

Ю.А. Митиков

## **СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПУСКОВОГО НАДДУВА БАКОВ С КИСЛОРОДОМ**

*Аннотация. Проведено системное расчетно-экспериментальное исследование системы предпускового наддува цилиндрического бака с жидким кислородом I ступени носителя на трех установках. Получены результаты по прогреву верхнего слоя кислорода, степени восстановления паров, скорости ввода газа в бак. Сформулированы предложения по совершенствованию системы.*

*Ключевые слова: предпусковой наддув, гелий, кислород, прогрев, восстановления паров, скорость ввода.*

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами**

В настоящее время космическая индустрия в мире стремительно развивается. Все больше стран стремятся оказывать услуги по запуску самых разнообразных космических аппаратов. В связи с возрастающей конкуренцией в этой сфере все большее значение приобретают работы системного характера, направленные на совершенствование систем ракет-носителей (РН) в комплексе, в том числе и со стартовой позицией. Именно такой подход сегодня может позволить снизить стоимость выведения в космическое пространство объектов различного назначения.

В качестве окислителя для ЖРД современных РН наибольшее распространение находит (и будет находить в обозримом будущем) жидкий кислород (как правило, в паре с углеводородным горючим типа керосин, далее – РГ-1). Для наддува топливных баков с кислородом во всем мире наибольшее распространение нашел гелий. Гелиевые газобаллонные системы наддува (СН), несмотря на конструктивную сложность и достаточно большую массу [1], на сегодняшний день являются наиболее изученными, в силу чего для проектирования не требуют высокого уровня разработчиков. Учитывая развитую индустрию гелия, построенные космодромы с хранилищами для него, РН,

использующие гелий для наддува, это рабочее тело будет использоваться еще достаточно долго. Хотя ожидать заметного улучшения параметров этих систем и не приходится [2], однако поле для совершенствования, локальных улучшений конструкции СН тут еще достаточно велико.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на что опирается автор**

Предпусковой наддув (ПН) баков, как известно [3], служит для обеспечения потребных давлений компонентов топлива на входе в двигатель при его запуске. Сегодня в ряде случаев выдвигается требование поддержания потребного давления газа в баках от момента запуска ЖРД и до начала движения РН с целью экономии гелия, запасенного на борту в баллонах высокого давления. Результаты проведения ПН являются исходными данными для расчетов и проектирования полетных СН.

ПН баков с кислородом (и с керосином) двигательных установок (ДУ) проводится, как правило, из наземных хранилищ космодромов, гелием с температурой окружающей среды. Потребное давление газа в баках контролируется в большинстве случаев сигнализаторами давления, которые через систему управления отключают (включают) расход гелия на наддув с помощью, в большинстве случаев, ЭПК. При такой постановке задачи проблемных вопросов расчетного характера по предпусковому наддуву бака с РГ-1 нет в силу незначительности температурного напора между гелием в свободном объеме бака и граничными поверхностями и мизерностью испарения горючего с его поверхности.

Иная картина наблюдается при ПН бака с жидким кислородом, который размещается, как правило, в цилиндрических нетеплоизолированных баках. После закрытия дренажного клапана окислителя и прекращения подпитки жидкий кислород в баке начинает прогреваться, растет давление его насыщенных паров. Гелий с температурой окружающей среды, введенный с определенной скоростью в бак с криогенным окислителем, способствует испарению кислорода, отдает тепло в граничные поверхности, прогревает верхний слой кислорода, остывает сам, уменьшая давление газа в свободном объеме бака.

Известные работы на эту тему [3], [4], [5] в силу ряда причин носят сугубо общий несистемный характер, рассматривая, как правило, только термодинамическую проблему наполнения емкости постоянного объема смесью газов известным расходом. Из каких соображений выбирать расход гелия на наддув, с какой скоростью и в каком направлении целесообразно его вводить в бак, сколько времени отводить на ПН, какова скорость восстановления давления насыщенных паров, каков прогрев кислорода – эти вопросы в технической литературе не освещены. А, например, ошибка в 1<sup>0</sup>С при определении температуры кислорода на момент старта РН для такой перспективной системы как самонаддув приводит к увеличению конечной массы газа в баке на ~ 110 кг за счет уменьшения рабочих запасов окислителя.

### **Постановка задачи исследований**

Целью расчетно-экспериментальных исследований является выработка практических рекомендаций по системному определению основных параметров ПН, именно тех, на которые у разработчика есть определенная степень влияния. К таким параметрам следует отнести - время предпускового наддува, потребный расхода гелия на наддув, скорость и направление ввода газа наддува в бак, скорость испарения кислорода и его прогрев за время ПН. С учетом полученных рекомендаций целесообразно системно рассмотреть более простые варианты построения системы ПН с учетом конструкции газобаллонной системы полетного наддува.

### **Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов**

Для изучения рассматриваемого вопроса были при общем подходе проведены три группы испытаний на экспериментальных модельных установках диаметрами 3,0, 2,1 и 1,25 м [6]. Материал всех баков – алюминиевый сплав. Верхнее и нижнее днища всех баков снабжены теплоизоляцией. Установки с меньшими диаметрами имели в своем составе газодинамические имитаторы внешнего теплоподвода.

Последовательность операций при всех испытаниях была одинаковой – заправка установки кипящим кислородом до требуемого уровня, стоянка с открытым дренажным клапаном (ДК) для выравнивания начального температурного профиля кислорода в баке, за-

крытие ДК (начало ПН) и ввод гелия с температурой окружающей среды в бак до настройки сигнализатора требуемого давления. Далее система управления с помощью сигнализатора давления поддерживала потребное давление газа в баке путем включения (отключения) расхода гелия на наддув. Гелий на разных экспериментах вводился в бак с разной скоростью.

Установки были оснащены системой измерения. Измерялись уровень кислорода в баке, давление газа в баке, температура верхнего днища бака, температура газа в баке (в объеме) и над уровнем кислорода с помощью поплавкового устройства. Поплавковое устройство позволяло измерять также температуру верхнего слоя топлива.

Основные результаты экспериментальных исследований сводятся к следующему. При вводе гелия в бак с любой скоростью давление в свободном объеме бака нарастало плавно без скачков. После прекращения наддува давление газа в баке плавно уменьшалось, что приводило к нескольким включениям системы ПН (до десяти).

При вводе гелия вдоль продольной оси бака со звуковой скоростью ( $w \approx 880$  м/с) эффективная работоспособность газа в баке получена на уровне  $(RT)_{эф} = 30410^4$  Дж/кг. С уменьшением скорости ввода газа до  $\sim 30$  м/с работоспособность газа увеличивалась до  $55410^4$  Дж/кг. Аналогичная тенденция прослеживалась и при использовании в качестве рабочего тела наддува азота и паров кислорода.

Объяснить такую зависимость работоспособности газа от скорости его ввода можно интенсивным теплообменом в кратере на поверхности кислорода, который образует струя газа. Есть и второй механизм, который уменьшает работоспособность газа при его вводе в бак с большой скоростью. За счет мощной эжекции струя гелия подсасывает большое количество кислорода из свободного объема бака. При интенсивном внедрении струи в верхний слой топлива (т.н. третий режим [7]) часть паров конденсируется внутри жидкого кислорода, увеличивая прогрев верхнего слоя и уменьшая количество рабочего тела в свободном объеме бака.

Полученные результаты позволяют сформулировать выводы для выбора скорости и направления ввода гелия в бак при ПН (а также и вначале работы системы полетного наддува в виду идентичности условий). Гелий (а равно и кислород с азотом) целесообразно

вводить в бак с незначительной скоростью (по гелию до ~30 м/с). В этом случае направление его ввода не является принципиальным.

За время от закрытия дренажного клапана и до запуска ДУ (~120с) прогрев верхнего слоя кислорода в баке от газа наддува и внешнего теплоподвода достигал 2<sup>0</sup>С. Эта величина реализовалась при минимальной влажности окружающего воздуха и максимальной скорости ветра (максимальном аэродинамическом потоке). Полученные результаты свидетельствуют о том, что время ПН (продолжительность стоянки с закрытым дренажным клапаном) целесообразно максимально сокращать.

Расчетные исследования с помощью полученных экспериментальных данных показывают, что за время с момента закрытия ДК и до запуска двигателя (~100 ч 120с) в свободном объеме бака происходит практически полное восстановление паров кислорода, соответствующее температуре его верхнего слоя.

Расход гелия при ПН целесообразно выбирать из условия достижения за отведенное время потребного давления газа в баке при максимальном начальном свободном объеме газа в баке и минимальном входном давлении теплого гелия на входе в носитель. Желательно учитывать при выборе расхода гелия и поддержания с его помощью постоянного давления газа в свободном объеме бака при работе двигателя на предварительной ступени до выхода на режим системы полетного наддува.

Полученные результаты по прогреву кислорода и, как следствие, восстановлению его паров, ухудшающие характеристики РН, приводят к мысли о проведении ПН бака с кислородом (и с РГ-1) холодным гелием через гелиевые газобаллонные системы полетного наддува. В этом случае из состава пневмогидравлической системы I ступени носителя исключается вся линия теплого гелия, а логика ее работы до старта переносится на систему полетного наддува. Упрощается обслуживание носителя и стартовая позиция. При этом заправку баллонов холодным гелием необходимо продлить до срабатывания контактов подъема РН (аналогично системе теплого гелия). В этом случае, при прочих равных условиях, уменьшится и прогрев верхнего слоя кислорода в баке, и количество паров в начальном объеме бака. До старта носителя произойдет проверка работоспособности системы полетного наддува. И главное, в этом случае можно существенно со-

кратить время ПН, т.к. минимальное давление зарядки баллонов почти в два раза выше минимального входного давления в системе теплого гелия ( $220^{+10} \cdot 10^5$  Па и  $130 \cdot 10^5$  Па соответственно).

#### **Выводы из данного исследования**

Проведенные на трех модельных установках системные исследования параметров системы предпускового наддува гелием баков с жидким кислородом позволили получить необходимые соотношения для основных влияющих факторов. Сформулированы рекомендации о целесообразности ввода гелия в свободный объем бака при предпусковом наддуве (а также первые секунды полетного наддува) с небольшой скоростью (для гелия  $\sim 30$  м/с). Направление его ввода в бак в таком случае не является критичным.

За время с момента закрытия дренажного клапана и до срабатывания контактов подъема (исследованное время  $\sim 120$ с) в нетеплоизолированных баках с кислородом прогрев верхнего слоя окислителя может составить  $2^{\circ}\text{C}$ , а восстановление паров 100%. Эти результаты являются исходными данными для расчета параметров системы полетного наддува. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что время предпускового наддува целесообразно сокращать до минимума.

Предложен способ предпускового наддува баков через систему полетного наддува холодным гелием. Это позволит заметно упростить систему наддува и проверить ее до старта носителя. Для этого логику работы системы предпускового наддува до старта надо сохранить прежнюю, но распространить ее на исполнительные органы системы полетного наддува. В этом случае можно почти в два раза сократить время предпускового наддува в силу того, что минимальное давление зарядки баллонов на практике, как правило, почти в два раза больше минимального давления в системе теплого гелия. При сокращении потребного времени на наддув и переходе на холодный гелий уменьшится прогрев верхнего слоя кислорода и количество испарившегося кислорода в начальный газовый объем.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Митиков Ю.А. Газобаллонные системы наддува и ракеты-носители нового поколения [Текст] / Митиков Ю.А. // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Д.: ГП КБ Южное, 2012. – №1. – С. 179 – 185с.
2. Мітіков Ю.О. Надхолодне польотне наддування баків з вуглеводневим пальним ракет-носіїв [Текст] / Мітіков Ю.О. // Системи озброєння та військова техніка. – Х.: ХУПС, 2012. – №Х. – С. хх – уу.
3. Челомей, В.Н. Пневмо-гидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями [Текст] / В.Н. Челомей, Д.А. Полухин, Н.Н.Миркин, В.М. Орещенко и др. М.: Машиностроение, 1978. – 240с.
4. Козлов А.А. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок [Текст] / А.А.Козлов, В.Н. Новиков, Е.В. Соловьев. М.: Машиностроение, 1988. – 352с.
5. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет [Текст] / Н.М.Беляев. М.: Машиностроение, 1976. – 336с.
6. Методика расчета и моделирования параметров систем наддува бака окислителя I ступени РН «Зенит» [Текст] : техн. отчет / Д.: КБ Южное; рук. Кучма Л.Д. – ОТ 21.5691.123; Инн. 49989кб, 1983. – 64с.
7. Митиков Ю.А. К вопросу определения диаметра кратера при взаимодействии струи газа с жидкой фазой [Текст] / Ю.А. Митиков, Л.В. Пронь // Известия вузов. Чёрная металлургия. – М.: МИСИС, 1981. – №3. – С.45 – 47.