

УДК 629.7.036.5

Ю. А. МИТИКОВ¹, В. Н. КУДЕРСКИЙ², С. А. КУДА², Г. М. ИВАНИЦКИЙ²¹ Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Украина² ГП «КБ «Южное», Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАДДУВА БАКОВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТВЕРДОТОПЛИВНЫМИ ГАЗОГЕНЕРАТОРАМИ

Проведены экспериментальные исследования наддува бака с керосином и жидким азотом твердотопливными газогенераторами. Использовались топлива на основе нитрата аммония и азиды натрия без оксида железа (расчетные температуры горения соответственно 1260К и 750К). Изучалась степень неравновесности химических процессов в продуктах сгорания топлив применительно к условиям баков ракет (изменение температуры в $5 \div 9$ раз за доли секунды). Исследования проводились на специальной установке. Топливный бак использовался из нержавеющей стали объемом 700 л, толщина стенки 10 мм. Последовательность операций традиционная – предпусковой наддув гелием, слив с основным наддувом, медленный слив остатка. Времена испытаний соответствовали работе I и II ступени носителя – 150 с, 1000 с. Измеряли перепад давления топлива на фильтре в расходной магистрали и температуру топлива в ней, температуру верхнего днища бака, газа возле него, температуры стенки бака. Результаты испытаний исключительно оптимистичные.

Ключевые слова: наддув баков, кислород, керосин, твердотопливные газогенераторы, экспериментальные исследования, неравновесные процессы.

Введение

Для наддува топливных баков современных двигательных установок (ДУ) на компонентах топлива кислород и керосин в качестве рабочего тела широкое распространение нашёл гелий. Гелиевые системы наддува (СН) объективно имеют ряд положительных сторон, благодаря которым они успешно применяются уже более пятидесяти лет. Однако современная гелиевая пневмогидравлическая система подачи топлива (ПГСП), включающая в себя такие основные составляющие как системы предпускового и полетного наддувов, является самой дорогостоящей частью ракеты [1] после ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа.

Аналогичная ситуация и по стартовому комплексу (СК). Для примера приведем одну из характеристик СК РН среднего класса «Зенит», который обеспечивает подачу гелия на борт носителя. В системе газоснабжения РН и технологического оборудования СК Байконура находится 1266 баллонов высокого давления по 500 л каждый, свыше 3000 единиц агрегатов автоматики, протяженность трубопроводов составляет десятки километров [2].

Из-за наибольшего распространения в мире и длительного опыта эксплуатации газобаллонных СН может сложиться впечатление их повышенной надежности. Однако это далеко не так. В качестве примеров отказа гелиевых систем приведем только

несколько из самого недалекого прошлого.

17.04.2014 г отложили запуск космического корабля Dragon к МКС. По сообщению пресс-службы NASA [3] причиной переноса даты старта явилась утечка гелия в ДУ первой ступени РН Falcon 9.

27.06.2014 не состоялся первый пуск РН «Ангара» легкого класса, который находился в разработке более 19 лет. Причиной отмены пуска РН стало падение давления гелия в баллоне наддува демпфера, установленного в расходной магистрали окислителя ДУ [4].

Очевидно, что круг проблем, связанный с использованием в ДУ гелия, оказывает влияние на сроки и стоимость разработки нового ракетного комплекса (РК), его последующей эксплуатации. В итоге, это приводит к увеличению стоимости запуска 1кг полезной нагрузки на опорную орбиту, к снижению конкурентоспособности всего РК [5].

За последние тридцать лет количество пусков РН в мире существенно сократилось. За период с 2004 по 2014 годы их общее количество в год в среднем составляло 80 [6]. В то же время количество стран, которые могут предоставлять пусковые услуги, выросло вдвое. Поэтому неудивительно, что борьба на рынке предоставления пусковых услуг будет и далее только обостряться. Побеждать в ней будет тот, кто сможет обеспечить наименьшую цену выведения при общепринятой надежности.

Постановка проблемы в общем виде

За последние тридцать лет в мире продемонстрирован заметный прогресс в исследовании и последующем промышленном производстве твердотопливных газогенераторов (ТТГГ) [7], [8]. Сфера их применения широка. В настоящее время известны, отработаны и широко применяются не только ТТГГ с восстановительными продуктами сгорания, как было еще совсем недавно. Большое применение нашли ТТГГ с нейтральными продуктами сгорания (углекислый газ, азот, например, для подушек безопасности автомобилей), а также чистыми кислородными (дыхательные системы в аварийных ситуациях для пассажиров самолетов, для личного состава подводных лодок, для катапультирующихся пилотов самолетов и др.). При этом температура продуктов сгорания современных твердых топлив может быть получена в очень широком диапазоне от 330К до 2300К, а их газопроизводительность сегодня составляет 380 ÷ 420 нормальных литров газа с 1 кг топлива. Также следует подчеркнуть существенное продвижение вперед в вопросах целенаправленной борьбы с сажеобразованием и другой конденсированной фазой при сжигании углеводородных топлив. В то же время, научных работ двигателистов, направленных на исследование возможностей упрощения ПГСП керосина и кислорода, стартового комплекса путем применения современных ТТГГ в составе ДУ, нам не известно.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья

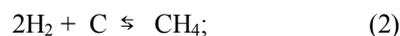
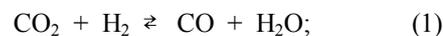
Перечислим основные достоинства ТТГГ, благодаря которым они и находят все более широкое применение в разных областях техники [7]: постоянная готовность к работе; отсутствие необходимости регламентных работ; отсутствие клапанов; простота запуска; быстрый выход на режим при любых расходах; отсутствие утечек при длительном хранении; большая безопасность при эксплуатации; возможность разнообразных компоновочных решений и др. Время работы ТТГГ находится в диапазоне 0,02 – 400 с. У большинства современных топлив ТТГГ тротиловый эквивалент (по ОСТ В84-208-81) равен нулю, переход горения во взрыв отсутствует.

Распространенные ТТГГ имеют высокую надежность. Они не уступают, а в большинстве случаев, и превосходят по этому показателю другие системы, используемые в качестве источников газа. Вероятность выполнения зарядами требований технического задания по внутрибаллистическим характеристикам $P > 0,999$ для большинства ТТГГ при

доверительном уровне 0,95.

Какие же нерешенные вопросы препятствуют внедрению в ракетную технику ТТГГ? Первый и основной - даже самые «лучшие» продукты сгорания твердых топлив содержат конденсируемую в баковых условиях (например, в криогенных) фазу (H_2O , CO_2 , CO , C_s и др.). Наличие твердой фазы внутри баков в таком случае может создать проблемы быстроходным насосам, датчикам СУРТ, борным устройствам и др.

Однако тут необходимо отметить, что справочные цифры по составу продуктов сгорания получены исключительно для условий равновесных процессов. Для примера рассмотрим типичные продукты сгорания углеводородного топлива - H_2 , H_2O , CO и CO_2 . При их равновесном охлаждении происходят следующие химические реакции [9]:



Реакции (2) и (3) протекают при температурах от 1100К до 700К. По данным работы [9] время, необходимое для достижения равновесия реакций (2) и (3) при температуре 1770К, составляет несколько секунд, причем с понижением температуры это значение только увеличивается. Таким образом, задача получения продуктов сгорания без сажи в данном случае сводится к быстрому ($\Delta t \leq 1$ с) прохождению продуктами сгорания температурного диапазона 1200 – 700К. Этот вывод применительно к СН вполне реализуем.

Формулирование целей статьи

Целями проведенных экспериментальных исследований являлись:

- оценка количества конденсированной фазы в топливном баке при его наддуве продуктами сгорания самых распространенных твердых топлив (на основе нитроаммония и азиды натрия);
- определение температурных режимов газа в баке, его конструкции и верхнего слоя топлива в баке при наддуве продуктами сгорания ТТГГ;
- получение в интересующих нас баковых условиях экспериментальных данных для расчета работоспособности продуктов сгорания твердых топлив, которая является одной из основных характеристик эффективности рабочего тела наддува;
- оценка возможности улавливания конденсированной фазы в продуктах сгорания простейшими металлическими сетками.

Полученные результаты в определенной степени могут характеризовать неравновесность протекания химических реакций в продуктах сгорания в условиях баков с жидким кислородом и керосином при резком изменении их температуры.

Изложение основного материала исследования

Для экспериментального исследования возможностей и проблематики наддува топливных баков с углеводородным горючим и криогенным окислителем твердотопливными газогенераторами были использованы два типичных представителя наиболее распространенных доступных топлив – МГТ-2П (на основе нитрата аммония, расчетная температура горения 1260К) и состав 62-15 (на основе азиды натрия, расчетная температура горения 750К).

Смесевые топлива на основе нитрата аммония имеют следующий состав продуктов сгорания: CO_2 11 – 22; CO 0 – 21; H_2 1 – 30; H_2O 20 – 34; CH_4 0 – 9; N_2 16 – 44 % объемных. Другие газы (NH_3 и т.п.) – менее 1,3 % об. Достоинством нитроаммониевых топлив является высокая чистота продуктов сгорания (с добавками типа динитрофеноксистеранола [10]), недостатком (в ряде случаев) – высокое содержание паров воды (в составе МГТ-2П – 20% об.).

Состав 62-15 (на основе азиды натрия) имеет следующие характеристики. Плотность топлива – 1845 кг/м^3 , выход азота от массы состава – 55%, содержание азота в газе 99,39 % об.

Испытания с двумя различными зарядами проводились на топливном баке из нержавеющей стали X18H10T объемом 700 л и толщиной стенки 10 мм (рис.).

Было проведено две серии экспериментов. Первая серия применительно к баку горючего, вторая – баку окислителя.

В качестве компонента топлива в первой серии использовалось углеводородное горючее РГ-1. В начале эксперимента проводился предварительный наддув емкости гелием с температурой окружающей среды от стендовых систем. Слив горючего из емкости начинался за 0,5 – 1,5 с до включения ТТГГ.

К концу работы ТТГГ (~130 с) максимальная температура газа в баке повышалась до 490К и слабо зависела от начальной температуры горючего (на разных испытаниях горючее заправлялось с температурой от 255К до 288К). Повышение температуры верхнего дна емкости за время наддува не превышало 21К, цилиндрической части емкости – 10 – 20К. Прогрев верхнего слоя горючего оценивался в 12 – 15К. Перепад давления на фильтре в расходной магистрали проявлялся следующим образом. Слив первых 90% компонента происходил с плавно

уменьшающимся расходом от 6,1 л/с до 2,7 л/с. Перепад давления на фильтре при этом изменялся пропорционально от $0,93 \cdot 10^5$ до $0,3 \cdot 10^5$ Па, что свидетельствует о постоянстве гидравлического сопротивления фильтра. Слив остатка горючего проводился через 15 мин при постоянном давлении в баке. Перепад давления на фильтре при этом увеличился с $0,4 \cdot 10^5$ до $0,72 \cdot 10^5$ Па, т.е. имело место значительное повышение гидравлического сопротивления фильтра. При его осмотре (фильтрующий элемент – один слой сетки №685 по ГОСТ 31.87-65) были обнаружены частицы типа песка в количестве до 5 г. Визуально сажи не обнаружено. Химический анализ твердой фракции не проводился. В эксперименте с горючим, температура которого в баке составляла 255К, лед, который мог бы образовываться из паров воды продуктов сгорания за счет конденсации с последующим замерзанием на поверхности топлива, на фильтре не обнаружен.

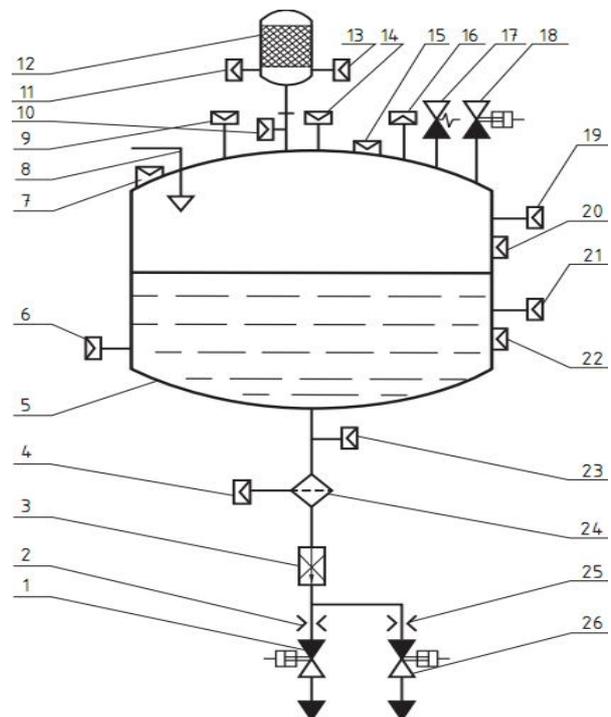


Рис. Экспериментальная установка:

- 1, 26 – клапаны слива; 2, 25 – расходные шайбы;
- 3 – датчик расхода; 4 – дифференциальный датчик давления; 5 – топливный бак; 6 – датчик температуры для регистрации уровня жидкого азота; 7, 9, 10, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23 – датчики температуры;
- 8 – магистраль предварительного наддува;
- 12 – ТТГГ; 11, 16 – датчики давления;
- 17 – предохранительный клапан;
- 18 – дренажный клапан; 24 – фильтр

Эффективная работоспособность газа наддува в экспериментах рассчитывалась по формуле

$$(RT)_{\text{эф}} = (P_{\text{к}} V_{\text{к}} - P_{\text{н}} V_{\text{н}}) / m,$$

где $P_{\text{к}}, P_{\text{н}}$ - давление газа в емкости в конце и начале наддува соответственно;

$V_{\text{к}}, V_{\text{н}}$ - свободные газовые объемы емкости в конце и начале наддува соответственно;

m - масса газа, введенного в емкость за время наддува.

После подстановки экспериментальных данных получено

$$(RT)_{\text{эф}} = (1,2 - 1,3) \cdot 10^5 \text{ Дж/кг.}$$

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность использования для наддува баков с углеводородным горючим ТТГГ на основе обычных серийных низкотемпературных топлив. Параметры таких систем удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СН. К основным вопросам, требующим решения при проектировании таких СН, следует отнести регулирование расхода газа на наддув и повышение чистоты продуктов сгорания ТТГГ.

Во второй серии экспериментов исследовался кратковременный наддув бака с низкипящим окислителем, который имитировали жидким азотом.

Для наддува использовался серийный ТТГГ с зарядом на основе азидата натрия. Время работы ТТГГ 8 – 10 с, масса введенного в бак азота – 1, 1 кг при массе заряда 2 кг.

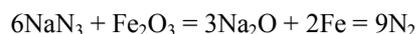
Емкость заправляли жидким азотом до объема. Начальное давление в газовом объеме емкости находилось на уровне давления насыщенных паров жидкого азота. Наддув ТТГГ проводился как при начальной стабилизации параметров в емкости (выравнивание температур за счет длительной стоянки заправленной емкости с открытым дренажным клапаном и подпиткой азотом), так и без нее.

Во время наддува емкости слив азота не производился. По окончании работы газогенератора азот сливали через фильтр для определения массы и состава попавшего в него твердой фазы продуктов сгорания ТТГГ.

К концу работы ТТГГ давление газа в емкости повышалось на $2,1 - 3,1 \cdot 10^5$ Па. Повышение температуры газа в емкости не превышало 10К, изменение температуры конструкции емкости имеющимися средствами измерения не зарегистрировано. Эффективная работоспособность газа наддува составила в этой серии $(1,2 - 1,5) \cdot 10^5$ Дж/кг.

Характерной особенностью используемого азотгенирующего состава 62-15 являлось высокое содержание в конденсированной фазе активного натрия (до 30% от веса заряда) и свободного угле-

рода (до 11% весовых). Это обстоятельство, несмотря на то, что конденсированная фаза из-за спекания остается, в основном, внутри газогенератора, способствует повышенному содержанию перечисленных элементов в газообразной части продуктов сгорания. Следует отметить, что в других известных азотгенирующих составах за счет наличия в них дополнительных окислителей (например, для состава 62-09 это Fe_2O_3) свободный натрий и сажа в продуктах сгорания на выходе из газогенератора отсутствует. При горении состава с оксидом железа (или триоксидом вольфрама WO_3) в результате следующей химической реакции



в газогенераторе образуется газопроницаемый твердый клинкер, обладающий хорошими фильтрующими свойствами [11].

С целью исследования методов очистки поступающих на наддув продуктов сгорания на двух испытаниях после ТТГГ, на входе в емкость, был установлен фильтр (фильтрующий элемент – один слой сетки №160 по ГОСТ 31.87-65, аналогичный установленному в расходной магистрали).

Результаты дефектации показали, что такой способ достаточно эффективен: твердых частиц на фильтре расходной магистрали на этих испытаниях не обнаружено. Зафиксированы твердые частицы в газовом фильтре (по консистенции напоминают пластилин). Вес задержанных фильтром частиц составлял на различных экспериментах от 3 до 7 г.

Экспериментальные исследования системы кратковременного наддува емкости с криогенным компонентом ТТГГ на основе азидата натрия показали возможность создания такой системы и правильность методики выбора основных проектных параметров. При этом представляется целесообразным использовать ТТГГ с топливом, содержащим оксид железа (состав 62-09). У данного состава, помимо высоких фильтрационных свойств, есть еще одна положительная сторона – температура продуктов сгорания составляет $\sim 1200\text{К}$. С целью увеличения процента выхода азота из твердого топлива целесообразно использовать вместо оксида железа триоксид вольфрама. С ним температура горения заряда еще выше, падает потребность в окислителе за счет термического разложения части исходного азидата натрия.

Результаты экспериментов следует считать существенно положительными. При современном развитии техники очистить продукты сгорания с помощью разнообразных механических или (и) химических фильтров не является проблемой.

Выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в данном направлении

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность использования для наддува баков с углеводородным горючим ТТГГ на основе обычных серийных низкотемпературных топлив. Параметры таких систем удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СН.

Проведенные экспериментальные исследования позволили впервые провести оценку количества конденсированной фазы в топливном баке при его наддуве продуктами сгорания самых распространенных твердых топлив (на основе нитроаммония и азиды натрия). В качестве компонента топлива использовалось углеводородное горючее РГ-1 и жидкий азот (имитатор жидкого кислорода).

При вводе в топливный бак продуктов сгорания ТТГГ с температурами 1260К и 750К и скоростями порядка несколько десятков метров в секунду вдоль продольной оси бака сажи (основной загрязняющий элемент) на фильтрах в расходных магистралях не обнаружено. Это свидетельствует о неравновесности протекания химических реакций в продуктах сгорания ТТГГ применительно к условиям наддува, где температура продуктов сгорания в баке падает в несколько раз за доли секунды.

Экспериментально определены температурные режимы газа в баке, его конструкции и верхнего слоя топлива в баке при наддуве продуктами сгорания ТТГГ с температурой 1260К (ранее достигнутая температура 1120К). Все интересующие температурные параметры оказались в норме.

Получены экспериментальные данные для расчета работоспособности продуктов сгорания твердых топлив в баковых условиях и проведены ее расчеты. Значения $(RT)_{эф} \approx (1,2 - 1,5) \cdot 10^5$ Дж/кг можно считать достаточно высокими.

Экспериментально проверена возможность улавливания конденсированной фазы продуктов сгорания распространенных ТТГГ простейшими металлическими однорядными сетками. Результаты вполне удовлетворительные.

Представляется целесообразным использовать ТТГГ с топливом, содержащим оксид железа (состав 62-09). У данного состава, помимо высоких фильтрационных свойств, есть еще одна положительная сторона – температура продуктов сгорания составляет ~ 1200К. С целью увеличения процента выхода азота из твердого топлива целесообразно использовать вместо оксида железа триоксид вольфрама. С ним температура горения заряда получается более высокая, падает потребность в окислителе за счет

реализации термического разложения части исходного азиды натрия.

Полученные экспериментальные данные по наддуву бака с углеводородным горючим и криогенным компонентом продуктами сгорания распространенных серийных ТТГГ позволяют проводить проектно-конструкторские проработки СН топливных баков ДУ с использованием современных ТТГГ.

Литература

1. *Ракета космического назначения сверхмалого класса [Текст] / А. В. Дегтярев, А. П. Кушнарев и др. // Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. ГКБ «Южное». – 2014. – № 1. – С. 14 – 20.*
2. *Бармин, И. В. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники [Текст] / И. В. Бармин. – М.: Полиграфикс РПК, 2005 (книга 1). – 420 с.*
3. *Запуск американского космического корабля Dragon к МКС перенесен на 18 апреля. - Космический дайджест, №16 (68) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ebul.ru/dl/digest-068.pdf>. – 19.04.2014.*
4. *Ангара (ракета-носитель). – Википедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>. – 9.06.2015.*
5. *Пути повышения надежности и безопасности эксплуатации ракетных комплексов [Текст] / Ю. А. Митиков, В. А. Антонов, М. Л. Волошин, А. И. Логвиненко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 87 – 90.*
6. *Соколов, А. Исследование РБК: Россия проигрывает космическую гонку Китаю [Электронный ресурс] / А. Соколов, И. Терентьев. – Режим доступа: <http://top.rbc.ru/economics/30/06/2014/933404.shtml>. – 30.06.2014.*
7. *Смирнов, Л. А. Конверсия. Ч. 1: Пороха, смесевые твердые топлива, пиротехнические изделия и взрывчатые вещества для мирных целей [Текст] / Л. А. Смирнов, В. С. Силин; под ред. В. А. Желтова. – М.: ЦНИИИИТИКП, 1993. – 158 с.*
8. *Синогина, Е. С. Изучение воспламенения и горения высокоэнергетических материалов на основе бесхлорных окислителей [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14, 01.04.17 / Синогина Елена Станиславовна. – Томск: Томский ГУ, 2006. – 142 с.*
9. *Беляев, Н. М. Системы наддува топливных баков ракет [Текст] / Н. М. Беляев. – М.: Машиностроение, 1976. – 335 с.*
10. *Пат. 2444505 Российская Федерация, МПК С06D 5/06, С06В 31/32. Газогенерирующий состав на основе нитрата аммония [Электронный ресурс] / В. Н. Попок, В. Н. Хмелев. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/244/244450.html>. – 9.06.2015.*

11. Пат. 2484075 Российская Федерация, МПК C06D 5/06, C06B 31/32. Способ изготовления пиротехнических зарядов [Электронный ресурс] /

И. В. Тартынов, Н. М. Вареных и др. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2484075>. – 9.06.2015.

Поступила в редакцию 9.06.2015, рассмотрена на заседании редколлегии 17.06.2015

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДДУВУ БАКІВ РУШІЙНИХ УСТАНОВОК ТВЕРДОПАЛИВНИМИ ГАЗОГЕНЕРАТОРАМИ

Ю. О. Мітків, В. М. Кудерський, С. А. Куда, Г. М. Іваницький

Проведено експериментальні дослідження наддуву бака з гасом і рідким азотом твердопаливними газогенераторами. Використовувалися палива на основі нітрату амонію і азиду натрію без оксиду заліза (розрахункові температури горіння відповідно 1260К і 750К). Вивчалася ступінь нерівноважності хімічних процесів в продуктах згорання палив стосовно умов баків ракет (зміна температури в $5 \div 9$ раз за частки секунди). Дослідження проводилися на спеціальній установці. Паливний бак використовувався з нержавіючої сталі об'ємом 700 л, товщина стінки 10 мм. Послідовність операцій традиційна - передпускове наддування гелієм, слив з основним наддуванням, повільний слив залишку. Тривалість випробувань відповідала тривалості роботи I і II ступеня носія - 150 с, 1000 с. Вимірювали перепад тиску палива на фільтрі у видатковій магістралі і температуру палива в ній, температуру верхнього днища бака, газу біля нього, температури стінки бака. Результати випробувань виключно оптимістичні.

Ключові слова: наддування баків, кисень, гас, твердопаливні газогенератори, експериментальні дослідження, нерівноважні процеси.

PROPULSION SYSTEM TANK PRESSURIZATION WITH SOLID FUEL GAS PRODUCER EXPERIMENTAL STUDY

Yu. A. Mitkov, V. N. Kuderskiy, S. A. Kuda, G. M. Ivanitskiy

Experimental research of kerosene and liquid nitrogen tank pressurization using solid fuel gas producers was held. Ammonium nitrate and sodium azide based fuel without iron oxide was used (corresponding calculated combustion temperatures are 1260K and 750K). The degree of chemical process disequilibrium in combustion products in appliance to rocket tank conditions (temperature variance $5 - 9$ times during tens of second) was investigated. A research was held on a special stand. A 700 liter volume fuel tank was made of stainless steel with 10 millimeters walls. The sequence of operations was usual – pre-launch helium pressurization, substance sink with main pressurization, and slow sink of the rest substance. The test timings corresponded to I and II carrier rocket stages – 150 sec, 1000 sec. A fuel pressure change on flow line filter, as well as fuel temperature in flow line were measured. The upper bottom tank temperature, nearby gas temperature, and tank walls temperature were measured. The investigation results are absolutely optimistic.

Key words: pressurization tanks, oxygen, kerosene, solid propellant gas generator, experimental studies, non-equilibrium processes.

Митків Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, заведуючий кафедрой двигателестроения, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: mitkov@ua.ua.

Кудерский Вячеслав Никитович – канд. техн. наук, начальник сектора проектно-конструкторского отдела, ГП «КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.

Куда Сергей Анатольевич - начальник сектора проектно-конструкторского отдела, ГП «КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.

Іваницький Геннадий Михайлович – начальник самостоятельной научно-исследовательской лаборатории, ГП «КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.