

doi: 10.15407/knit2016.03.009

УДК 621.454.2 + 662.7

А. С. Кухта, А. В. Дибривный

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепро

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОКРАТНОГО ЗАПУСКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДУ802 ПРИ РАБОТЕ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА

Долгохраняемые топлива, такие как гидразин, НДМГ, ММГ, АТ и др. широко применяются в двигательных установках разгонных блоков и космических аппаратов с длительным временем эксплуатации в условиях космоса. Тем не менее, по причине их негативного влияния на окружающую среду, а также высокой токсичности возникает необходимость применения дополнительных средств нейтрализации и защиты персонала при эксплуатации в наземных условиях, что значительно увеличивает стоимость отработки и эксплуатации. Тем не менее, эти средства защиты несовершенны, и не исключают полностью угрозы жизни и здоровью персонала. Поэтому на сегодняшний день сложилась устойчивая тенденция по переходу на экологически чистые компоненты топлива. Одним из таких топлив является пара перекись водорода + керосин. Применение этой топливной пары для двигательных установок рассматриваемого типа также позволяет обеспечить многоразовый запуск в полете без значительного усложнения конструкции и достаточно высокие энергетические характеристики. Приведена аналитическая оценка вариантов решения одной из ключевой задач модернизации — обеспечение многоразового воспламенения и стабильности параметров камеры двигателя.

Ключевые слова: экологическое топливо, перекись водорода + керосин.

ВВЕДЕНИЕ

В докладах IAC-04-S.1.10 и IAC-05-C4.1.04 на 55-м и 56-м Международных астронавтических конгрессах ГП КБЮ представляло результаты испытаний двигательного блока и двигательной установки ДУ802 автономного космического буксира «Кречет» для конверсионной РН «Днепр», работающей на топливе АТ+НДМГ. Основные характеристики двигательной установки ДУ802 приведены в таблице, а ее внешний вид — на рис. 1. Пневмонасосная система подачи компонентов топлива, используемая в ДУ802, может быть предпочтительнее вытеснительной и турбонасосной систем подачи, так как ПНА по сравнению с ТНА является более простым и надежным узлом, а по сравнению с вытеснитель-

ной подачей топлива пневмонасосная позволяет обеспечить более высокое давление в камере при низких давлениях на входе в двигатель и обеспечивает высокую точность поддержания тяги и соотношения компонентов топлива. Количество запусков ДУ802 фактически ограничивается запасом рабочих тел на борту.

За счет вышеописанных характеристик у ДУ802 есть возможность эффективно конкурировать на рынке, а применение в ней экологически чистых компонентов топлива позволит дополнительно повысить эту конкурентоспособность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, есть два основных подхода к созданию жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок (ДУ).

© А. С. КУХТА, А. В. ДИБРИВНЫЙ, 2016

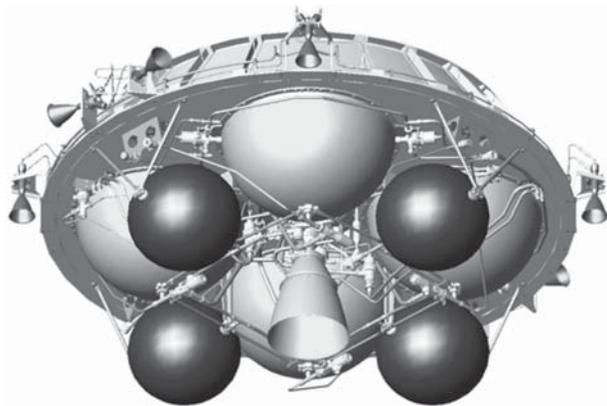


Рис. 1. Двигательная установка ДУ802

**Основные характеристики
двигательной установки ДУ802**

| Параметры (характеристики) и размерность | Величина |
|---|--------------|
| Компоненты топлива | АТ+НДМГ |
| Тяга, кН | 4.413 |
| Удельный импульс тяги, с | 322.5 |
| Давление в камере, бар | 36.5 |
| Соотношение компонентов | 2.25 |
| Время работы, с | 350 |
| Количество включений | проверено 12 |

1. Разработка абсолютно новых ДУ, которая зачастую сопряжена со значительными затратами на создание производственной и испытательной баз, а также значительным объемом отработки.

2. Модернизация ДУ со значительной степенью заимствования, позволяющая максимально возможно использовать имеющиеся производство и сократить затраты на модернизацию стендов и отработку, а также общие сроки разработки двигателя.

Специалистами ГП «КБ «Южное» был выбран второй подход к созданию экологически чистой двигательной установки — модернизация имеющейся двигательной установки ДУ802 для работы на компонентах топлива «высококонцентрированная перекись водорода (ВПВ) + керосин РГ-1». При этом ключевым моментом модернизации стало сохранение следующих характеристик ДУ802.

1. Возможность длительной эксплуатации в условиях открытого космоса.
 2. Обеспечение многократного запуска в полете.
 3. Возможность дросселирования тяги.
 4. Простота и надежность конструкции.
 5. Более высокая энергетика, чем у двигателей с вытеснительной системой подачи топлива, достигаемая без существенного усложнения конструкции.
 6. Высокая точность обеспечения тяги ($\pm 3\%$) и поддержания соотношения компонентов ($\pm 0.5\%$).
- При этом после модернизации двигательная установка должна обладать новым качеством — экологичностью.

ВЫБОР ТОПЛИВА

В качестве альтернативы штатной топливной паре были выбраны компоненты топлива высококонцентрированная перекись водорода (~90 %) + керосин РГ-1, которые отвечают требованиям экологичности и долговечности [3], а также способны обеспечить приемлемые энергетические характеристики системы. Более подробная информация по выбору компонентов топлива, их совместимости с конструкционными материалами, как и аналитическая оценка основных энергетических характеристик ДУ, были описаны ранее в докладе IAC-04-S.1.10.

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОКРАТНОГО
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

Как уже отмечалось, перекись водорода не самовоспламеняется с углеводородами. В то же время к двигательным установкам такого типа предъявляются требования по обеспечению многократного включения в полете (около 10 и более). Обычно при использовании несамовоспламеняющихся компонентов топлива в двигатель вводится дополнительная система зажигания, инициирующая горение на запуске, а после отключающаяся.

В случае применения перекиси водорода появляется возможность использовать ее свойство разлагаться при наличии катализатора с образованием парагаза, содержащего воду и кислород с достаточно высокой температурой для воспла-

менения керосина. В качестве катализатора для разложения перекиси было принято решение использовать серебряные сетчатые катализаторы, аналогичные ранее использованным в составе парогенератора британской ракеты ВЕТА-1 [2]. Данный катализатор превосходит другие типы катализаторов, используемые в ЖРД, такие как водный раствор перманганата натрия (по аналогии с ракетой «Фау-2») и металлические зерна, покрытые активным слоем катализатора (к примеру водного раствора перманганата калия и соды, используемого в газогенераторах двигателей РД107/РД108 [<http://www.lpre.de/energomash/RD-107/index.htm>]) ввиду:

- простоты конструкции,
- сравнительно малой массы,
- отсутствия дополнительных компонентов топлива,
- сравнительно низкого перепада давления на катализаторе (может быть существенно снижен за счет увеличения площади контакта с окислителем),
- возможности регулирования полноты каталитического разложения толщиной пакета катализатора.

Для дальнейшего использования принимается катализатор типа К-86 (разработки ГИПХ, Российская Федерация) или его коммерчески доступный на рынке аналог. Катализаторы данного типа представляют собой набор сеток из нержавеющей стали, покрытых слоем активированного серебра. Такие катализаторы пригодны к работе в среде перекиси водорода (85—97 %) и обеспечивают разложение 99—100 % перекиси.

ИНТЕГРАЦИЯ КАТАЛИЗАТОРА С КАМЕРОЙ ДВИГАТЕЛЯ

Одним из ключевых элементов двигателя, определяющих его облик и основные характеристики, является камера. Естественно, что ее проектирование и отработка выполняются в соответствии с предъявляемыми к двигателю требованиями и под определенную топливную пару, а полученная в результате разработки материальная часть максимально возможно адаптирована для решения определенных задач при определенных условиях работы.

Проведенный проектный анализ показал, что для обеспечения работы камеры двигателя на новом топливе потребует изменения схемы охлаждения и смесеобразование. Это обусловлено целым рядом факторов.

1. Ввиду изменения массового соотношения расходов компонентов топлива с 2.25 примерно на 8:

- а) увеличивается массовый расход окислителя, что повлечет за собой увеличение гидравлического сопротивления форсунок и тракта охлаждения;
- б) значительное снижение расхода горючего через камеру приведет к снижению перепада давления на форсунках горючего, что может повлиять на устойчивость горения в камере двигателя;
- в) изменение расходов по трактам охлаждения, а также тепловых потоков в камере двигателя влечет за собой необходимость изменения геометрических характеристик трактов охлаждения.

2. Необходимо обеспечить подачу высокотемпературных продуктов разложения перекиси водорода в камеру двигателя для обеспечения воспламенения и устойчивого горения компонентов топлива.

Следует отметить, что решение задач 1 и 2 должно быть комплексным. И определяющим для формирования облика камеры двигателя будет принятый способ воспламенения топлива в камере двигателя.

На сегодняшний день есть два подхода к разложению перекиси водорода: каталитический и термокatalитический. На основе этих двух подходов был проработан ряд принципиальных схем, сравнительный анализ которых будет рассмотрен ниже. Сравнение проведено по критериям конструктивной простоты, обеспечения минимального перепада давления по трактам и минимального давления на выходе из ПНА, минимизации количества используемых узлов и агрегатов двигателя, а следовательно, — повышения надежности и снижения массы).

1. Система с каталитическим разложением предполагает установку катализатора для разложения всего расхода перекиси непосредственно

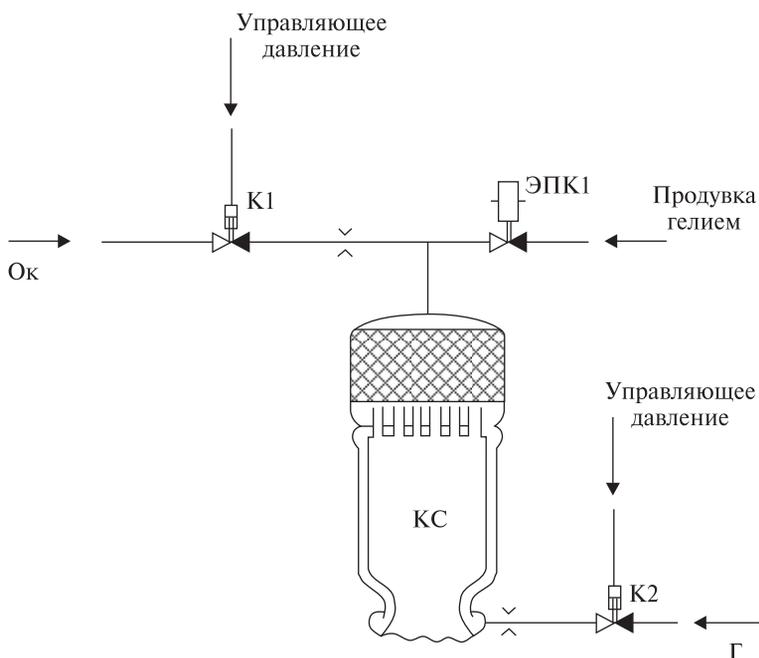


Рис. 2. Камера модернизированной двигательной установки ДУ802 с полным разложением перекиси (K1, K2 — клапан пневмоуправляемый, ЭПК1 — электропневмоклапан, КС — камера двигателя)

в камеру перед форсуночной головкой (представлен на рис. 2).

Данная схема наиболее проста с точки зрения организации рабочих процессов в камере, так как весь расход перекиси водорода разлагается каталитически, после чего в среду высокотемпературного парогаса подается керосин — происходит воспламенение. Недостатками же являются сравнительно большая масса пакета катализатора и значительный перепад на нем, который становится определяющим для энергетического баланса всего двигателя, в результате чего требуется повышение давления на выходе из ПНА.

2. Было рассмотрено несколько вариантов систем, предполагающих термокаталитическое разложение перекиси водорода в огневом пространстве камеры.

Вариант 1. Пакет катализатора (ПК) представляет собой отдельный узел, соединенный с камерой посредством газовода (представлен на рис. 3). При этом на него может подаваться около 25 % суммарного расхода ВПВ [1].

Эта схема опробована в двигателях разработки НПО «Энергомаш», но, вероятно, она малоприменима для ЖРД малых тяг.

Основным достоинством варианта 1 является возможность легкого изменения параметров

катализатора, а также его отработки отдельно от камеры двигателя. В данном случае перепад на пакете катализатора будет существенно ниже. Тем не менее, в форсуночной головке требуется предусмотреть специальную форсунку (форкамеру), обеспечивающую подачу высокотемпературного парогаса. Также появляется необходимость введения в состав двигателя дополнительного ЭГК (ЕНV1), тем не менее, в сравнении с предыдущим вариантом масса системы (по предварительным оценкам) будет несколько ниже.

Вариант 2 предполагает интеграцию катализатора в состав форкамеры, установленной в форсуночной головке, что позволит исключить газовод из состава двигателя и обеспечить охлаждение пакета катализатора в составе форсуночной головки, хотя и повлечет незначительное увеличение осевого размера камеры (представлен на рис. 4).

С точки зрения приведенных выше критериев оценки данный вариант превосходит предыдущий с точки зрения конструктивной простоты и минимизации количества узлов и агрегатов двигателя.

В *варианте 3* в форкамеру организована подача части горючего, что позволит повысить

Рис. 3. Камера модернизированной двигательной установки ДУ802 с отдельным пакетом катализатора (К1, К2 — клапан пневмоуправляемый, ЭПК1 — электропневмоклапан, ЭГК1 — электрогидроклапан, КС — камера двигателя, ПК — пакет катализатора)

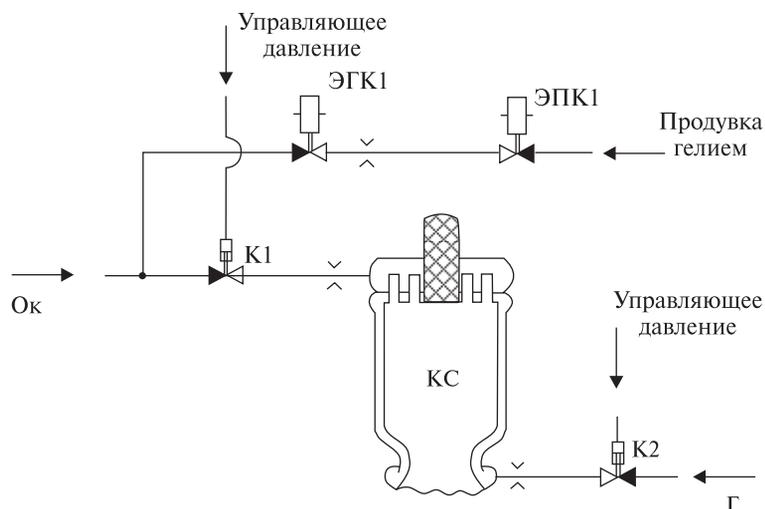
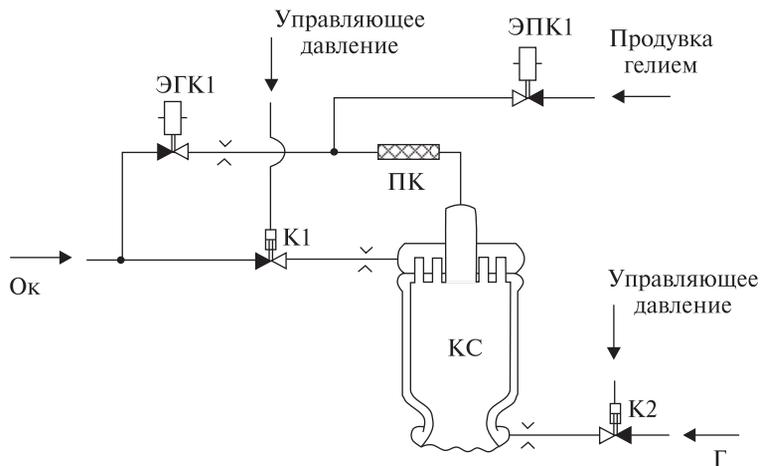


Рис. 4. Камера модернизированной двигательной установки ДУ802 с однокомпонентной форкамерой (К1, К2 — клапан пневмоуправляемый, ЭПК1 — электропневмоклапан, ЭГК1 — электрогидроклапан, КС — камера двигателя)

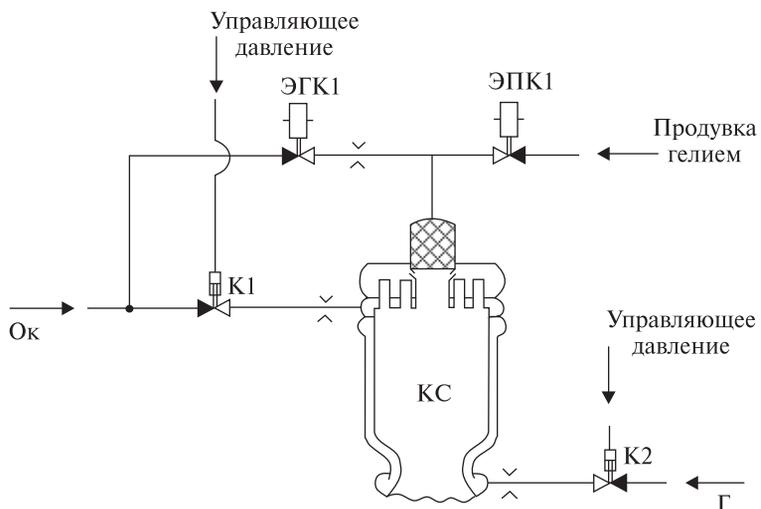


Рис. 5. Камера модернизированной двигательной установки ДУ802 с двухкомпонентной форкамерой (К1, К2 — клапан пневмоуправляемый, ЭПК1 — электропневмоклапан, ЭГК1 — электрогидроклапан, КС — камера двигателя)

эффективность смесеобразования и воспламенения керосина с продуктами разложения ВПВ, температуру газа на выходе из форкамеры, что в свою очередь повлечет повышение эффективности температурного разложения ВПВ и стабильности рабочих процессов в камере (представлен на рис. 5).

Тем не менее, малый расход горючего через форсунку форкамеры может приводить к засорению и закоксовыванию отверстия горючего, и к нестабильному соотношению компонентов топлива в форкамере. Такая форкамера также потребует более эффективного охлаждения, чем представленная в варианте 2, обеспечение которого на сегодняшний день представляется затруднительным.

На данный момент для дальнейшей разработки рассматриваются варианты 2 и 3 как наиболее эффективные с точки зрения обеспечения минимальных перепадов давления по трактам, а также простоты конструкции.

Стоит отметить, что используемый в большинстве схем процесс термokatалитического разложения в огневом пространстве на сегодняшний день изучен мало и требует дополнительной отработки.

ВЫВОДЫ

Модернизация двигательной установки ДУ802 для работы на компонентах «перекись водорода (90 %) + керосин (РГ-1)» потребует доработки камеры двигателя, в первую очередь в части форсуночной головки. Также в связи с изменением массового соотношения компонентов топлива потребуются доработка ПНА.

Зажигание компонентов топлива на запуске будет обеспечиваться разложением части перекиси в катализаторе, установленном в форкамере, установленной в форсуночную головку с образованием парогаса с температурой 700 °С и подачи его в камеру сгорания, где он будет воспламеняться с керосином. Для увеличения температуры на выходе из форкамеры есть возможность подачи в нее части керосина, но это сопряжено с рядом конструктивных сложностей.

Все вносимые в конструкцию двигательной установки изменения требуют подтверждения в ходе экспериментальной отработки.

Модернизация двигательной установки под новые компоненты топлива позволит сократить затраты на разработку на величину до 60 % в сравнении с разработкой абсолютно новой ДУ.

1. *Афанасьев И.* Чистая перекись // *Новости космонавтики.* — 2004. — № 12. — 10 с.
2. *Broughton L. W., Kretschmer W.* Development of the Beta-I rocket motor. Report RPD10. — Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hants, 1951.
3. *Ventura M.* Long term storability of hydrogen peroxide, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, AZ, July 10-13, 2005. — AIAA-2005-4551.

Стаття надійшла до редакції 09.09.15

REFERENCES

1. *Afanas'ev I.* Pure peroxide. *Novosti kosmonavtiki*, N 12, 10 p. (2004) [in Russian].
2. *Broughton L. W., Kretschmer W.* Development of the Beta-I rocket motor. Report RPD10. (Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hants, 1951).
3. *Ventura M.* Long term storability of hydrogen peroxide, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2005-4551 (Tucson, AZ, July 10—13, 2005).

А. С. Кухта, О. В. Дібрівній

Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАПУСКУ МОДЕРНІЗОВАНОЇ
ДВИГУННОЇ УСТАНОВКИ ДУ802 ПРИ РОБОТІ НА
ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ КОМПОНЕНТАХ ПАЛИВА**

Палива тривалого зберігання, зокрема гідразин, НДМГ, ММГ, АТ та ін. широко використовуються у двигунних установках розгінних блоків і космічних апаратів з великим часом експлуатації в умовах космосу. Але через їхній негативний вплив на навколишнє середовище, а також велику токсичність виникає необхідність використання додаткових засобів нейтралізації та захисту персоналу при експлуатації в наземних умовах, що суттєво збільшує вартість відпрацювання і експлуатації. Проте ці засоби захисту недосконалі і не виключають повністю загрози життю і здоров'ю персоналу. Через це зараз склалась стійка тенденція до переходу на екологічно чисті компоненти палива. Одним з таких палив є пара перекис водню + гас. Використання цієї паливної пари для двигунних установок розглядуваного типу також дозволяє забезпечити багаторазовий запуск у польоті без значного ускладнення конструкції та досить високі енергетичні характеристики. Приведено аналітичну оцінку варіантів розв'язку однієї з ключових задач модернізації — забезпечення багаторазового загоряння і стабільності параметрів камери двигуна.

Ключові слова: екологічне паливо, перекис водню + гас.

A. S. Kukhta, A. V. Dibrivny

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro

**MULTIPLE STARTUP PROVISION
FOR A MODERNIZED DU802 PROPULSION
SYSTEM DURING ITS OPERATION
ON ECOLOGICALLY CLEAN PROPELLANTS**

Storable propellants, such as UDMH, MMH, NTO etc. are widely used in upper stage and spacecraft propulsion systems with long-term operation in space conditions. Nevertheless, because of their negative influence on the environment as well as a high toxicity to leaving beings, it is necessary to use additional neutralization and personnel protection means during ground operations that significantly increase the cost of propulsion system development and operations. But this protective equipment is imperfect and do not fully exclude the threat to life and health of personnel. So, there is a strong tendency on transfer to green propellants. One of such propellants, is the hydrogen peroxide + kerosene propellant pair. The application of this propellant pair for the considered type of propulsion systems will allow providing both a multiple in-flight startups without a significant design complication and a high efficiency. We present an analytical estimation of providing multiple ignition and parameter stability of engine's combustion chamber.

Key words: green propellants, hydrogen peroxide + kerosene.