НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН "75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК"

КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

© 2021 г. Ю. Г. Драгунов^{*a,b,**}

^а Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля, Москва, Россия ^b Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: Yury.Dragunov@nikiet.ru

Поступила в редакцию 29.12.2020 г. После доработки 11.01.2021 г. Принята к публикации 18.01.2021 г.

В статье приведены данные о разработке ядерных энергетических установок для использования в космических аппаратах — ядерных ракетных двигателей и ядерных энергетических установок. Представлена информация о создании реакторной установки для транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса. Изложены результаты исследований, включая моделирование нейтронной физики, теплообмена и газодинамики, испытаний полномасштабных макетов основных узлов реакторной установки и проведения контрольного физического пуска.

Ключевые слова: ядерная энергетика, ядерный ракетный двигатель, прямое преобразование энергии, турбомашинное преобразование энергии, газоохлаждаемый реактор.

DOI: 10.31857/S0869587321050066

Невозможно переоценить важность освоения космического пространства. Космос сегодня – это глобальная спутниковая связь и телевещание, высокоточная космическая навигация, метео- и экологический мониторинг, дистанционное зондирование Земли с целью изучения природных ресурсов, картографии, фундаментальные космические исследования, пилотируемые полёты на долговременных орбитальных станциях с выполнением программы научноприкладных исследований. Трудно переоценить и значение энергетики для успешного решения этих задач [1].

4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли. Вскоре после этого со-



ДРАГУНОВ Юрий Григорьевич — член-корреспондент РАН, научный руководитель космических ядерных установок НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля, заведующий кафедрой ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана. бытия И.В. Курчатов пригласил в Лабораторию измерительных приборов АН СССР – будущий Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова (ныне – НИЦ "Курчатовский институт") ведущих представителей атомной, авиационной и космической науки и техники. Он поздравил С.П. Королёва с успешным запуском спутника и поставил задачу создания ядерных энергетических источников для космоса – ядерного ракетного двигателя (ЯРД) и ядерной энергетической установки (ЯЭУ).

Работы развивались стремительными темпами. 13 января 1958 г. прошло совещание по размощного импульсного работке реактора, 27 марта того же года рассмотрены основы проекта. 13 мая 1958 г. вышло постановление Правительства СССР о создании на объекте 905 Министерства обороны – Семипалатинском ядерном полигоне – высокотемпературного импульсного графитового реактора (ИГР). Реактор взрывного действия, как его назвали. предназначался для высокотемпературных динамических испытаний топливных и конструкционных материалов. Научное руководство реакторным комплексом было поручено Институту атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова, главным конструктором реактора назначили НИКИЭТ.

КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Параметр	СССР	США	
Тепловая мощность реактора, МВт	230	4100	
Расход водорода, кг/с	16	120	
Максимальная температура водорода на выходе из реактора, К	3100	2550	2200
Ресурс работы на макс. температуре, с	4000	50	2400
Максимальный удельный импульс тяги, с	940	850	
Средняя/максимальная плотность энерговыделения в активной зоне, кВт/см ³	15/25	2.3/5.2	
Принципы отработки и создания	Поэлементный	Интегральный	
Затраченные средства, млрд \$	0.3	2.0	

Таблица 1. Результаты, достигнутые в СССР и США по программам ЯРД

В июне 1960 г. состоялся физический пуск ИГР, в августе 1961 г. – энергетический пуск, в 1962–1963 гг. на реакторе был выполнен комплекс испытаний модельных тепловыделяющих сборок до температуры 3000° по шкале Кельвина. Результаты экспериментов на ИГР стали базой для подготовки постановления Правительства СССР от 13 августа 1964 г. о сооружении исследовательского гетерогенного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора канального типа ИВГ.1 для испытания и отработки полномасштабных узлов ядерного ракетного двигателя (научный руководитель – ИАЭ им. И.В. Курчатова, главный конструктор – НИКИЭТ).

С января 1970 г. управление созданием стендовой базы на Семипалатинском ядерном полигоне было сосредоточено в филиале Подольского научно-исследовательского технологического института (ПНИТИ) – Объединённой экспедиции. В 1975 г. стендовый комплекс с реакторами ИВГ.1 и ИРГИТ ввели в эксплуатацию. За время работы в режиме ЯРД на нём испытано более 200 тепловыделяющих сборок четырёх модификаций активных зон.

В исследованиях по проблемам создания ЯРД сформировались два направления. На одном направлении (ИАЭ, НИКИЭТ, ПНИТИ) концентрировались усилия по отработке полномасштабных элементов в специально созданном для этих целей реакторе с возможностью изменения состава и конструкции активной зоны. На втором направлении, сосредоточенном в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) и НИИ тепловых процессов (НИИТП), развитие работ шло по пути создания ЯРД на базе реактора минимальных размеров. 26 февраля 1971 г. вышло постановление Правительства СССР о проведении стендовой отработки и создании ядерного ракетного двигателя с тягой 400 кН, получившего индекс 11Б91. Конструкторское бюро химавтоматики назначили главным конструктором двигателя, НИИТП (ныне – ФГУП "Центр Келдыша") – научным руководителем.

На рисунке 1 показаны наземные прототипы отечественных ядерных ракетных двигателей, испытанных на Семипалатинском ядерном полигоне. Работы по созданию ядерного ракетного двигателя изложены в монографии [2, 3]. Следует отметить значительную роль НИИТП (ФГУП "Центр Келдыша") в изучении теплофизики ЯРД, материаловедческих проблем, разработке совместно с НИИ-9 (ныне – Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара) первой конструкции тепловыделяющей сборки, в сотрудничестве с ФЭИ – реактора минимальных размеров ИР-20 и ИР-100, газофазного реактора, технического задания на проектирование испытательной базы, наземного прототипа ЯРД.

Результаты, достигнутые СССР по программе ЯРД, приведённые в таблице 1, показывают существенное преимущество параметров ЯРД по сравнению с аналогом в США, особенно по температуре водорода на выходе из реактора.

Важнейшее направление работ в области ЯЭУ космического назначения — установки с прямым преобразованием энергии. Первая из них — термоэлектрический реактор-преобразователь "Ромашка" — была создана в ИАЭ им. И.В. Курчатова в кооперации с ПНИТИ (НИИ НПО "Луч") и Сухумским физико-техническим институтом. Реактор-преобразователь, пуск которого состо-



Реактор ИГР

ЯРД 11Б91

Рис. 1. Наземные прототипы ядерных ракетных двигателей СССР

ялся 14 августа 1964 г., испытывался в непрерывном режиме около 15000 ч, выработав примерно 6100 кВт · ч электроэнергии.

С 1960 г. в стране начали наращивать работы по созланию космических срелств. обеспечивавших наведение нового поколения противокорабельных крылатых ракет. ЯЭУ для этих систем производились в НПО "Красная звезда", Физико-энергетический институт осуществлял научное руководство и разрабатывал электрогенерирующие каналы. Специалисты предложили два типа ЯЭУ: с термоэлектрическим преобразованием тепловой энергии ядерного реактора в электрическую ("Бук") и с термоэмиссионным преобразованием ("Топаз-1"). Основные параметры реакторных установок, прошедших лётно-космические испытания в составе ЯЭУ, представлены в таблице 2. Всего осуществлён 31 пуск космических аппаратов с ЯЭУ "Бук" и 2 пуска космиче-ских аппаратов с ЯЭУ "Топаз-1". Параллельно разрабатывалась ядерная энергетическая установка "Енисей" (главный конструктор – Центральное конструкторское бюро машиностроения, научный руководитель – ИАЭ им. И.В. Курчатова, технолог и разработчик электрогенерирующих каналов – ПНИТИ/НПО "Луч"). К 1988 г. установка прошла полный цикл наземных испытаний, подтвердив требуемые параметры и ресурс 1.5 года, на основе расчётного моделирования была показана возможность достижения трёхгодичного ресурса. Важнейший вклад в создание установок с прямым преобразованием энергии и ядерных ракетных двигателей внёс академик Н.Н. Пономарёв-Степной.

В 1997-2009 гг. были предложены концептуальные проекты космических ядерных энергосистем, что позволило с учётом предшествующего опыта перейти к созданию ЯЭУ мегаваттного класса с турбомашинным преобразованием энергии. Инициатором этих работ стал академик А.С. Коротеев (ФГУП "Центр Келдыша").

Предприятиями Госкорпорации "Росатом" разработан проект реакторной установки на основе быстрого газоохлаждаемого реактора, где в качестве теплоносителя применяется гелий-ксенонная смесь. Схема ЯЭУ приведена на рисунке 2. Технические характеристики этой установки существенно выше, чем у мировых аналогов, температура теплоносителя на выходе из реактора – до 1500° по шкале Кельвина, срок службы – не менее 10 лет [4, 5]. Работы по данному проекту открыли принципиально новый этап в создании ЯЭУ для

КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Таблица 2. Реакторные установки, прошедшие лётно-космические испытания в составе ЯЭУ

Основные параметры	SNAP – 10A	ЯЭУ "Бук"	ЯЭУ "Топаз-1"
Страна	США	СССР	СССР
Тип ЯЭУ	Термоэлектричество	Термоэлектричество	Термоэмиссия
Тип реактора	Тепловой	Быстрый	Тепловой
Загрузка	4.3	30	11.5
Тепловая мощность, кВт	34	100	150
Электрическая мощность, кВт	0.5	3	5
Масса ЯЭУ, кг	450 (125 – ЯР)	930	980
Теплоноситель	NaK	NaK	NaK
Температура теплоносителя	803	973	880
Топливо	Смесь гидрида циркония и урана	Уран-молибденовый сплав	Диоксид урана
Год	1965	1970-1988 (31 пуск)	1987—1988 (2 пуска)
Подтверждённый ресурс	43 сут	4400 ч	142 и 340 сут
Орбита, км	1300	300	800

космических аппаратов. Техническим заданием мощность установки удалось увеличить более чем на два порядка, ресурс – на порядок больше по сравнению с ЯЭУ, прошедшими лётные испытания. Это была командная работа. НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля выполнял роль головного исполнителя и главного конструктора реакторной установки. В проекте участвовали РНЦ "Курчатовский институт" (научный руководитель, разработчик нормативной документации по ядерной и радиационной безопасности), ведущие институнаучного блока ГК "Росатом" (ФЭИ. ты НИИ НПО "Луч", НИИ атомных реакторов, НИИ реакторного материаловедения), федеральные ядерные центры, комбинаты и заводы, обеспечивавшие изготовление топлива и тепловыделяющих элементов, предприятия ГК "Роскосмос" (ФГУП "Центр Келдыша", РКК "Энергия", НПО "Машиностроение"), академические учреждения (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Институт физики твёрдого тела РАН), образовательные вузы (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ и МИФИ).

Проект выполнен с использованием современного суперкомпьютера, позволившего на основе 3D-моделирования обеспечить ему высокое качество и оптимизировать программу экспериментальной отработки реакторной установки. Уже проведены исследования, связанные с изменением свойств топлива и конструкционных материалов в условиях облучения в реакторе, моделирование нейтронной физики, теплообмена и газодинамики, испытание полномасштабных макетов основных узлов реакторной установки: корпуса реактора, радиационной защиты, приводов системы управления и защиты, регулирующих органов, фрагментов активной зоны. На ри-



Рис. 2. Схема ядерной энергодвигательной установки



Рис. 3. Моделирование нейтронной физики, теплообмена и газодинамики

сунке 3 представлены результаты моделирования нейтронной физики, теплообмена и газодинамики, в процессе которого выработаны рекомендации по расчёту коэффициентов теплопередачи и термодинамическим свойствам гелий-ксенонной смеси [6], на рисунке 4 — результаты экспериментов, проведённых для верификации расчётных кодов. В АО "НИКИЭТ" выполнен комплекс расчётов с использованием верифицированных кодов для обоснования проекта реакторной установки, включая анализ её безопасности в различных режимах. Специалисты Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ–ВНИИЭФ) провели расчётные



Рис. 4. Эксперименты для верификации расчётных кодов



Рис. 5. Полномасштабный макет корпуса реактора

работы по обоснованию безопасности установки при аварийных ситуациях, связанных с падением космического аппарата на землю. Всё это позволило перейти к отработке технологии изготовления оборудования, созданию и испытанию полномасштабных макетов корпуса реактора (рис. 5).

Особое внимание уделялось конструкции и технологии изготовления твэлов, их испытанию в исследовательских реакторах. В ФЭИ и НИИ НПО "Луч" создали технологию изготовления оболочек твэла из монокристалла молибдена с

ниобием длиной до 900 мм, в РФЯЦ–ВНИИЭФ изготовили и испытали блоки радиационной защиты (рис. 6) и регулирующие органы системы управления и защиты. Результаты подтвердили характеристики, заложенные в проекте. В обоснование работоспособности активной зоны в ПАО "Машиностроительный завод" испытали макет фрагмента активной зоны реакторной установки на стойкость к воздействию сейсмических и эксплуатационных нагрузок (рис. 7). В НИИ атомных реакторов и НИИ реакторных материа-



Рис. 6. Блоки внутренней и наружной радиационной защиты



Рис. 7. Фрагмент активной зоны

лов выполнили комплекс ампульных и полноразмерных испытаний твэлов. Послереакторные исследования подтвердили их расчётные ресурсные характеристики. На рисунке 8 представлена информация о петлевых испытаниях фрагмента активной зоны реактора.

На завершающем этапе был изготовлен полномасштабный конструкторско-технологический макет реактора с полным комплектом тепловыделяющих элементов. После контрольной сборки активной зоны состоялся физический пуск установки. В ходе исследований удалось измерить ряд нейтронно-физических характеристик: критическую загрузку активной зоны; интегральную и дифференциальную эффективность регулирующих органов системы управления и защиты и каждой группы регулирующих органов; начальный запас реактивности при штатной загрузке и положение регулирующих органов системы управления защиты, которое компенсирует запас реактивности. Экспериментальные результаты хорошо совпали с расчётами.

Научно-исследовательские И опытно-конструкторские работы позволили подтвердить выполнение основных технических требований к реакторной установке, отработать технологию изготовления оборудования, создать производственные комплексы, модернизировать испытательную базу, обеспечить соответствие параметров ЯЭУ экспериментальным данным. Таким образом, были подтверждены основные технические характеристики реакторной установки, её ядерная и радиационная безопасность и реализуемость проекта в целом. Результаты работ по созданию перспективных космических ядерных электроэнергетических и двигательных установок стали важной основой для разработки с участием Российской



Рис. 8. Петлевые испытания фрагмента активной зоны на реакторе МИР-1.М

академии наук Стратегии развития космической ядерной энергетики на период до 2030 года, утверждённой указом Президента РФ от 22 февраля 2019 г.

Особо следует отметить выдающийся вклад в развитие космической ядерной энергетики академиков РАН Н.Н. Пономарёва-Степного и А.С. Коротеева.

ЛИТЕРАТУРА

- Коротеев А.С. Ядерная энергетика как путь к покорению дальнего космоса – российский опыт и перспективы развития // V Межд. научно-техн. конф. "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" (МНТК НИКИЭТ-2012). Т. 1. Москва, 27–29 ноября 2012 г. С. 19–35.
- Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А.С. Коротеева. М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006.

- Демянко Ю.Г., Конюхов В.Г., Коротеев А.С. и др. Ядерные ракетные двигатели / Под ред. А.С. Коротеева. М.: Норма-Информ, 2001.
- 4. Драгунов Ю.Г. Разработка реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса // Атомная энергия. 2012. № 1. С. 4–6.
- Драгунов Ю.Г., Габараев Б.А., Ромадова Е.Л. Космическая ядерная энергетика: прошлое, настоящее, будущее // V Межд. научно-техн. конф. "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" (МНТК НИКИЭТ-2012). Москва, 27—29 ноября 2012 г. С. 146–147.
- Dragunov Yu.G., Romadova E.L., Gabaraev B.A. Recommendations on calculation of transport coefficients and thermodynamic properties of helium-xenon gas mixtures // Nucl. Engineering Des. 2019. V. 354. P. 196–198.