

УДК 629.7.036.74

## ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНАЯ ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КАНОПУС-В» И ЕЕ ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В.А. Лесневский\*, Л.И. Махова\*, М.В. Михайлов, В.П. Ходненко\*\*, А.В. Хромов\*\*

ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск

\*ФГУП Опытно-конструкторское бюро «Факел», г. Калининград

\*\*ФГУП НПП «Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики», г. Москва

E-mail: polus@online.tomsk.net

Описана первая электрореактивная двигательная установка для малого космического аппарата «Канопус-В». Ее особенностями являются малая масса и тяга, широкий диапазон входного напряжения и повышенная точность стабилизации напряжения разряда. Рассмотрены задачи проведения огневых испытаний, показаны основные измерительные средства, схема и результаты испытаний.

### Ключевые слова:

Стационарный плазменный двигатель, электрореактивная двигательная установка, система питания и управления, электродинамический имитатор тягового модуля.

### Key words:

Stationary plasma thruster, electrojet thruster device, power processing unit, electro-dynamic simulator of a thrust module, fair tests.

Практическое использование электрореактивных двигательных установок началось в России с 1971 г. Они предназначены для выдачи импульсов тяги при коррекции ошибок выведения, а также при поддержании параметров орбиты в течение срока активного существования. Все эксплуатирующиеся на сегодняшний день установки предназначены для работы в составе космических аппаратов массой более одной тонны, что обуславливает их значительную массу (более 100 кг) и параметр тяги более 40 мН. Однако в последнее время заказчики проявляют интерес к малым космическим аппаратам (КА) масса которых не превышает 500 кг, это связано со значительной экономией средств на запуск и эксплуатацию таких спутников. Для удержания орбиты малых КА требуется значительно меньшее усилие, поэтому использование имеющихся установок приведет к необоснованному увеличению расхода рабочего тела и массы, что негативно отразится как на стоимости самого аппарата, так и на стоимости запуска.

Двигательная установка для малого космического аппарата впервые разработана ОКБ «Факел» и применена на аппарате «Канопус-В». В состав двигательной установки входят два стационарных плазменных двигателя СПД-50 (СПД), два модуля газораспределения, блок подачи ксенона, межблочные трубопроводы с проверочными горловинами, блок хранения ксенона, система питания и управления. Масса заправленной двигательной установки (с учетом рабочего тела – ксенона) составляет 26 кг, а номинальное значение тяги – 14 мН.

Для обеспечения удобства монтажа блоков двигательной установки на борт КА, а также для возможности сварки межблочных трубопроводов на предприятии-изготовителе принято решение объединить двигатели, модули газораспределения, блок подачи ксенона и трубопроводы в блок коррекции орбиты КА (рис. 1). Все сварные соедине-

ния трубопроводов производились при сборке блока коррекции и обвязке его трубопроводами. Блок коррекции соединен с блоком хранения рабочего тела при помощи штуцерно-нипельного соединения, что обеспечивает простоту установки блоков двигательной установки на КА и возможность снятия блока хранения ксенона для заправки. Созданный блок коррекции орбиты КА прошел огневые испытания совместно с летной системой электропитания и управления.

В соответствии со сложившейся практикой применения корректирующих двигательных установок (КДУ) в составе отечественных КА огневые испытания летных комплектов данных установок, систем их питания и управления проводятся на предприятиях-изготовителях КДУ [1], поскольку они имеют технические средства, позволяющие проводить такого рода испытания.

Цель испытаний – подтвердить соответствие действительных значений параметров КДУ-КВ требуемым.

Для достижения поставленной цели необходимо проверить следующее:

- работоспособность системы питания и управления (СПУ-КВ) при штатных нагрузках, создаваемых КДУ-КВ;
- прием и исполнение команд управления;
- формирование и выдачу аналоговой, сигнальной функциональной и телеметрической информации, провести сравнение параметров, выдаваемых СПУ-КВ, со значениями, регистрируемыми стендовыми средствами;
- работоспособность КДУ-КВ при ее управлении от СПУ-КВ;
- требуемые значения напряжений и токов потребляющих элементов КДУ-КВ;
- работу схемы поддержания разрядного тока в заданных пределах (при замкнутой схеме регулирования);

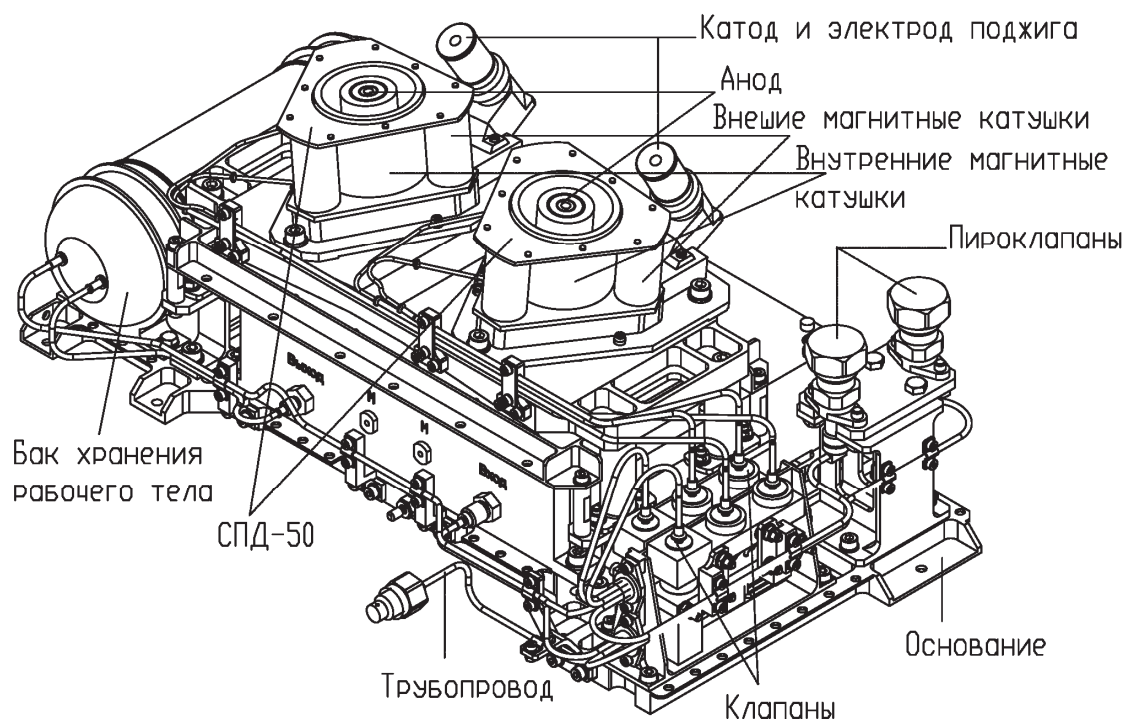


Рис. 1. Внешний вид блока коррекции орбиты КА «Канопус-В»

- характеристики пусковых и переходных процессов в разрядной цепи комплекса «СПУ-КДУ»;
- пульсации пусковых и переходных процессов в электрических цепях по шинам питания СПУ-КВ.

Средства проведения огневых испытаний КДУ по функциональной значимости можно подразделить на три группы: 1 – основные; 2 – средства измерения тяги и расхода ксенона КДУ; 3 – вспомогательные.

К первой группе относятся:

- вакуумная камера с крионасосом, в которой проводится включение КДУ-КВ;
- средства управления и обработки результатов испытаний;
- средства энергетического обеспечения.

Для проведения огневых испытаний КДУ-КВ использовалась горизонтально ориентированная вакуумная камера объемом 20 м<sup>3</sup> (ОКБ «Факел»). Рабочий отсек вакуумной камеры откачивается криогенными насосами, обеспечивающими безмасляный вакуум и имитируя натурные условия: статическое давление – не более 0,7 мПа; динамическое давление – не более 27 мПа.

Средства управления и обработки результатов испытаний включают контрольно-проверочную аппаратуру (КПА КДУ-КВ), поставляемую с СПУ-КВ (НПЦ «Полюс»), обеспечивающую выдачу команд управления и прием телеметрической информации, а также стендовые средства измерения, предназначенные для проверки параметров КДУ-КВ (ОКБ «Факел»).

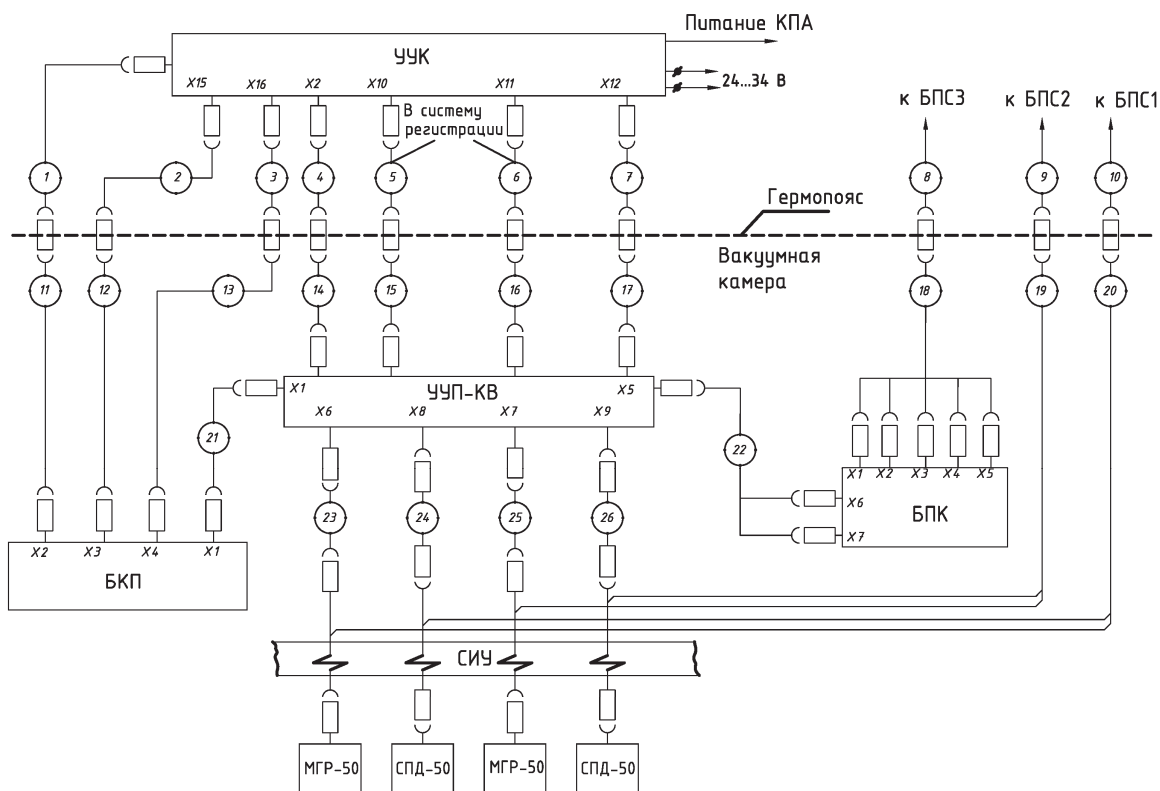
Средства энергетического обеспечения – стендовые источники питания, обеспечивающие пода-

чу требуемого напряжения на вход СПУ (ОКБ «Факел»). При необходимости исследования взаимного влияния бортовых источников питания и нагрузки в качестве средств энергетического обеспечения могут использоваться элементы бортовой системы электропитания (НПП ВНИИЭМ).

Ко второй группе относится тягоизмерительное устройство (ОКБ «Факел»). Тяга двигателя – один из основных параметров КДУ, причем двигатель должен выдавать как кратковременные импульсы тяги длительностью от нескольких секунд, так и длительные – до нескольких часов. Устройство позволяет оперативно измерять тягу в течение заданного времени.

Для КДУ-КВ, кроме требования к параметру тяги (12,6...15,4 мН), предъявляется требование к ограничению значения угла отклонения вектора тяги. Это обусловлено тем, что при отклонении вектора тяги от заданного направления в процессе работы КДУ неизбежно появление боковых составляющих вектора тяги и, как следствие, паразитных вращающих моментов, воздействующих на КА в целом. Требования к величине углов отклонения вектора тяги жесткие: значения допустимых отклонений для КДУ-КВ не должны превышать одного градуса.

В течение нескольких лет тягоизмерительное устройство успешно используется в ОКБ «Факел». Работает оно по принципу крутильных весов и может определять тягу и ее составляющие одновременно двух двигательных блоков на базе СПД, размещенных на его подвеске [2]. Результаты измерений тяги при проведении огневых испытаний в ОКБ «Факел» почти совпадают с полученными при лет-



**Рис. 2.** Электрическая схема огневых испытаний КДУ КА «Канопус-В»: УУК – устройство управления и контроля из состава КПА КДУ-КВ; БКП – блок коммутации питания (блок СПУ-КВ); УУП-КВ – устройство управления и питания (блок СПУ-КВ); БПК – блок подачи ксенона; МГР – модуль газораспределения; СПД – стационарный плазменный двигатель; БПС – блок приёма сигналов; 1–26 – соединительные кабели; СИУ – система измерения ускорения

ной эксплуатации космических аппаратов «Галс», «Экспресс», SESAT, «Экспресс-А», «Экспресс-АМ».

В третью группу входят вспомогательные средства для проведения испытаний: пневматическое оборудование (газовые баллоны, пульта, магистрали подачи и устройства измерения давления газа), кабельная сеть, приборы для измерения пульсаций, пусковых и переходных процессов в цепях электропитания, устройства охлаждения объектов испытаний и т. п. (ОКБ «Факел»).

На рис. 2 приведена электрическая схема огневых испытаний КДУ КА «Канопус-В».

В рамках огневых испытаний КДУ-КВ выполнено четыре включения длительностью 30 мин и четыре включения по 2 ч с перерывами между включениями не менее 30 мин, которые необходимы, чтобы двигатель успел остыть к следующему включению. Результаты испытаний показаны в таблице.

Температура корпуса двигателя изменялась от 37 до 116 °С, что не превысило расчетную величину 120 °С. Особенность огневых испытаний заключалась в том что схема испытаний (рис. 2) не предусматривала прямое измерение токов в цепях нагрузки, поскольку для этого необходимо подключать дополнительные кабели и делать петлю снаружи вакуумной камеры. В этом случае длина кабелей будет значительно превышать штатную, а токи в низкоомных цепях (нагреватель катода, термодроссель и магнитная катушка) отличаться

от реальных значений. Для измерения токов в ходе огневых испытаний использовались показания аналоговой телеметрии, представляющей собой гальванически развязанное постоянное напряжение 0...6 В, амплитуда которого изменяется пропорционально величине измеряемого параметра.

Помимо малой массы и тяги важной особенностью КДУ-КВ является широкий диапазон изменения входного напряжения (17 % от номинального значения) и повышенная точность стабилизации напряжения разряда (не хуже 2,7 %). В эксплуатируемых установках оба этих параметра составляют около 5 %. В следствие чего СПУ-КВ имеет более сложные схемотехнические решения, позволяющие выполнить эти требования.

По результатам огневых испытаний (см. табл.) видно, что все параметры КДУ-КВ были в пределах нормы, так точность поддержания напряжения разряда составила 1,1 %, а тяга не опускалась ниже 14,1 мН.

СПУ является неотъемлемой частью любой КДУ на базе СПД, которая формирует требуемые режимы электропитания для всех элементов КДУ, каждый из которых отличается режимом и мощностью потребляемой электроэнергии, а также характером процессов в трактах передачи энергии [3]. В связи с этим для каждого типа потребителей КДУ в СПУ создаются формователи требуемого режима электропитания и отдельные каналы передачи энергии. Поэтому большинство контролируемых

**Таблица.** Результаты огневых испытаний КДУ-КВ

Наименование параметра	Требуемые значения	Измеренные значения	Средство измерения	Примечание
Напряжение питания, В	24...34	24,2...33,7	Вольтметр М2017	Устанавливается оператором
Ток потребления, А	8,5...12,1	8,6...12,0	Милливольтметр М1105	В обратной зависимости от напряжения питания
Ток нагревателя катода, А	11,25...11,75	11,52...11,58	КПА КДУ-КВ	$R = 0,60...0,73$ Ом
	11,0...12,0			$R = 0,19...0,25$ Ом
Напряжение разряда, В	180...190	184...187	GDM-8246	Рабочий режим
	<350	209...305		Режим подготовки
Ток разряда, А	1,20...1,30	1,20...1,24	КПА КДУ-КВ	Телеметрия
Ток магнитной катушки, А	1,3...1,4	1,34...1,37	КПА КДУ-КВ	$R = 1,4...3,1$ Ом. Телеметрия
Ток регулятора расхода, А	1,3...1,5	1,37...1,40	КПА КДУ-КВ	Режим подготовки, $R = 0,19...0,40$ Ом. Телеметрия
	0; 3,6...4,0	0; 3,67...3,75		Рабочий режим, $R = 0,19...0,40$ Ом. Телеметрия
Напряжение питания клапанов блока подачи ксенона и электроклапанов двигателя, В	22,5...33	22,8...32,5	Мультиметр АРРА-207	Напряжение открытия
	8...13	8,6...10,4		Напряжение удержания
Мощность потребления системы СПУ-КВ, Вт	<292	<291	Вольтметр М2017, Милливольтметр М1105	Рабочий режим
Погрешность аналоговой телеметрии, %	<5	<3	Мультиметр АРРА-207, КПА КДУ-КВ	В диапазоне рабочих значений
Расход ксенона, мг/с	1,5...1,8	1,61...1,69	СИР 400.487.0000.00, АРРА-207, КСП-4	
Тяга, мН	12,6...15,4	14,1...15,0	СИУ 72.160.4500.00, КСП-4	Рабочий режим

параметров (см. табл.) обеспечивает СПУ. Соответствие этих параметров гарантирует требуемое значение тяги – основной выходной параметр КДУ.

Из вышеизложенного следует, что для проверки работоспособности КДУ требуется использование сложного стендового оборудования с большими энергетическими и материальными затратами. Заменяв СПД, модуль газораспределения, блок подачи ксенона и блок хранения ксенона проверочными устройствами (имитирующими их работу), можно решить большинство рассмотренных задач с существенно меньшими затратами средств и времени. В качестве имитирующего устройства можно использовать электродинамический имитатор тягового модуля [4], который предполагается использовать в качестве нагрузки, имитирующей работу СПД и основных модулей системы подачи рабочего тела. Его возможности позволяют проводить проверки в широком диапазоне уровней разрядного тока, имитировать все режимы работы системы электропитания, а также моделировать варианты запуска СПД с различными типами термодросселей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев Е.А. Испытания космических электроракетных двигателей установок. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
2. Способ испытаний электрореактивного двигателя по определению тяги и составляющих вектора тяги и устройство для его осуществления: пат. 2243516 Рос. Федерация. № 2002129009/02; заявл. 19.11.02; опубл. 27.12.04, Бюл. № 36. – 5 с.
3. Боязитов С.Ю., Вастрюков В.Ф., Деев В.Е., Катасонов Н.М., Михайлов М.В., Подоппелов И.А. Система электропитания

#### Выводы

В России создана первая корректирующая двигательная установка для малого космического аппарата на базе двух стационарных плазменных двигателей СПД-50. Особенностью установки является малая масса 26 кг (у аналогов свыше 100 кг) и небольшая тяга 14 мН (у аналогов не менее 40 мН). Показано, что при изменении напряжения разряда двигателя на 17 % от номинального значения точность стабилизации не хуже 1,1 %, что превосходит существующий уровень более чем в 4 раза.

Огневые испытания установки проведены на стенде, оборудованном горизонтально ориентированной вакуумной камерой объемом 20 м<sup>3</sup> с криогенными насосами, обеспечивающими безмасляный вакуум: статическое давление – не более 0,7 мПа; динамическое – не более 27 мПа. Значения напряжений нагрузок контролировались прямыми измерениями, а токов – по показаниям телеметрии. Диапазон изменения тяги двигателя составил 14,1...15,0 мН, что соответствует заявленным требованиям.

- корректирующей двигательной установки малого космического аппарата // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 97–101.
4. Лесневский В.А., Румянцев А.В., Соколов В.В. Имитатор электродинамических характеристик тягового модуля // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. – 2010. – № 10. – С. 132–137.

Поступила 06.04.2011 г.