

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ МОЩНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2018 г. Андрианов Д.И.¹, Захаренков Л.Э.^{1,2}, Каревский А.В.¹, Кирыушин Е.Н.¹,
Ошев Ю.А.¹, Попов А.В.¹, Попов С.А.¹, Семёнкин А.В.^{1,2},
Солодухин А.Е.^{1,2}, Терехов Д.Н.¹, Штонда С.Ю.¹

¹ГНЦ РФ–ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») Ул. Онежская, 8, г. Москва, Российская Федерация, 125438, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 105005, e-mail: bauman@bmstu.ru

Расширение масштабов космической деятельности в околоземном пространстве и дальнем космосе требует повышения уровня энергодвигательного обеспечения. Для выполнения транспортных операций рассматривается создание и применение космических аппаратов с мощными ядерными энергоустановками и электроракетными двигателями. Одной из задач, которую необходимо решить на пути создания таких энергодвигательных установок, является проведение наземной экспериментальной отработки. В статье рассматривается подход к организации проведения наземной экспериментальной отработки мощных ядерных энергодвигательных установок на примере результатов международного проекта DEMOCRITOS. В рамках работ по данному проекту были определены несколько концепций демонстраторов, которые предназначены для отработки необходимых технологий. Одной из таких концепций является наземный демонстратор, который включает в себя контур преобразования тепловой энергии в электрическую, радиатор, систему преобразования электрической энергии и электроракетные двигатели. Приведен состав и проектный облик стендовой базы для проведения наземной безъядерной экспериментальной отработки составляющих ядерной энергодвигательной установки.

Ключевые слова: ядерная энергодвигательная установка, реакторная установка, система преобразования энергии, электроракетная двигательная установка, система отвода тепла, холодильник-излучатель, система преобразования электрической энергии, наземная экспериментальная отработка, наземный демонстратор.

SPECIAL ASPECTS OF ORGANIZING GROUND DEVELOPMENTAL TESTS OF HIGH-POWER NUCLEAR POWER GENERATION UNITS FOR SPACE APPLICATIONS

Andrianov D.I.¹, Zakharenkov L.E.^{1,2}, Karevskiy A.V.¹, Kiryushin E.N.¹,
Oshev Yu.A.¹, Popov A.V.¹, Popov S.A.¹, Semenkin A.V.^{1,2},
Solodukhin A.E.^{1,2}, Terekhov D.N.¹, Shtonda S.Yu.¹

¹The State Scientific Centre of Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise Research Centre named after M.V. Keldysh (Keldysh Research Centre) 8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russian Federation, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

²Bauman Moscow State University (Bauman MSTU) 5 bld. 1 2nd Bauman str., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: bauman@bmstu.ru

Expanding space exploration in near-Earth space and deep space call for a higher level of power-generation and propulsion capabilities. Spacecraft with powerful nuclear power generating units and electrical propulsion systems are being considered for transportation operations. One of the problems that need to be solved on the way toward development of such power generation and propulsion systems is the conduct of the ground developmental tests. The paper discusses an approach to organizing ground developmental tests of high-power nuclear power-generation and propulsion system taking as an example the results of the international project DEMOCRITOS. Identified within the framework of this project were several concepts of demonstrators intended for developmental testing of the necessary technologies. One of such concepts is a ground demonstrator which includes a thermal-to-electrical power conversion loop, a radiator, electric power transformation system and electric propulsion engines. The paper provides a list and a design configuration of a testing facility for conducting nuclear-free ground developmental tests on the components of the nuclear power-generation and propulsion system.

Key words: nuclear power-generating and propulsion system, reactor system, power conversion system, electrical propulsion system, heat-removal system, refrigerator-radiator, electric power conversion system, ground developmental testing, ground demonstrator.

АНДРИАНОВ Дмитрий Игоревич — инженер ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша»,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
ANDRIANOV Dmitry Igorevich — Engineer at Keldysh Research Centre,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

ЗАХАРЕНКОВ Леонид Эдуардович — кандидат технических наук, заместитель
начальника отделения ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша», доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
ZAKHARENKOV Leonid Eduardovich — Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Division
at Keldysh Research Centre, Assistant professor at Bauman MSTU, e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

КАРЕВСКИЙ Андрей Владимирович — кандидат технических наук, начальник отдела
ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша», e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
KAREVSKIY Andrey Vladimirovich — Candidate of Science (Engineering), Head of
Department at Keldysh Research Centre, e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

КИРЮШИН Евгений Николаевич — ведущий инженер ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша»,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
KIRYUSHIN Evgeny Nikolaevich — Lead engineer at Keldysh Research Centre,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

ОШЕВ Юрий Аркадьевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша», e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
OSHEV Yury Arkadyevich — Doctor of Science (Engineering), Lead Research Scientist
at Keldysh Research Centre, e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

ПОПОВ Александр Владимирович — инженер ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша»,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
POPOV Alexander Vladimirovich — Engineer at Keldysh Research Centre,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

ПОПОВ Сергей Александрович — заместитель начальника отделения ГИЦ ФГУП «Центр
Келдыша», e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru
POPOV Sergey Alexandrovich — Deputy Head of Division at Keldysh Research Centre,
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

СЕМЁНКИН Александр Вениаминович — доктор технических наук, заместитель
генерального директора — начальник отделения ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша», заведующий
кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: semenkin@kerc.msk.ru

SEMENKIN Alexander Veniaminovich — Doctor of Science (Engineering), Deputy General Director – Head of Division at Keldysh Research Centre, Head of Department at Bauman MSTU, e-mail: semenkin@kerc.msk.ru

СОЛОДУХИН Александр Евгеньевич — кандидат технических наук, заместитель начальника отделения ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», доцент кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: solodukhin@kerc.msk.ru

SOLODUKHIN Alexander Evgenyevich — Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Division at Keldysh Research Centre, Assistant professor at Bauman MSTU, e-mail: solodukhin@kerc.msk.ru

ТЕРЕХОВ Дмитрий Николаевич — инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

TEREKHOV Dmitry Nikolayevich — Engineer at Keldysh Research Centre, e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

ШТОНДА Сергей Юрьевич — инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

SHTONDA Sergey Yuryevich — Engineer at Keldysh Research Centre, e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

Введение

Разработка проектов, в которых предусматривается использование космических транспортных средств на базе мощных ядерных энергодвигательных установок (ЯЭДУ), ведется с самых первых этапов практического освоения космического пространства, и с течением времени потребность в таких космических аппаратах становится все более актуальной. В настоящее время в мире наблюдается рост числа таких проектов [1, 2], активный интерес к которым обуславливается возрастающими технологическими и конструктивными возможностями по созданию основных составных частей мощной (от сотен киловатт до десятков мегаватт) ЯЭДУ, а именно:

- реакторной установки;
- системы преобразования энергии;
- электроракетной двигательной установки;
- системы отвода тепла;
- системы преобразования и распределения электрической энергии.

При проведении наземной экспериментальной отработки (НЭО) изделий космического назначения требуется обеспечение условий, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации (вакуума, невесомости, низких температур и пр.). В настоящее время создание таких условий для мощной ЯЭДУ в сборе, а также некоторых ее составляющих — системы

отвода тепла (СОТ) и электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) — является невыполнимой задачей. Основными ограничениями являются: большие габариты изделий; невозможность создания вакуумных стендов с производительностью откачных систем, необходимой для обеспечения требуемого для испытаний ЭРДУ вакуума, а также необходимость обеспечения условий невесомости при испытаниях бескаркасных холодильников-излучателей (ХИ) СОТ.

Поэтому при НЭО предлагается проводить последовательную поэлементную и поэтапную отработку характерных и относительно небольших модулей (секций) составных частей ЯЭДУ, а также сборок на их основе.

Также предлагается максимально возможный объем наземной отработки составных частей ЯЭДУ проводить на безъядерных стендах без привлечения реакторной установки (РУ). Безъядерная отработка может быть выполнена с использованием тепловых имитаторов реакторной установки (ТИРУ), которые в общем случае представляют собой мощные электрические нагреватели газа. Ядерные же испытания с использованием делящихся материалов проводятся для автономной отработки РУ и ее элементов, а также на финальном этапе наземной отработки ЯЭДУ при проведении совместных (интеграционных) испытаний РУ и других составных частей ЯЭДУ после завершения безъядерной отработки всех систем.

При таком подходе укрупненный перечень наземных испытаний составных частей ЯЭДУ и их интеграционных испытаний может выглядеть следующим образом:

- отработка РУ и ее элементов на ядерных стендах;
- безъядерная отработка системы преобразования энергии (СПЭ) с использованием ТИРУ;
- отработка единичного электроракетного двигателя (ЭРД) с использованием стендовых источников питания;
- отработка сборки из нескольких ЭРД или их масштабируемого по мощности макета с использованием стендовых источников питания;
- интеграционные безъядерные испытания (с использованием ТИРУ) следующих составных частей ЯЭДУ: СПЭ, системы преобразования и распределения электрической энергии (СПРЭЭ), секций ХИ, единичного ЭРД (или сборки из нескольких ЭРД) и электрического макета ЭРДУ;
- интеграционные ядерные испытания РУ, СПЭ, СПРЭЭ и электрического макета ЭРДУ.

Предлагаемая последовательность проведения НЭО, предусматривающая проведение на первом этапе безъядерных (безреакторных) испытаний, была опробована ранее при создании отечественных космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) первого поколения [3]. Первым разработанным изделием стал реактор-преобразователь «Ромашка». Его НЭО выполнялась в два этапа.

На первом этапе проводились комплексные испытания полномасштабной тепловой модели реактора-преобразователя и штатного комплекта реактора «Ромашка» на стенде с электронагревом. Целью данных испытаний являлась проверка работоспособности всей установки в целом и ее отдельных узлов, а также исследование рабочих параметров установки в стационарных и нестационарных режимах. Проведенные исследования позволили изучить работоспособность элементов реактора-преобразователя и рекомендовать переход ко второму этапу отработки, на котором проводились ядерные энергетические испытания. В дальнейшем опыт отработки высокотемпературного кремний-германиевого преобразователя для установки «Ромашка» был использован в работах по созданию КЯЭУ «Бук» [3].

Аналогичная последовательность испытаний использовалась при наземной

отработке установок КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2»). Основное принципиальное преимущество одноэлементных электрогенерирующих каналов (ЭГК) КЯЭУ «Енисей» — это возможность их безреакторной отработки в рабочих условиях на стендах с электронагревом, при проведении испытаний на которых решалось большинство вопросов, связанных с созданием термоэмиссионных ЭГК с ресурсом три и более лет [4].

Как было сказано выше, существенно упростить проведение НЭО позволяет модульный принцип построения мощных ЯЭДУ, поскольку позволяет подвергать испытаниям отдельные модули (секции) подсистем. Модульный принцип был предложен РКК «Энергия» при проектировании межорбитального буксира «Геркулес» [5].

Главными преимуществами модульной схемы являются:

- на стадии создания — возможность отработки при существующих экономических, производственных условиях и на доступной экспериментальной базе;
- увеличение уровня мощности до определенного предела может происходить преемственно, путем количественного увеличения числа унифицированных модулей.

Постановлениями Правительства по разработке межорбитального буксира «Геркулес» предусматривались создание экспериментально-испытательных баз, в т. ч. реакторных, а также материаловедческие, технологические и экспериментально-испытательные работы по агрегатам, узлам, модулям ЯЭУ и ЭРДУ, их поузловая и поагрегатная отработка с созданием полномасштабного макета модуля системы охлаждения и нейтронно-физического прототипа.

Такой же подход к проведению НЭО предусматривался в проекте NASA «Прометей» (*Prometheus*) [6]. На первом этапе планировалось проводить безъядерные испытания модулей системы преобразования энергии [7, 8] и остальных агрегатов, составляющих ЯЭДУ [9], а затем переходить к испытаниям с ядерным реактором.

Аналогичная логика экспериментальной отработки ЯЭДУ предложена в международном проекте *DEMOCRITOS* (демонстраторы систем преобразования, реактора, радиатора, двигателей электроракетных двигательных установок), финансируемого в рамках Исследовательской рамочной программы Еврокомиссии «Горизонт 2020». Данный проект проводился с 2015 по 2017 гг.

и являлся продолжением успешных совместных Российско-европейских работ в рамках проекта *MEGANIT* (мегаваттные высокоэффективные технологии для космических энергодвигательных систем для длительных миссий) [10, 11]. Целью проекта *DEMOCRITOS* являлся анализ проведения демонстрационных экспериментальных работ, необходимых для развития технологий ЯЭДУ мегаваттного уровня мощности [5].

Долгосрочной целью совместных работ, проводимых международной кооперацией организаций-партнеров [6], является разработка космического аппарата (КА) с ЯЭДУ мегаваттного уровня мощности для реализации различных космических задач, трудновыполнимых другим способом.

Состав ЯЭДУ такого КА, предложенный в рамках проекта *DEMOCRITOS*, приведен ниже [10, 11]:

- РУ, вырабатывающая тепловую мощность 3,3 МВт;
- СПЭ в составе шести сборок турбокомпрессоров-генераторов (ТКГ) по 200 кВт каждая (общей электрической мощностью 1 МВт, одна сборка резервная);
- ЭРДУ мощностью ~1 МВт и мощностью единичного ЭРД ~50 кВт;
- электрическая мощность управляется и распределяется с помощью СПРЭЭ на ЭРДУ и другие потребители;
- СОТ, обеспечивающая отвод избыточной тепловой мощности от составных частей ЯЭДУ и сброс ее в окружающее космическое пространство, выполнена на

базе радиаторов с тепловыми трубами. В качестве возможной альтернативной опции рассматривалась возможность применения бескаркасных ХИ.

Учитывая новизну КА с ЯЭДУ и большинства составляющих компонентов, а также необходимость безусловного выполнения существующих международных норм в области использования ядерных источников энергии в космосе, в рамках проекта *DEMOCRITOS* было предложено рассматривать поэтапную отработку и демонстрацию возможности создания и безопасного использования КА с ЯЭДУ, а именно:

- отработка составляющих и создание наземного демонстратора ЯЭДУ;
- создание и испытания в космосе летного демонстратора КА с ЯЭДУ;
- создание собственно целевого КА на основе уже отработанной ЯЭДУ.

В рамках проекта *DEMOCRITOS*, исходя из принятой проектной схемы построения КА (рис. 1), рассматривались возможные концепции демонстраторов. В результате был предложен набор демонстраторов, предназначенных для отработки технологий, необходимых для создания КА с ЯЭДУ:

- наземный компонент *DEMOCRITOS* (безъядерный) или наземный демонстратор (НД);
- ядерный компонент *DEMOCRITOS* или демонстратор реактора;
- летный компонент *DEMOCRITOS* или летный демонстратор.

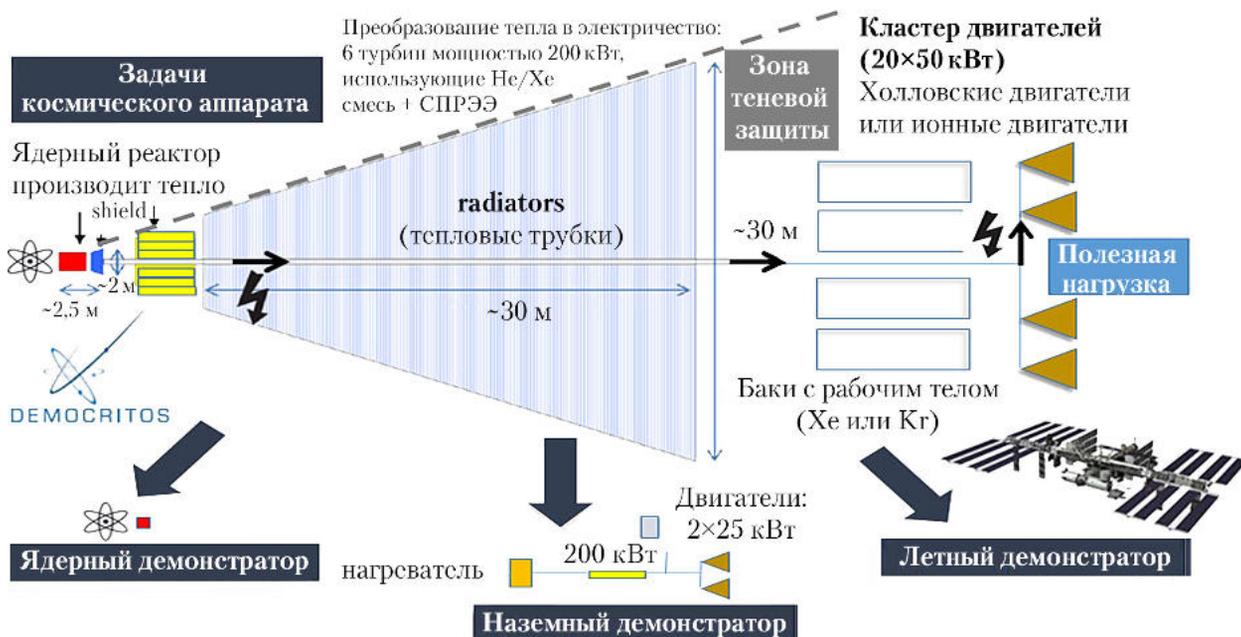


Рис. 1. Принципиальная схема космического аппарата с ЯЭДУ [13]

Примечание. СПРЭЭ — система преобразования и распределения электрической энергии.

Проектные облики ядерного и летного компонентов определялись Европейскими партнерами проекта: *NNL* (Великобритания) и *DLR* (Германия), соответственно [12]. При этом создание НД (без ядерного реактора) являлось первым и ключевым этапом изложенной выше логической последовательности экспериментальной отработки ЯЭДУ. ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» совместно с европейскими партнерами [13] (*ESF*, *CNES*, *ARIANESPACE* – Франция; *DLR* – Германия; *NNL* – Великобритания; *TAS* – Италия) для комплектации НД и проведения наземных демонстрационных испытаний были выбраны следующие составляющие ЯЭДУ, успешная демонстрация совместной работы которых в наземных условиях является необходимым и достаточным условием для перехода к следующему этапу отработки:

1. Турбокомпрессор-генератор, представляющий собой быстровращающийся агрегат, объединяющий в единой сборке турбину, компрессор и электрический генератор переменного тока.

2. Секция ХИ (радиатора) на основе тепловых труб характерной площадью 1...3 м².

3. Кластер на базе ЭРД с уровнем мощности 25 кВт. В качестве возможных кандидатов в первую очередь рассматриваются ЭРД, разрабатываемые участниками проекта *DEMOCRITOS*: ионный двигатель *IT-500* производства ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и холловский двигатель *PPS20k* производства *Snesma* [7]. Применение других ЭРД, близких по уровню мощности, также возможно, например – холловских двигателей СПД-230 разработки ФГУП ОКБ «Факел» и ТМ-50 разработки ФГУП «ЦНИИмаш».

4. Аппаратура системы преобразования и распределения электрической энергии в составе блока управления, блока инвертора, блоков выпрямителя, блоков распределения высоковольтной и низковольтной мощности.

Проектные характеристики рассматриваемых составляющих ЯЭДУ для наземного демонстратора были предложены европейскими партнерами консорциума. Главная цель испытаний – демонстрация возможности всех компонентов НД функционировать в составе единой системы. Достижение этой цели обеспечивается:

- демонстрацией функциональных возможностей НД: запуск, останов, перезапуск (многократный) с высокой степенью безопасности;
- демонстрацией работы и выхода из аварийных режимов;

- демонстрацией возможности длительной стабильной работы на характерных режимах, в том числе: номинальной мощности (100%); пониженной мощности (50%) и в режиме холостого хода (менее 10% мощности);

- определением характеристик на различных режимах (мощность, КПД, тепловые и электрические потери и т. д.);

- демонстрацией нескольких (40 для обеспечения Лунной миссии) типовых циклов работы от запуска до останова.

Зонай ответственности ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» в рамках работ по проекту *DEMOCRITOS* являлась разработка, совместно с европейскими партнерами, проектного облика стендовой базы для испытаний НД ЯЭДУ. Предложенный состав и проектный облик стендовой базы для НД, приведенные в настоящей статье, основываются на наиболее типичной концепции построения КА с мощной ЯЭДУ, рассматриваемой различными странами (США, Россия, Западная Европа, Китай), и могут быть использованы при планировании НЭО разрабатываемых в мире ЯЭДУ большой мощности.

Стендовая база для испытаний наземного демонстратора

В общем случае при проведении наземных испытаний образцов космической техники должны учитываться условия их эксплуатации в космосе (вакуум, диапазон температур, невесомость, космическое излучение и пр.). Однако, для демонстрации рассматриваемых технологий нет необходимости полного воспроизведения всех перечисленных условий. Целесообразно обеспечить только те условия, которые имеют принципиальную важность для работы составляющих НД.

Создание стенда на базе одной очень большой вакуумной камеры, имитирующей космический вакуум, и размещение в ней всех составляющих НД нецелесообразно из-за значительных финансовых затрат. Такой вариант размещения потребует также организации в вакуумной камере отдельных зон для испытаний различных составляющих НД. Например, зона для испытаний высокооборотных агрегатов должна быть отделена от других зон, чтобы исключить воздействие теплового излучения на другие компоненты НД.

Поэтому предлагается проводить испытания НД на стендовой базе, состоящей из

нескольких испытательных участков с использованием нескольких вакуумных камер:

- участок для испытаний контура преобразования энергии, который позволяет испытать турбину, компрессор, генератор, турбокомпрессор-генератор, теплообменники и т. д.;
- участок для испытаний СПРЭЭ;
- участок для испытаний кластера ЭРД;
- участок для испытаний секций радиатора.

При этом, несмотря на то, что каждый компонент НД испытывается на различных испытательных участках, все компоненты должны быть максимально интегрированы друг с другом.

Примерный план с габаритными размерами стендовой базы для наземного демонстратора приведен на рис. 2. Площадь, занимаемая стендовой базой (без учета офисных помещений), составляет ~1 400 м².



Рис. 2. План стендовой базы для наземного демонстратора: 1 – участок для испытаний электроракетных двигателей; 2 – участок компрессоров криогенных насосов; 3 – участок для проведения испытаний контура преобразования энергии; 4 – участок системы электропитания и управления резистивным нагревателем газа; 5 – участок тепловыделяющих элементов балластной нагрузки; 6 – участок для испытаний холодильника-излучателя; 7 – участок форвакуумной станции; 8 – участок системы оборотного водоснабжения и водоподготовки; 9 – участок системы охлаждения оборотного водоснабжения; 10 – участок газовой ramпы высокого давления; 11 – участок комнаты управления; 12 – участок разгрузки/погрузки; 13 – офисные помещения

Производственные помещения условно можно разделить на 13 зон (рис. 2). Основными испытательными зонами являются: 1 — участок для испытаний ЭРД; 3 — участок для проведения испытаний контура преобразования энергии и 6 — участок для испытаний ХИ. Остальные зоны являются вспомогательными и предназначены для размещения технологического и инженерного оборудования.

Проектный облик стендовой базы приведен на рис. 3.

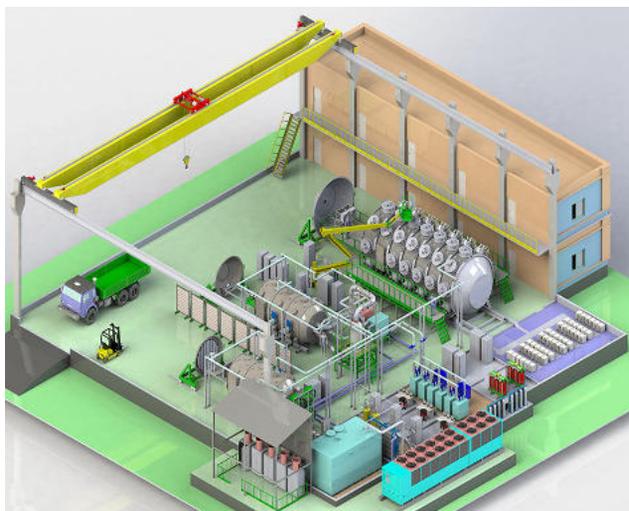


Рис. 3. Проектный облик стендовой базы для наземного демонстратора

Участок испытаний электроракетного двигателя

На рис. 4 показан план участка испытания ЭРД.

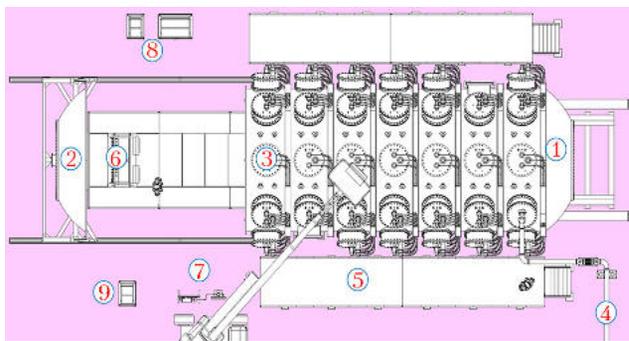


Рис. 4. План участка испытаний электроракетного двигателя (ЭРД): 1 — вакуумная камера; 2 — система загрузки с откатной крышкой и внутренней технологической площадкой обслуживания; 3 — криогенные насосы; 4 — подвод магистрали форвакуумной откачки; 5 — внешние технологические площадки обслуживания; 6 — ЭРД; 7 — система подачи рабочего тела ЭРД; 8 — источники электропитания ЭРД; 9 — элементы системы управления

Вакуумная камера состоит из нескольких секций и двух крышек и имеет характерный размер: диаметр ~4,5 м и длину ~13 м.

Одна из крышек установлена на камере неподвижно. Вторая крышка совмещена с системой загрузки ЭРД в камеру и внутренними технологическими площадками обслуживания. Закрытие и вскрытие камеры происходит в соответствии с кинематической схемой, приведенной на рис. 5. При этом ведущая колесная пара системы загрузки движется по рельсовым направляющим, установленным в полу участка, а ведомая — по направляющим, расположенным внутри вакуумной камеры.

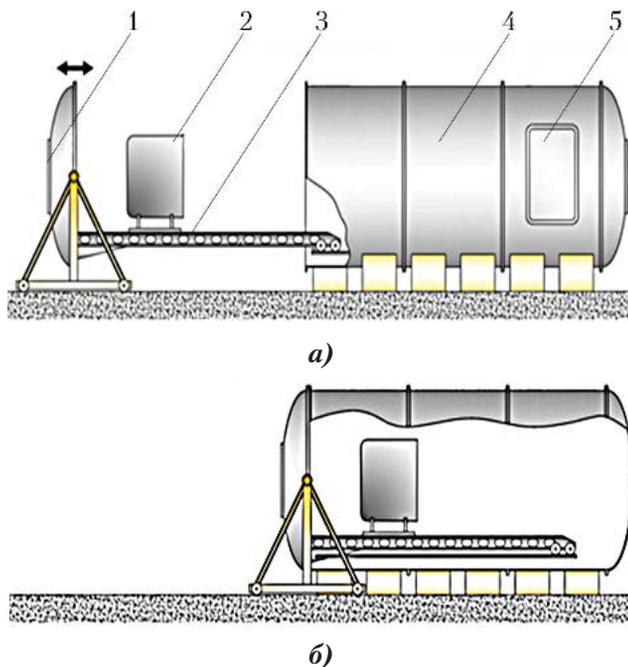


Рис. 5. Кинематическая схема загрузки в камеру: а — камера открыта; б — камера закрыта; 1 — монтажный фланец; 2 — ЭРД; 3 — система загрузки; 4 — вакуумная камера; 5 — люк для доступа персонала

Участок испытаний контура преобразования энергии

На рис. 6 и 7 показаны план и проектный облик участка испытаний контура преобразования энергии.

Вакуумная камера состоит из секций и крышек и имеет характерный размер: диаметр ~3 м и длину ~5,5 м. Так же, как и в случае камеры для испытаний ЭРД, одна из крышек установлена на камере неподвижно, а вторая крышка совмещена с системой загрузки ТКГ в камеру. Аналогично схеме загрузки ЭРД (рис. 5) происходит и загрузка ТКГ в вакуумную камеру. Монтажный фланец с помощью ведущей колесной пары системы загрузки движется по рельсовым направляющим, установленным в полу участка, а ведомая часть системы загрузки движется по направляющим внутри камеры.

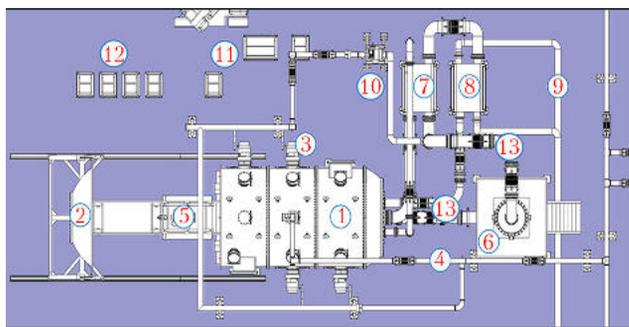


Рис. 6. План участка испытаний контура преобразования энергии: 1 – вакуумная камера; 2 – система загрузки с откатной крышкой; 3 – турбомолекулярный насос с вакуумным затвором; 4 – подвод магистрали форвакуумной откачки; 5 – турбокомпрессоры-генераторы; 6 – резистивный нагреватель газа; 7 – теплообменник-рекуператор; 8 – теплообменник-холодильник; 9 – подвод/отвод охлаждающей воды к теплообменнику-холодильнику; 10 – клапан отсечения вакуумной магистрали от контура преобразования энергии; 11 – элементы системы управления; 12 – элементы системы преобразования электрической энергии; 13 – трубопроводы контура преобразования энергии

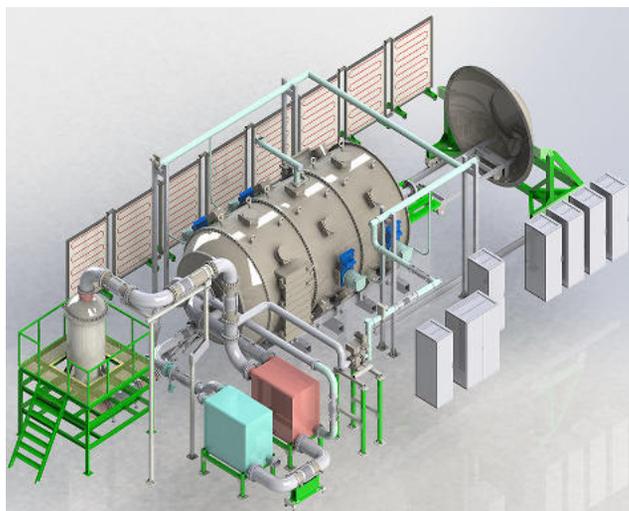


Рис. 7. Проектный облик участка испытаний контура преобразования энергии

На вакуумной камере предусмотрены следующие интерфейсы:

- *газовые*, через которые осуществляется стыковка расположенных вне вакуумной камеры трубопроводов подвода и отвода рабочего тела на турбину и компрессор с соответствующими трубопроводами ТКГ, расположенными внутри вакуумной камеры;

- *силовые электрические*, через которые осуществляется отвод вырабатываемой генератором электрической мощности к СПРЭЭ, а также подвод электрической мощности от системы обеспечения запуска к генератору для раскрутки вала ТКГ при работе генератора в моторном режиме;

- *измерительные*, через которые осуществляется передача сигналов от датчиков ТКГ к стендовой системе управления;

- *гидравлические*, через которые осуществляется подвод и отвод теплоносителей для охлаждения элементов ТКГ (при необходимости).

Вакуумная камера должна иметь водяное охлаждение для снятия тепловой мощности, излучаемой поверхностью ТКГ и трубами. Охлаждаемыми должны быть как секции камеры, так и ее крышки. Камера также должна иметь двери для доступа персонала внутрь при подготовке к испытаниям после загрузки ТКГ в камеру.

Одним из ключевых составляющих стендовой базы является тепловой имитатор ядерного реактора, предназначенный для нагрева рабочего вещества в замкнутом контуре преобразования энергии. В проекте *DEMOCRITOS* рассматривалась конструкция имитатора, созданного ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», которая выполнена в виде проточного нагревателя с резистивными элементами [15, 16]. Схема и фотография экспериментального резистивного нагревателя газа (РНГ) приведены на рис. 8. РНГ установлен на ступень и соединен с элементами контура высокотемпературными трубопроводами с сильфонами-компенсаторами.

Проток и нагрев газа осуществляется внутри негерметичных трубок 14, к которым по электрическим шинам 15 через охлаждаемые герметичные токовводы 1 подводится электрический ток. Трубки через изоляторы установлены в отверстиях несущих фланцев 11. Подвод газообразного рабочего тела осуществляется через патрубок 2, а его отвод – через патрубок 9. Внутренняя полость нагревателя 10 сформирована негерметичными внутренними экранами 6, 8 и слоем теплоизоляционного материала 7. Внешний герметичный корпус состоит из цилиндрической части 12 и двух крышек эллипсоидной формы 4. Охлаждение уплотнений стыков крышек и цилиндрической части корпуса осуществляется по каналам охлаждения 3, 5 и 13.

Резистивный нагреватель газа с уровнем мощности до 1 МВт и рабочим давлением до 4 МПа рассчитан на работу при расходах инертного газа (аргон, гелий-ксеноновая смесь) до 4 кг/с, с нагревом газа до 1 500 К. Нагреватель имеет длину ~2 400 мм, диаметр его внешнего герметичного корпуса составляет ~600 мм. Охлаждение внешнего герметичного корпуса обеспечивает его температуру на уровне, не превышающем 100 °С.

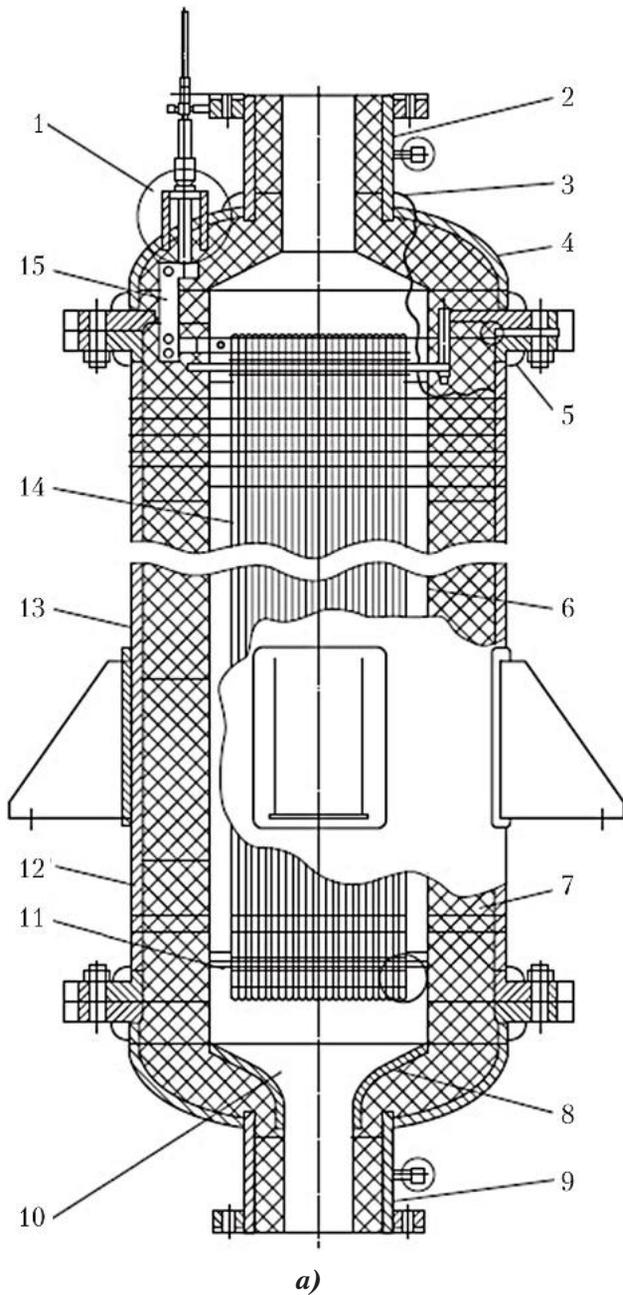


Рис. 8. Резистивный нагреватель газа: а – схема; б – внешний вид; 1 – охлаждаемые герметичные токовые вводы; 2, 9 – патрубки для подвода и отвода нагреваемого газа; 3, 5, 13 – кожухи с каналами водяного охлаждения; 4, 12 – внешний герметичный корпус, состоящий из цилиндрической части и двух крышек эллипсоидной формы; 6, 8 – негерметичные внутренние экраны; 7 – слой теплоизолирующего материала; 10 – внутренняя полость, предназначенная для нагрева в ней газа; 11 – отверстия несущих фланцев; 14 – негерметичные трубки; 15 – электрические шины

План участка испытаний секции холодильника-излучателя

На рис.9 показан план участка для испытаний ХИ. Конструкция вакуумной камеры схожа с конструкцией вакуумной камеры для испытаний контура преобразования энергии, состоит из секций и крышек, и имеет характерный размер: диаметр ~3 м и длину ~5,5 м. Закрытие и вскрытие камеры происходит в соответствии с кинематической схемой, приведенной на рис. 5. При этом ведущая колесная пара системы

загрузки движется по рельсовым направляющим, установленным в полу участка, а ведомая – по направляющим, расположенным внутри вакуумной камеры (рис. 9).

В отличие от вакуумной камеры, используемой для размещения ТКГ при испытаниях контура преобразования энергии, данная камера оборудована дополнительным охлаждаемым до криогенных температур цилиндрическим экраном, установленным внутри камеры. В качестве хладагента может использоваться жидкий азот. Крышки также оборудованы криогенным экраном.

Камера оснащена четырьмя оптическими вводами для проецирования светового потока на систему зеркал, установленную внутри камеры. Световой поток подается четырьмя группами ламп имитатора солнечного излучения, установленного в непосредственной близости от неподвижной крышки вакуумной камеры. Такая конструкция имитатора солнечного излучения подобна конструкциям, используемым на уже существующих стендах [17].

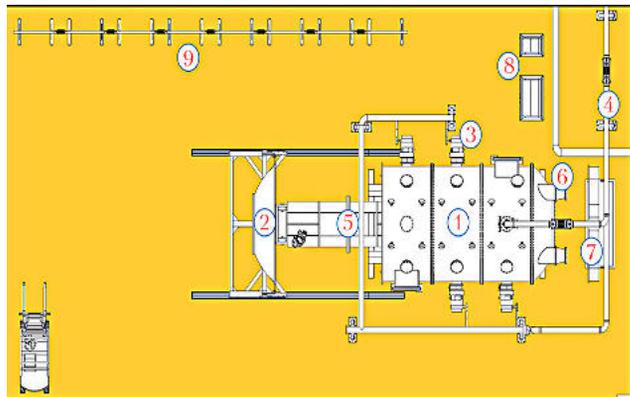


Рис. 9. План участка испытаний секции холодильника-излучателя (ХИ): 1 – вакуумная камера; 2 – система загрузки с откатной крышкой; 3 – турбомолекулярный насос с вакуумным затвором; 4 – подвод магистрали форвакуумной откачки; 5 – дополнительная секция ХИ; 6 – оптический ввод; 7 – имитатор солнечного излучения; 8 – элементы системы управления и электропитания солнечного имитатора; 9 – сборка секций ХИ

Заключение

В статье описывается предварительный проектный облик стендовой базы для проведения испытаний безъядерного наземного демонстратора ЯЭДУ мегаваттного класса. На сегодняшний день в мире не существует стендовой базы, способной обеспечить проведение полномасштабных испытаний такой ЯЭДУ как единой системы. Поэтому организациями-участниками проекта DEMOCRITOS была разработана концепция наземного демонстратора и выполнена проработка облика стендовой базы, позволяющей провести как отработку основных составляющих ЯЭДУ, так и демонстрацию возможности функционирования всех составляющих в составе единой системы.

Полученные результаты проектной проработки могут быть в дальнейшем использованы при выборе площадки для размещения стендовой базы и оценки возможности использования уже существующих стендов для испытаний отдельных элементов ЯЭДУ мегаваттного класса.

Список литературы

1. Коротеев А.С., Ошев Ю.А., Попов С.А., Каревский А.В., Солодухин А.Е., Захаренков Л.Э., Семёнкин А.В. Ядерная энергодвигательная установка космического аппарата // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 5. С. 45–59.
2. Zakharenkov L.E., Semenkin A.V., Solodukhin A.E. Concept of electric propulsion realization for high power space tug / In: Progress in propulsion physics (EUCASS advances in aerospace sciences book series. V. 8). Moscow: Torus press, 2016. P. 165–180.
3. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей») / Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. М.: ИздАТ, 2008. 146 с.
4. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. М.: Энергоатомиздат, 2000. 375 с.
5. Синявский В.В. Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 25–45.
6. National Aeronautics and Space Administration. 2005. Prometheus project. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory. Final Report No. 982-R120461.
7. Write S.A., Vernon M.E., Pickard P. Small scale closed Brayton cycle dynamic response experiment results. Sandia Report SAND2006-3485 (Unlimited Release) / Sandia National Laboratories – 2006.
8. Hervol D.S., Briggs M., Owen A.K., Lavelle T.A. Experimental and analytical performance of a dual Brayton power conversion system. NASA/TM-2009-215511.
9. Hervol D.S., Mason L., Birchenough A., Pinero L. Experimental investigations from the operation of a 2 kW Brayton power conversion unit and a xenon ion thruster. NASA/TM-2004-212960.
10. Jansen F., Detsis E., Bauer W., Cliquet E., Gaia E., Hodgson Z., Koroteev A.S., Masson F., Semenkin A.V., Tinsley T., Tosi M.C., Ruault J.-M., Worms J.-C. MEGAHIT Roadmap. Режим доступа: http://cordis.europa.eu/result/rcn/169848_en.html (дата обращения 02.04.2017 г.).
11. Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere F.,

Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A., Tinsley T., Hodgson Z., Koppel Ch., Guimarães L.N.F. DEMOCRITOS demonstrators for realization of nuclear electric propulsion of the European roadmaps MEGAHIT & DiPoP // Special Issue of Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS) for the Joint Conference 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT, submitted (2015).

12. Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere F., Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Tinsley T., Hodgson Z., Guimarães L.N.F. Step-by-step realization of the international nuclear power and propulsion system (INPPS) mission // 66th International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel, 2015, IAC-15-C4.7-C3.5, x30696.

13. Koroteev A.S. et al. Test bench for key components of megawatt class international power and propulsion system ground demonstration // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Milan, Italy, July 3–7, 2017.

14. Zurbach S., Cornu N., Lasgorceix P. Performance evaluation of a 20 kW Hall Effect thrusters // 32th International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, IEPC-2011-020, 2011.

15. Патент на полезную модель 119555 РФ. МПК H05B 3/40. Электрический нагреватель газа. Заявитель и патентообладатель — Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша» // Изобретения. Полезные модели. Опубликовано 20.08.2012 г.

16. Андрианов Д.И., Захаренков Л.Э., Каревский А.В., Попов А.В., Попов С.А., Семёнкин А.В., Солодухин А.Е., Терехов Д.Н., Штонда С.Ю. Мощные энергодвигательные установки космического назначения с газотурбинным преобразованием энергии по замкнутому циклу Брайтона и особенности их экспериментальной отработки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. Вып. 7(55). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-7-1518.

17. Кравченко С.В., Нестеров С.Б., Романько В.А., Тестоедов Н.А., Халиманович В.И., Христич В.В. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 1(13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-598.

Статья поступила в редакцию 18.12.2018 г.

Reference

1. Koroteev A.S., Oshv Yu.A., Popov S.A., Karevskii A.V., Solodukhin A.E., Zakharenkov L.E., Semenkin A.V. Yadernaya energodvigatel'naya ustanovka kosmicheskogo apparata [Nuclear power generation and propulsion system]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2015, no. 5, pp. 45–59.

2. Zakharenkov L.E., Semenkin A.V., Solodukhin A.E. Concept of electric propulsion realization for high power space tug. In: *Progress in propulsion physics (EUCASS advances in aerospace sciences book series. Vol. 8)*. Moscow: Torus press publ., 2016. P. 165–180.

3. Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoy N.N., Usov V.A. Kosmicheskaya yadernaya energetika (yadernye reaktory s termoelektricheskim i termoemissionnym preobrazovaniem — «Romashka» i «Enisey») [Nuclear power generation in space (nuclear power reactors with thermoelectric and thermionic conversion — Romashka and Enisey)]. Ed. by N.N. Ponomarev-Stepnoy. Moscow, Izdat publ., 2008. 146 p.

4. Sinyavskiy V.V. Metody i sredstva eksperimental'nykh issledovaniy i reaktornykh ispytaniy termoemissionnykh elektrogeneriruyushchikh sborok [Methods and means of experimental studies and reactor tests of thermionic power-generating assemblies]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2000. 375 p.

5. Sinyavskiy V.V. Nauchno-tehnicheskii zadel po yadernomu elektroraketnomu mezhorbital'nomu buksiru «Gerkules» [Advanced technology for nuclear electric propulsion orbital transfer vehicle Hercules]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 25–45.

6. National Aeronautics and Space Administration. 2005. Prometheus project. Pasadena, CA, Jet Propulsion Laboratory. Final Report no. 982-R120461.

7. Write S.A., Vernon M.E., Pickard P. Small scale closed Brayton cycle dynamic response experiment results. Sandia Report SAND2006-3485 (Unlimited Release). Sandia National Laboratories, 2006.

8. Hervol D.S., Briggs M., Owen A.K., Lavelle T.A. *Experimental and analytical performance of a dual Brayton power conversion system*. NASA/TM-2009-215511.

9. Hervol D.S., Mason L., Birchenough A., Pinero L. *Experimental investigations from the operation of a 2 kW Brayton power conversion unit and a xenon ion thruster*. NASA/TM-2004-212960.

10. Jansen F., Detsis E., Bauer W., Cliquet E., Gaia E., Hodgson Z., Koroteev A.S., Masson F., Semenkin A.V., Tinsley T., Tosi M.C., Ruault J.-M., Worms J.-C. *MEGAHIT Roadmap*. Available at: http://cordis.europa.eu/result/rcn/169848_en.html (accessed 02.04.2017).

11. Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere F., Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A., Tinsley T., Hodgson Z., Koppel Ch., Guimarães L.N.F. *DEMOCRITOS demonstrators for realization of nuclear electric propulsion of the European roadmaps MEGAHIT & DiPoP*. Special Issue of Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS) for the Joint Conference 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT, submitted (2015).

12. Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere F., Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Tinsley T., Hodgson Z., Guimarães L.N.F. *Step-by-step realization of the international nuclear power and propulsion system (INPPS) mission*. 66th International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel, 2015, IAC-15-C4.7-C3.5, x30696.

13. Koroteev A.S. et al. *Test bench for key components of megawatt class international power and propulsion system ground demonstration*. 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Milan, Italy, July 3–7, 2017.

14. Zurbach S., Cornu N., Lasgorceix P. *Performance evaluation of a 20 kW Hall Effect thrusters*. 32th International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, IEPC-2011-020, 2011.

15. *Utility model patent 119555 RF. MPK H05B 3/40. Elektricheskii nagrevatel' gaza* [Electrical gas heater]. The applicant and the patent owner – State Scientific Center of the Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise Keldysh Research Center. *Izobreteniya. Poleznye modeli*, published 20.08.2012.

16. Andrianov D.I., Zakharenkov L.E., Karevskii A.V., Popov A.VI., Popov S.A., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Terekhov D.N., Shtonda S.Yu. *Moshchnye energodvigatel'nye ustanovki kosmicheskogo naznacheniya s gazoturbinnym preobrazovaniem energii po zamknutomu tsiklu Braitona i osobennosti ikh eksperimental'noi otrabotki* [High-power power-generation and propulsion systems for space applications with closed Brayton cycle gas-turbine energy conversion and special aspects of their developmental testing]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, issue 7(55). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-7-1518.

17. Kravchenko S.V., Nesterov S.B., Roman'ko V.A., Testodov N.A., Khalimanovich V.I., Khristich V.V. *Podkhody k sozdaniyu kompleksnykh sistem dlya otrabotki i ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Approaches to development of integrated systems for developmental testing of spacecraft]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, issue 1(13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-598.