

УДК 629.7.03

КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЗАПРАВКА КСЕНОНОМ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТИПА «КАНОПУС-В»

Г.А. Акопов, И.А. Медведков,
В.П., Ходненко, А.В. Хромов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Описаны наземные испытания корректирующей двигательной установки (КДУ) на базе стационарного плазменного двигателя СПД-50 в составе малых космических аппаратов (КА) типа «Канопус-В», а также её заправка рабочим телом (ксеноном) на космодроме Байконур. В ходе комплексных испытаний произведена проверка алгоритма управления КДУ от бортовой вычислительной машины как при нормальной работе, так и при возникновении нестандартных ситуаций. Качество заправленного ксенона контролировалось с помощью химического анализа проб рабочего тела из заправленного бака КДУ.

Ключевые слова: *малый космический аппарат, корректирующая двигательная установка, стационарный плазменный двигатель, система заправки ксеноном, комплексные испытания.*

В работе обобщён опыт наземных испытаний корректирующих двигательных установок (КДУ) на базе стационарных плазменных двигателей, а также проведения заправки их рабочим телом, полученный при работах с КДУ малого космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Канопус-В».

КДУ служит для выдачи импульсов тяги с целью изменения положения и скорости центра масс КА. При помощи КДУ могут проводиться манёвры по изменению высоты и наклона орбиты КА, а также формирование и поддержание орбитальной группировки КА.

В состав двигательной установки входят два стационарных плазменных двигателя СПД-50 с модулями газораспределения МГР-50, блоки хранения и подачи ксенона, а также система питания и управления СПУ-КВ. Двигательная установка создана ОКБ «Факел» (г. Калининград), а система СПУ-КВ – НПЦ «Полус» (г. Томск). Электропневматическая схема КДУ приведена на рис. 1, подробное описание устройства и работы КДУ дано в [1]. Составные части КДУ и установка в целом прошли автономную отработку. Например, двигатель СПД-50 и модуль МГР-50 отработали в вакуумной камере по 800 ч и 2000 включений, что соответствует их гарантийному ресурсу. После сборки и огневых включений на заводе-изготовителе блока коррекции, объединяющего СПД-50 и МГР-50 с блоком подачи ксенона (БК) и межблочными трубопровода-

ми (МБТ), двигательная установка была поставлена в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» для установки на борт КА и проведения испытаний в составе КА.

После установки блоков КДУ на панель «–Х» КА проводились:

- проверка прочности и герметичности межблочных трубопроводов;
- проверка газового функционирования;
- автономные испытания КДУ;
- стыковочные испытания КДУ;
- проверка выдачи импульса подрыва пироклапанов.

Проверка прочности и герметичности межблочных трубопроводов осуществлялась при помощи масс-спектрометрического гелиевого течеискателя методом «щупа». Для подачи гелия в полости межблочных трубопроводов была собрана схема, показанная на рис. 2. Сначала проводилась проверка трубопровода высокого давления, для чего гелий под давлением 18,1 – 18,6 МПа (185 – 190 кгс/см²) подавался в проверочную горловину ПУ1. После заполнения трубопроводов гелием производилась проверка локальной негерметичности штуцерно-ниппельного соединения блока хранения ксенона с трубопроводом, а также сварные соединения трубопроводов с помощью щупа, подключённого к течеискателю. После проверки МБТ высокого давления проверялись межблочные трубопроводы низкого давления, в том числе ресивер. Гелий для проверки подавался через горловину ПУ2 под давлением 0,16 – 0,18 МПа (1,6 – 1,9 кгс/см²). При проверке

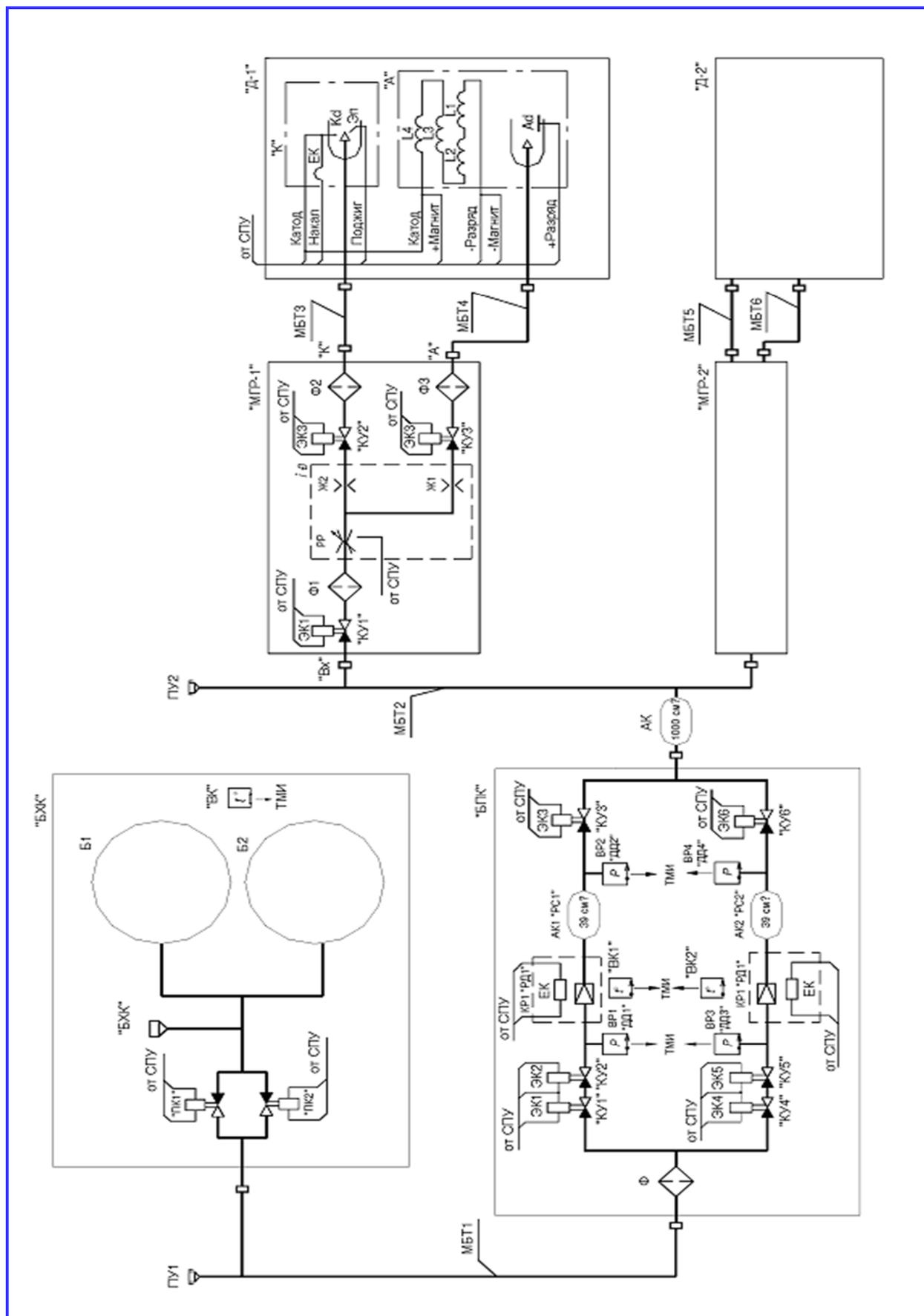


Рис. 1. Электронепневматическая схема КДУ

газового функционирования гелий подавался в поверочную горловину трубопровода высокого давления ПУ1. Клапаны блока подачи ксенона и модулей газораспределения, а также датчики давления БПК были подключены к пульту имитатора ИКДУ из состава контрольно-проверочной аппаратуры КДУ (КПА).

Автономные и стыковочные испытания КДУ

С помощью пульта ИКДУ открывались электрические клапаны каждой ветви подачи ксенона БПК и каждого модуля МГР-50, а с помощью гелиевого течеискателя контролировалось истечение ксенона из разрядной камеры соответствующего двигателя. Одновременно проверялись датчики давления БПК, их показания сверялись с показаниями манометра пульта подачи давления (см. рис. 2).

При проведении автономных испытаний КДУ на борту КА была собрана схема испытаний, показанная на рис. 3. Питание, управление и приём телеметрии КДУ осуществлялись от устройства управления и контроля (УУК) контрольно-проверочной аппаратуры, вместо двигателей СПД-50 были подключены имитаторы ИСПД-50, также из состава КПА. Имитатор стационарного плазменного двигателя ИСПД-50 позволяет воспроизводить подготовку и работу СПД-50, в том числе устанавливать любое необходимое значение тока анода, разрывать цепь накала катода и имитировать режим повышенной проводимости разрядного канала двигателя, приводящий к срабатыванию токовой защиты в СПУ-КВ. Модули МГР-50 и блок подачи ксенона при автономных испытаниях КДУ были подключены по штатной схеме. В поверочную горловину ПУ1, как и при предыдущих проверках, подавался гелий.

С помощью устройства УУК на систему СПУ-КВ выдавались команды по штатной циклограмме подготовки каждого из двигателей КДУ (перевод имитатора в режим разряда не проводился). С помощью гелиевого течеискателя также регистрировалось истечение из разрядной камеры выбранного двигателя.

Следующим после автономных испытаний КДУ являлся этап стыковочных испытаний. При этом КДУ электрически подключалась к системе энергоснабжения и телекомандной системе КА, как показано на рис. 4. Система подачи гелия была отключена от КДУ, ввиду отсутствия охлаждения потоком газа вместо штатных модулей МГР-50 подключались их имитаторы, установленные в устройстве УУК КПА. Имитатор ИКДУ использовался только для имитации показаний датчиков

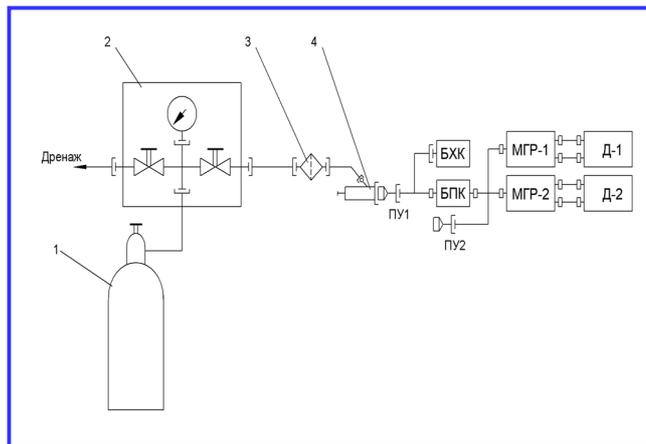


Рис. 2. Схема системы подачи гелия: 1 – баллон с гелием; 2 – пульт подачи давления ППД-001; 3 – фильтр; 4 – кран зарядный

низкого давления ксенона БПК.

В ходе стыковочных испытаний оператор испытательного вычислительного комплекса КА «Канопус-В» (ИВК-КВ) вручную выдаёт команды управления КДУ, а также указания оператору КПА КДУ по изменению режимов работы имитаторов ИСПД-50. Рабочее место оператора КПА КДУ показано на рис. 5. При испытаниях имитируется работа каждого двигателя с каждой из ветвей блока БПК. Также проверяется правильность формирования и приёма телеметрической информации КДУ.

Для проверки выдачи импульсов подрыва пироклапанов собирается схема, показанная на рис. 6. Далее оператор ИВК-КВ выдаёт команду на подрыв пироклапанов, и по показанию амперметров фиксируются токи через имитаторы мостиков пироклапана.

Комплексные испытания КДУ

Ниже представлен алгоритм автоматического управления двигательной установкой, которое производится при помощи 22 разовых команд, формируемых телекомандной системой КА. В телекомандную систему команды поступают по мультиплексному каналу обмена (аналог MIL-STD-1553B) от бортовой вычислительной системы (БВС). В программном обеспечении БВС разовые команды объединены в 15 циклограмм управления КДУ [2]. При исполнении циклограмм управления БВС производит анализ телеметрической информации КДУ (10 аналоговых и 6 сигнальных параметров СПУ-КВ, информация от датчиков давления БПК). БВС способна самостоятельно выходить из нештатных ситуаций, а также реагировать на так называемые «важные события», формируемые телекомандной системой. Перечень нештатных ситу-

аций, важных событий и действия БВС по их парированию приведены в таблице.

Схема комплексных испытаний КДУ совпадает со схемой стыковочных испытаний (см. рис. 4).

В ходе комплексных испытаний КДУ проводилась отработка программного обеспечения БВС, обеспечивающего как штатную эксплуатацию КДУ (каждого двигателя с каждой веткой БПК), так и выход из нештатных ситуаций в соответствии с таблицей (кроме НШ4, имитация которой средствами КПА КДУ оказалась невозможна). Изменение режимов работы имитаторов ИСПД-50 и ИКДУ осуществлял оператор КПА, который получал соответствующие указания от ИВК-КВ посредством выносного пульта оператора – портативного компьютера со специальным программным обеспечением. Для автоматизации комплексных испытаний бортового комплекса обеспечивающих систем, в который входят КДУ, система электропитания и система обеспечения теплового режима, была разработана специальная испытательная программа (инструкция) ИНК-113, которая исполнялась в ИВК-КВ. В первой части инструкции проверялось штатное функционирование систем, во второй – имитировались нештатные ситуации. Для КДУ была обеспечена имитация как отдельных нештатных ситуаций, так и их разнообразных комбинаций. Успешное функционирование КДУ КА «Канопус-В» № 1 и Белорусского КА на орбите в течение более чем двух лет показало достаточ-

ность объёма комплексных испытаний. Бортовая вычислительная система КА «Канопус-В» состоит из двух полукомплектов, поэтому с помощью инструкции ИНК-113 сначала проверялся первый полукомплект БВС, а затем – второй полукомплект. Комплексные испытания бортового комплекса обеспечивающих систем на обоих полукомплектах БВС занимали четыре рабочих дня.

После завершения испытаний проводился анализ протокола, который автоматически ведётся в ИВК-КВ, а также сброс информации из запоминающего устройства телекомандной системы и сравнение её с протоколом ИВК.

Термовакуумные испытания КА

При термовакуумных испытаниях (ТВИ) КА имитировалась штатная работа КДУ на протяжении сорока минут на освещённой части витка орбиты КА в течение четырёх витков подряд. Схема испытаний была аналогична схеме комплексных испытаний КДУ (см. рис. 4) с той лишь разницей, что при ТВИ использовались специальные кабели, обеспечивающие соединение с гермоводами вакуумной камеры и не применялся имитатор ИКДУ.

При обработке результатов испытаний к экспериментальным данным добавлялись расчётные значения тепловых потоков от двигателей и модулей газораспределения, которые при испытаниях были обесточены. Необходимо отметить, что при лётных испытаниях КДУ выяснилось, что при

Нештатные ситуации (НШ) и важные события (ВС) КДУ

Шифр	Наименование	Парирующее воздействие
НШ1	Отсутствие тока накала катода при подготовке двигателя	Повторно выдать команду на подготовку двигателя
НШ2	Отсутствие тока анода при работе двигателя	Выдавать серии из четырёх команд (т. н. «подзапуски») вплоть до появления тока анода, но не более 35 раз
НШ3	Срабатывание токовой защиты анода в СПУ-КВ	Увеличить счётчик срабатываний защиты на единицу, при четвёртом срабатывании – отключить КДУ
НШ4	Наличие тока накала катода при работе двигателя	Выдать команду на перевод двигателя в режим разряда
НШ5, НШ6	Давление на выходе БПК ниже нормы	Переход на резервную ветвь БПК
НШ7, НШ8	Давление на выходе БПК выше нормы	Выполнить сброс давления за редуктором в ресивер (осуществляется при подготовке к включению)
ВС1, ВС2	Пропадание тока накала катода	Повторно выдать команду на подготовку двигателя
ВС3, ВС4	Предел давления за редуктором БПК	Выполнить сброс давления в окружающее пространство (осуществляется при отключённой КДУ)

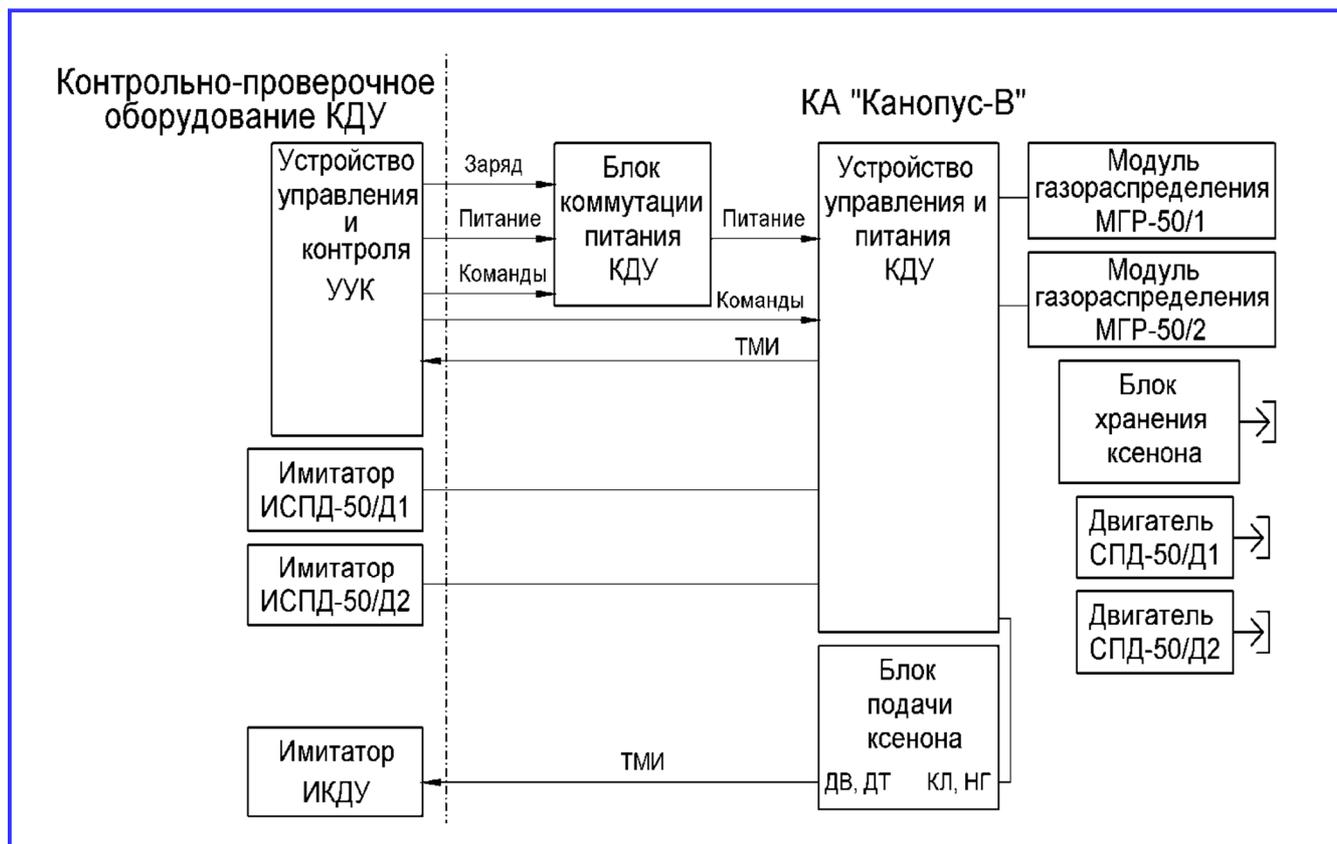


Рис. 3. Структурная схема автономных испытаний КДУ

включении двигательной установки на теневом участке витка разрядный ток аккумуляторной батареи достигает существенных значений и вызывает нагрев батареи. Данное явление можно было выявить в ходе термовакуумных испытаний КА, если бы имитация включений КДУ производилась на теневом участке витка. Поэтому при разработке программ и методик ТВИ перспективных КА необходимо обязательно планировать включения КДУ в тени Земли.

Испытания КА на электромагнитную совместимость

Данные испытания проводились в безэховой камере ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». Схема испытаний также была аналогична комплексным испытаниям за исключением имитатора ИКДУ. При испытаниях двигатели СПД-50 и модули МГР-50 были обесточены, а комплект КПА-КВ располагался вне безэховой камеры. В ходе испытаний имитировалась только штатная работа каждого из двигателей КДУ.

Заправка и подготовка КДУ на космодроме

После завершения наземной экспериментальной отработки в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» КА

«Канопус-В» №1 и Белорусский КА были отправлены на космодром Байконур для подготовки к запуску.

На техническом комплексе космодрома проводились следующие работы с КДУ:

- проверка прочности и герметичности трубопроводов;
- заправка КДУ ксеноном, отбор проб из направленного бака, консервация внутренних полостей КДУ ксеноном;
- комплексные испытания КДУ;
- проверка выдачи импульсов подрыва пироклапанов;
- сборка лётной схемы.

При проверке герметичности трубопровода высокого давления КА «Канопус-В» была обнаружена течь гелия по штуцерно-нипельному соединению блока хранения ксенона с трубопроводом. Течь образовалась из-за применения прокладки из нештатного материала, после установки штатной прокладки течь была устранена.

Для заправки КДУ рабочим телом (ксенон высокой чистоты) применялась система заправки ксеноном СЗК-001, разработанная КБ «Арматура» – филиалом ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (г. Ковров). Схема си-

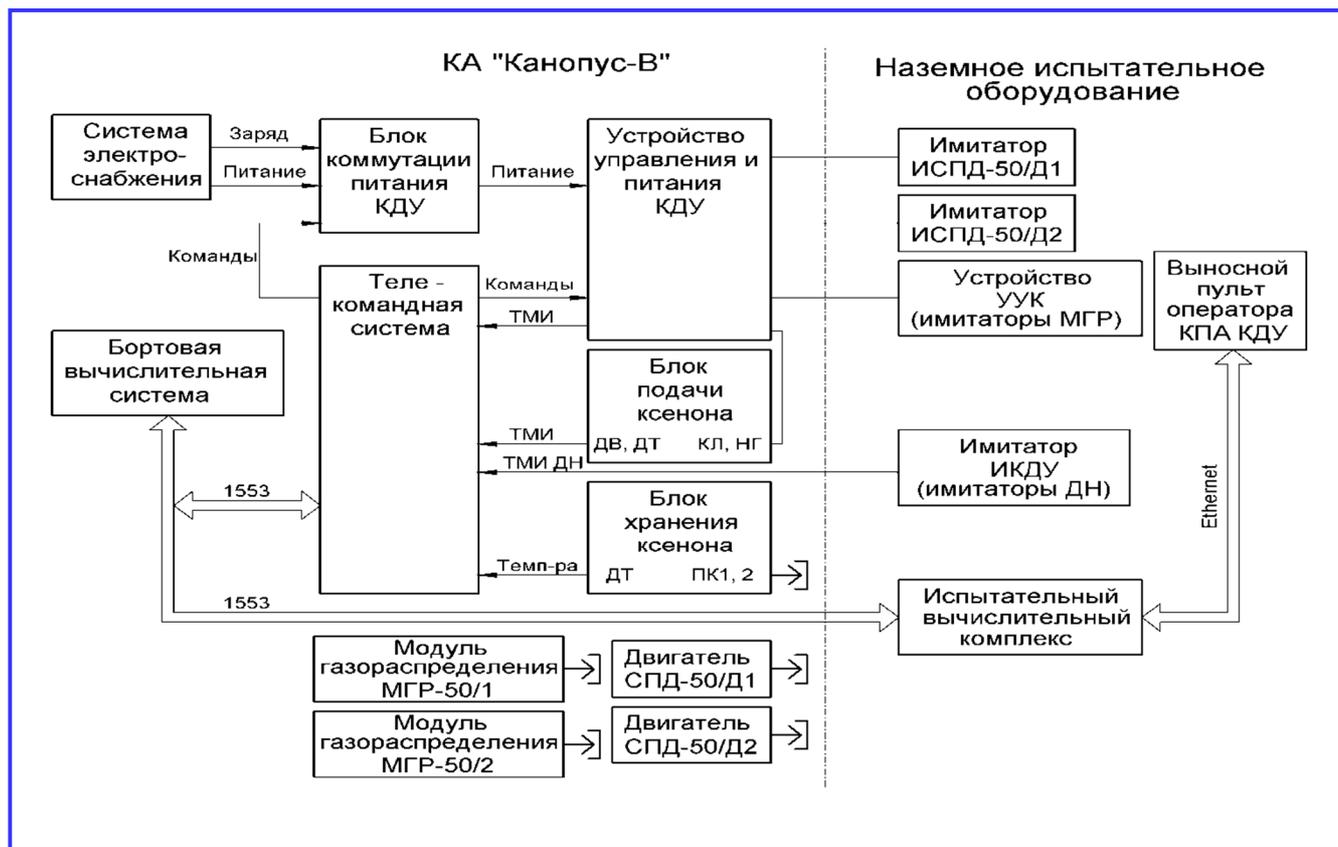


Рис. 4. Структурная схема стыковочных и комплексных испытаний КДУ



Рис. 5. Рабочее место оператора контрольно-проверочной аппаратуры КДУ

стемы [3] приведена на рис. 7, а фотография системы, развёрнутой на техническом комплексе при заправке – на рис. 8. Принцип действия СЗК-001 заключается в создании возможности перетекания ксенона из баллона 1 (см. рис. 7) в заправляемый бак 3 до выравнивания давлений, а затем – в принудительной перекачке ксенона с помощью компрессора 2 с пневматическим приводом. Способ отсечки дозы – весовой, взвешиванию подвергается баллон с ксеноном и перекачивающее оборудование. Система заправки ксеноном применялась при заправке КА «Монитор-Э», «КазСат», «Экспресс-МД».

Заправка КДУ КА «Канопус-В» состоит из следующих этапов:

- автономная ксеноновая подготовка СЗК-001 с отбором проб ксенона из внутренних полостей системы для химического анализа;
- подготовка бака к заправке (трёхкратное вакуумирование и заполнение ксеноном бака КДУ с целью удаления посторонних газов);
- заправка дозы (первая фаза – заправка перепуском, вторая фаза – дозаправка компрессором);
- отбор проб ксенона из заправленного бака;
- точная отсечка дозы ($5,2 \pm 0,1$ кг).

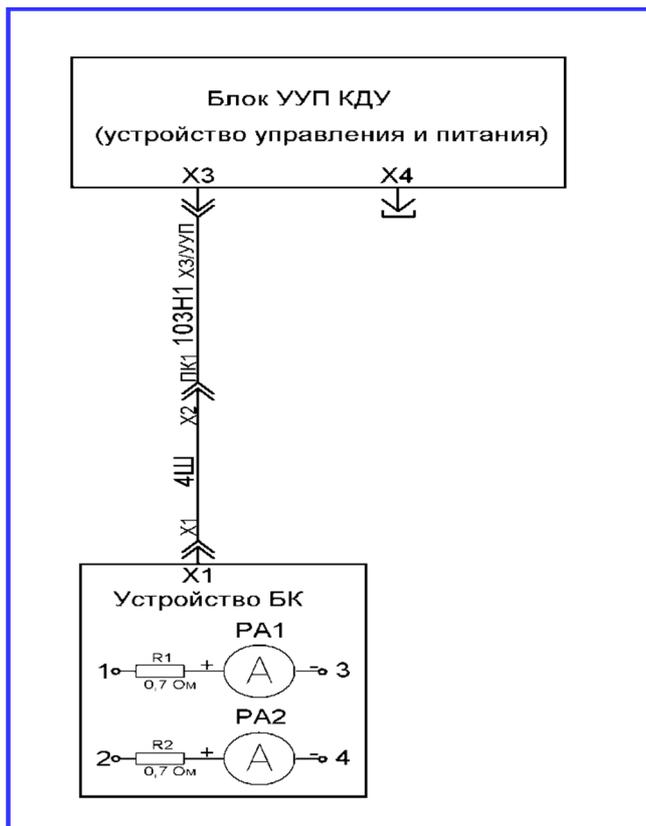


Рис. 6. Схема проверки выдачи импульса подрыва пироклапанов КДУ

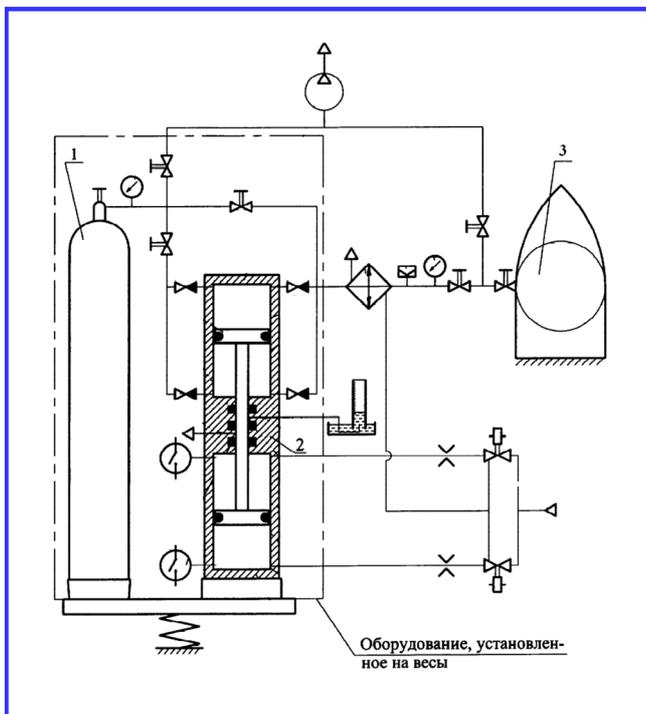


Рис. 7. Схема системы заправки ксеноном СЗК-001

Температура блока хранения ксенона КДУ контролировалась оператором ИВК-КВ с помощью штатного датчика температуры блока, принудительное охлаждение бака при заправке не применялось.

Пробы ксенона отбирались в два пробоотборника, которые затем отправлялись в ООО «Хром» (г. Муром) для проведения химического анализа. Анализ показал повышение содержания углеводородов в одном из пробоотборников, которое не превышало допустимого значения и, скорее всего, было вызвано наличием остатков смазки на резьбе переходника СЗК-001.

После заправки производилась консервация внутренних полостей КДУ в следующей последовательности:

- трёхкратное вакуумирование и заполнение ксеноном внутренних полостей КДУ (трубопроводы, БПК, ресивер) с давлением 0,2 – 0,5 кгс/см²;
- продувка ксеноном модулей МГР-50 в течение 5 мин.

Комплексные испытания КДУ на техническом комплексе не отличались от испытаний на заводе-изготовителе КА. В ходе испытаний из-за ошибки оператора КПА КДУ-КВ (регулятор тока анода ИСПД-50 был установлен на максимальное значение вместо нулевого) произошёл отказ транзистора в модуле питания накала катода СПУ-КВ, потребовавший ремонта модуля. В результате принято решение применять в перспективных разработках только автоматическую КПА, а на КПА КДУ-КВ перед началом комплексных испытаний КДУ фиксировать органы управления КПА в положении, исключающем включение СПУ-КВ на штатную нагрузку.



Рис. 8. Развёрнутая СЗК-001

Сборка лётной схемы КДУ производилась на заключительном этапе подготовки КА. Правильность сборки схемы контролировалась с помощью опроса контроля стыковки. Для цепей без контроля стыковки (например, цепи пироклапанов) производилось фотографирование состыкованных разъемов. Также производилось фотографирование закрытых и законтренных горловин и штуцера КДУ.

Положительные результаты наземных и лётных испытаний КДУ КА типа «Канопус-В» позволяют применить изложенный подход к наземным испытаниям и заправке двигательной установки при создании КДУ метеорологического КА «Метеор-М» № 3 на базе двигателя СПД-100В.

Выводы

1. Успешные лётные испытания КДУ КА «Канопус-В» №1 и Белорусский КА показали полноту и достаточность наземной отработки КДУ, а также возможность обеспечения высокой чистоты заправляемого рабочего тела.

2. При составлении программ и методик термовакуумных испытаний КА необходимо обеспечить имитацию работы КДУ как на освещённых, так и на теневых участках витка.

3. Контроль герметичности межблочных трубопроводов КДУ необходимо проводить до и после транспортировки КА на космодром для проведения запуска.

4. Необходимо (по возможности) применять контрольно-проверочную аппаратуру, не требующую участия оператора.

Литература

1. Система коррекции орбиты малого космического аппарата дистанционного зондирования «Канопус-В» / А. В. Горбунов, В. П. Ходненко, А. В. Хромов, В. М. Мурашко, А. И. Корякин, В. С. Жосан, Г. С. Грихин, В. Н. Галайко, Н. М. Катасонов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 126. – № 1. – С. 19–24.
2. Результаты лётных испытаний корректирующей двигательной установки с двигателем СПД-50 на борту космического аппарата типа «Канопус-В» / К. В. Киселёв, И. А. Медведков, В. П. Ходненко, А. В. Хромов, В. А. Шляконов, Л. В. Рыбальченко, М. В. Михайлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2013. – Т. 137. – № 6. – С. 7. – 14.
3. Способ заправки двигательной установки космического аппарата ксеноном и устройство для его осуществления: пат. 2341424 Рос. Федерация: МПК В64Г 5/00, F17С 5/06 / Ю. Л. Арзуманов, Н. А. Володин, Р. А. Петров, С. В. Шеманаев; заявитель и патентообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». – № 2006124189/11; заявл. 20.01.08; опубл. 20.12.08, бюл. № 35. – 12 с.: илл.

Поступила в редакцию 02.09.2014

Георгий Арменакович Акопов, канд. техн. наук, начальник отдела, т. (495) 623-33-35.

Илья Андреевич Медведков, начальник лаборатории, т. (495) 607-25-35.

Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 624-94-98.

*Александр Викторович Хромов, канд. техн. наук, начальник отдела, т. (495) 624-82-90,
e-mail: ahromov84@rambler.ru.*