлено, что по мере опускания уровня топлива в баке оптимальным режимом работы СН является плавное изменение направления и скорости струи (от радиально-вверной до осевой). За счет интенсивного перемешивания существенно уменьшается прогрев верхней части бака при увеличении среднемассовой температуры газа в баке.

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

- команды от системы управления в

заданный период (рис. 4, а);

– теплового воздействия горячего газа наддува (рис. 4, б);

– газодинамических сил или кинетической энергии потока газа (рис. 4, в);

– воздействия перегрузки или вибрационно-динамических сил (рис. 4, г);

– изменения уровня топлива в баке (рис. 4, д);

– комбинированного сочетания указанных выше (рис. 4, е) и других физических эффектов.

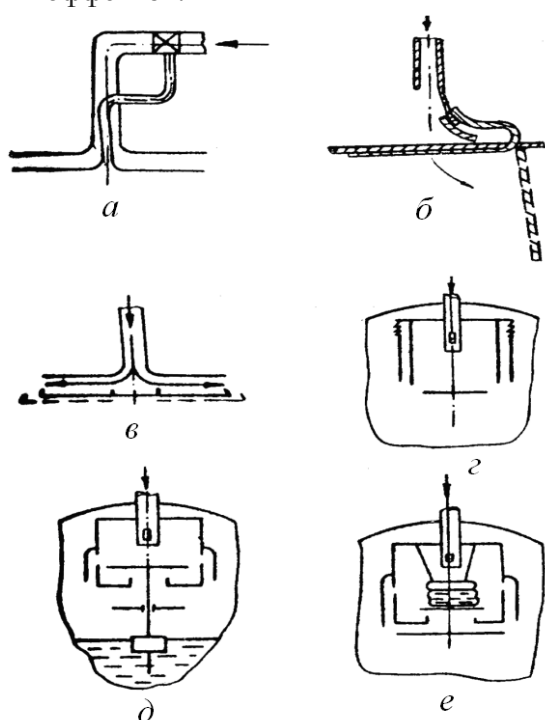
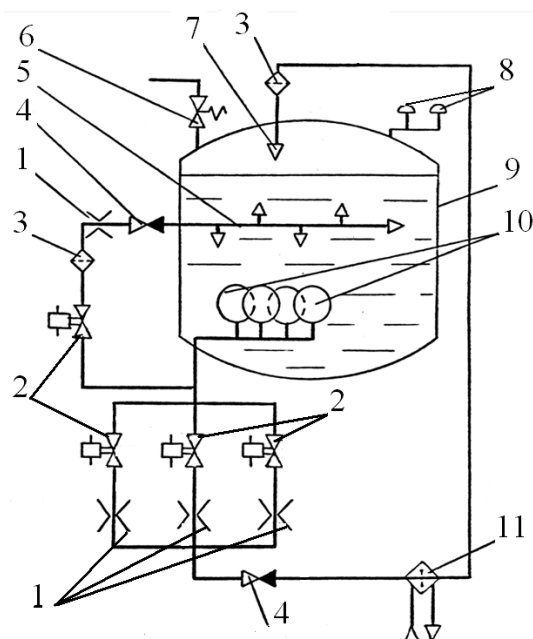


Рис. 4. Схемы распылителей

Среди известных СН различного типа (паровых, смесевых, генераторных и др.) для наддува баков с жидким кислородом (водородом) наиболее рациональными оказались газобаллонные гелиевые системы (рис. 5, б). Их эффективность характеризуется высокой удельной работоспособностью гелия как газа наддува с высокой газовой постоянной, слабой растворимостью в жидкостях и химической инертностью. Кроме того, использование теплообменников для предварительного нагрева гелия перед вводом в бак как минимум в 1,5-2 раза сокращает его массу, необходимую для обеспечения требуемого давления в баке. Применение утепленных в криогенном

компоненте баллонов высокого давления для хранения гелия сокращает их количество по суммарному объему в 2,6 раза. Для баков горючего (с керосином) целесообразно иногда использовать сверххолодную СН, в которой гелий поступает в бак с температурой 50-90 К (рис. 6) [3].

Эта СН показала высокую эффективность в составе РН "Зенит", обеспечивая (при прочих равных условиях) тот же уровень давления, что и горячая. Ее преимуще-



ства заключаются в меньшей массе (из-за отсутствия относительно длинных труб).
Рис. 5. Схема основного наддува бака окислителя:

- 1 – жиклеры; 2 – электропневмоклапаны;
- 3 – фильтры; 4 – обратные клапаны; 5 – коллектор барботажа; 6 – предохранительный клапан;
- 7 – распылитель; 8 – сигнализаторы давления;
- 9 – бак окислителя; 10 – баллоны;
- 11 – теплообменник

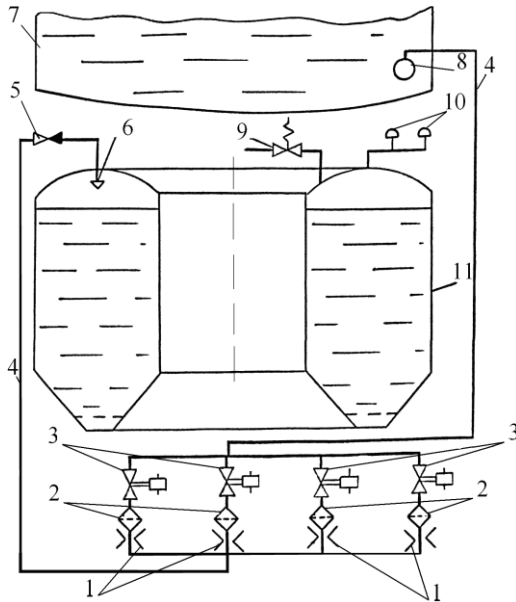


Рис. 6. Система основного наддува бака горючего: 1 – жиклеры; 2 – фильтры; 3 – электропневмоклапаны; 4 – трубопроводы; 5 – обратный клапан; 6 – распылитель; 7 – бак окислителя; 8 – баллон с гелием; 9 – предохранительный клапан; 10 – сигнализаторы давления; 11 – бак горючего

подводящих магистралей с теплообменником) и существенном упрощении автономной отработки.

Одним из путей улучшения работы СН служит применение в баках температурных дестратификаторов (барботажных, жидкостных, механических и др.). За счет принудительного перемешивания жидкого компонента в баке они выравнивают температурный профиль топлива, возникающий от аэродинамики, горячего газа наддува или двигателя. В различных конструкциях нашли широкое применение барботажные системы, например, на баке окислителя 2-й ступени РН "Зенит" (рис. 5). На рис. 7, 8 показано формирование характерных температур компонента топлива по высоте бака и времени полета ступени:

- на входе в двигатель $t_{вх}$;
- свободной поверхности t_3 ;
- среднемассовой по объему бака $t_{ср}$;
- на различных высотах (уровнях) компонента топлива t_i .

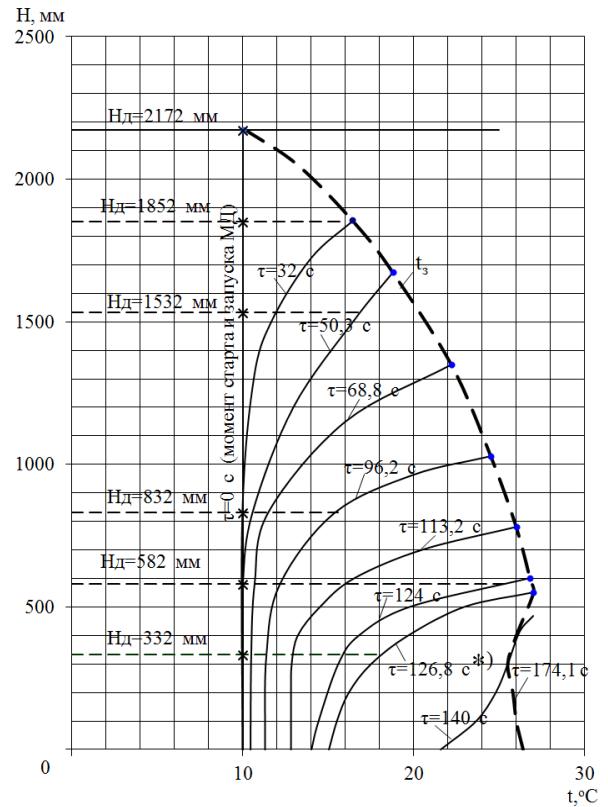


Рис. 7. Изменение профилей температуры горючего по времени полета τ и высоте бака H 2-й ступени: H_d – высота датчиков измерения температуры горючего относительно полюса нижнего днища бака; *) – момент выключения МД

Как видно из этих рисунков, что весьма важно, после выключения маршевого двигателя (МД) температура "зеркала" не повышается, а становится равной среднемассовой температуре на входе в двигатель.

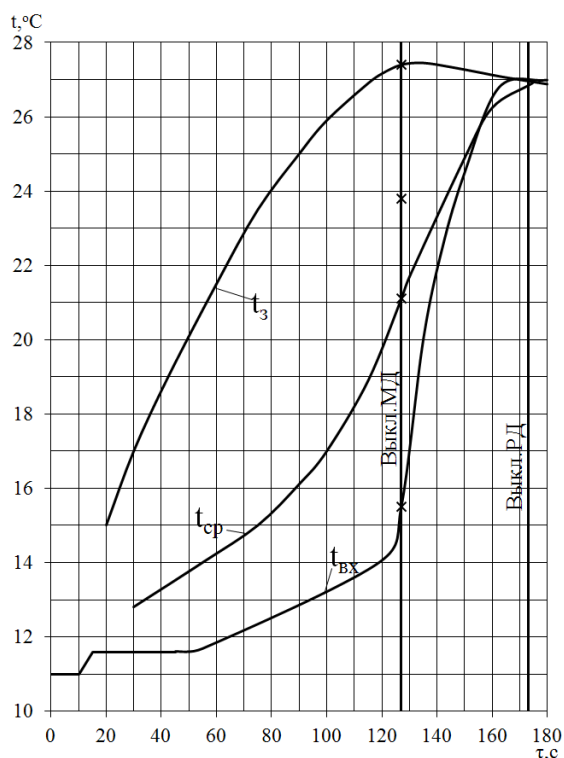


Рис. 8. Изменение температуры горючего на входе в МД и РД при полете: ноль времени соответствует моменту разделения ступеней; *) – момент выключения МД

При использовании данного эффекта возникает возможность увеличить продолжительность участка автономной работы рулевого двигателя (РД) ступени. Тем самым повышается энергетика РН в целом.

Работа ГРС основана на использовании остаточной энергии давления газов наддува баков и остатков топлива. В случае самовоспламеняющихся компонентов топлива (типа АТ+НДМГ) с целью получения дополнительной энергии (импульса тяги) организуется самоуправляемое дожигание их остатков непосредственно в баках. Для этого баки сообщаются специальной магистралью с элементами автоматики (рис. 9).

Разработанные ГРС оказались в 3-5 раз легче систем отделения с твердотопливными двигателями. С точки зрения экологии их внедрение позволяет пассивировать отработавшие ступени, что согласно требованиям международных норм и стандартов вносит заметный вклад в решение проблемы борьбы с космическим мусором. При этом утилизируются неиспользованные остатки компонентов топлива и газа наддува, что способствует повышению энергетиче-

ских характеристик изделий в целом.

Не менее важным остается решение таких вопросов:

- разработка новых, более надежных узлов автоматики и обеспечение их резервирования на РН;
- организация высокотехнологичного изготовления ПГС и обеспечение их экспериментальной отработки.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение предложенных направлений совершенствования ПГС существенно улучшит основные технические характеристики РН в целом.

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, Украина, МПК В64Д 37/00. Способ наддува топливного бака ракеты / Б. А. Шевченко, Ю. А. Митиков, А. И. Логвиненко (Украина). Заявитель и патентообладатель ГКБ "Южное". – № 2000031474; заявл. 15.03.2002; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.
4. Пат. 72330, Украина, МПК F02K 9/44, F02K 11/00. Способ выработки остатка топлива в двигательной установке жидкостной ракеты / Г. М. Иваницкий, С. Н. Кубанов, А. И. Логвиненко, Г. И. Юшин (Украина); заявитель и патентообладатель ГКБ "Южное". – №200210267; заявл. 16.12.2002; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
5. Логвиненко А. И. Тенденции развития систем наддува топливных баков РН // Докл. на Конгрессе МАА, Фукуока, Япония, окт. 2005 г. – Днепропетровск: ГП КБЮ, 2005.
6. Машенко А. Н., Логвиненко А. И. Пассивация топливных систем верхних ступеней РН – эффективное средство борьбы с космическим мусором // Докл. на Конгрессе МАА, Хайдарабад, Индия, окт. 2007 г. – Днепропетровск: ГП КБЮ, 2007.

Статья поступила 11.08.2016