

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

**КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ  
ЭНЕРГЕТИКА**

**(ядерные реакторы  
с термоэлектрическим и  
термоэмиссионным преобразованием –  
"Ромашка" и "Енисей")**



**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной, В.А. Усов

**Космическая ядерная энергетика  
(ядерные реакторы с термоэлектрическим  
и термоэмиссионным преобразованием –  
«Ромашка» и «Енисей»)**

*Под редакцией академика РАН Н.Н. Пономарева-Степного*

*(издание второе, дополненное)*

Москва

**ИздАт**

2012 г.

К65

ББК 6П2.8 + 6Т6

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. акад. РАН Н.Н. Пономарева-Степного – издание второе, дополненное – М.: ИздАТ, 2012. – 226 с. – илл.

ISBN 978-5-86656-227-5

Изложены результаты исследований и разработок космических ядерных энергетических установок с прямым преобразованием тепловой энергии, выполненных Курчатовским институтом в содружестве с многими российскими организациями. Дан краткий анализ начального этапа становления этого направления в нашей стране и за рубежом, сформулированы основные требования к ядерным установкам со стороны космических систем.

Основное внимание в книге уделено решению научно-технических проблем при создании первого реактора-преобразователя «Ромашка» с высокотемпературными кремний-германиевыми полупроводниковыми элементами и космической ядерной установки «Енисей» с термоэмиссионным реактором-преобразователем. Дано описание и изложены физико-технические основы реакторов-преобразователей «Ромашка» и «Енисей», конструктивные схемы и особенности этих установок, методы и результаты исследований их нейтронных, теплофизических и энергетических параметров, результаты энергетических (в том числе ядерных) испытаний на наземных стендах. На основе опыта разработки установок «Ромашка» и «Енисей» изложены рекомендации по развитию этого направления ядерной техники и созданию установок второго поколения.

Описывается также уникальный опыт международного сотрудничества по программе «Топаз», в процессе которого в США с участием американских, российских, английских и французских специалистов на стендах выполнялись энергетические испытания установки «Енисей» и ее элементов и разрабатывался проект космического аппарата для космических испытаний установки «Енисей» в сочетании с набором электрических двигателей. Издание второе, дополнено фотографиями и списками основных участников разработки установки «Енисей» и воспоминаниями американских и российских специалистов о программе «Топаз».

Для специалистов в ядерной и космической технике, а также интересующихся историей становления и развития атомных проектов.

УДК 621.039.5:629.19.03, ББК 6П2.8 + 6Т6

ISBN 978-5-86656-227-5

© Кухаркин Н.Е.,  
Пономарев-Степной Н.Н.,  
Усов В.А., 2012

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Введение</b> .....	9
<b>Глава 1. РЕАКТОР-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «РОМАШКА»</b> .....	12
1.1. Исторический аспект .....	12
1.2. Описание реактора-преобразователя «Ромашка».....	21
1.3. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик элементов реактора-преобразователя «Ромашка» на этапе, предшествующем ядерным энергетическим испытаниям.....	31
1.4. Основные результаты ядерных энергетических испытаний реактора-преобразователя «Ромашка».....	41
1.5. Варианты использования и развития по мощности реактора-преобразователя «Ромашка».....	56
1.6. Они создали «Ромашку» .....	63
Список литературы .....	69
<b>Глава 2. КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА «ЕНИСЕЙ» («Топаз-2»)</b> .....	70
2.1. Исторический аспект .....	70
2.2. Описание систем КЯЭУ «Енисей», конструктивных особенностей ее отдельных элементов и основные параметры.....	75
2.3. Результаты комплексных испытаний КЯЭУ «Енисей»....	95
2.4. Ядерные энергодвигательные установки.....	102
2.5. Люди, создавшие КЯЭУ «Енисей» .....	116
Список литературы .....	139
<b>Глава 3. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ПО КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ</b> .....	141
3.1. Сотрудничество с США .....	141
3.2. Сотрудничество с КНР.....	197
<b>Заключение</b> .....	199
<b>Благодарность</b> .....	202
<b>Публикации и доклады на конференциях специалистов</b> ...	203

## Предисловие

«Всему свое время, и время всякой вещи под небом...»

Книга Екклесиаста

В мире идет процесс глобализации. В развивающиеся страны хлынул поток ценностей цивилизованного мира. Важный компонент потока — промышленные технологии. Для развитых стран трансфер технологий — это выгодное размещение капитала. Выгода развивающихся стран — это приобщение к индустриальному пути развития, наращивание промышленного производства, эффективное использование трудового ресурса, повышение уровня жизни. Новая технологическая среда, в которую погружается развивающийся мир, требует все больше энергии.

Анализ статистики потребления энергии в мире показывает, что в последние десятилетия в силу роста объемов энергетики развивающихся стран наблюдается выравнивание удельного на душу населения потребления энергии между развитыми и развивающимися странами. Динамика выравнивания неминуемо ведет к необходимости увеличить в ближайшие десятилетия глобальное производство энергии как минимум в два—три раза. Процесс необратим. Решение проблемы требует вскрытия и освоения новых энергетических ресурсов. Если мы не хотим потерять мир, необходимо включать все возможные источники энергии в обеспечение этого растущего спроса.

В поиске решения на первое место выходит вопрос о располагаемом ресурсе того или иного источника энергии. Есть, казалось бы, очевидное решение, которое заявлено рядом стран как спасение, это возобновляемые источники: солнце, ветер, гидро, приливы, биомасса... Но, к сожалению, значительная материальная емкость этих технологий затрудняет достижение требуемых темпов их освоения.

Атомная энергия не относится к категории возобновляемого ресурса, но способность ядерных реакторов воспроизводить топливо из сырья (уран и торий), объемы которого многократно превышают ресурс исходного топлива, переводит ее в разряд практически неисчерпаемых источников энергии.

На ближайшем этапе имеется достаточное количество ядерных материалов для обеспечения потребностей ядерной энергетики в топливе даже при работе в открытом цикле. Однако в дальнейшем

она неизбежно столкнется с ограниченностью ресурсов дешевого урана. Внедрением таких инновационных ядерных технологий, как расширенное воспроизводство топлива в ядерном реакторе на быстрых нейтронах и замыкание топливного цикла, проблемы ресурсов ядерного топлива будут сняты.

Первичные энергетические ресурсы расходуются примерно в равных долях для производства электричества, для энергоснабжения промышленности и коммунального сектора и на транспорте. Атомная энергетика в настоящее время вырабатывает около 20% мирового производства электроэнергии, и предполагается дальнейшее наращивание ее доли. Но в этой сфере она конкурирует с углем, для которого ресурсные ограничения не столь существенны. Наибольшую напряженность демонстрирует рынок топлива для транспорта и коммунальных нужд, где, в основном, используются нефть и газ. Эту напряженность не удастся скомпенсировать адекватным развитием сырьевой базы.

Завоевание атомной энергетикой области электроэнергетики является только первым, наиболее простым шагом. Выработка промышленного и отопительного тепла, участие атомной энергетики в производстве моторного топлива и восстановителей является задачей такого же масштаба, как электроэнергетика. В перспективе, возможно, значительная часть транспорта будет использовать в виде топлива не загрязняющий атмосферу, централизованно получаемый водород. Развертывание крупномасштабной атомной энергетики для этих целей позволит экономить нефть и газ для тех потребителей, где их сложнее всего заменить. И хотя атомная энергетика до настоящего времени не освоила эту сферу, принципиальная возможность производить в реакторах высокотемпературное тепло открывает ей этот инновационный путь. Это определение усиливается возможностью производства водорода из воды с помощью высокотемпературных ядерных реакторов. А водород – это энергетический ключ к промышленным технологиям, транспорту, коммунальному сектору.

Таким образом, практическая неограниченность ядерных топливных ресурсов и возможность наряду с электричеством производить водород или другие удобные для потребителя энергоносители нацеливают мир на новую волну крупномасштабного использования атомной энергии. Решение этой проблемы стимулирует активное развитие инновационных ядерных технологий.

Одним из важнейших инновационных направлений развития атомной энергетики будущего станут высокотемпературные реакторы и технологии использования их энергии. Освоение высоких температур позволяет получить не только высокий КПД при производстве электроэнергии, но и эффективно использовать реакторы для получения водорода и моторного топлива, опреснения воды, для других технологических процессов, в том числе в коммунальном секторе. С развитием высокотемпературных реакторных технологий появляется также возможность создавать для специального применения ядерные реакторы с прямым преобразованием энергии, ядерные ракетные двигатели с уникальной удельной тягой. Необходимо как можно более быстрый старт разработок этой техники.

Как говорится в обиходе, новое – это хорошо забытое старое.

Многие из разработок с использованием высокотемпературных реакторов были опробованы на начальных этапах становления атомной техники для военных, а затем и мирных приложений. В нашей стране направление высокотемпературной ядерной энергетики развивалось Курчатовским институтом в содружестве с исследовательскими и технологическими институтами, конструкторскими бюро, промышленными комбинатами Средмаша, многих других министерств и Академии наук. У истоков разработки объектов с высокотемпературными реакторами стояли выдающиеся ученые И.В. Курчатов, А.П. Александров, А.М. Люлька, С.А. Лавочкин, А.Н. Туполев, С.П. Королев, В.А. Глушко, В.М. Мясишев, М.В. Келдыш, Н.А. Доллежал, А.А. Бочвар, А.И. Лейпунский, Н.Д. Кузнецов и многие другие.

Сделано много. Проработаны пилотируемые и беспилотные атомные самолеты, прямоточные и турбореактивные ядерные двигатели, реакторы с нагревом воздуха или с промежуточным контуром с жидким металлом или инертным газом, реакторы на тепловых и быстрых нейтронах, керамические тепловыделяющие элементы и тепловыделяющие элементы в металлических оболочках. Созданы опытные реакторы и ядерные ракетные двигатели, космические реакторы с термоэмиссионными и термоэлектрическими преобразователями. Опыт авиационных и ракетных реакторов был использован в проектах высокотемпературных гелиевых реакторов для электроэнергетики и промышленных технологий. Проектно-конструкторские работы сопровождались экспериментально-стендовой отработкой технических решений и основного оборудования. С этой целью в институтах

и конструкторских бюро создана лабораторная и стендовая база. Особое внимание уделялось исследованиям, разработке и испытаниям керамических тепловыделяющих элементов, которые использовались для нагрева до сверхвысоких температур воздуха, водорода, гелия. Малогабаритность, высокая энергетическая напряженность и быстрая динамика этих реакторов требовали повышенной точности предсказания нейтронно-физических, термогидравлических и термopрочностных параметров и процессов. Пригодность этих установок для использования в летательных аппаратах определялась возможностью создать компактную гамма-нейтронную защиту и обеспечить радиационную безопасность.

Колоссальный объем результатов исследований и разработок имеет неоценимое значение в предстоящей работе по созданию новых ядерных технологий, востребованных ныне и необходимых для ближней и отдаленной перспектив. К сожалению, на раннем этапе активное использование этой информации затруднялось секретными ограничениями, а в дальнейшем к этим ограничениям прибавлялись естественные причины. Все это подтолкнуло нас к работе по обобщению и опубликованию наиболее интересной и полезной для использования в нынешних разработках информации в виде серии изданий. Серия посвящена физико-техническим проблемам ядерной энергетики, в разрешении которых активно трудился сектор № 6 и далее Отделение высокотемпературной энергетики Курчатовского института. В эту серию включаются работы по высокотемпературной ядерной энергетике, системному анализу энергетики, физике и технике высокотемпературных реакторов различного назначения, атомно-водородной энергетике, высокотемпературным ядерным материалам и топливу, физике процессов в термоэмиссионном преобразователе, моделированию поведения ядерных материалов и др. В серию включены работы по реабилитации территорий, загрязненных радиоактивными веществами, даны результаты работ по нераспространению и физической защите. В каждой книге на основе и со ссылкой на опубликованные материалы суммируются имеющиеся по этому направлению результаты. Естественно, предлагаемые в серии публикации не исчерпывают накопленного объема информации, и следует надеяться, что полезность издания стимулирует продолжение серии и будут опубликованы результаты работ по ядерной и радиационной безопасности, поведению материалов под облучением,

физике радиационной защиты, поведению продуктов деления в высокотемпературном топливе, диспозиции ядерных материалов и многие другие, информация по которым пылится в хранилищах.

В представленной вниманию читателей книге обобщаются результаты исследований и разработок космических ядерных энергетических установок с прямым – термоэлектрическим и термоэмиссионным – преобразованием тепловой энергии ядерного реактора в электричество, выполнявшихся Курчатовским институтом в содружестве с многими российскими организациями.

Основное внимание в книге уделено решению научно-технических проблем при создании первого реактора-преобразователя «Ромашка» с высокотемпературными кремний-германиевыми полупроводниковыми элементами и космической ядерной установки «Енисей» с термоэмиссионным реактором-преобразователем.

В книге дается описание и изложены физико-технические основы реакторов- преобразователей «Ромашка» и «Енисей», конструктивные схемы и особенности этих установок, методы и результаты исследований их нейтронных, теплофизических и энергетических параметров, результаты энергетических, в том числе ядерных испытаний на наземных стендах. На основе опыта разработки установок «Ромашка» и «Енисей» изложены рекомендации по развитию этого направления ядерной техники и созданию установок второго поколения.

В книге описывается также уникальный опыт международного сотрудничества по программе «Топаз», в процессе которой в США с участием американских, российских, английских и французских специалистов на стендах выполнялись энергетические испытания установки «Енисей» и ее элементов и разрабатывался проект космического аппарата для космических испытаний установки «Енисей» в сочетании с набором электрических двигателей.

Авторы работают в Курчатовском институте по ядерной авиационно-космической тематике начиная с дипломных проектов и по настоящее время.

Книга рассчитана на читателей, специализирующихся в ядерной и космической технике, а также интересующихся историей становления и развития атомных проектов. В специальном разделе приведен список работ, в которых более подробно излагается информация по тематике данного издания.

Академик Н.Н. Пономарев-Степной,  
почетный вице-президент РНЦ «Курчатовский институт»

## ВВЕДЕНИЕ

Ядерная энергетика на основе реакторов нашла определенную нишу в космических программах XX века. Перспективы использования ядерных (реакторных) энергетических установок в космосе обусловлены такими их преимуществами перед традиционными солнечными фотоэлектрическими и другими источниками энергии, как:

- независимостью от расстояния до Солнца и ориентации на Солнце;
- компактностью;
- лучшими массогабаритными характеристиками при использовании в составе беспилотных космических аппаратов (КА), начиная с уровня электрической мощности в несколько десятков кВт;
- стойкостью к воздействию радиационных поясов;
- возможностью их совмещения (для получения тяги) с наиболее эффективными электрореактивными двигателями и создания на этой основе энергодвигательных комплексов, способных выводить на высокоэнергетические орбиты массу полезных грузов в 2–3 раза больше, чем при использовании доразгонных блоков на химическом топливе, и обеспечить при этом длительное (до 5–7 лет и более) питание целевой аппаратуры КА с уровнем электрической мощности 25–400 кВт (эл) и более.

Российская космическая ядерная термоэлектрическая установка «БУК» [4] успешно эксплуатировалась в составе космических аппаратов морского радиолокационного наблюдения. Две российские космические ядерные термоэмиссионные установки «Топаз» [4] в 1987 и 1988 годах успешно прошли испытания в течение 0,5 и 1 года совместно с электрореактивными двигателями в составе космических аппаратов «Космос-1818 и 1867».

Полный цикл наземной отработки (включая шесть ядерных энергетических испытаний на ресурс до 1,5 лет) прошла российская космическая ядерная энергетическая установка «Енисей», которая разрабатывалась для системы непосредственного телевизионного вещания на удаленные районы России и системы космической связи.

В России выполнен значительный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию ядерных

ракетных двигателей (ЯРД). Работы по космическим ядерным энергетическим установкам (КЯЭУ) и ЯРД являются основой для дальнейшего развития работ по использованию ядерной энергии в космосе (для создания на околоземной орбите систем ТВ, наблюдения, связи и радиолокации, для освоения Луны и полета на Марс, изучения спутников Юпитера).

Перспектива развития работ по использованию ядерной энергии в космосе связывается с созданием в XXI веке технологического задела и мощных энергодвигательных комплексов, способных переводить в 2–3 раза больше по массе полезные нагрузки с радиационно-безопасных околоземных орбит на высокоэнергетические орбиты и обеспечивать в течение длительного времени (до 10 лет) питание целевой аппаратуры КА электрической энергией 25–100 кВт(эл) и более.

Основным требованием при выполнении этих работ является безусловное выполнение условий ядерной и радиационной безопасности для населения Земли. Вывод на мощность ядерной энергодвигательной установки должен осуществляться только после достижения космическим аппаратом высокой ( $H \geq 800$  км), радиационно-безопасной орбиты, время существования КА на которой существенно превышает время, необходимое для распада накопленной в реакторе радиоактивности до близкого к исходному уровня.

В книге обобщается опыт создания с участием РНЦ «Курчатовский институт» первого поколения КЯЭУ с прямым термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием энергии реакторов-преобразователей «Ромашка» и «Енисей». Приводятся для сравнения параметры других КЯЭУ («БУК» и «Топаз»), созданных ГП «Красная Звезда» и ГНЦ РФ–ФЭИ, и параметры разрабатывавшихся в США установок.

На основе полученного опыта в России в соответствии с утвержденной концепцией развития космической ядерной энергетики ведутся научно-исследовательские работы по отработке отдельных элементов более мощных (25–400 кВт(эл)) и обладающих повышенным (до 5–7 лет и больше) ресурсом энергодвигательных комплексов, способных обеспечить тягу для перевода КА с радиационно-безопасной околоземной орбиты на геостационарную орбиту (ГСО) и в дальний космос и производство электрической энергии для длительного питания целевой и служебной аппаратуры КА.

На основании проведенных научно-исследовательских экспериментальных работ (НИЭР) и опыта разработки установок первого поколения в книге приводятся проектные параметры перспективных энергодвигательных установок с электрореактивными двигателями в диапазоне электрических мощностей 25–400 кВт с использованием термоэмиссионного преобразования для создания тяги и производства электроэнергии для питания аппаратуры КА.

В книге описываются результаты международного сотрудничества с США и Китаем, высказывается мнение о необходимости международного сотрудничества в деле разработки перспективных КЯЭУ для мирных применений в околоземном и дальнем космосе.

# Глава 1. РЕАКТОР-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «РОМАШКА»

## 1.1. Исторический аспект

В начале 1960-х годов в бывшем Советском Союзе на предприятиях Министерства среднего машиностроения – в Институте атомной энергии, Физико-энергетическом институте, Сухумском физико-техническом институте, Подольском научно-исследовательском технологическом институте, ОКБ «Заря» и затем в Научно-производственном объединении «Красная Звезда» и Центральном конструкторском бюро машиностроения были развернуты работы по прямому преобразованию тепловой энергии ядерного реактора в электричество для космических применений с использованием термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей.

Работы проводились совместно с конструкторскими предприятиями Минавиапрома: ОКБ-52 (В.Н. Челомей), ОКБ-670 (М.М. Бондарюк), МКБ «Красная Звезда», ОКБ-165 (А.М. Люлька), ТМКБ «Союз» (С.К. Туманский, под руководством Г.М. Грязнова).

Интерес к этим работам был обусловлен тем, что подобные методы преобразования тепловой энергии в электричество принципиально упрощают схему энергетических установок, исключают промежуточные этапы превращения энергии и позволяют создать более компактные и легкие энергетические установки в диапазоне электрических мощностей от единиц до нескольких сотен киловатт.

Методы прямого преобразования наиболее перспективны в сочетании с ядерным реактором, обладающим при небольшом объеме активной зоны огромным запасом тепловой энергии, выделяющейся в процессе ядерного деления урана, что особенно привлекательно для космических применений.

В Сухумском физико-техническом институте к этому времени был разработан термоэлектрический сплав на основе высокотемпературного кремний-германиевого полупроводникового материала с верхней рабочей температурой до 1000 °С и добротностью  $Z \sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  и созданы экспериментальные образцы термоэлектрических преобразователей.

В это же время в СССР и США были начаты исследования по термоэмиссионным преобразователям.

Работы подогревались сообщениями из США из научных публикаций [1] (рис. 1.1) о начале разработок реакторов с термоэлектрическими, термоэмиссионными и машинными схемами преобразования энергии для космических применений (установки SNAP-2, SNAP-8, SNAP-10, SNAP-10a и другие) для различных космических задач:

- питания бытовой аппаратуры спутников наблюдения;
- широкополосного телевидения и радио;
- будущих ракет на электрической тяге для освоения планет солнечной системы с уровнем энергопотребления в диапазоне малых (0,1–10 кВт (эл.)), средних (1–100 кВт (эл.)) и больших (0,1–10 МВт (эл.)) мощностей.



FIG. 1. LOW-POWER (0.1–10 kw) SNAP thermal reactors such as SNAP-10A will use thermoelectric converters to power devices aboard surveillance satellites (left). MEDIUM-POWER (1–100 kw) SNAP-2 and SNAP-8 subatomic systems will be used in satellites (center) for worldwide TV and radio. HIGH-POWER (0.1–10 Mw) systems using fast reactors and advanced turboelectric or thermionic converters would electrically propel rockets (right) for exploration of planets of the solar system.

### Compact Reactors for Space Power

ONLY A FEW WATTS of electrical power for a matter of days or weeks were required for a space vehicle during the first three years of the era of space exploration (Explorer, Vanguard, Pioneer). Systems of space exploration (Ranger, Surveyor, Prospector), along with military programs (Midas, Hermes, Advent), will require hundreds of watts of auxiliary power for periods of a few months to a year. These programs will be followed by Titan and Transit for worldwide TV and communications, which will require auxiliary power units in the kilowatt range. Finally, planetary exploration (Mariner, Voyager) along with electrical propulsion by about 1965 and manned space flight by about 1970 will require units producing hundreds of kilowatts to tens of megawatts.

Recognition of the high specific-energy potential ( $\approx 10^4$  watt-hr/lb), circulation independence, compactness, ruggedness and adaptability of reactor power units has led to the SNAP reactor power systems program shown in Fig. 1 and the table (1, 6).

#### SNAP Criteria

The considerations governing design choices for SNAP-type reactors include:

- Low weight. Since it costs \$1,000–15,000 to put each pound into an earth orbit, a high premium is placed on lightweight systems.
- High temperature. Since heat generated in space vehicles can be dissipated only by radiation to space, the system must operate as hot as the "state-of-the-art" will permit so as to minimize radiator area and weight.
- Reasonable cost. Cost must not be so high that it limits application in operational systems.
- Growth potential and adaptability. The system must be compatible with advanced missions and improved power-conversion technology.
- Schedule. Estimation beyond existing technology must be limited so as to minimize development time.

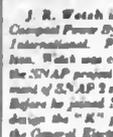
Vol. 19, No. 4 - April, 1961

#### AUTHORS

**B. M. Stuchemp** is the Chief of Space Power Section of the Compact Power Systems Dept. of Atomic International. He was project engineer for the design and construction of the SNAP Experimental Reactor. Since joining the SNAP program, he has been responsible for the design of test facilities and the planning of the tests for SNAP 2.



**Ralph Balout** is Director of the Compact Power Systems Dept. of Atomic International. He is responsible for the SNAP reactor projects A1 in consultation for AEC. Balout joined NAA in 1950 and became Group Leader of Preliminary Analysis in 1954. He has been Group Leader of General Engineering and Deputy Director, Organic Reactors Dept.



**J. R. Welch** is Deputy Director of the Compact Power Systems Dept. of Atomic International. Prior to his present position, Welch was chief project engineer for the SNAP program and headed the development of SNAP 2 since its inception at A1. Before he joined NAA in 1952 he helped design the "K" production reactors with the General Electric Co. at Hanford.



- Long life with exceptional reliability. Because of the cost and complexity of putting payloads into space, power sources must have reliably long life. The SNAP approach to reliability is simplicity—moving parts, valves, control logic, filters and auxiliary systems are either eliminated or minimized.

The clean vacuum environment of outer space almost excludes external effects, except for the possibilities of meteorite damage or diffusion welding of hot surfaces in

73

Рис. 1.1. Первая публикация США в журнале «Nucleonics» (апрель 1961 г.) «Compact Reactor for Space Power»

По данным работ [1, 2] в США при поддержке Комиссии по атомной энергии (АЕС) в 1957 году была развернута программа разработки космических ядерных (изотопных и реакторных) вспомогательных источников энергии (SNAP) для энергоснабжения различных космических аппаратов.

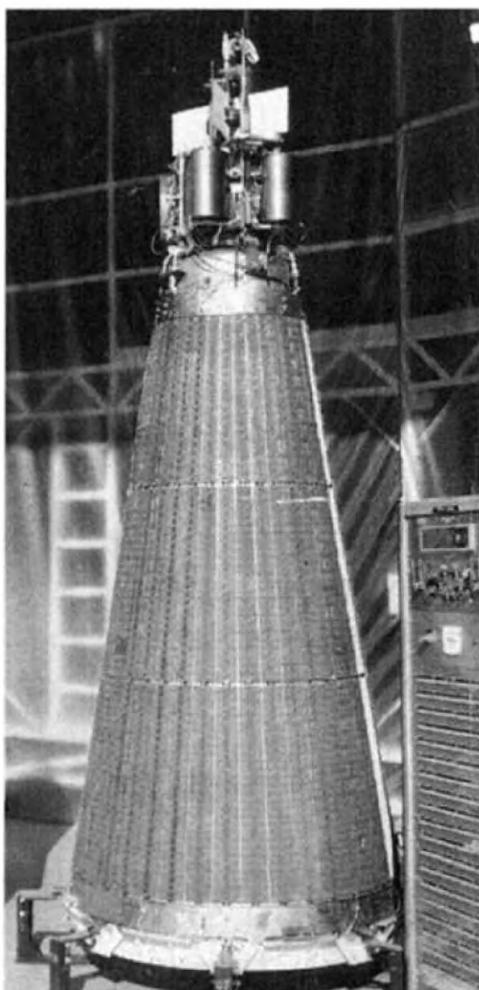
Первыми реакторными космическими установками в США, разработка которых была поручена фирме Atomic International (руководители разработки Н. Dieckamp, R. Valent и J. Wetch), явились SNAP-2, SNAP-8 с системой преобразования по циклу Ренкина на ртути электрической мощностью 3,0 и 35 кВт соответственно. Для установки SNAP-2 был разработан компактный ядерный реактор с гомогенной уран-гидридциркониевой активной зоной, охлаждаемой Na–K-теплоносителем с бериллиевым отражателем. Ресурс установки должен быть  $\geq 1$  год при массе установки без защиты 750 Lb (340 кг). Ввиду технической сложности отработки и проблем

**Проектные разработки КЯЭУ в США (1959–1993) [2]**

Название проекта	SNAP-2	SNAP-10A	SNAP-8	SNAP-50 (ADVANCED)	SNAP-TI (THERMIONIC)	SP-100	SPACE-R (SNAP-ТОПАЗ)
Электрическая мощность, кВт	3,0	0,5	35	50–300	50–100	100–300	40
Преобразование энергии	Цикл Ренкина (Hg)	Термо-электричество (Si-Ge)	Цикл Ренкина (Hg)	Цикл Ренкина (K)	Термо-эмиссия	Термо-электричество (Si-Ge); машинные схемы (цикл Брайтона) охлаждаемый Li-реактор на быстрых нейтронах	Термо-эмиссия с использованием технологии «ТОПАЗ-2»
Ресурс, год	1	1	1	5	1–3	7–10	5–10

с коррозией установка не была доведена до практического использования в космических программах, а созданный компактный реактор этой установки был применен в разрабатываемой с 1961 года фирмой Atomic International первой в мире реакторной установке SNAP-10a с термоэлектрической системой преобразования энергии на основе кремний-германиевых полупроводниковых элементов электрической мощностью 0,5 кВт, выведенной в космос в апреле 1965 года. Впоследствии в 1967 году все работы по поставке оборудования для реакторных установок SNAP в США были прекращены с целью концентрации средств на лунную программу.

На рис. 1.2 представлены общий вид космической ядерной энергетической установки SNAP-10a и параметры разрабатываемых в США космических установок. На рис. 1.3 представлена схема преобразования установки SNAP-10a, в таблице 1.1 суммированы результаты испытания реакторов SNAP.



*Рис. 1.2. Космическая ядерная энергетическая установка США SNAP-10A с термоэлектрическим преобразованием энергии (первая в космосе, апрель 1965 г.) и параметры проектных разработок КЯЭУ в США (1959–1993)*

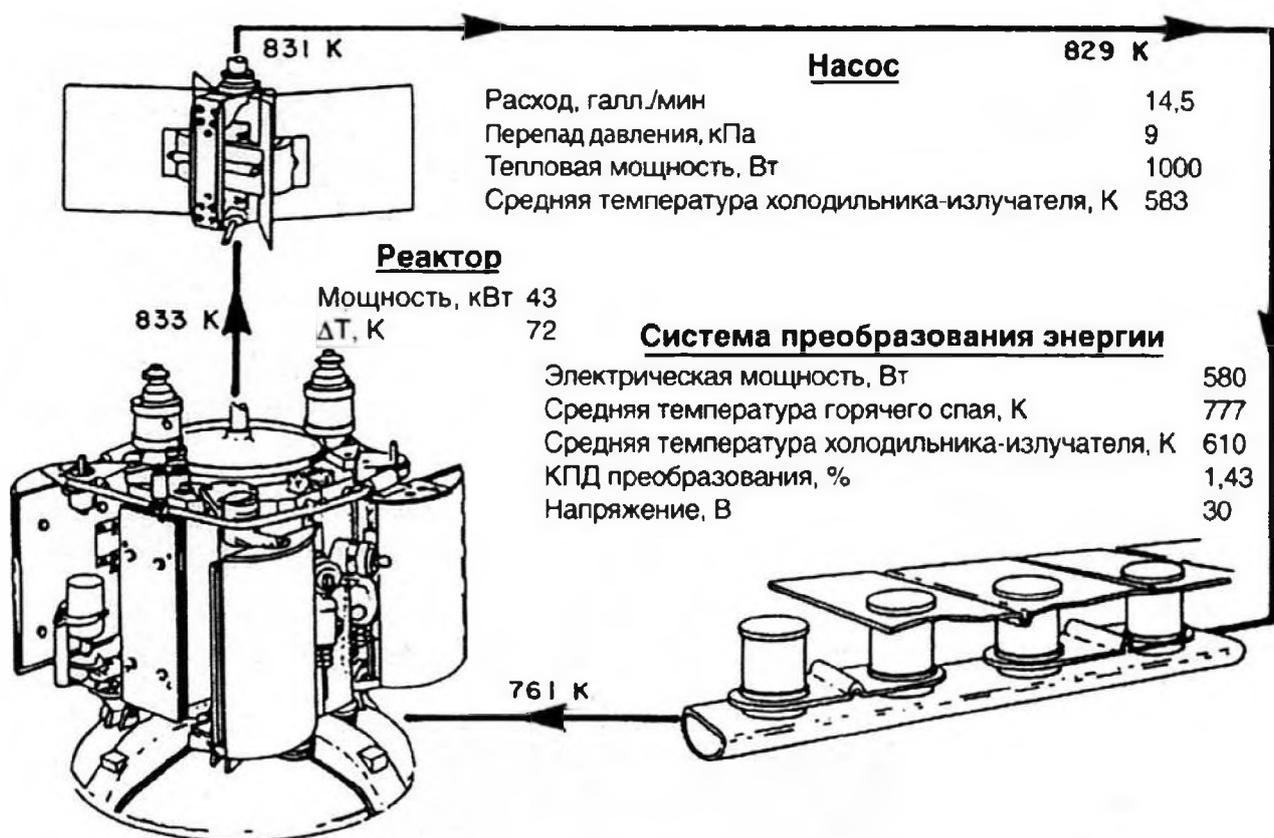


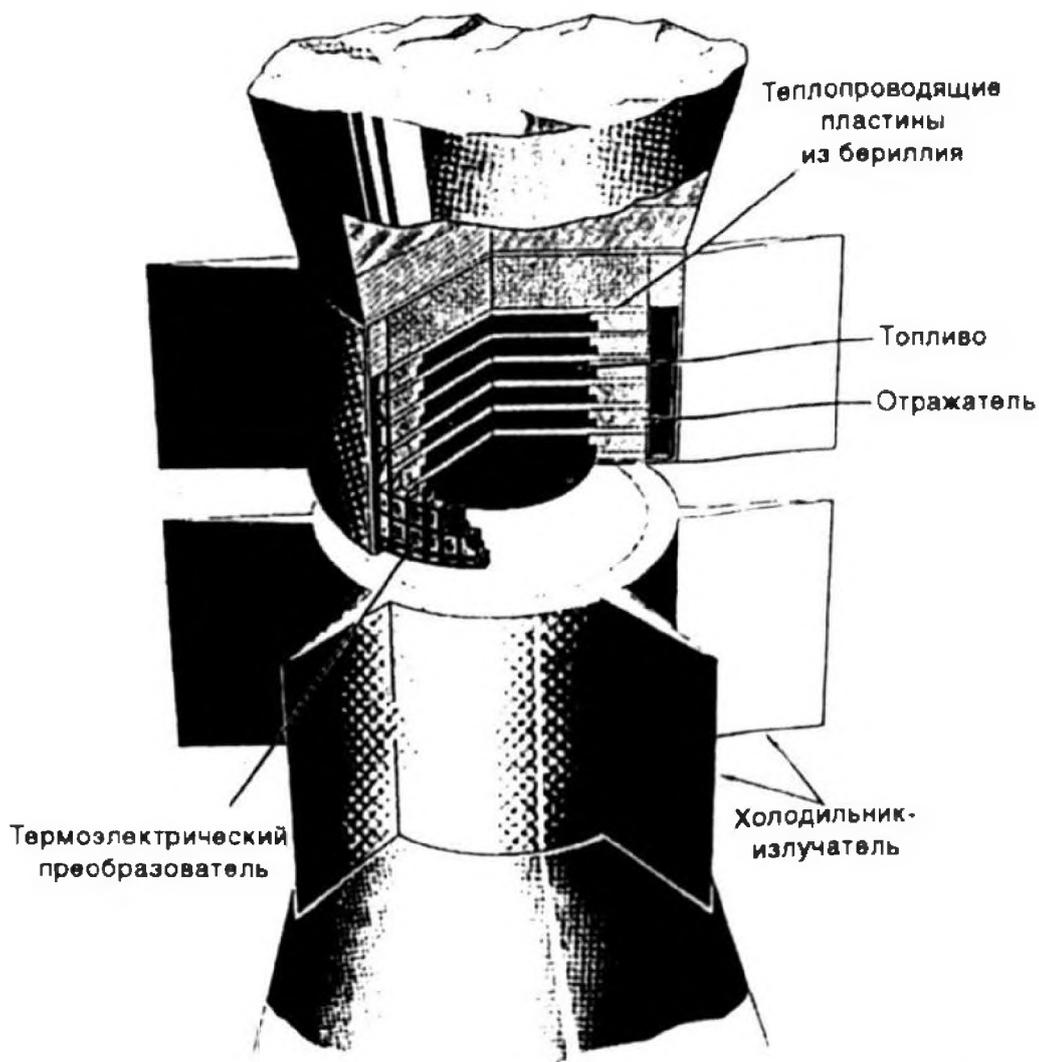
Рис. 1.3. Схема преобразования в установке SNAP-10a

В 1960 году в США стартовала программа разработки безциркуляционной реакторной термоэлектрической установки SNAP-10 электрической мощностью 100–200 Вт, руководители разработки – сотрудники фирмы Atomic International J.R. Wetch и H. Dieckamp [2]. Термоэлектрический преобразователь (на основе Pb–Te) в этой установке был совмещен с радиальным бериллиевым отражателем, а тепло из активной зоны передавалось на преобразователь за счет теплопроводности материалов активной зоны (бериллиевых теплопроводных пластин и уран–гидридциркониевого сплава) и бериллиевого отражателя. Проектная схема первой безциркуляционной реакторной термоэлектрической установки США SNAP-10 показана на рис. 1.4

Установка SNAP-10 не была реализована в США из-за низкой электрической мощности и проблем с ресурсом среднетемпературного (Pb–Te) термоэлектрического материала, однако предложенная в этой установке безциркуляционная схема передачи тепла от активной зоны к термоэлектрическому преобразователю, как наиболее простая и надежная, привлекла внимание российских разработчиков

## Результаты испытаний в США реакторов SNAP

Параметр	SNAP-2		SNAP-10A		SNAP-8	
	Эксперимент. реактор (SER)	Опытный реактор (S2DR)	Летная установка		Эксперимент. реактор (S8ER)	Опытный реактор (S8DR)
			FS-3	FS-4		
Выход в кри- тику	Сентябрь 1959	Апрель 1961	Январь 1965	Апрель 1965	Май 1963	Июнь 1968
Останов	Ноябрь 1960	Декабрь 1962	Март 1966	Май 1965	Апрель 1965	Декабрь 1969
Тепловая мощ- ность, кВт(т)	50	57	38	42	600	600-1000
Выработка теп- ловой энергии, МВт-ч	225	273	383	41	5100	4350
Электрическая мощность, Ватт	-	-	402	650 на начало кампании 535 на конец кампании	-	-
Выработка электроэнер- гии, МВт-ч	-	-	4,0	0,6	-	-
Время работы, мощность и температура	1800 ч при 920 К, 3500 ч выше 750 К	2800 ч при 920 К 7700 ч выше 750 К	417 дней при около 800 К	43 дня выше 785 К	100 дней на мощ- ности 600 кВт(т) при 975 К. 1 год на мощности выше 400 кВт при 975 К	429 ч на мощности 1000 кВт(т); 1670 ч при 965 К; 6680 ч выше 810 К



*Рис. 1.4. Проектная схема первой реакторной термоэлектрической установки США SNAP-10*

и послужила толчком для разработки более высокотемпературной термоэлектрической безциркуляционной установки «Ромашка» на основе кремний-германиевых преобразователей (руководители разработки – сотрудники Института атомной энергии М.Д. Миллионщиков, В.И. Меркин, Н.Н. Пономарев-Степной).

В бывшем Советском Союзе разработка космической ядерной энергетической установки, аналогичной SNAP-10a, но более мощной с компактным реактором на быстрых нейтронах, охлаждаемым жидкометаллическим теплоносителем (Na–K), и вынесенной термоэлектрической системой преобразования электрической мощностью до 3,0 кВт, началась в 1962 году в ОКБ-670 генеральным конструктором М.М. Бондарюком при научном руководстве Физико-энергетического

института (научный руководитель А.И. Лейпунский и В.Я. Пупко) для космического аппарата, разрабатываемого в ОКБ-52 (генеральный конструктор В.Н. Челомей). Установка получила название «БУК». Она была доведена до практической реализации головным предприятием Министерства среднего машиностроения (МСМ) по космической ядерной энергетике ГП «Красная Звезда», объединившим в 1972 году все работы по установке «БУК» [5].

В 1975 году КЯЭУ «БУК» в составе космического аппарата радиолокационной разведки УС-А (RORSAT – по американской терминологии) была принята на вооружение [5].

В 1961 году в Институте атомной энергии на основе имевшегося в то время задела по физике высокотемпературных ядерных реакторов на быстрых нейтронах, высокотемпературным топливным композициям  $UC$ ,  $UC_2$ ,  $UCe_{13}$ , графита и материалов отражателей из металлического бериллия были разработаны предложения по возможным конструктивным решениям нового типа высокотемпературных реакторных систем – реактору-преобразователю с прямым преобразованием тепловой энергии в электричество (рис. 1.5) на основе термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей.

В реакторе-преобразователе источник тепла – ядерный реактор и система преобразования – термоэлектрический или термоэмиссионный преобразователь совмещены в едином блоке. Тепло ядерного реактора передается за счет теплопроводности материалов активной зоны и радиального отражателя на преобразователь и далее на излучатель без какого-либо теплоносителя и систем его прокачки, а не преобразованная часть тепла сбрасывается излучением с помощью ребристого холодильника–излучателя.

Реактор-преобразователь – это полностью статическая ядерная энергетическая система, предназначенная для получения электроэнергии для космических применений в диапазоне электрической мощности от 0,5 до 5,0 кВт (эл). В некоторых проработанных вариантах реакторов-преобразователей (за счет введения охлаждения холодных спаев (или анодов) преобразователей жидкометаллическим теплоносителем (Na–K) или водой) была показана возможность получения 10 кВт и более электрической мощности.

В 1961 году на основе предложений Института атомной энергии было принято решение Правительства о создании и проведении ядерных энергетических испытаний малогабаритной космической

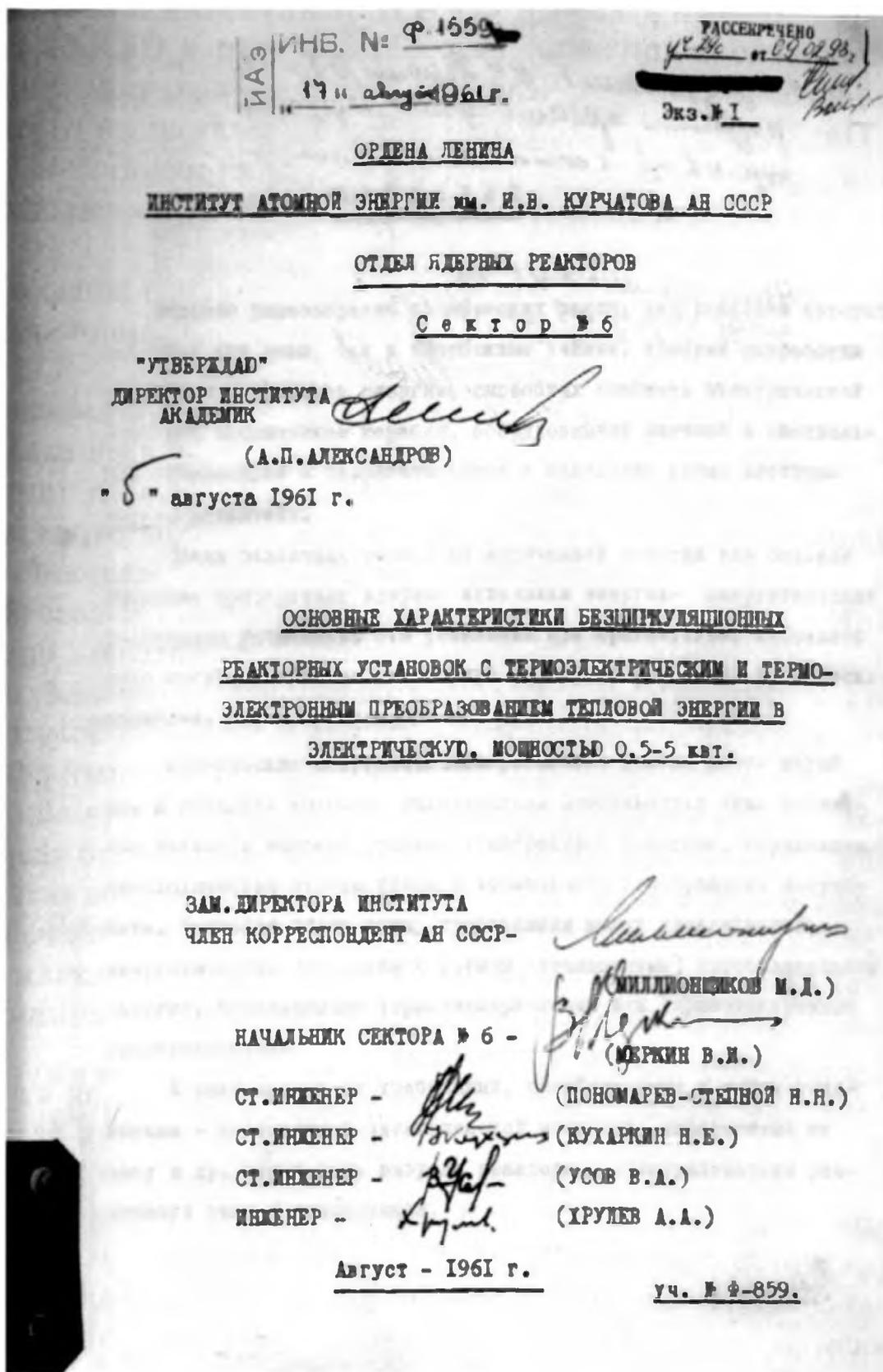


Рис. 1.5. Титульный лист первого отчета ИАЭ «Основные характеристики безциркуляционных реакторных установок с термоэлектрическим и термоэлектронным преобразованием тепловой энергии в электрическую, мощностью 0,5–5,0 кВт(эл)», август 1961 г.

электростанции с прямым преобразованием тепловой энергии в электричество, получившей название реактор-преобразователь «Ромашка».

Реактор-преобразователь «Ромашка» был спроектирован и сооружен в ИАЭ в кооперации с СФТИ, ПНИТИ и Харьковским ФТИ при активной поддержке Научно-технического управления МСМ [3, 5].

К августу 1964 года (всего лишь за 3 года от начала разработки) реактор-преобразователь «Ромашка» был полностью готов к длительным энергетическим испытаниям на специально сооруженном в ИАЭ стенде «Р».

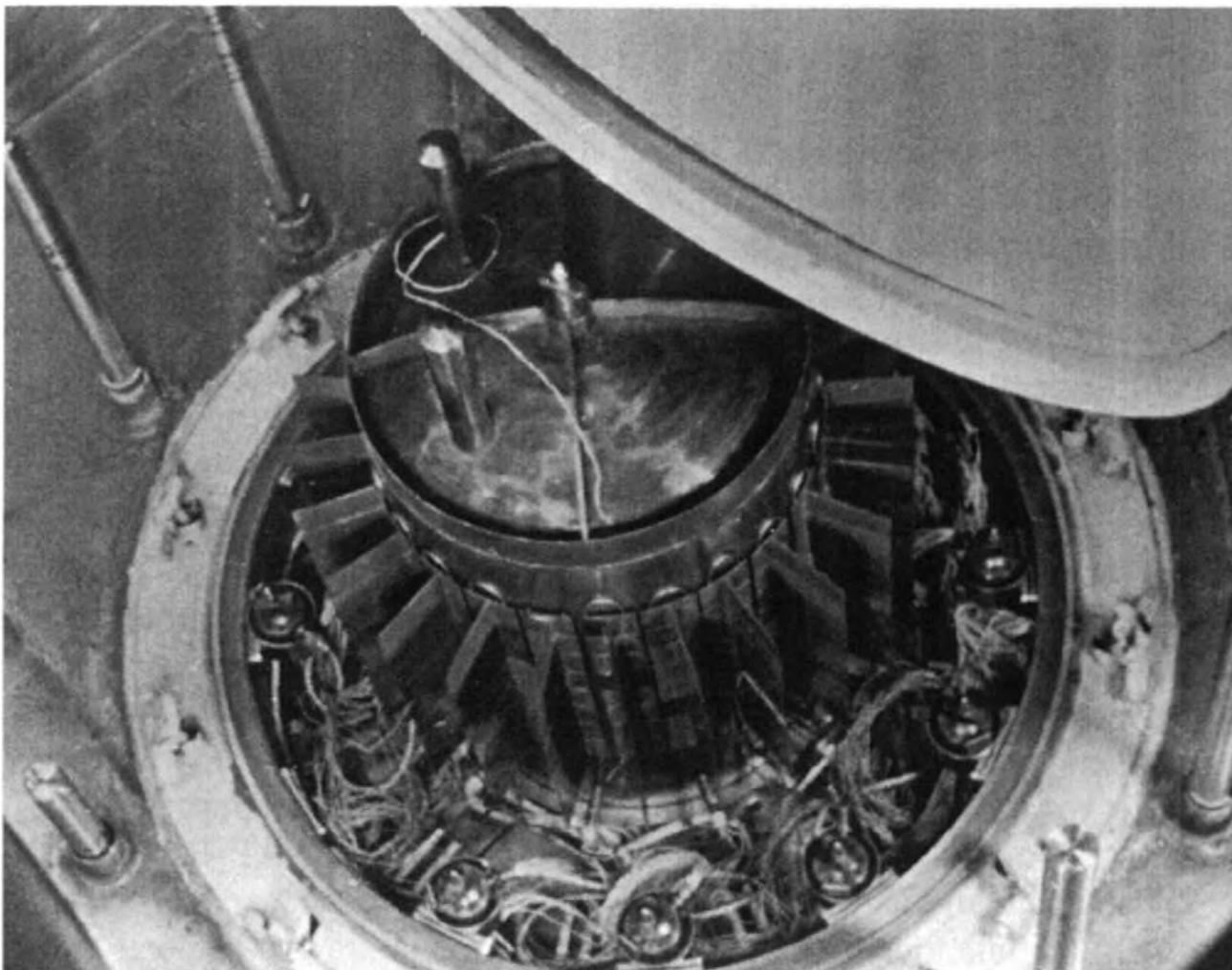
Пуск реактора-преобразователя «Ромашка» был осуществлен 14 августа 1964 года. Он проработал в непрерывном режиме ~15 000 ч., выработав ~ 6 100 кВт · ч электроэнергии. Начало испытаний установки «Ромашка» опередило на 4,5 месяца начало наземных ядерных испытаний в США FS-3 – прототипа установки SNAP-10a и на 8 месяцев опередило начало ЛКИ – прототипа FS-4. Сообщение о пуске установки «Ромашка» на III Женевской конференции [5] ввергло в шок руководителей работ по установке SNAP-10a .

Пуск и успешные испытания реактора-преобразователя «Ромашка», как сообщалось ТАСС, продемонстрировали, что в Советском Союзе впервые в мире был создан работающий ядерный реактор-преобразователь, способный генерировать электроэнергию без участия каких-либо движущихся рабочих тел и механизмов, и экспериментально показана его способность к длительной работе.

## 1.2. Описание реактора-преобразователя «Ромашка» [3, 5]

Установка «Ромашка» состоит из ядерного реактора, системы его регулирования и термоэлектрического преобразователя с ребристым холодильником-излучателем. Общий вид установки представлен на рис. 1.6. Чертеж реактора-преобразователя «Ромашка» на этапе рабочего проекта представлен на рис. 1.7.

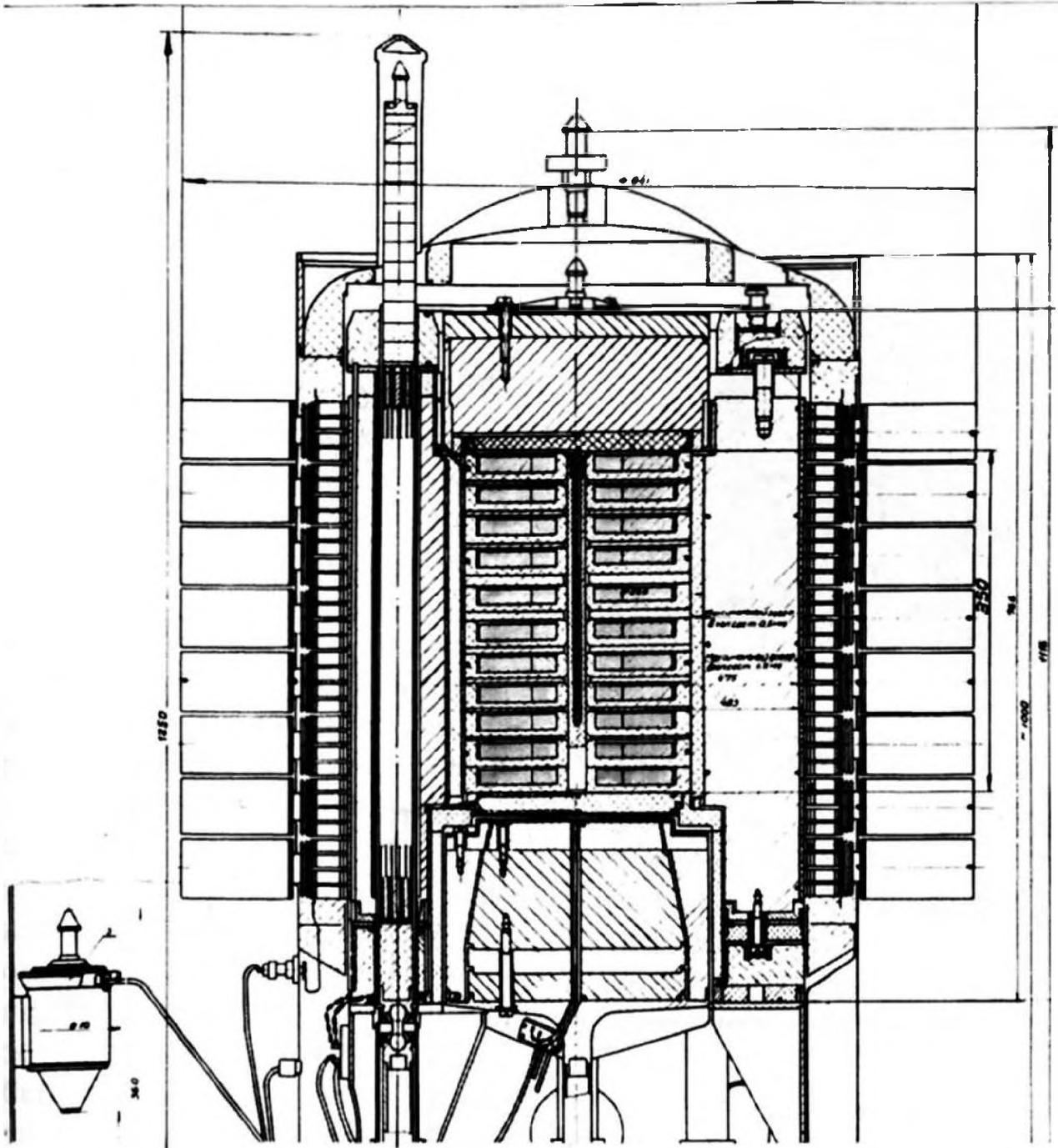
Ядерный реактор установки «Ромашка» представляет нейтронно-физическую систему, работающую на быстрых нейтронах. Реактор служит источником тепловой энергии, которая преобразуется с помощью полупроводниковых термоэлементов в энергию электрическую. Тепло, выделяемое в результате деления урана-235 в активной



*Рис. 1.6. Общий вид установки «Ромашка»*

зоне реактора, путем теплопроводности передается в радиальном направлении на отражатель и далее с боковой поверхности отражателя передается на коаксиально расположенный и примыкающий к отражателю полупроводниковый преобразователь. Реактор цилиндрической формы, состоит из активной зоны, отражателей (радиального и торцевых) и четырех стержней регулирования (рис. 1.8). Расположение реактора – вертикальное.

Активная зона реактора по высоте набирается из 11 тепловыделяющих элементов, каждый из которых состоит из графитового корпуса с крышкой и тепловыделяющих сегментных пластин и центрального диска из дикарбида урана с обогащением по урану-235 – 90% (рис. 1.9). Общий вес урана-235 в активной зоне реактора составляет 49 кг.



*Рис. 1.7. Чертеж реактора-преобразователя «Ромашка»  
на этапе рабочего проекта*

Графитовый корпус твела выполнен таким образом, чтобы значительная часть потока тепла, выделяемого активной зоной, проходила по телу графитовой кассеты, что уменьшает температурный перепад на дикарбиде урана. Изменяя толщину дна

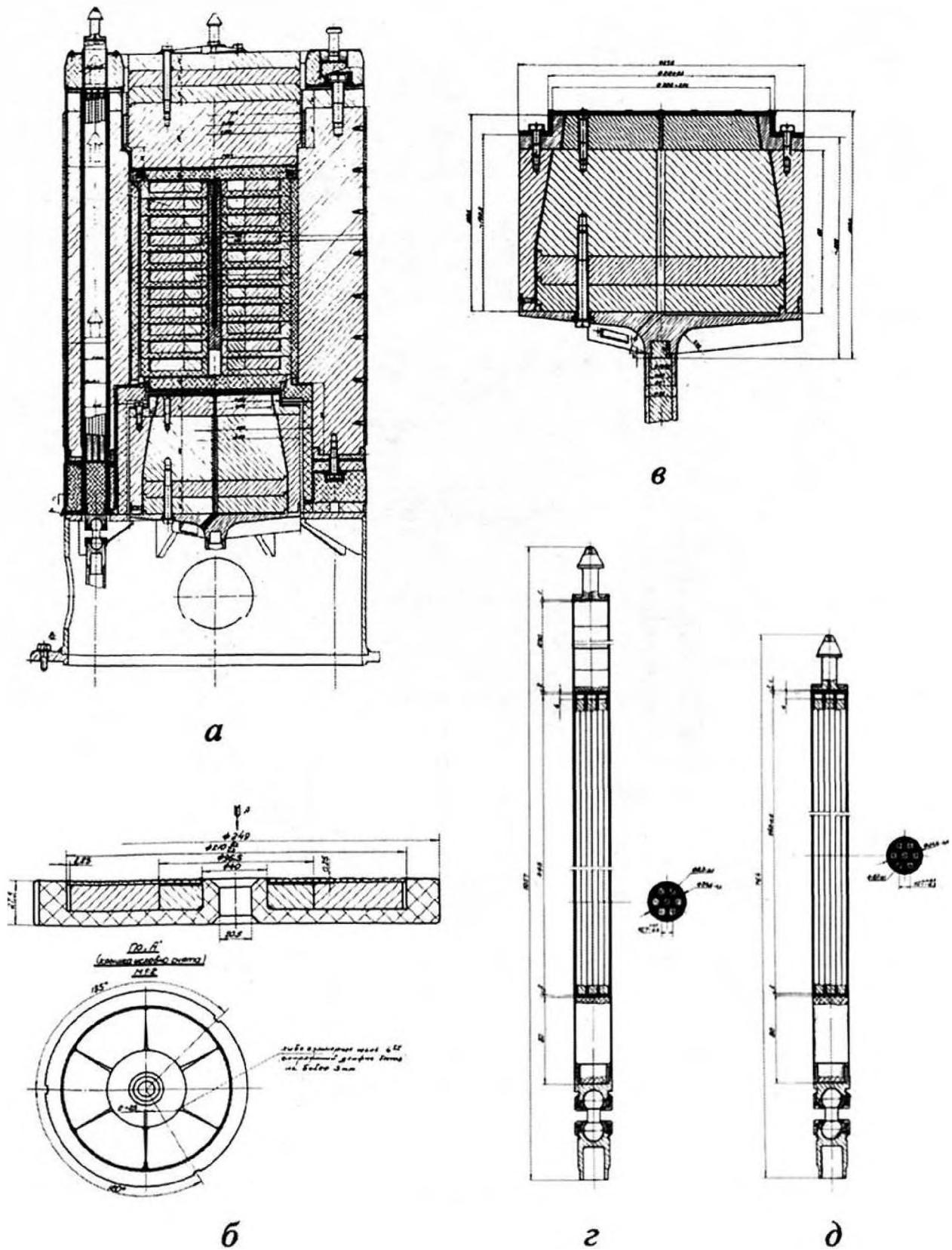
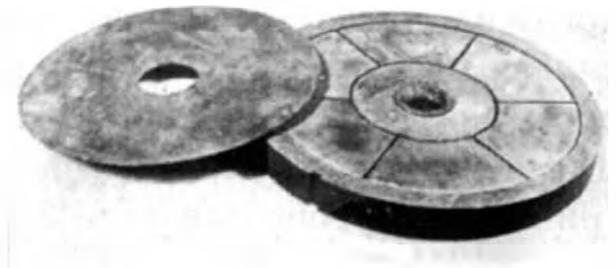
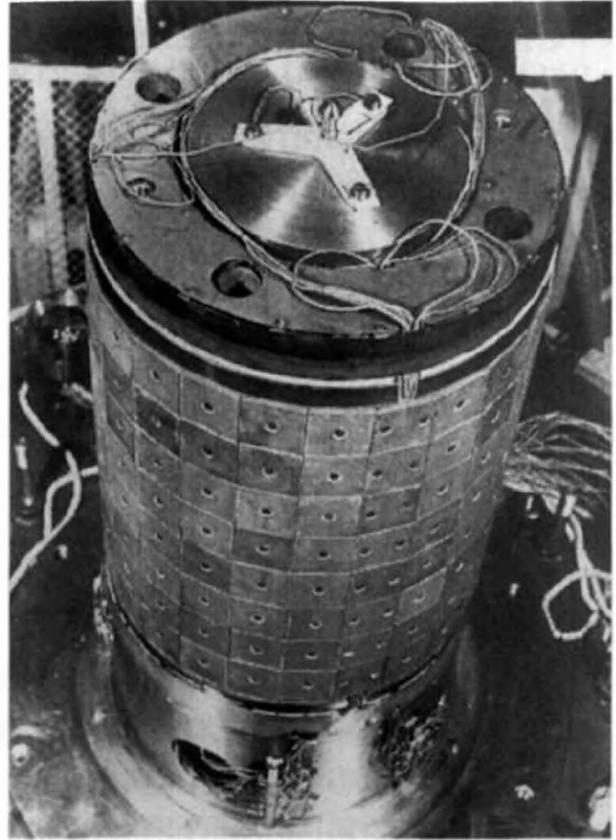


Рис. 1.8. Чертежи основных элементов реактора-преобразователя: а – реактор; б – твэл; в – НТО; г – стержни РР и АЗ; д – стержень АР

и крышек кассет перед сборкой активной зоны, можно влиять на нейтронно-физические характеристики, в частности, на осевую неравномерность тепловыделения и температурный эффект реактивности установки.

Активную зону окружает монолитный радиальный отражатель из бериллия. Между активной зоной и радиальным отражателем помещается графитовая втулка, которая предотвращает деформацию отражателя при рабочих температурах, близких к точке плавления бериллия ( $1283\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), и защищает кассеты активной зоны от химического взаимодействия с металлическим бериллием благодаря наличию на втулке защитного покрытия из карбида кремния и окиси бериллия. На наружной 24-гранной поверхности радиального отражателя, примыкающей к полупроводниковому преобразователю, с помощью винтов из бериллия прикреплены графитовые пластины, предотвращающие возможное взаимодействие бериллия с материалом преобразователя и уменьшающие испарение бериллия.

Торцевые отражатели реактора выполнены также из металлического бериллия. По торцам реактора для снижения утечек тепла установлена высокотемпературная теплоизоляция на основе пенографита и многослойной графитированной ткани. Выбранное сочетание материалов в реакторе обеспечивает работоспособность активной зоны до  $\sim 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$  в центральной части реактора, до  $1000\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  – на наружной поверхности отражателя.



*Рис. 1.9. Общий вид реактора и твэл установки «Ромашка»*

Система регулирования реактора состоит из четырех стержней, расположенных в радиальном бериллиевом отражателе, и нижнего торцевого отражателя. Для автоматического регулирования реактора в процессе работы предусмотрен стержень автоматического регулирования (АР) из бериллия и окиси бериллия в оболочке из ВЖ-98, приводимый в движение сервоприводом. Ручное регулирование реактора осуществляется движением комбинированного отражающе-поглощающего нейтроны стержня ручного регулирования (РР). Компенсация температурного эффекта реактора осуществляется движением нижнего торцевого отражателя.

Два стержня аварийной защиты (АЗ), аналогичные по устройству стержню РР, и нижний торцевой отражатель обеспечивают аварийную защиту реактора.

Привод всех органов регулирования, кроме упомянутого стержня АР, осуществляется с помощью гидравлической системы. Приводы органов управления и защиты размещаются снизу под корпусом реактора.

В качестве термоэлектрического генератора в установке «Ромашка» используется преобразователь на основе наиболее высокотемпературного в настоящее время полупроводникового кремний-германиевого сплава (Si – 85%; Ge – 15% вес.). Термоэлектрические характеристики кремний-германиевого сплава приведены на рис. 1.10. Для космического реактора-преобразователя, в котором термоэлектрический преобразователь совмещен с радиальным отражателем,

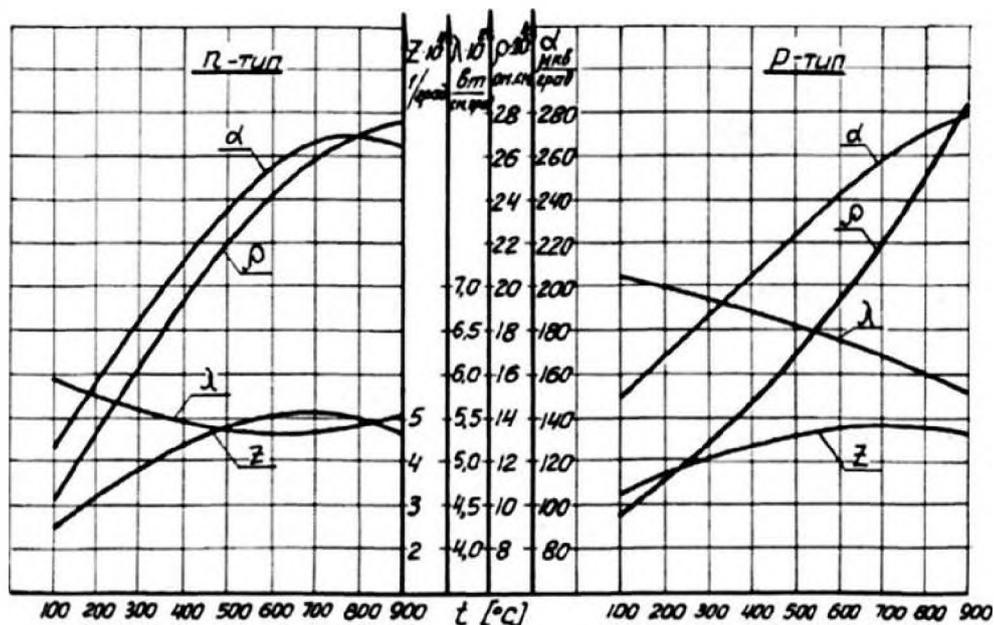


Рис. 1.10. Термоэлектрические характеристики кремний-германиевого материала с 15% вес. германия n- и p-типа проводимости

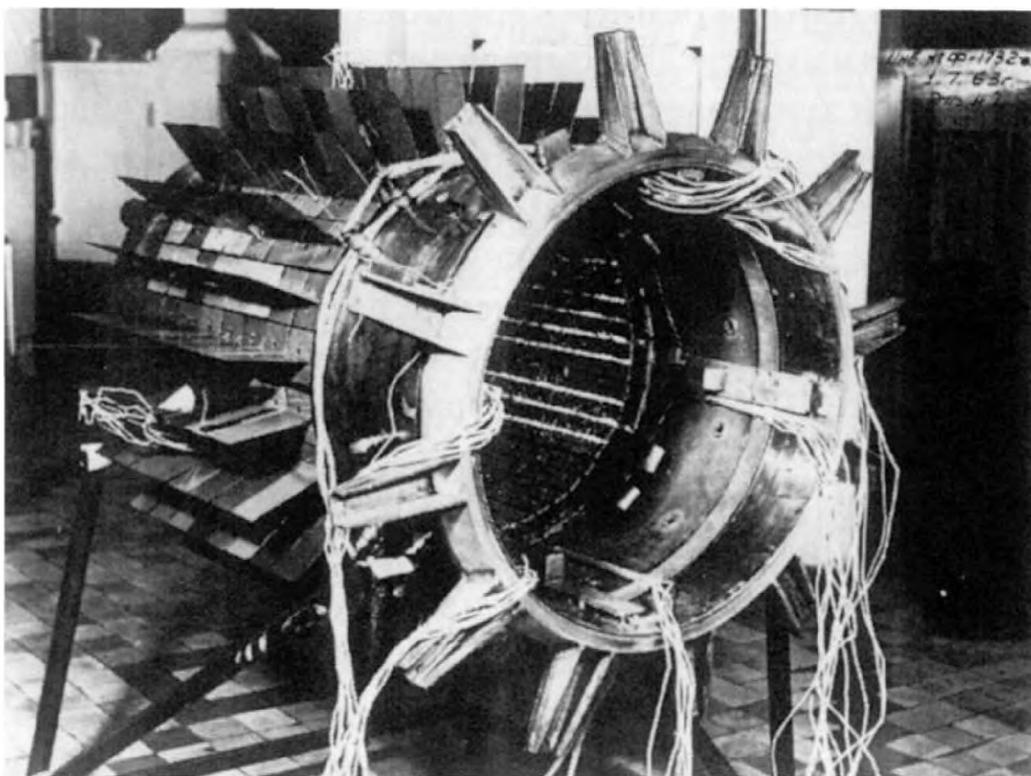
высокотемпературный кремний-германиевый сплав по сравнению с другими известными среднетемпературными (PbTe-GeTe) и низкотемпературными термоэлектрическими материалами обеспечивает возможность получения максимальной электрической мощности с единицы поверхности отражателя. При использовании максимального перепада температур на кремний-германиевом сплаве  $\Delta T = T_r - T_x = 750 - 800^\circ$  термоэлектрический преобразователь на основе Si-Ge (55 % весовых) позволяет получить удельную электрическую мощность с единицы поверхности термобатареи  $\sim 2,5$  Вт(эл)/см<sup>2</sup> при КПД до 6,0%.

Преобразователь смонтирован внутри герметичного стального кожуха аппарата (рис. 1.11 и 1.12).

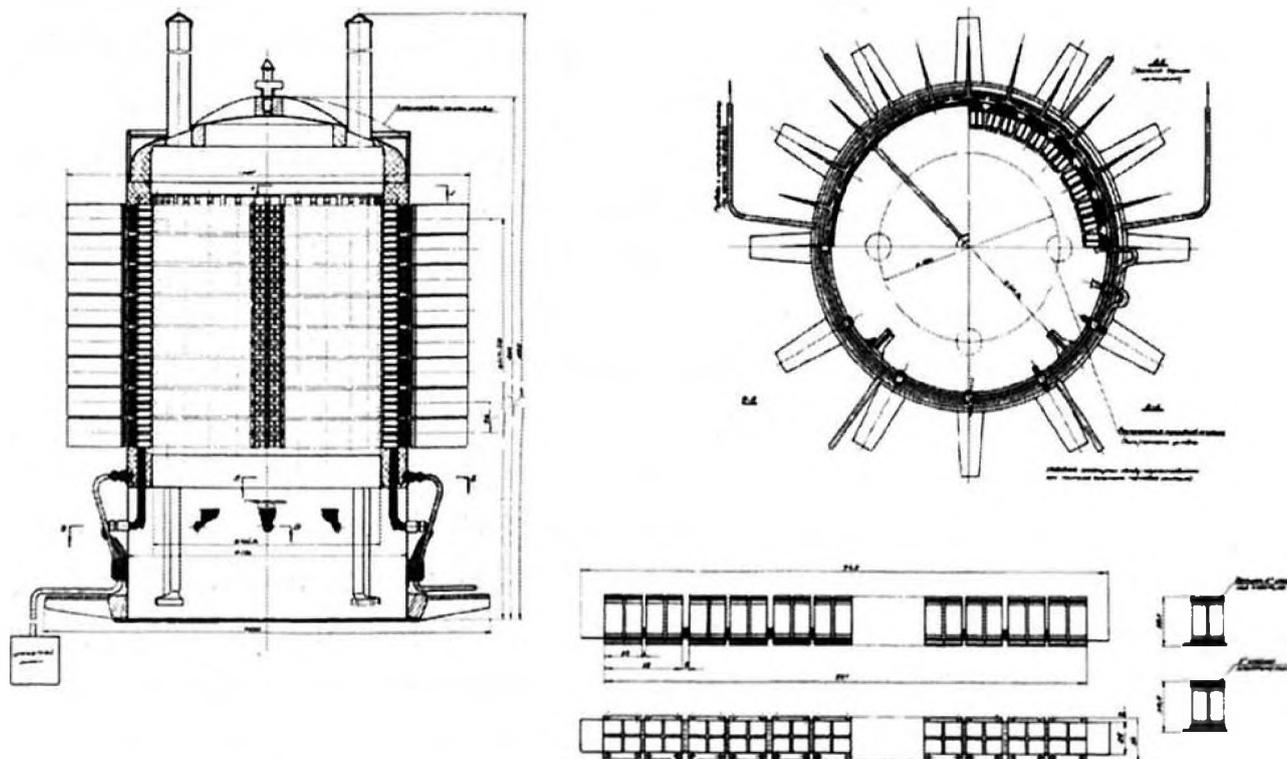
Секции термоэлементов укреплены упругим образом на кожухе посредством газонаполненных силовых сильфонных элементов таким образом, что стебель медного башмака, который отводит тепло от батареи, включающей в себя восемь пар полупроводниковых термостолбиков, выходит наружу, не нарушая герметичности кожуха преобразователя. К стеблю башмака, с соблюдением хорошего теплового контакта, прикреплено медное ребро, являющееся элементом холодильника-излучателя. Термоэлемент представляет собой пару термостолбиков с *n*- и *p*-проводимостью, соединенных по горячей стороне молибденовой коммутационной пластинкой. По холодной стороне отдельные пары термостолбиков коммутируются между собой медной перемычкой в единую последовательную цепь по высоте преобразователя. Электрически термостолбики соединены параллельно-последовательно в четыре параллельные ветви, что обеспечивает повышенную надежность цепей преобразователя при случайном повреждении отдельных участков коммутации.

Коммутация между секциями выполнена гибкими проводниками, что обеспечивает независимое перемещение отдельных секций термоэлементов при неодинаковом термическом расширении отражателя и кожуха преобразователя. Для исключения электрического замыкания термоэлементов по горячей и холодной сторонам на корпус, а также на реактор, к горячему и холодному спаям термостолбиков приварены электроизоляционные металлокерамические пластины.

В качестве керамики в электроизоляционных пластинках при-



*Рис. 1.11. Общий вид термоэлектрического преобразователя в герметичном корпусе с ребристым холодильником-излучателем*



*Рис. 1.12. Чертежи преобразователя установки «Ромашка» на этапе рабочего проекта*

менена окись бериллия, обладающая хорошими тепловыми, теплопрочностными и электроизоляционными свойствами при высоких температурах.

Непреобразованная часть тепла отводится от преобразователя 192 ребрами-излучателями. Профиль и размеры ребер выбраны из условия минимального веса при заданном теплосъеме. Для повышения излучательной способности в инфракрасной части спектра, излучающая поверхность ребер имеет жаростойкое эмалевое покрытие, обеспечивающее коэффициент излучения  $\geq 0,9$ .

По мере разогрева реактора, после его запуска, вследствие нагрева газа и повышения давления в сильфонных элементах, заполненных аргоном при  $p = 1$  ата, происходит поджатие всех термоэлементов к поверхности отражателя, с установлением необходимого теплового контакта между термоэлектрическим преобразователем и ядерным реактором. Для снижения тепловых потерь все промежутки между термоэлементами и пустоты в конструкции преобразователя заполняются кварцевой ватой. Все детали реактора и термоэлементов работают в среде гелия, заполняющего герметичную полость реактора-преобразователя. Герметизация реактора не позволяет осколочным продуктам распространяться за пределы зоны, ограниченной корпусом преобразователя.

В целом преобразователь установки разбит на четыре группы, каждая из которых имеет независимые силовые выводы.

Основные характеристики реактора-преобразователя «Ромашка»:

Диаметр активной зоны (по кассетам), мм	241
Высота активной зоны (по кассетам), мм	351
Внутренний диаметр радиального отражателя, мм	266
Наружный диаметр радиального отражателя (по графитовым пластинам), мм	483
Высота радиального отражателя, мм	553
Толщина ВТО, мм	125
Толщина НТО, мм	180
Загрузка делящегося вещества по урану-235, кг	49
Вес реактора, кг	265
Вес термоэлектрического преобразователя с корпусом и холодильником-излучателем (без нижнего фланца корпуса), кг	185

Вес реактора-преобразователя (без приводов регулирующих стержней), кг	450
Ресурс работы реактора-преобразователя, час	15000
Эффективная тепловая мощность реактора-преобразователя (без учета растечек тепла в торцы), кВт	28,2
Электрическая мощность реактора-преобразователя на клеммах нагрузки (в начале ресурса работы), Вт	460–475
Коэффициент уменьшения электрической мощности за ресурс 15 000 ч.	0,80
Рабочее напряжение на клеммах реактора-преобразователя (при последовательном соединении 4-х групп преобразователей), вольт	21
ЭДС преобразователя (в начале ресурса работы), вольт	42,7
Возрастание коэффициента термоэдс преобразователя за ресурс 15 000 ч.	1,16
Внутреннее сопротивление преобразователя (в начале ресурса работы), Ом	0,96
Возрастание внутреннего сопротивления преобразователя за ресурс 15 000 ч.	1,52
Количество термоэлементов в преобразователе	3072
Количество последовательно соединенных термоэлементов в преобразователе	768
Максимальная температура центра активной зоны реактора, °С	1900
Максимальная температура радиального бериллиевого отражателя, °С	1200
Максимальная температура наружной поверхности радиального отражателя, °С	960
Максимальная температура горячих спаев преобразователя, °С	815
Максимальная температура холодных спаев преобразователя, °С	585
Максимальная температура основания излучающих ребер, °С	550
Средний перепад температур на термоэлектрическом материале, °С	216
Температурный эффект реактора, %	–2,65
Эффективность всех стержней регулирования, %	1,74
Эффективность подвижного нижнего торцевого отражателя, %	3,6
Выгорание урана-235 в реакторе за 15 000 ч. работы на мощности, г	~40
Общий поток нейтронов в центре активной зоны, н/см <sup>2</sup> сек.	$9,2 \cdot 10^{12}$
Общий поток нейтронов на границе активной зоны реактора, н/см <sup>2</sup> сек.	$7,4 \cdot 10^{12}$
Утечка нейтронов из реактора, н/см <sup>2</sup> сек.	$3,0 \cdot 10^{12}$

### 1.3. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик элементов реактора-преобразователя «Ромашка» на этапе, предшествующем ядерным энергетическим испытаниям [5]

**Выбор параметров установки.** Энергетические возможности реактора-преобразователя «Ромашка» без теплоносителя определяются предельными характеристиками используемых в нем материалов, размерами его основных элементов и их конструктивным оформлением. Тесная взаимосвязь этих параметров потребовала выполнения широкого круга расчетно-теоретических и экспериментальных теплофизических, нейтронно-физических и материаловедческих исследований, направленных на определение оптимальных характеристик установки и обоснование работоспособности ее элементов.

**Теплоэнергетические расчеты.** Электрическая мощность установки в конечном счете определяется тепловым режимом.

Особенностью установки является то, что режим работы преобразователя, а следовательно, и выдаваемая им электрическая мощность определяются допустимым уровнем температуры отдельных элементов реактора и преобразователя и возможностями сброса тепла излучателем. В связи с этим для определения энергетических параметров установки необходимо было выполнить тепловой расчет реактора-преобразователя в целом.

Выражение, описывающее величину электрической мощности, можно представить в виде [5]

$$W = \frac{M}{(1+M)^2} \cdot \frac{\frac{1-r_{ki}S}{l(\sigma_1+\sigma_2)} - \frac{2\lambda_3 \cdot S_3}{S(\lambda_1+\lambda_2)}}{1 + \frac{2Q_n l \cdot \alpha^2 \left[ \frac{1}{M+1} \cdot \frac{T_r}{T_r - T_x} - \frac{1}{2} \frac{1}{(M+1)^2} \right]}{nms(\sigma_1+\sigma_2)(\lambda_1+\lambda_2)}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \alpha_i \alpha_k Q_i Q_k}{(\lambda_1+\lambda_2)^2 \cdot \frac{S}{m} \sum_i n(\sigma_{1i}+\sigma_{2i})}$$

где  $Q_i$  – тепловой поток через  $i$  зону;  $Q_n$  – полный тепловой поток через преобразователь;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности; удельное сопротивление;  $\sigma$  – коэффициент термо э.д.с;  $l$  – длина термостолбика;  $S$  – сечение термостолбиков  $S_3$  – сечение теплоизоляции между столбиками;  $n_s$  – число зон,  $n_z$  – число последовательно соединенных пар;  $m$  – число параллельно соединенных пар;  $T_r$   $T_x$  – температура

горячего и холодного спаев полупроводников;  $r_k$  — электросопротивление коммутации одной пары;  $M$  — отношение сопротивления внешней нагрузки к внутреннему сопротивлению преобразователя (индексы 1 и 2 относятся к полупроводниковым материалам  $n$  и  $p$  типа;  $i$  и  $k$  — номера зон).

Неравномерность распределения температур и тепловых потоков по внешней поверхности радиального отражателя учитываются этой формулой путем разбиения преобразователя по высоте на кольцевые зоны, в пределах которых температурные условия принимаются одинаковыми. Влияние неравномерности на эффекты Джоуля и Пельтье пренебрегаются.

Задача о распределении температур в активной зоне, отражателе и преобразователе сводится к решению уравнений теплопроводности в многозонной системе с нелинейными граничными условиями, описывающими передачу тепла излучением. Численное решение этих уравнений было проведено на электронно-вычислительной машине.

Расчетное распределение температур в радиальном отражателе для одного из режимов работы показано на рис. 1.13.

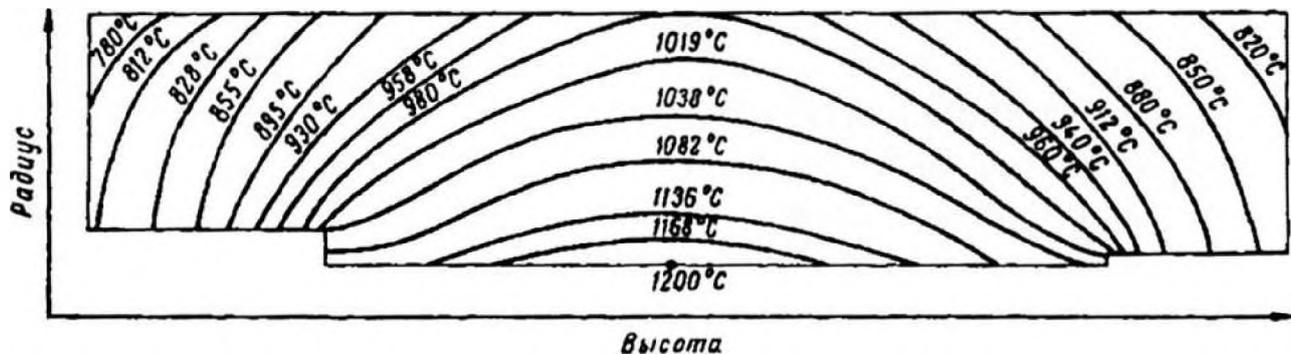


Рис. 1.13. Расчетное распределение температуры по сечению радиального бериллиевого отражателя

Элементы активной зоны реактора находятся в напряженных условиях как по уровню температур, так и по температурным перепадам, определяющим термические напряжения. В связи с этим была решена задача о влиянии возможных нарушении целостности твэла на повышение температуры в активной зоне. Решение было выполнено с помощью метода электро моделирования температурных полей на электропроводной бумаге.

В рассматриваемой системе тепло, прошедшее через преобразователь, отводится излучением. Максимальный теплоотвод с поверхности при заданной средней температуре холодных слоев

преобразователя обеспечивает наибольшую электрическую мощность при прочих равных условиях. Для определения оптимальной формы излучающей поверхности (число ребер, размер, профиль) была решена система интегрально-дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры в ребрах с учетом взаимного облучения элементов и теплопроводности. На рис. 1.14 приведена зависимость теплоотвода от веса и числа ребер.

С учетом результатов тепловых расчетов системы была определена электрическая мощность установки в зависимости от тепловой мощности, проходящей через преобразователь при вариации величины добротности термоэлемента.

**Нейтронно-физические расчеты.** Нейтронно-физические характеристики реактора были рассчитаны с использованием многогруппового метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Применение этого метода в данном случае позволило надежно учесть геометрические и физические особенности системы, связанные с гетерогенной структурой активной зоны, наличием каналов и зазоров сложной конфигурации, резко неоднородными физическими свойствами материалов активной зоны и отражателя, специфической системой регулирования реактора и т.д. При расчетах использовалась

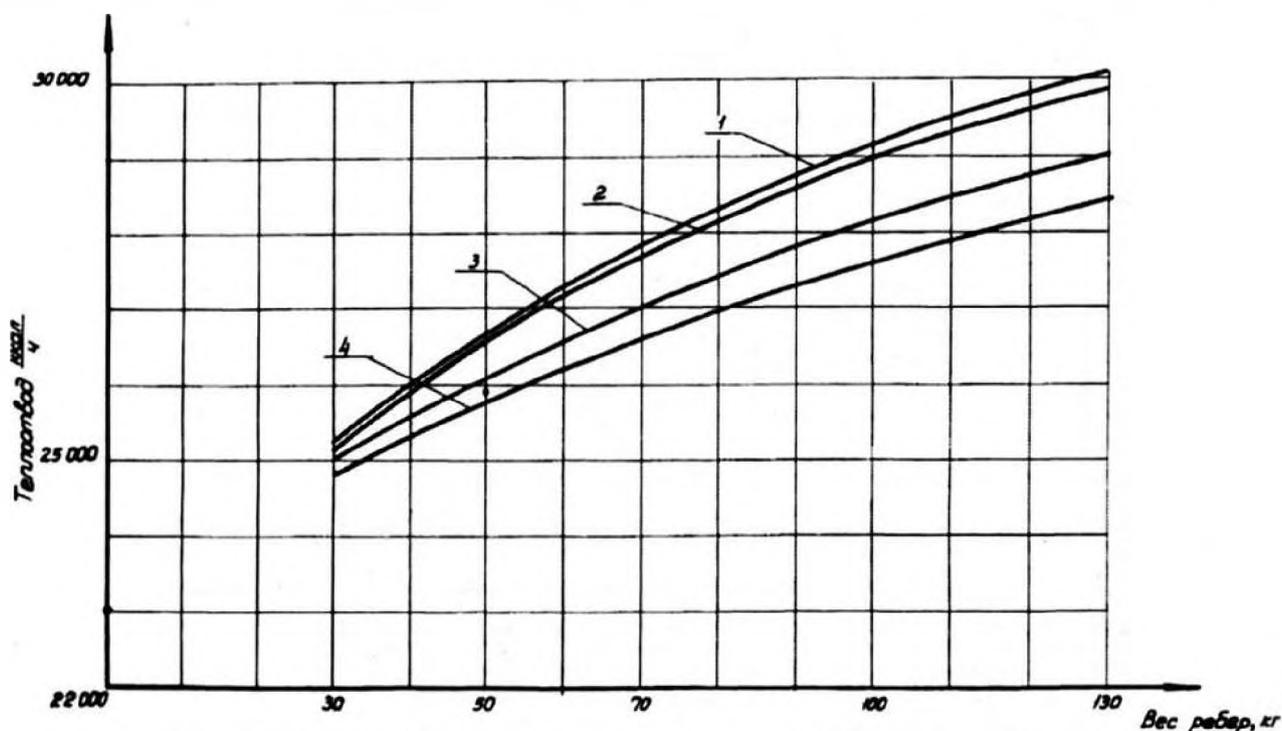


Рис. 1.14. Зависимость теплоотвода от веса ребер (температура основания ребер 600 °C):  
1—6 ребер; 2—9 ребер; 3—18 ребер; 4—36 ребер

многогрупповая (21 группа) система констант, которая учитывает резонансную структуру сечения  $U^{238}$  реакцию  $(n, 2n)$  на бериллии и неупругие переходы в первых девяти группах. В процессе расчета прослеживалось около 50 000 нейтронных историй.

**Экспериментальное изучение характеристик элементов установки.** Для обоснования проектных параметров установки были проведены экспериментальные теплофизические и металлофизические исследования материалов и узлов установки.

Исследованы контактное взаимодействие дикарбида урана с графитом, испаряемость дикарбида урана в инертной среде при температуре до 2000 °С (рис. 1.15). Изучены температурная зависимость коэффициента теплопроводности дикарбида урана (рис. 1.16), коэффициента линейного расширения и другие характеристики в широком интервале температур.

Эти исследования наряду с исследованием термочностных

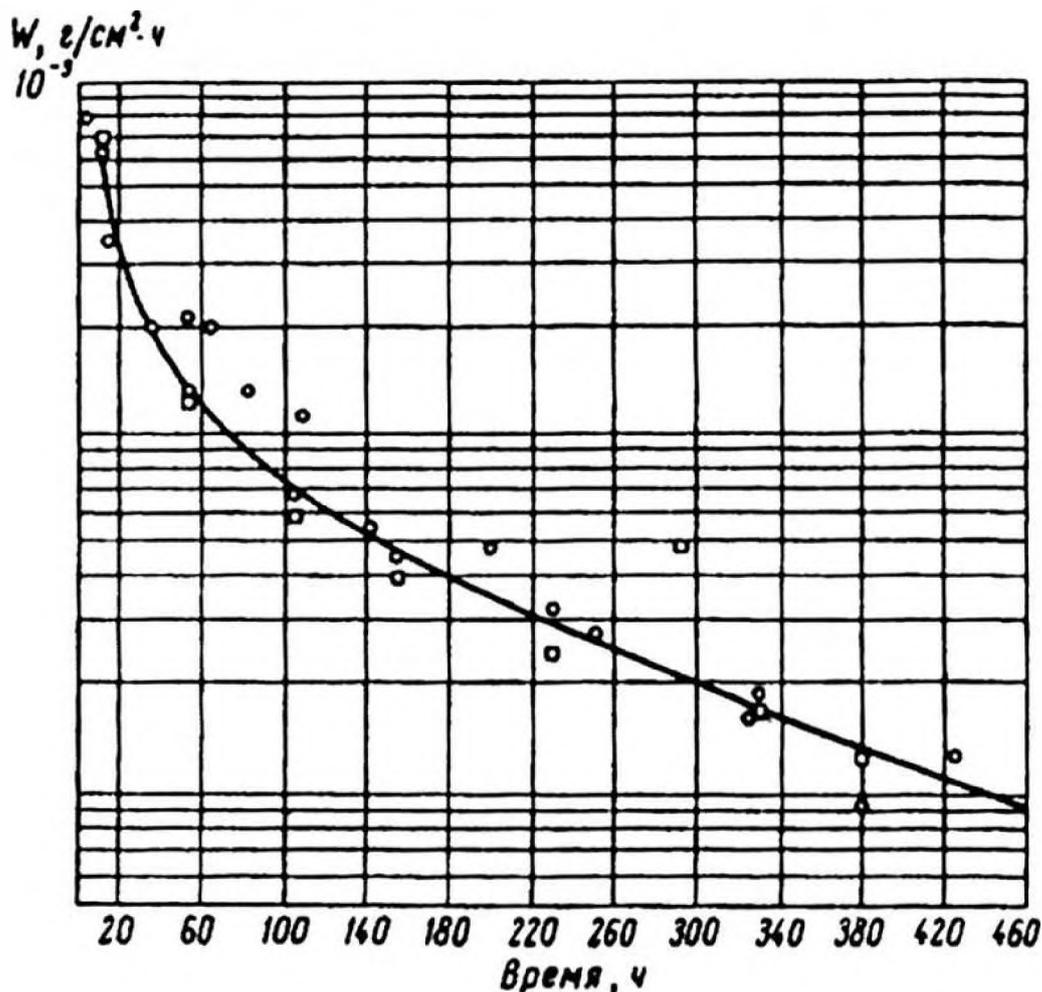


Рис. 1.15. Скорость испарения дикарбида урана в инертной среде при  $t = 2000$  °С ( $\bullet$ ,  $\square$  — разные образцы). Данные Л.К. Мизрахи и Ю.М. Уткина

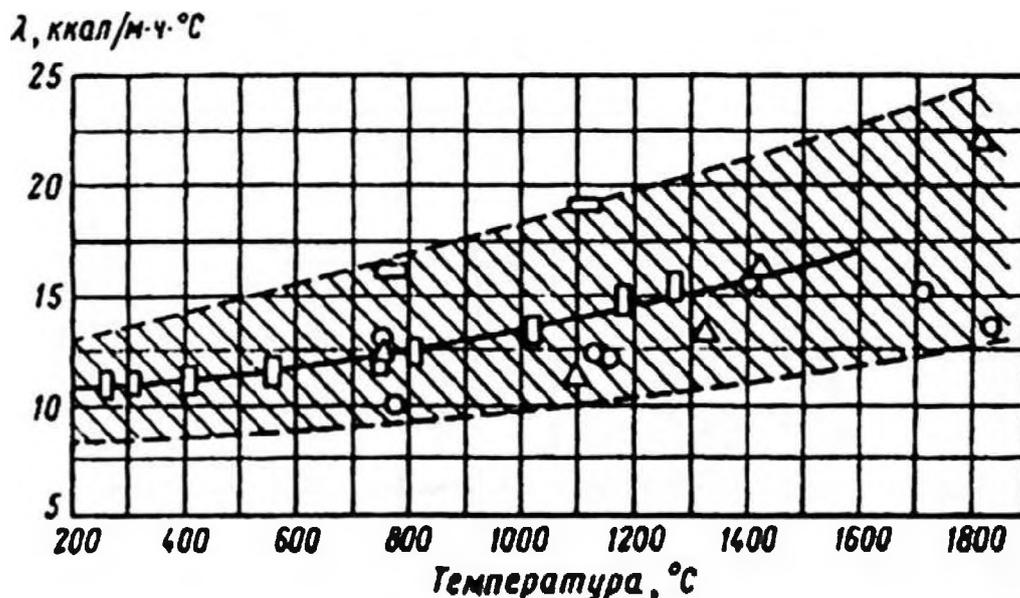


Рис. 1.16. Зависимость теплопроводности дикарбида урана от температуры ( $\bullet$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\square$  — разные образцы). Данные А.Г. Харламова

характеристик дикарбида урана, испытаниями макетных твэлов и петлевыми испытаниями образцов из дикарбида урана показали работоспособность твэлов в рабочих условиях.

Использование в реакторе бериллиевого отражателя, работающего при больших тепловых потоках в области температур, близких к температуре плавления, потребовало экспериментального исследования взаимодействия металлического бериллия с различными конструкционными материалами, изучения коэффициента теплопроводности бериллия, исследования деформируемости и термостойкости бериллия.

Для уменьшения утечек тепла через торцы реактора и между термоэлементами преобразователя в установке используется высокотемпературная теплоизоляция. В связи с этим была изучена теплопроводность теплоизоляции в различных средах в области рабочих температур.

Одна из важных сторон проведенных исследований — изучение работоспособности элементов термоэлектрического преобразователя в потоках нейтронного и  $\gamma$ -излучения. Неоднократные многочасовые испытания термоэлементов в петлях реактора РФТ при интегральных потоках нейтронов  $3 \cdot 10^{19}$  нейтр./см<sup>2</sup> позволили сделать вывод, что основные свойства термоэлементов изменяются в допустимых пределах (рис. 1.17).

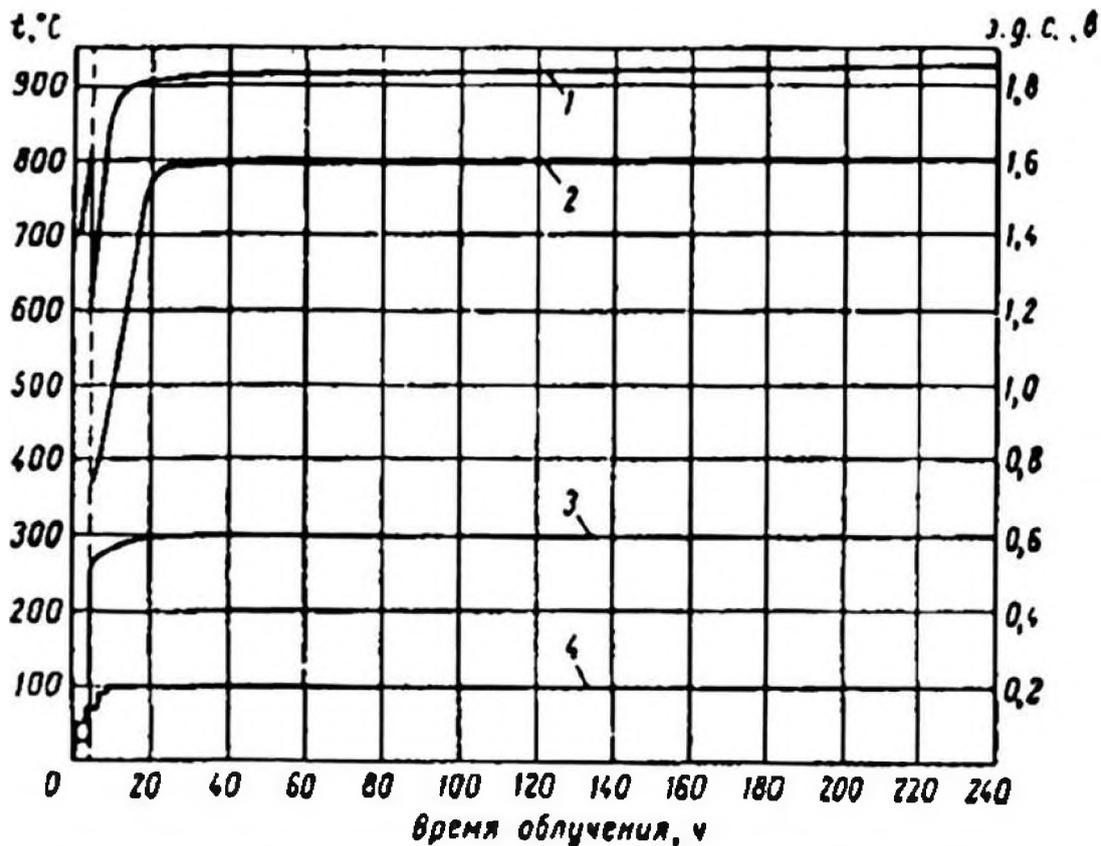


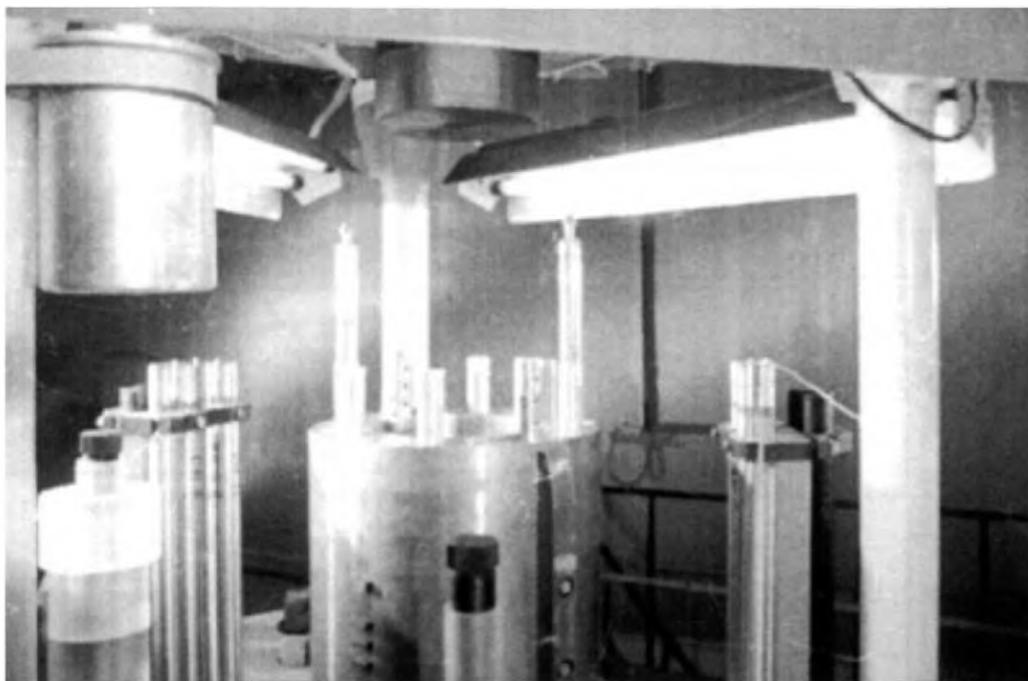
Рис. 1.17. Изменение основных параметров полупроводниковых термоэлементов в процессе реакторного облучения (максимальный — интегральный поток нейтронов  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  нейтр./см<sup>2</sup>). Данные Г.М. Павлова:

1 — температура горячего спая; 2 — термо-ЭДС секции; 3 — перепад температуры на термоэлементах; 4 — мощность реактора

**Стендовые исследования нейтронно-физических характеристик.** Для этих исследований в ИАЭ был сооружен критический стенд с нейтронно-физическим прототипом реактора (рис. 1.18).

Было осуществлено пять различных сборок, отличающихся концентрацией делящегося материала. На каждой сборке был проведен комплекс исследований, охватывающий широкий круг вопросов: зависимость критических нагрузок от состава активной зоны, эффективность отражателей и органов регулирования, распределение тепловыделения в активной зоне, влияние на реактивность конструктивных зазоров и т.д.

Большое внимание было уделено изучению влияния перемещения нижнего торцевого отражателя и профилирования активной зоны на нейтронно-физические характеристики реакторной системы, а также исследованию эффективности стержней регулирования и полей тепловыделения. Реактивность во всех этих случаях измерялась различными методами: по периоду разгона, импульсным и интегральным.



*Рис. 1.18. Критический стенд для исследования НФХ реактора-преобразователя установки «Ромашка»*

Сравнение результатов измерений реактивности различными методами позволило оценить величину эффективности запаздывающих нейтронов и определить влияние фотонейтронов, обусловленных наличием бериллиевого отражателя.

На критическом стенде были проведены исследования выходящих из отражателя потоков нейтронов и  $\gamma$ -излучения и спектр нейтронов (рис. 1.19 и 1.20).

**Стендовые исследования теплоэнергетических характеристик.** Заключительному этапу испытаний реактора-преобразователя на натурном испытательном стенде предшествовали комплексные испытания полномасштабной тепловой модели реактора-преобразователя и штатного комплекта реактора «Ромашка» на стенде с электронагревом (рис. 1.21).

Цель указанных испытаний – проверка работоспособности всей установки в целом и ее отдельных узлов, а также исследование рабочих параметров установки в стационарных и нестационарных режимах.

В процессе испытаний постоянно измерялись температурные поля в различных элементах установки. Для этого в реакторе и преобразователе было установлено 53 вольфрам-рениевых и 86 хромель-алюмелевых термопар.

Электрические характеристики преобразователя измерялись с помощью специального электрического пульта, который позволял,

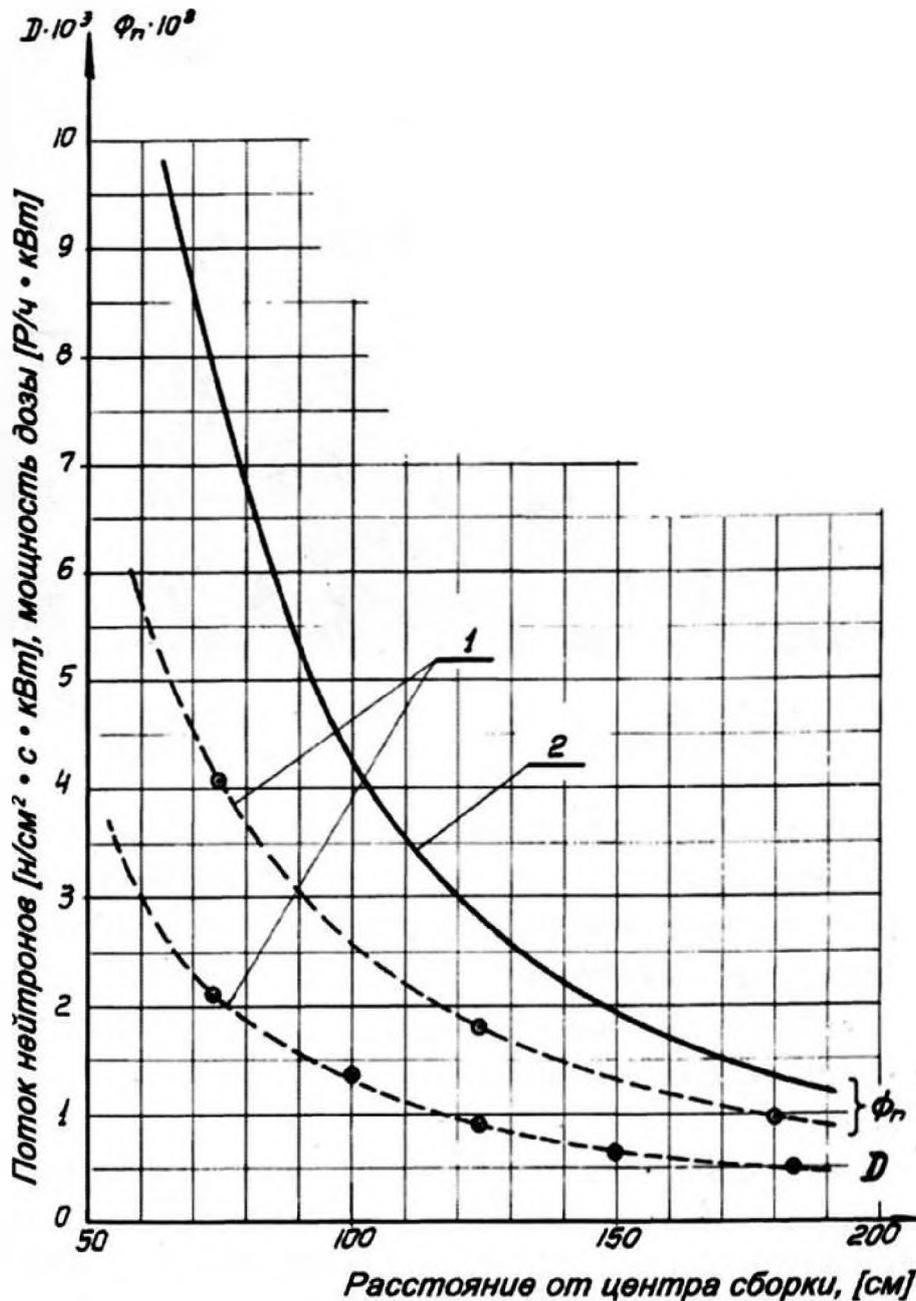


Рис. 1.19. Общий поток нейтронов и мощность дозы  $\gamma$ -излучения за отражателем реактора-преобразователя «Ромашка»:  
1 – экспериментальные кривые; 2 – расчётная кривая для нейтронов

во-первых, для каждой из четырех групп термоэлементов плавно менять нагрузку от 0,1 до 10 Ом и проводить измерения электродвижущей силы, тока короткого замыкания, рабочего тока и напряжения, во-вторых, проводить электрические измерения не только отдельно по группам, но и при последовательном и параллельном соединении групп. Электрическая мощность преобразователя определялась в режиме максимальной мощности.

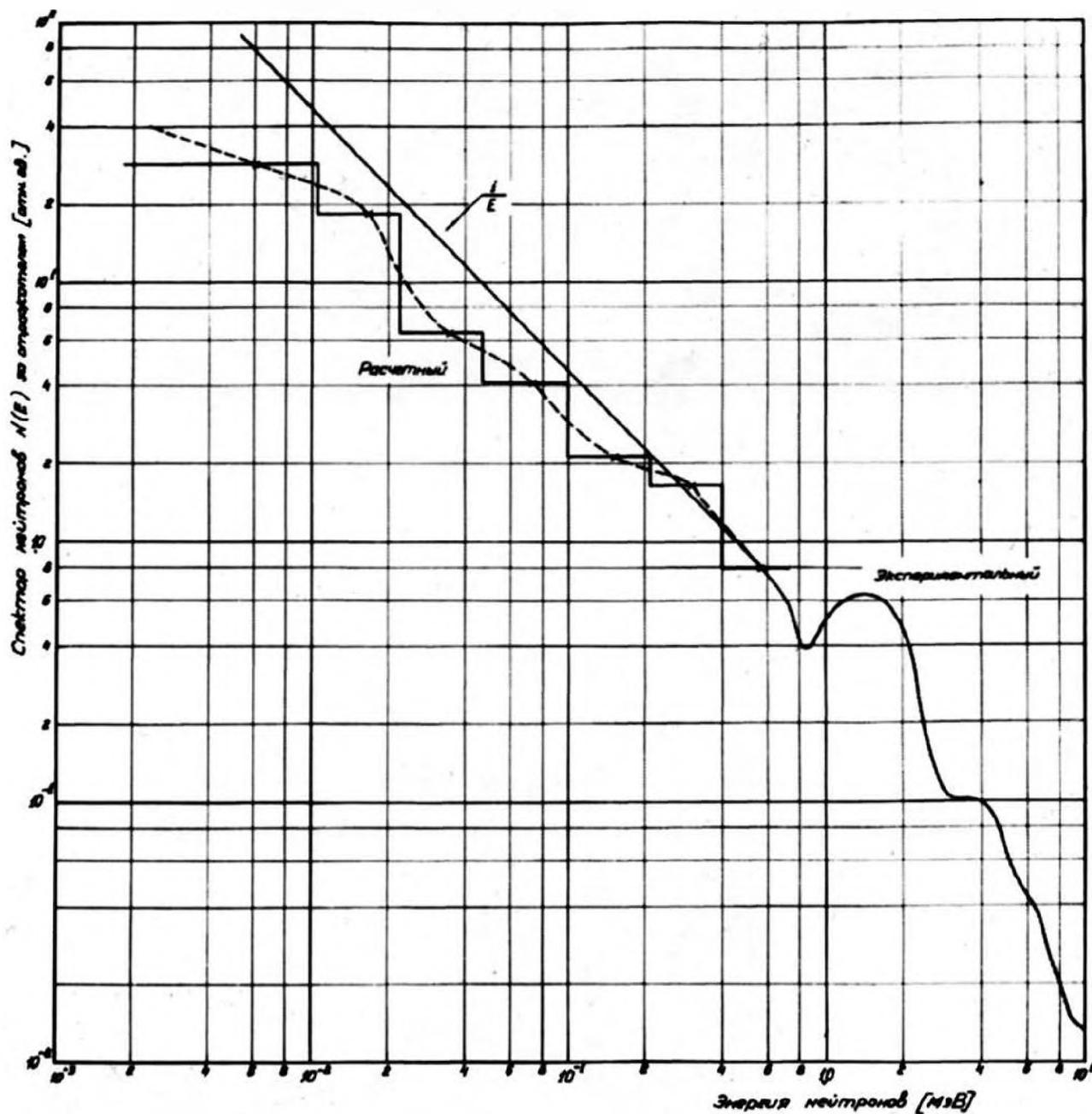
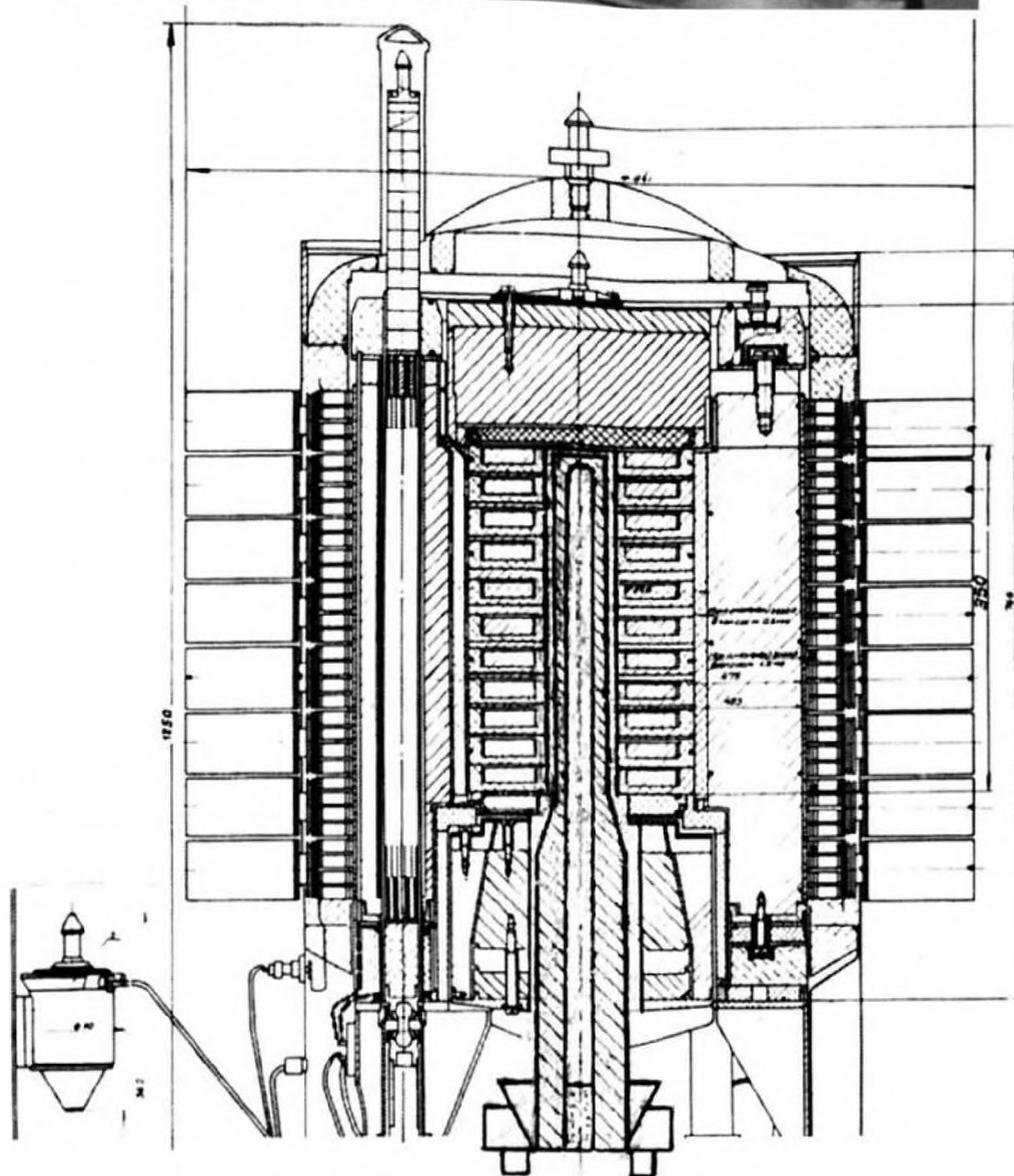
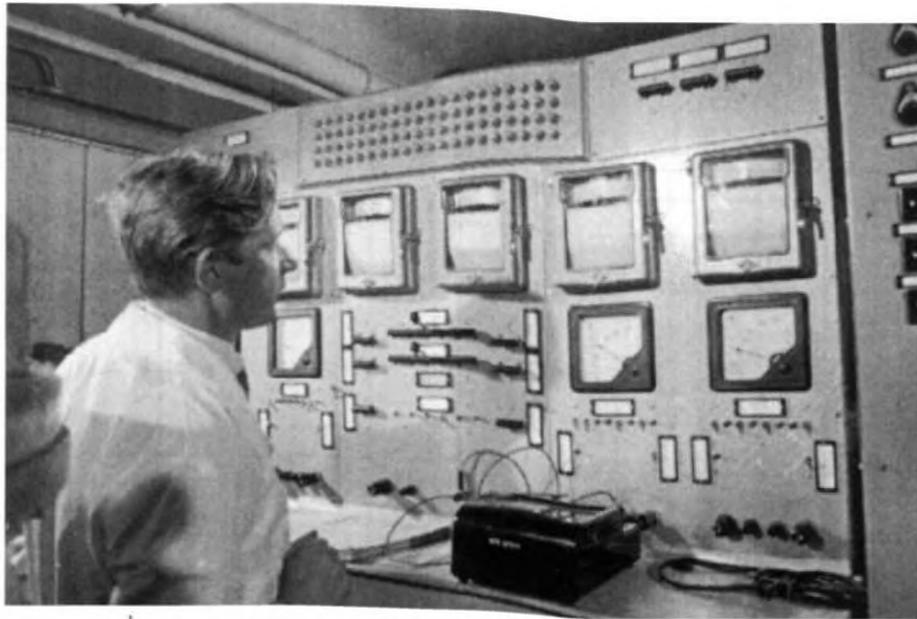
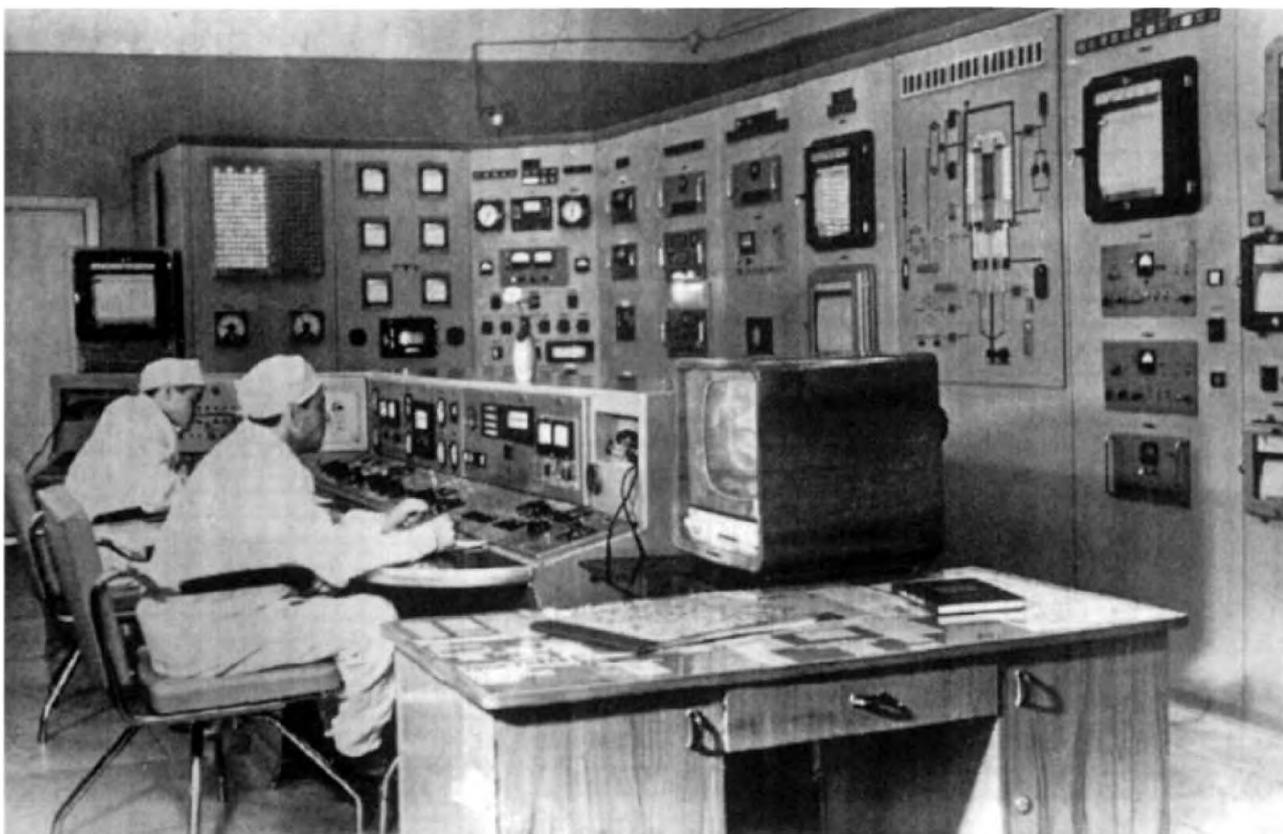


Рис. 1.20. Спектр нейтронов за отражателем реактора установки «Ромашка»

Проведенные исследования позволили изучить работоспособность элементов реактора-преобразователя и рекомендовать переход к ядерным энергетическим испытаниям на стенде «Р» (рис. 1.22).



*Рис. 1.21. Пультавая стенда ЛН и схема испытаний реактора-преобразователя «Ромашка» с электронагревом*



*Рис. 1.22. Общий вид пультовой комплекса «Р»*

#### **1.4. Основные результаты ядерных энергетических испытаний реактора-преобразователя «Ромашка» [6].**

Реактор-преобразователь «Ромашка» испытывался в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова с августа 1964 года по апрель 1966 года, то есть в течение около 15 000 ч. За это время реактор-преобразователь выработал ~6100 кВт·ч электроэнергии, показав высокую степень надежности и стабильности основных параметров. Характеристики реактора-преобразователя «Ромашка» представлены на рис. 1.23.

В 1969 году реактор-преобразователь демонтирован с целью анализа состояния его элементов после столь длительного ресурса работы.

В соответствии с программой экспериментов на реакторе-преобразователе был проведен большой комплекс исследований, позволявший изучить его физические и теплоэнергетические характеристики как на стационарных, так и нестационарных режимах работы. В процессе проводимых экспериментов осуществлялся непрерывный контроль температур в различных элементах



реактора-преобразователя и осуществлялся периодический замер характеристик термоэлектрического преобразователя.

В соответствии с программой исследований реактор-преобразователь работал в следующих режимах по теплоотводу:

- теплоотвод с холодильника-излучателя только за счет излучения при вакууме в испытательной камере  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст. (первые ~1200 ч);
- теплоотвод с холодильника-излучателя за счет излучения и дополнительно естественной конвекции гелия при давлении в камере 0,3–1,0 ата (последующие ~13 500 ч). Этот режим был обусловлен нарушением герметичности объема реактора-преобразователя из-за разрушения под действием нейтронного и гамма-излучения стеновых резиновых уплотнений.

На протяжении первых ~4000 ч. испытаний реактора-преобразователя производились периодическая компенсация изменений реактивности органами регулирования и поддержание тепловой мощности, соответствующей температуре внутренней поверхности радиального отражателя 1200 °С. Поддержание тепловой мощности осуществлялось вручную оператором без использования предусмотренной системы автоматического управления.

Следующий период с целью лучшего выявления изменений характеристик реактор-преобразователь работал в режиме саморегулирования при неподвижных органах регулирования, без какого-либо вмешательства со стороны оператора. Компенсация изменения реактивности была осуществлена при этом только после ~12 000 ч работы. В течение ~500 ч. проводились нестационарные испытания реактора-преобразователя.

На протяжении всех исследований реактор-преобразователь работал в режиме постоянной нагрузки. Некоторые замеры параметров проводились в «импульсном» режиме включения нагрузки после работы в режиме ЭДС.

В режиме сброса непреобразованного тепла с холодильника-излучателя реактор-преобразователь при указанных температурах обеспечивал получение в начале ресурса 460–475 Вт электрической мощности при постоянной оптимальной внешней нагрузке. Распределение температур по высоте показано на рис. 1.24.

К концу 1000-часовых испытаний реактора-преобразователя было замечено некоторое (на 8 %) увеличение внутреннего сопротивления преобразователя и незначительное возрастание коэффициента термо-

эДС преобразователя. В связи с этими изменениями электрическая мощность преобразователя уменьшилась на 5 %.

К концу ресурса работы реактора-преобразователя (после ~15 000 ч.) при номинальной мощности возрастание внутреннего сопротивления составило 1,52 раза, а возрастание коэффициента термоэдс составило 1,16 раза.

При этом электрическая мощность преобразователя уменьшилась до 0,80 от начальной. Изменение характеристик реактора-преобразователя со временем представлено на рис. 1.25, 1.26, 1.27.

Таким образом, испытания установки «Ромашка» показали, что термоэлектрический преобразователь на основе кремний-германиевого сплава теряет электрическую мощность до 20–25 % за ресурс 15 000 ч при дальнейшем конечном темпе падения электрической мощности ~5,5% в год. Потеря электрической мощности определяется в основном возрастанием внутреннего сопротивления преобразователя из-за диффузионных процессов, протекающих в коммутационных

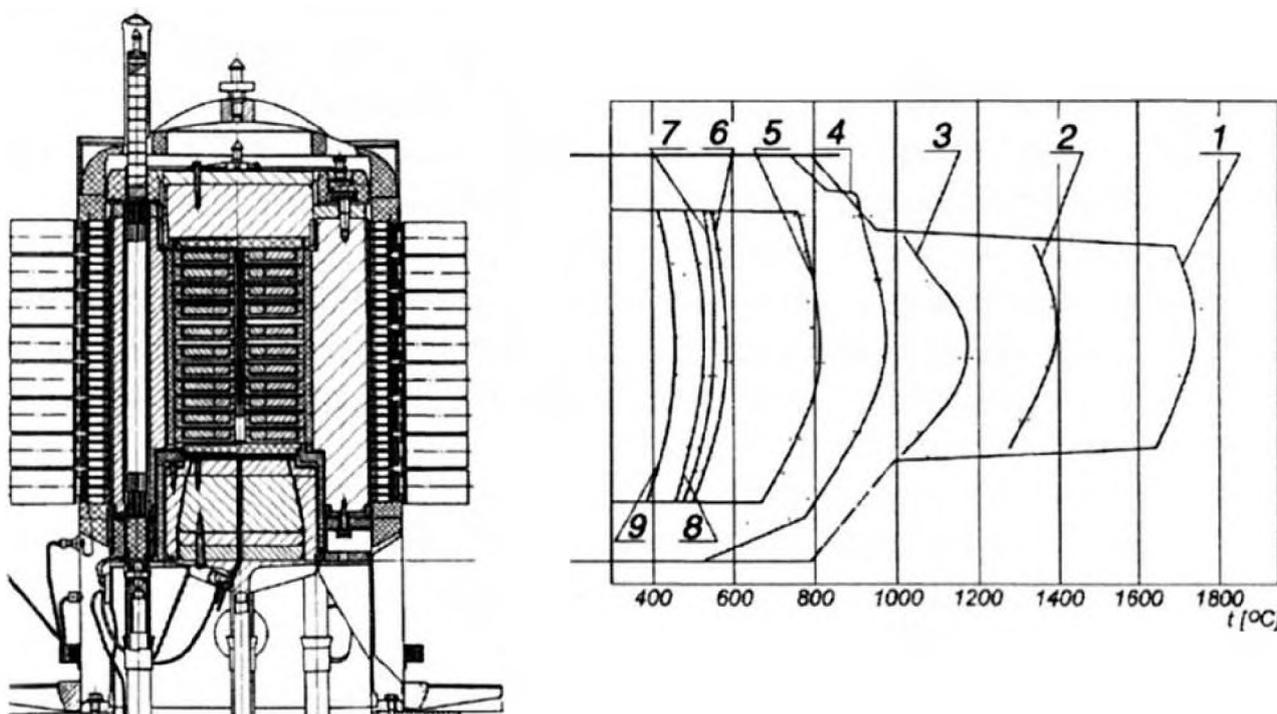


Рис. 1.24. Распределение температур по высоте реактора-преобразователя «Ромашка»

1 — температура центра (на оси реактора); 2 — температура края графитовых кассет активной зоны; 3/4 — температура внутренней/наружной поверхности радиального отражателя; 5/6 — температура горячих/холодных спаев преобразователя; 7/8/9 — температура основания/полки/конца ребер излучателя

переходах на границе графитовая шайба – кремний-германиевый сплав с образованием слоя карбида кремния, имеющего большое омическое сопротивление, и за счет влияния нейтронного излучения на характеристики кремний-германиевого сплава.

За время ресурса работы реактора-преобразователя (за первые ~12 000 ч.) было замечено падение реактивности 0,6 %, что компенсировалось органами регулирования.

Данное изменение реактивности можно объяснить главным образом небольшими изменениями геометрии активной зоны вследствие деформации тепловыделяющих элементов и отражателя.

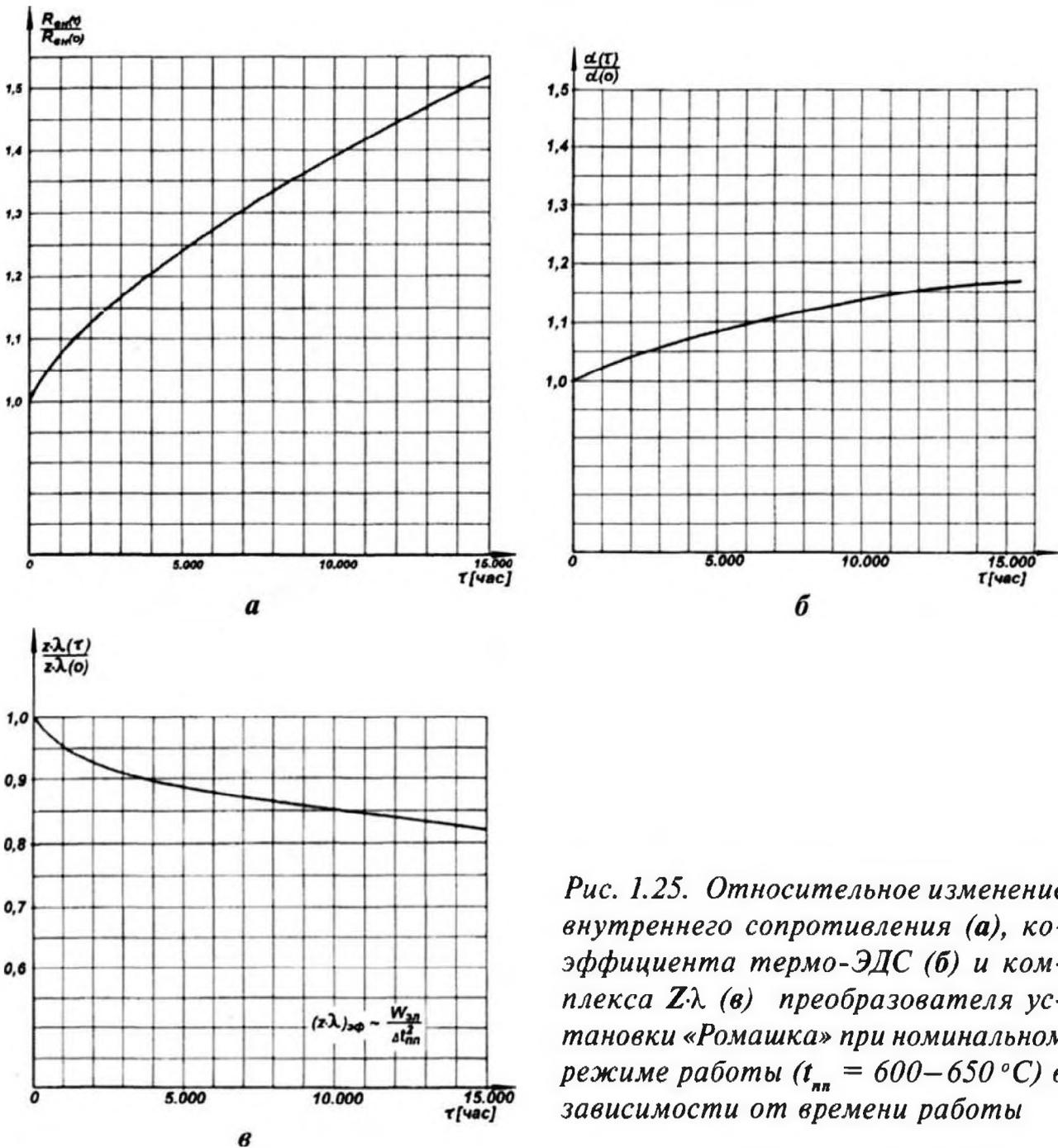


Рис. 1.25. Относительное изменение внутреннего сопротивления (а), коэффициента термо-ЭДС (б) и комплекса  $Z\lambda$  (в) преобразователя установки «Ромашка» при номинальном режиме работы ( $t_{\text{пн}} = 600-650^\circ\text{C}$ ) в зависимости от времени работы

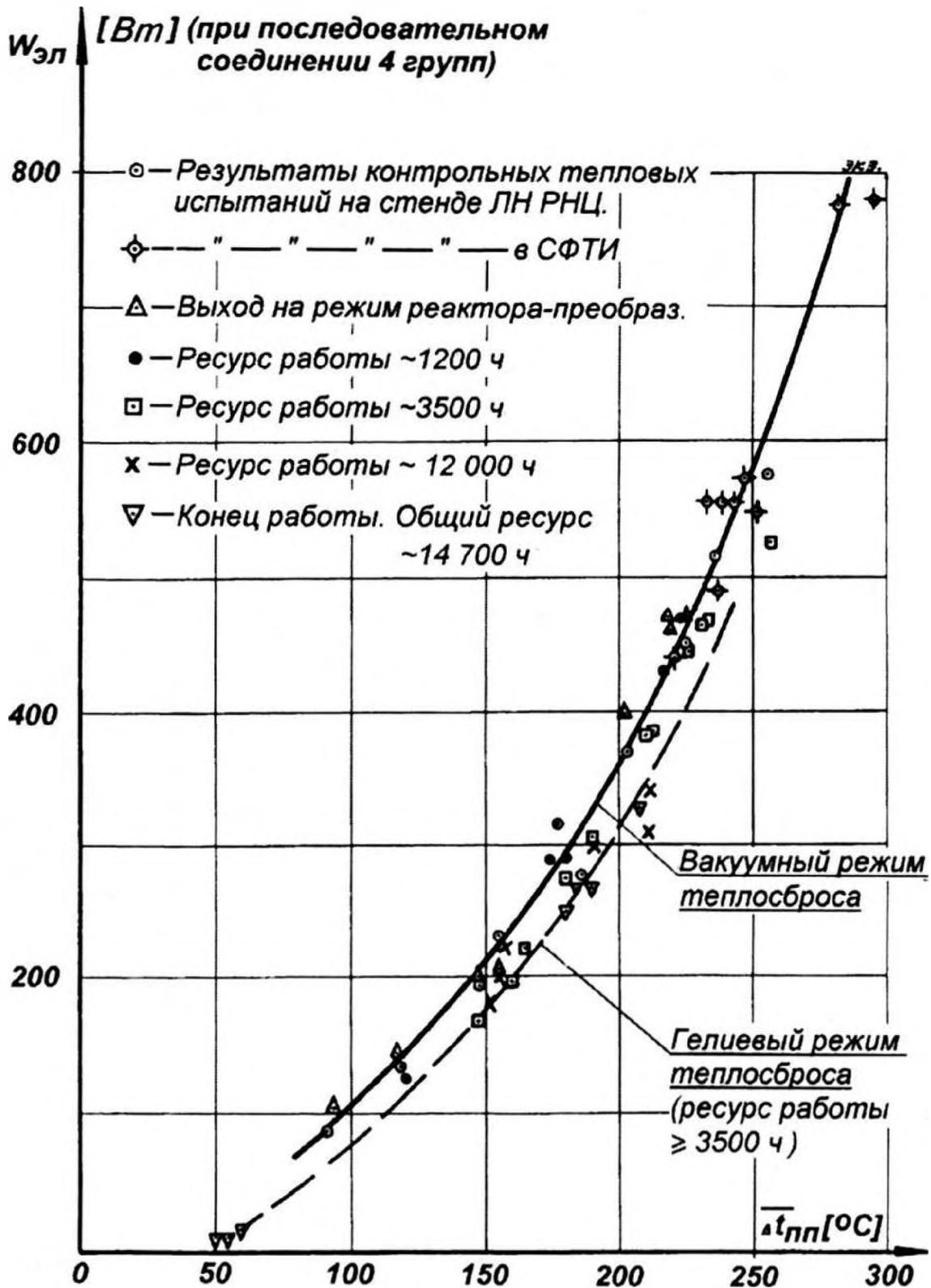


Рис. 1.26. Зависимость электрической мощности преобразователя установки «Ромашка» от среднего перепада температур на термоэлементах для различного ресурса работы

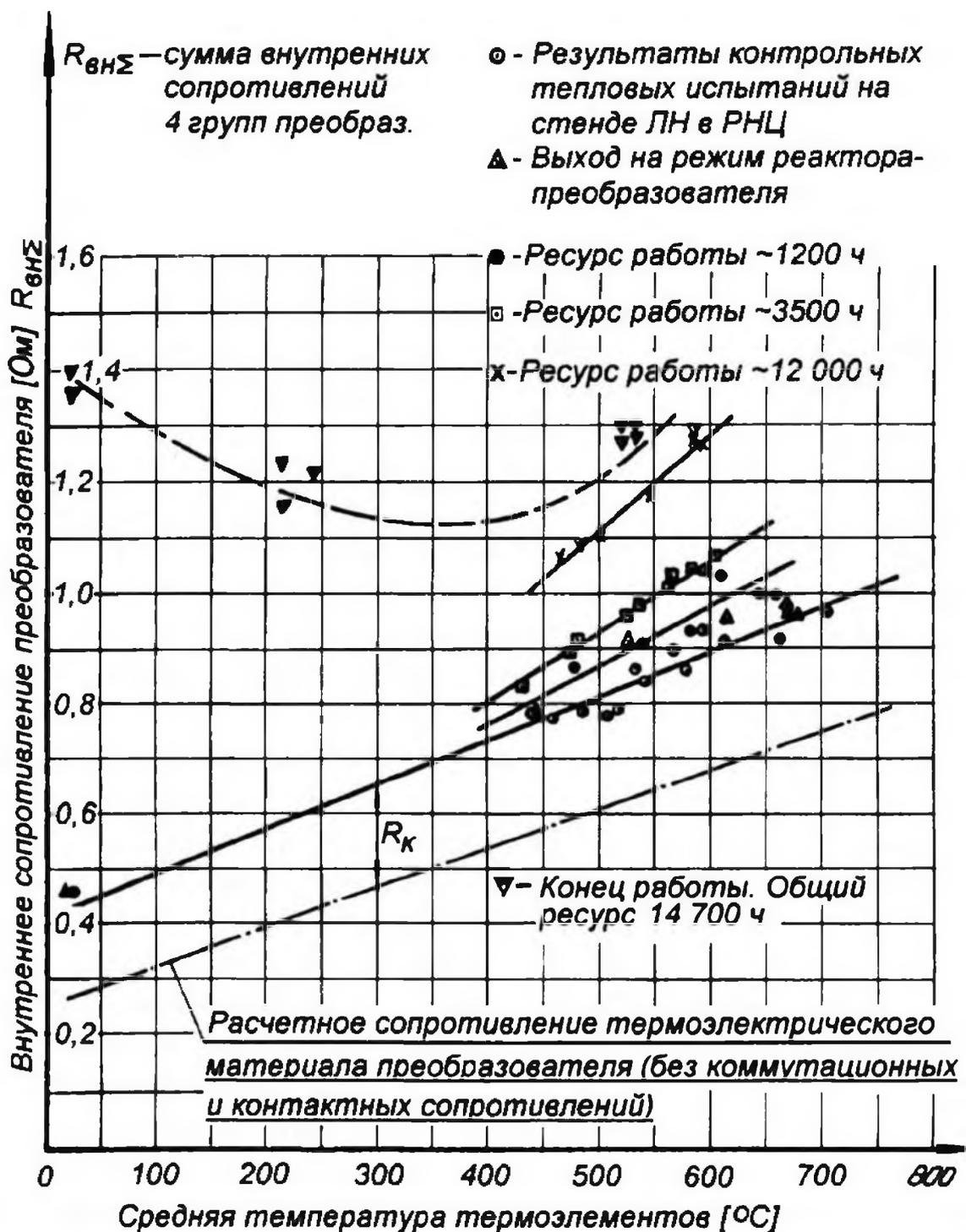


Рис. 1.27. Зависимость внутреннего сопротивления термоэлектрического преобразователя установки «Ромашка» от средней температуры термоэлементов для различного ресурса работы

Реактор-преобразователь обладает общим отрицательным температурным эффектом – 2,7% при изменении температуры внутренней поверхности бериллиевого отражателя от 20 до 1200 °С.

В течение всего ресурса работы (~15 000 ч) не было отмечено каких-либо случайных внутренних возмущений. Отмечены только систематические ресурсные изменения параметров. Опыт эксплуатации реактора-преобразователя «Ромашка» и проведенные исследования показывают, что система устойчива. Часть ресурса реактор отработал без системы автоматического управления в режиме саморегулирования. Отсутствие случайных возмущений и устойчивость реактора-преобразователя позволяют отказаться от системы автоматического регулирования и на других подобных объектах.

Небольшие ресурсные изменения реактивности можно компенсировать редкими (один раз в 100–200 ч) периодическими перемещениями органов регулирования.

Реактор-преобразователь может работать длительное время вообще без участия оператора, что является особенно ценным качеством в случае использования его в качестве автономного источника энергии.

На рис. 1.23 видно, что в режиме саморегулирования в течение 0,5 года непрерывной работы реактор-преобразователь уменьшил выдаваемую электрическую мощность на ~100 Вт (с ~460 до ~360 Вт), то есть на 28%.

После разделки преобразователя установки «Ромашка» и его выдержки (для спада активности) были отобраны образцы термоэлементов *p*- и *n*-типа проводимости с графитовой коммутацией по горячей и холодной стороне. Проведены их исследования на специально созданных установках с целью определения влияния облучения и температурного отжига на изменение параметров (электропроводности  $\sigma$ , коэффициента термоЭДС  $\alpha$  и омического сопротивления материала *p*- и *n*-типа проводимости и контактов в системе C–SiGe–C).

Результаты исследований суммированы в работе [7]. Некоторые наиболее характерные результаты исследований омического сопротивления термоэлементов представлены на рис. 1.28 и 1.29.

На основании результатов исследований ресурсных характеристик реактора-преобразователя «Ромашка» с термоэлектрическим кремний–германиевым преобразователем, проведенных в РИЦ «Курчатовский институт» в течение ~15 000 ч и исследований на тепловом стенде параметров термоэлектрического материала и кон-

тактных сопротивлений преобразователя после разделки, делаются следующие выводы.

1. Термоэлектрический преобразователь установки «Ромашка», выполненный на основе разработанного в СФТИ кремний-германиевого сплава Si–Ge (с 15% вес. Ge) с контактными переходами из графита по горячей и холодной сторонам, в процессе эксплуатации меняет свои характеристики. Изменения обусловлены:

- возрастанием внутреннего сопротивления преобразователя до 1,5 раза за ресурс ~15 000 часов;
- увеличением коэффициента термоэдс в 1,17 раза;
- падением значений комплекса  $(Z \times \lambda)_{эф}$  в ~0,82 раза.

Изменение указанных характеристик приводит к падению электрической мощности преобразователя (при фиксированном среднем перепаде температур на термоэлементах) до 25%.

2. Измерение суммарного внутреннего сопротивления термоэлектрического преобразователя в начале и конце ресурса показывает качественное изменение хода зависимости  $R_{вн\Sigma}$  от средней температуры термоэлементов (см. рис. 1.27). В начале ресурса  $R_{вн\Sigma}$  монотонно возрастает с повышением температуры (от 0,45 Ом при температуре 20 °С до 1,0 Ом при температуре 730 °С, т.е.  $\sim 0,775 \times 10^{-3}$  Ом/град, а в конце ресурса (после 14 700 ч) внутреннее сопротивление при температуре 20 °С  $R_{вн} = 1,4$  Ом практически сравнивается с внутренним сопротивлением преобразователя при рабочей температуре ~600 °С.

В рабочей области температур преобразователя 400–700 °С наблюдается постепенное возрастание внутреннего сопротивления в зависимости от времени работы и возрастание темпа роста внутреннего сопротивления в зависимости от температуры (от  $0,775 \times 10^{-3}$  в начале ресурса до  $1,76 \times 10^{-3}$  Ом/град после 12 000 ч работы).

Изменение характера зависимости внутреннего сопротивления от средней температуры в начале и конце ресурса может быть обусловлено двумя факторами:

- диффузионными процессами на контакте между кремний-германиевым сплавом и графитовой коммутацией по горячей и холодной сторонам и образованием слоев карбида кремния, который имеет падающую от температуры зависимость электросопротивления;
- возможным расслоением в месте спаев горячей и холодной сторон и возрастанием вследствие этого сопротивления. Этому

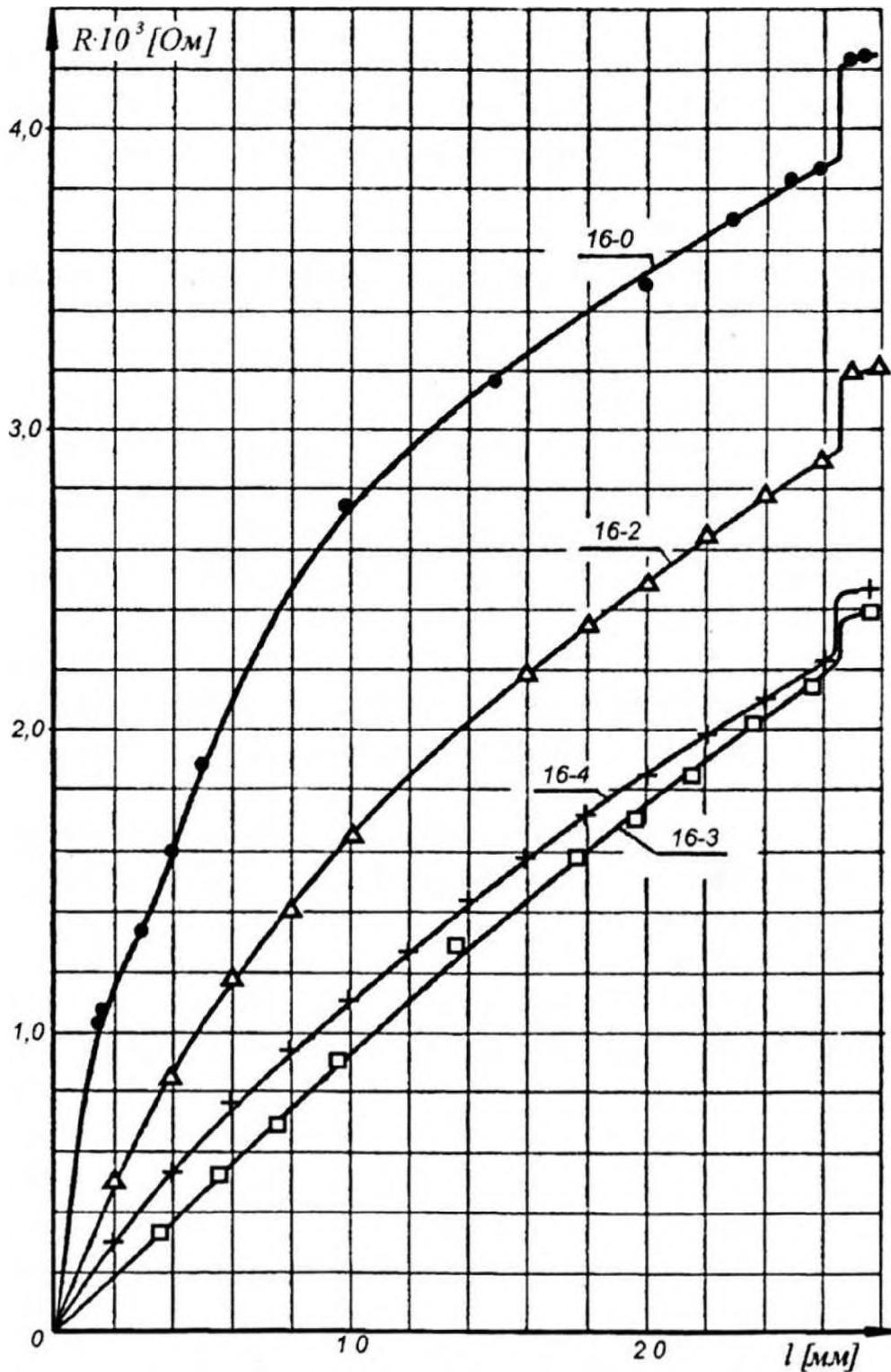


Рис. 1.28. Изменение омического сопротивления облученных Si-Ge-образцов р-типа № 16 с графитовой коммутацией по торцам до и после температурного и временного отжига в зависимости от расстояния между зондами:

• — до отжига;  $\Delta$  — отжиг при  $t = 600^\circ\text{C}$  30 ч, при  $t = 750^\circ\text{C}$  24 ч, при  $t = 900^\circ\text{C}$  4 ч, при  $t = 950^\circ\text{C}$  4 ч;  $\square$  — отжиг при  $t = 750^\circ\text{C}$  24 ч, при  $t = 900^\circ\text{C}$  4 ч, при  $t = 950^\circ\text{C}$  3 ч, при  $t = 1000^\circ\text{C}$  3 ч; + — отжиг при  $t = 900^\circ\text{C}$  4 ч, при  $t = 950^\circ\text{C}$  3 ч, при  $t = 1000^\circ\text{C}$  3 ч

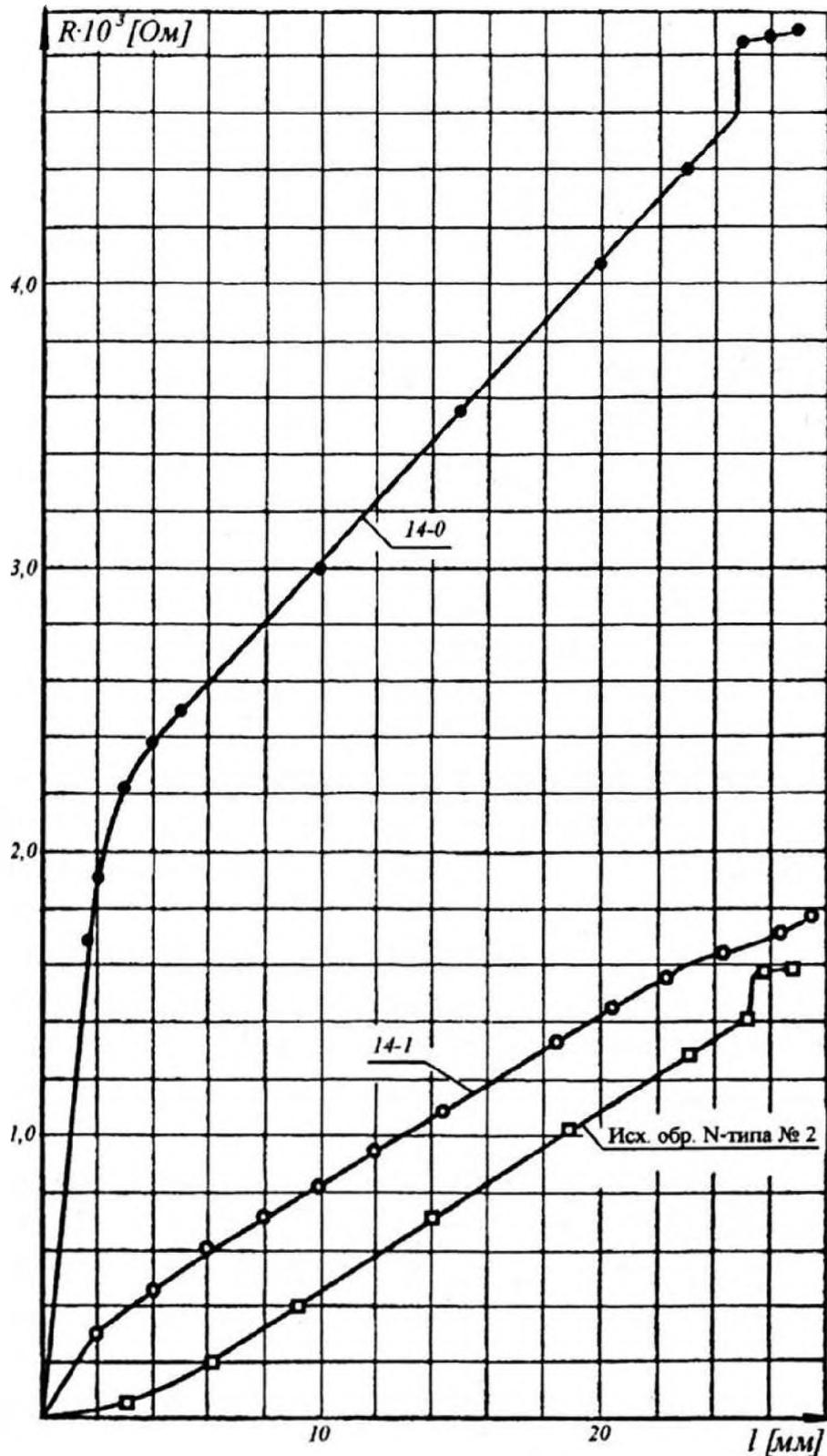


Рис. 1.29. Изменение омического сопротивления облученных Si-Ge-образцов п-типа № 14 с графитовой коммутацией по торцам до и после температурного и временного отжига в зависимости от расстояния между зондами:  
 • — образец до температурного отжига; ● — образец, прошедший температурный отжиг при  $t_{max} = 900$  °С

фактору может способствовать уменьшение силы поджатия термоэлементов при пониженной температуре за счет уменьшения давления в сильфоновых коробках, заполненных газом.

3. Основными причинами изменения характеристик термоэлектрического преобразователя на основе кремний-германиевого сплава (возрастание сопротивления, некоторое увеличение коэффициента термоэдс и падение электрической мощности) являются следующие физические факторы:

- изменение параметров кремний-германиевого сплава под действием нейтронного и гамма-излучения реактора;
- изменение параметров сплава в зависимости от времени работы при повышенных температурах.

Оба эти фактора приводят к изменению физических характеристик сплава в одном и том же направлении (к возрастанию омического сопротивления, увеличению коэффициента термоэдс и к уменьшению коэффициента добротности сплава).

Основными выводами проведенных исследований влияния реакторного облучения и отжига на изменение параметров (электропроводности, коэффициента термоЭДС и омического сопротивления контактов С-SiGe-С) штатных термоэлементов установки «Ромашка» являются следующие:

3.1. У термоэлементов с *p*- и *n*-проводимостью после радиационного облучения повышается величина контактного электросопротивления коммутации, что особенно заметно на горячей стороне. Отжиг при высоких температурах снижает контактное электросопротивление коммутации термоэлементов, образовавшихся в процессе облучения.

3.2. В результате температурного и временного отжига радиационных дефектов восстанавливаются свойства SiGe-сплава:

- электропроводность возрастает до 85–105% от номинала;
- коэффициент термоЭДС уменьшается до номинального значения.

Максимальный отжиг радиационных дефектов в Si-Ge-сплаве наблюдается:

- в термоэлементах с *n*-типом проводимости при  $t = 750$  °С, с длительностью отжига  $\tau = 3$  ч;
- в термоэлементах с *p*-типом проводимости при  $t = 950$  °С с длительностью отжига  $\tau = 3$  ч.

Высокотемпературный отжиг (без облучения) также значительно

влияет на параметры термоэлектрического материала и приводит к уменьшению добротности сплава *n*-типа за время испытаний ~15 000 ч на 7% и уменьшению добротности сплава *p*-типа на 9%. При этом  $\rho_n$  возрастает на 30% , а  $\alpha_n$  на 8%.

При дальнейших разработках кремний-германиевых термоэлектрических преобразователей, работающих в области высоких температур (от 300 до 1 000 °С для *n*-типа и от 500 до 1000 °С для *p*-типа), следует учитывать временное падение в процессе работы добротности и возрастание электрического сопротивления и коэффициента термоэдс, а также влияние реакторного излучения на характеристики сплава и контактные сопротивления переходов по горячей и холодной сторонам термоэлементов. Устранение этих эффектов возможно при введении режима отжига при температуре до 950 °С и времени до 3 ч.

Влияние второго фактора (изменение параметров сплава от времени работы при отжиге при повышенных температурах) было также исследовано американскими специалистами при разработке кремний-германиевого сплава (Si–Ge с 42% вес. Ge) для изотопных генераторов для космоса при ресурсах до 12 лет.

Анализ состояния элементов реактора после демонтажа подтвердил вывод о надежности конструкции системы, показал, что в данной системе существуют большие запасы и полученные параметры не являются предельными.

В целом полученные результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы:

- конструкция статической ядерно-энергетической установки на основе высокотемпературного реактора-преобразователя с кремний-германиевым термоэлементом обладает высокой надежностью;
- экспериментально подтверждена длительная (до ~15 000 ч) работоспособность реактора-преобразователя при изменении выходных параметров (электрической мощности) не более, чем на 25 %;
- экспериментально подтверждена длительная работа высокотемпературного реактора с твэлами из дикарбида урана при максимальной температуре ~1900 °С и бериллиевым отражателем при максимальной температуре до ~1200 °С при флюенсах до  $\sim 5 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>.

Результаты испытаний позволили наметить возможные пути улучшения параметров подобной системы, реализация которых позволит форсировать электрическую мощность до  $\sim 1000$  Вт или сократить вес системы до  $\sim 200$  кг при соответствующем сокращении электрической мощности до  $\sim 200$  Вт. Это возможно за счет сокращения термических сопротивлений по горячей стороне (от бериллиевого отражателя до горячего спае преобразователя), использования тепловых труб в холодильнике-излучателе, исключения графитовой коммутации на горячем и холодном спае кремний-германиевых элементов и использования более эффективного кремний-германиевого сплава с 55%-ным содержанием германия.

Дальнейшее более существенное улучшение энергетических характеристик подобной системы может быть получено при использовании вместо термоэлектрического преобразователя энергии преобразователя на основе плоских модульных термоэмиссионных элементов, располагаемых в радиальном бериллиевом отражателе (рис. 1.30).

Проект такого варианта реактора-преобразователя был разработан в ИАЭ им. И.В. Курчатова совместно с ОКБ «Заря» и предложен американскими специалистами в докладе на 4-й конференции по преобразованию энергии в Вашингтоне в 1969 году [8]. Установка подобного типа представляет собой дальнейшее развитие статической ядерно-энергетической системы типа «Ромашка». Нагрев катодов термоэмиссионных элементов в этой установке осуществляется непосредственно излучением активной зоны реактора. Электрическая мощность такой установки может составлять 3–5 кВт.

Ядерно-энергетические установки на основе реактора-преобразователя «Ромашка» с термоэлектрической или термоэмиссионной системой преобразования в силу целого ряда привлекательных особенностей, а именно:

- максимальной компактности;
- малого веса;
- высокой ресурсоспособности ( $\geq 1$  года);
- полной статичности работы и отсутствия контуров с жидкотеплоносителем;
- саморегулируемости энергоустановки, обусловленной отрицательным температурным коэффициентом реактивности;
- возможности предварительного испытания установки в целом с электронагревом непосредственно перед загрузкой активной зоны;

могут успешно использоваться для решения некоторых специальных задач (научные станции на Луне, Марсе, Венере) в качестве альтернативы изотопным генераторам.

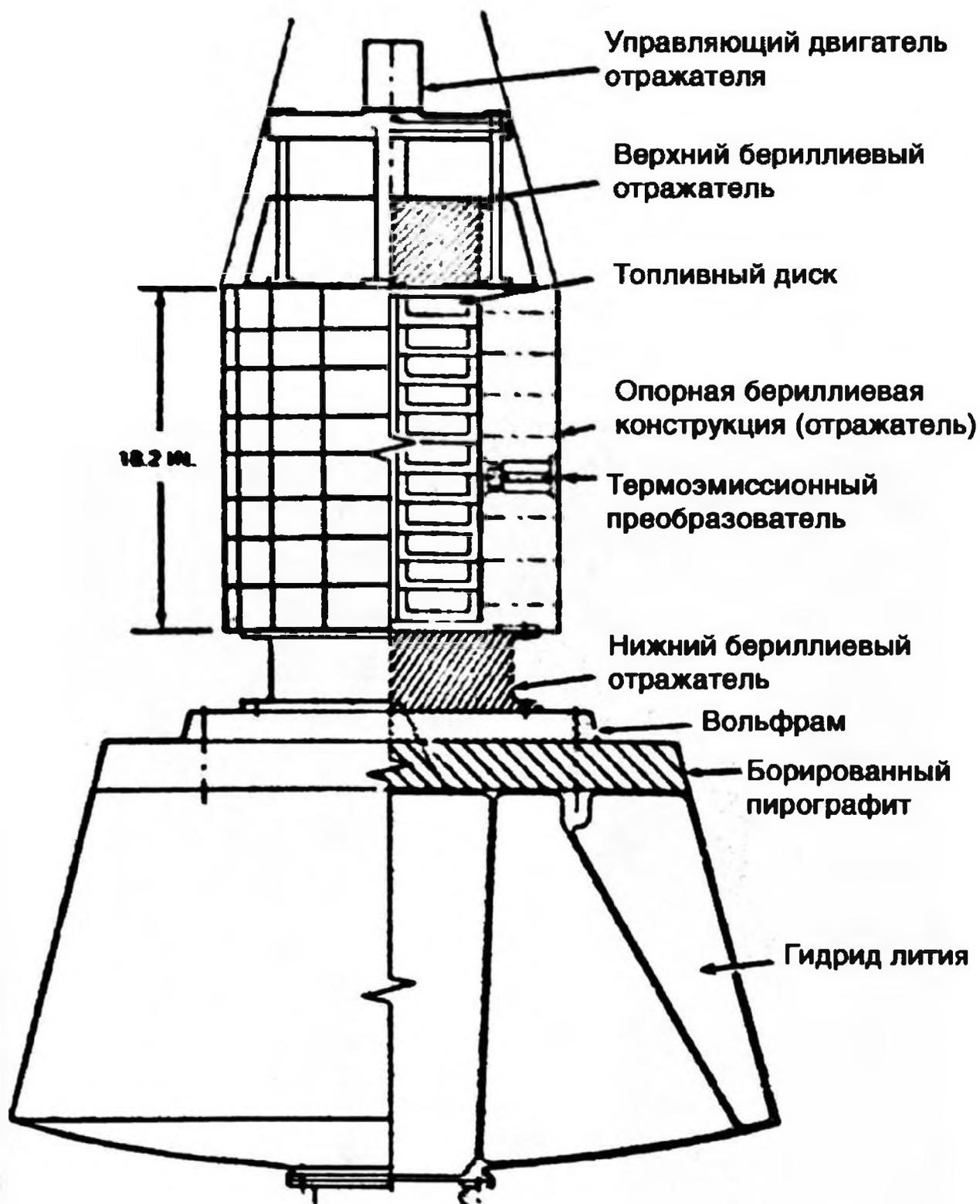


Рис. 1.30. Общий вид термоэмиссионного реактора на базе установки «Ромашка»

### 1.5. Варианты использования и развития по мощности реактора-преобразователя «Ромашка»

Создание и успешные испытания первого в мире реактора-преобразователя «Ромашка» вызвали большой интерес как в научных кругах, так и у главных конструкторов, разрабатывающих космическую технику и другие автономные объекты. На этапе создания установки «Ромашка» большую заинтересованность в использовании разрабатываемых технологий высокотемпературных реакторных систем с термоэлектрическими и термоэмиссионными преобразователями в космической технике проявляли С.П. Королев, М.В. Келдыш, В.Н. Челомей, А.М. Люлька, Г.М. Грязнов, В.И. Сербин, космонавты Ю.А. Гагарин, Г.С. Титов, А.Н. Николаев (рис. 1.31) и многие другие.



*Рис. 1.31. Знакомство космонавтов с «Ромашкой»*

С.П. Королев первым предложил запустить в космос реактор-преобразователь «Ромашка», предупредив при этом разработчиков, что он будет их «топтать» для ускорения работ. Преждевременная смерть С.П. Королева не позволила реализовать его планы, но совместные работы ИАЭ им. И.В. Курчатова и ОКБ-1 по инициативе М.В. Мельникова и Б.Е. Чертока продолжались при выполнении работ по лунной программе. По выданному ОКБ-1 техническому заданию предусматривалось использовать реактор-преобразователь «Ромашка» для энергоснабжения лунной станции в качестве альтернативы разрабатываемым в то время электрохимическим и изотопным генераторам. Для уменьшения воздействия нейтронного и гамма-излучения реактора на персонал и оборудование лунной станции планировалось разместить реактор-преобразователь в естественном лунном кратере или в специально подготовленной воронке. Взрыв ракеты-носителя Н-1 на стартовой площадке перечеркнул планы по лунной программе и, соответственно, планы использования реактора-преобразователя на Луне. Перспектива развития реактора-преобразователя «Ромашка» (для лунной программы) представлена на рис. 1.32.

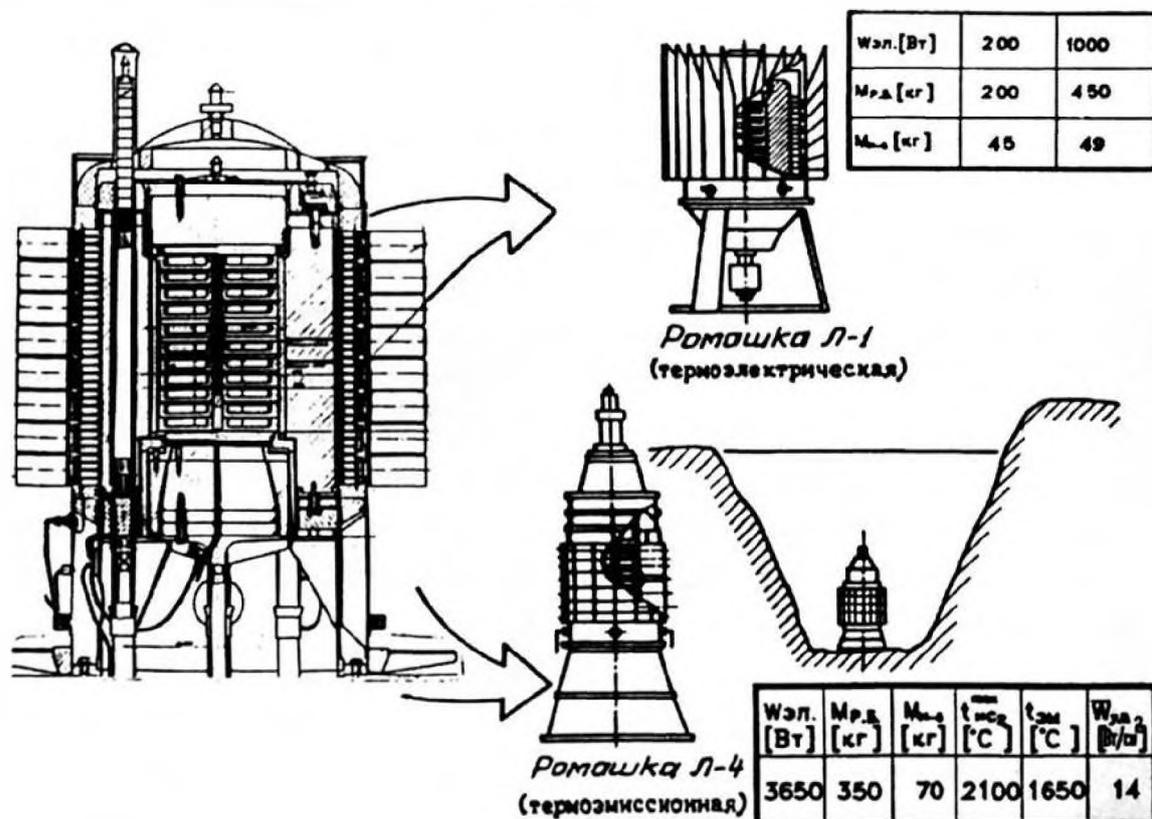


Рис. 1.32. Перспективы развития реактора-преобразователя «Ромашка» (для планетных исследований)

Применительно к разрабатываемому в ОКБ-52 (В.Н. Челомей) космическому аппарату УС-А в 1963 году в кооперации с ОКБ-165 (А.М. Люлька) на этапе предэскизного проекта была разработана вторая (наряду с разрабатывавшейся в ОКБ-670 (М.М. Бондарюк) установкой «БУК») космическая термоэлектрическая установка с кремний-германиевыми преобразователями, совмещенными с активной зоной, с охлаждением холодных спаев Na–K теплоносителем электрической мощностью 5,0 кВт. Однако ввиду отсутствия в то время данных о влиянии излучения реактора на характеристики кремний-германиевого сплава дальнейшее развитие получила установка «БУК» с вынесенным за защиту двухкаскадным (Si–Ge и PbTe) термоэлектрическим преобразователем. Установка «БУК» была доведена коллективом НПО «Красная Звезда» (Г.М. Грязнов) до серийной эксплуатации и в мае 1975 года принята на вооружение в составе КА УС-А [4] (рис. 1.33).

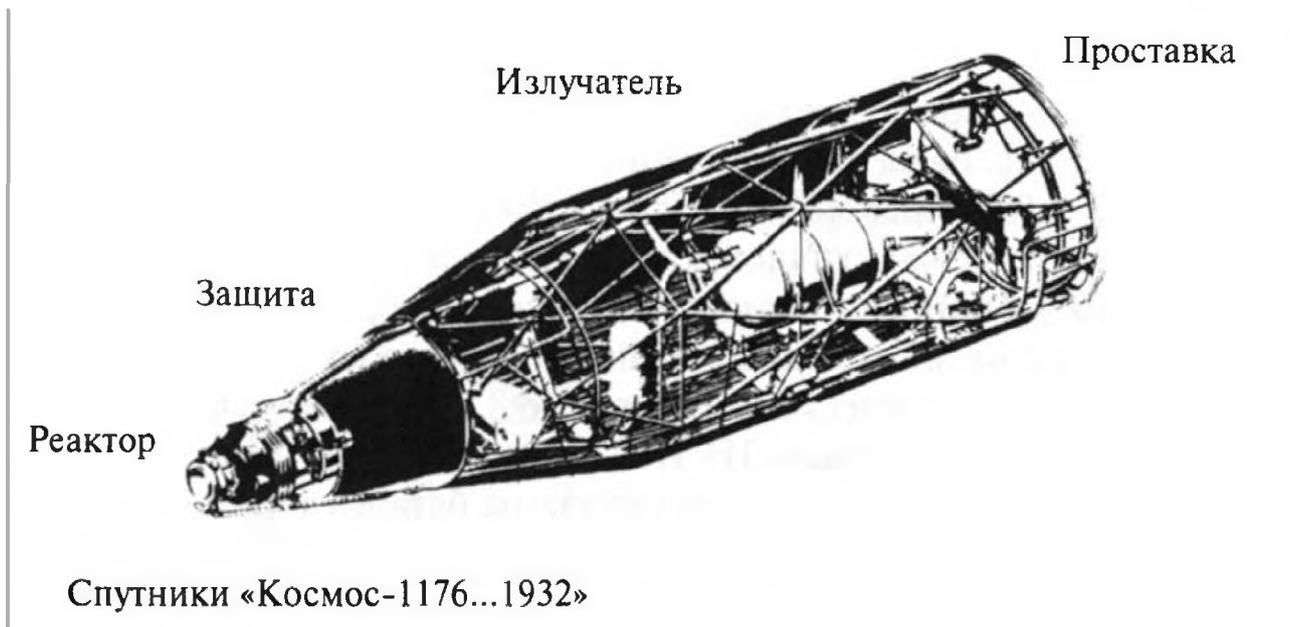
Накопленный к тому времени опыт отработки высокотемпературного кремний-германиевого преобразователя для установки «Ромашка» был использован СФТИ в работах по верхнему каскаду преобразователя КЯЭУ «БУК». Конструктивная схема российских термоэлектрических установок «Ромашка» и «БУК» и их основные параметры представлены на рис. 1.34.

После публикации работ по реактору-преобразователю «Ромашка» [5, 6] ряд фирм США (General Atomic, Thermionics Rasor Assoc, Thermo-electron Co, Douglas Hanford и Lockheed) при поддержке ERDA и AF начали проектное изучение и обзор по термоэмиссионной установке «Ромашка», получившей название STAR-C.

В 1972–1982 годах по данным работы [2] в США действовала технологическая программа поддержки исследований установок низкого уровня мощности, в том числе термоэмиссионной установки «Ромашка», а в 1987 году при поддержке Аэрофорс (AF) фирмами Lockheed и General Atomics были выполнены обзор и проектная стадия работ по установке «STAR-C».

Большой интерес к использованию систем с термоэлектрическими преобразователями типа «Ромашка» в свое время проявили разработчики автономных установок для морских задач.

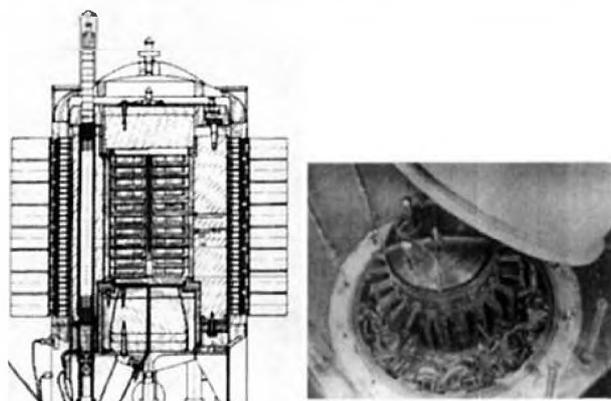
По техническому заданию моряков в ИАЭ им. И.В. Курчатова совместно с ЦКБМ была разработана на этапе техно-рабочего проекта ядерная термоэлектрическая установка электрической мощностью



Мощность электрическая, кВт	3
Мощность тепловая, кВт	100
Загрузка урана-235, кг	30
Масса, кг	930

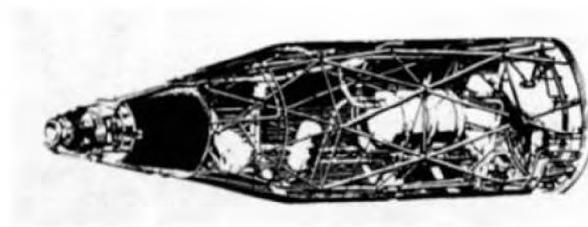
Рис. 1.33. Конструктивная схема космической ядерной термоэлектрической установки «БУК», разработанная ГП «Красная Звезда» и ГНЦ РФ – ФЭИ

**Реактор-преобразователь «Ромашка»**



Мощность электрическая, кВт	0,5
Мощность тепловая, кВт	28
Загрузка урана-235, кг	49
Масса, кг	450
Подтвержденный ресурс, ч	15 000

**Космическая ядерная энергетическая установка «БУК»**



Разработка ГП «Красная Звезда»

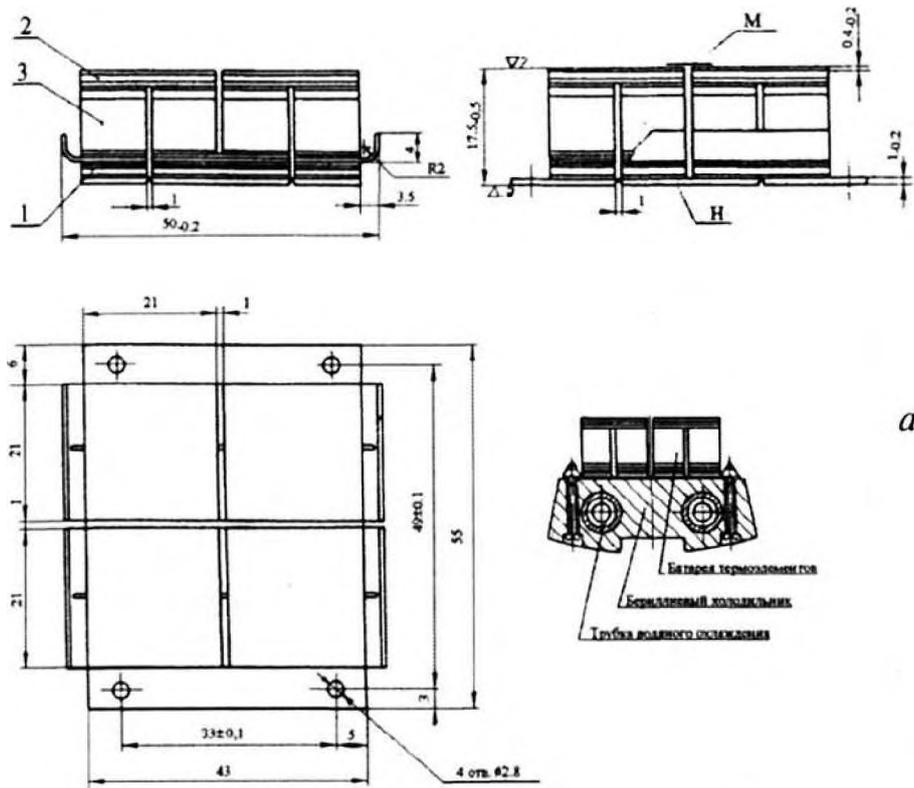
Мощность электрическая, кВт	3,0
Мощность тепловая, кВт	100
Загрузка урана-235, кг	30
Масса, кг	930
Подтвержденный ресурс, ч	4400

Рис. 1.34. Российские космические ядерные энергетические установки первого поколения с термоэлектрическими преобразователями энергии

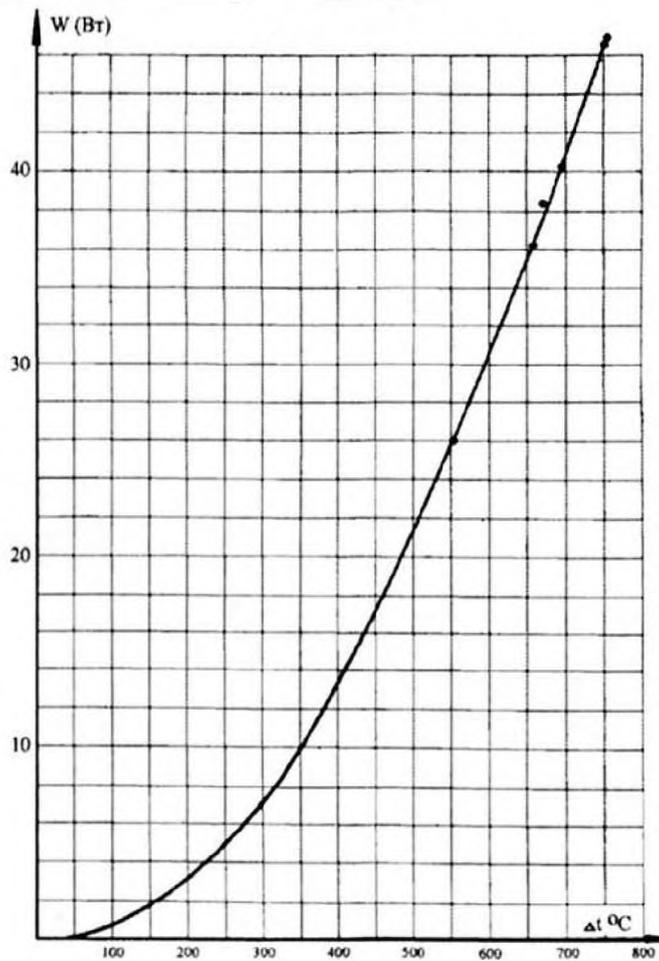
10 кВт с охлаждением холодных спаев водой. Для повышения температурного перепада на кремний-германиевых термоэлементах и повышения КПД, преобразователь в этой установке размещался на боковой поверхности активной зоны в зазоре между зоной и боковым отражателем. Общий вид тепловой модели реактора-преобразователя с водоохлаждаемыми холодными спаями термоэлектрического преобразователя, электрической мощностью 8,7 кВт (эл), испытанной с электронагревом на стенде ЛН Института атомной энергии, представлен на рис. 1.35. На рис. 1.36 показаны батарея термоэлементов этой установки и крепление ее на водоохлаждаемом холодильнике и приводится мощность термобатареи этой установки при различном перепаде температур.



*Рис. 1.35. Общий вид реактора-преобразователя (изделие 185) с водоохлаждаемым холодным спаем термоэлектрического преобразователя ( $N_{эл} = 8,7$  кВт) на стенде ЛН*



a



б

Рис. 1.36. Батарея термоэлементов и крепление её на холодильнике для установки с водоохлаждаемыми холодными спаями (а) и её мощность в режиме оптимальной нагрузки при различном перепаде температур (б)

При использовании в этой установке улучшенного кремний-германиевого сплава с 55% вес. германия (рис. 1.37) можно было рассчитывать на получение 10 кВт полезной электрической мощности при общем КПД ~5,0%.

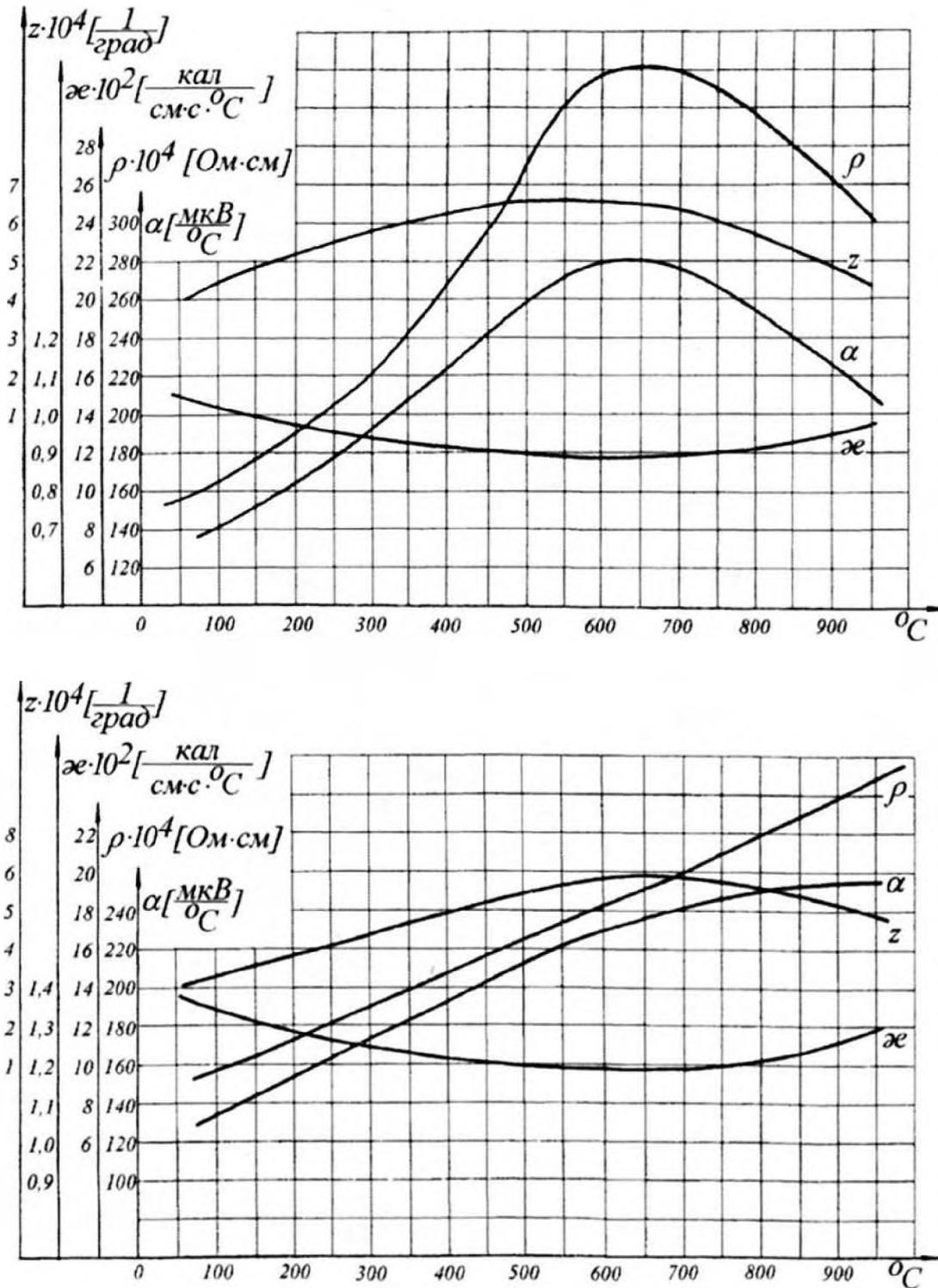


Рис. 1.37. Термоэлектрические характеристики кремний-германиевого материала с 55% весовых германия n- и p-проводимости

При разработке установки большой комплекс исследований был проведен по влиянию излучения реактора на характеристики кремний-германиевого сплава. Поскольку часть батареи в этой установке работает при более низких температурах, чем в установке «Ромашка», в них идет накопление дефектов из-за более медленного их отжига. Исследования показали влияние нейтронного излучения на электропроводность и коэффициент термоэдс термоэлектрического Si–Ge-материала, что приводило со временем к возрастанию электросопротивления и повышению ЭДС преобразователя и в итоге к снижению КПД. Для устранения этих эффектов были разработаны мероприятия по периодическому (через ~200 ч работы) отжигу преобразователя и при работе установки на мощности за счет введения вакуумного режима и повышения при этом термического сопротивления по холодной стороне термобатарей и, соответственно, повышения температуры холодных спаев. Разработка объекта, использующего данную установку, показала недостаточность заданного техническим заданием уровня электрической мощности, и дальнейшая разработка установки была прекращена на этапе технорабочего проекта. Изложенные варианты использования и развития по мощности реактора-преобразователя «Ромашка» по тем или иным причинам не были реализованы в космических программах и в автономных системах, но создание и успешные испытания первого в мире реактора-преобразователя были высоко оценены научной общественностью и явились свидетельством успехов в области высокотемпературных реакторов с прямым преобразованием энергии.

## **1.6. Они создали «Ромашку»**

Около 3 лет прошло от первых исследований по определению возможного облика установки «Ромашка» до пуска и начала ядерных энергетических испытаний на стенде «Р». Дополнительно еще около 2 лет заняли непрерывные ресурсные испытания.

В этот интервал вошли работы коллектива сектора № 6 — одного из первых секторов, созданных И.В. Курчатовым при организации Лаборатории № 2 (начальник сектора В.И. Меркин (рис. 1.38)), и других подразделений Института атомной энергии (опытного производства, реактора РФТ, отделов вычислительной техники, капитального строительства, снабжения и ремонтно-строительного цеха) — основных разработчиков установки и создателей реакторного испытательного стенда.



*Рис. 1.38. В.И. Меркин – начальник сектора № 6 Института атомной энергии*

За этот период в секторе № 6 были разработаны рабочие чертежи установки, создана стендовая база и исследованы характеристики элементов реактора и преобразователя на критическом стенде с нейтронно-физическим прототипом реактора и стенде тепловых испытаний полноразмерной установки с электрическим нагревом, исследованы свойства материалов на теплофизических установках и при облучении в реакторе РФТ. Сооружен стенд «Р», на котором проведены ресурсные ядерные энергетические испытания.

В НИИ ТВЭЛ (директор М.В. Якутович) совместно с Подольским опытным заводом (директор А.Ф. Петров) разработана технология и изготовлены принципиально новые элементы активной зоны из дикарбида урана 90%-ного обогащения по урану-235, отражатели из металлического бериллия и металлокерамические электроизоляционные пластины для преобразователя. Основные участники работ: Н.И. Полторацкий, В.И. Митрофанов, Р.Г. Фрайштут, В.С. Колтунов, Е.М. Ракитская, П.П. Олейников.

В СФТИ (директор И.Г. Гвердцители) исследованы характеристики, изготовлен и испытан на теплофизическом стенде кремний-германиевый термоэлектрический преобразователь. Основные участники работ: И.Г. Гвердцители, П.В. Челидзе, С.П. Лалыкин, Ю.Д. Губанов, В.Ф. Жуков, В.К. Кавырзин, Р.Я. Кучеров, С.А. Еремин.

В Харьковском ФТИ (директор В.Е. Иванов) разработаны покрытия для защиты графитовых изделий от химического взаимодействия с бериллием при высоких температурах.

В НИИ «Графит» (директор С.Е. Вяткин) разработаны графитовые элементы активной зоны с покрытиями и теплоизоляционные элементы из пористого графита и графитированной ткани.

Второй вариант активной зоны для установки «Ромашка» на основе  $U\text{Ve}_{13}$  был разработан во ВНИИНМ (директор А.А. Бочвар, основной исполнитель Н.Ф. Исланкина).

Большой объем работ по проектированию, изготовлению оборудования и монтажу стенда «Р» был выполнен предприятиями МСМ, Московским проектным институтом (директор Ф.З. Ширяев), монтажным предприятием трест № 1, СУ-76, НИИ авиационной технологии с опытным заводом в г. Кимры.

Выполнение работ в столь сжатые сроки потребовало самоотверженного, не считаясь с личным временем, труда всего коллектива сектора № 6, других подразделений ИАЭ им. И.В. Курчатова и других предприятий. Работа не могла быть выполнена без четкой координации, содействия и контроля сроков со стороны Научно-технического управления МСМ (начальник Б.С. Поздняков, основные участники работ: М.С. Гусаров, Е.А. Коптелов, В.И. Селиванов).

На начальном этапе разработки установки в секторе № 6 ИАЭ им. И.В. Курчатова был создан штаб для руководства работами во главе с заместителем директора академиком М.Д. Миллионщиковым. Состав штаба представлен на рис. 1.39. В него вошли В.И. Меркин, Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин, В.А. Усов, Е.Н. Самарин, В.Г. Косовский, Г.Г. Малкин, Ю.А. Нечаев.



*Рис. 1.39. Штаб по разработке реактора-преобразователя «Ромашка»*



*Рис. 1.40. Учитель и ученик: А.П. Александров и Н.Н. Пономарев-Степной*



*Рис. 1.41. Основные участники разработки и испытаний, 1964 г.:  
стоят (слева направо): В.Я. Серов, Е.Н. Самарин, Ю.А. Нечаев, Н.Е. Кухаркин;  
сидят (слева направо): В.А. Усов, Г.Г. Малкин, В.Г. Косовский*

Ходом работы живо интересовался директор Института атомной энергии академик А.П. Александров (рис. 1.40), он лично участвовал в первом физическом пуске реактора на критическом стенде.

Большой вклад на этапе сооружения комплекса «Р» внесли заместитель директора ИАЭ С.А. Тополин, руководитель ОКСа Б.М. Тюгин, сотрудник В.Н. Попов, а также руководитель РСЦ В.С. Колдин. Основные участники разработки и испытаний представлены на рис. 1.41.

В авторском свидетельстве № 30814 Государственного комитета по делам изобретений и открытий СССР по заявке № 966747/558-6а с приоритетом от 11 ноября 1964 года зарегистрированы авторы изобретения: Г.В. Компаниец, Ю.В. Ивашев, А.С. Абрамов, В.Г. Косовский, Н.Е. Кухаркин, В.И. Меркин, Л.К. Мизрахи, Ю.А. Нечаев, М.Д. Миллионщиков, Г.А. Новгородцев, Б.С. Поздняков, Н.Н. Пономарев-Степной, Е.Н. Самарин, В.Я. Серов, В.А. Усов, Н.И. Тихонов, В.Г. Фадин, А.Г. Харламов, Л.В. Горлов, А.А. Ефремов.



*Рис. 1.42. Участники 40-летнего юбилея со дня пуска реактора-преобразователя «Ромашка»*

Это только небольшая группа участников работ, основная тяжесть работ по исследованию характеристик установки в процессе непрерывных двухгодичных ресурсных испытаний и последующей разделки и изучения состояния основных ее элементов пришлось на коллектив комплекса «Р», на сменный персонал и состав служб. Участники 40-летнего юбилея со дня пуска реактора-преобразователя «Ромашка» представлены на рис. 1.42.

Более полно участие коллектива сектора № 6, комплекса «Р» и других предприятий раскрыто в работах по космической ядерной энергетике, опубликованных на различных конференциях, симпозиумах, в иностранных и российских журналах и книгах. Список этих работ и их авторов приведен на стр. 203–211.

---

## Список литературы

1. Dieckamp H., Balent R., Wetch J. Compact reactor for space power. – *Nucleonics*, 1961, vol. 19, № 4.
2. Wetch J.R. History of Space Nuclear Power Short Course Notes. – In: 7 Symp. on Space Nuclear Power. Albuquerque, New Mexico, 1990.
3. Компаниец Г.В., Ивашев Ю.В., Абрамов А.С., Косовский В.Г., Кухаркин Н.Е., Меркин В.И., Мизрахи Л.К., Миллионщиков М.Д., Нечаев Ю.А., Новгородцев Г.А., Поздняков Б.С., Пономарев-Степной Н.Н., Самарин Е.Н., Серов В.Я., Усов В.А., Тихонов Н.И., Фадин В.Г., Харламов А.Г., Горлов Л.В., Ефремов А.А. Авторское свидетельство № 30814 на изобретение реактора-преобразователя «Ромашка» с приоритетом от 11 ноября 1964 г.
4. Грязнов Г.М. Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора). – М.: ФГУП ЦНИИАтоминформ, 2007.
5. Миллионщиков М.Д., Гвердцители И.Г., Абрамов А.С., Горлов Л.В., Губанов Ю.Д., Ефремов А.А., Жуков В.Ф., Иванов В.Е., Ковырзин В.К., Коптелов Е.А., Косовский В.Г., Кухаркин Н.Е., Кучеров Р.Я., Лалыкин С.Н., Меркин В.И., Нечаев Ю.А., Поздняков Б.С., Пономарев-Степной Н.Н., Самарин Е.Н., Серов В.Я., Усов В.А., Фадин В.Г., Яковлев В.В., Якутович М.В., Ходаков В.А., Компаниец Г.В. Высокотемпературный ректор-преобразователь «Ромашка». – *Атомная энергия*, 1964, т. 17, вып. 5, с. 329–336.
6. Гвердцители И.Г., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Основные результаты 15 000-часовых испытаний высокотемпературного реактора-преобразователя «Ромашка». – В сб.: Доклады 4-й Американской конференции по преобразованию энергии. Вашингтон, 1969.
7. Кухаркин Н.Е., Кузьмин Ю.Г., Усов В.А. Техническая справка о научно-исследовательской работе «Обобщение результатов ранее проведенных исследований сплава кремний–германий в условиях реактора-преобразователя «Ромашка». РНЦ «Курчатовский институт», ИЯР ОтВЭ, инв. № 35-11/67 от 27.06.2001.
8. Rasor N., Greenberg J., Mayer M. A thermionic reactor based on radiant heat transfer and demonstrated components. – В сб.: Доклады 4-й Американской конференции по преобразованию энергии. Вашингтон, 1969.

## **Глава 2. КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА «ЕНИСЕЙ» («Топаз-2»)**

КЯЭУ «Енисей» не слетала в космос,  
но слетала в США и обратно, проложив  
путь к международному сотрудничеству.

### **2.1. Исторический аспект**

В 1969 году КБ Прикладной механики в Красноярске было поручено создать космический аппарат, который должен обеспечить непосредственное телевизионное вещание на отдаленные районы страны. Энергетическую установку для этого аппарата было поручено создать организациям МСМ: Центральному конструкторскому бюро машиностроения – Главному конструктору энергетической установки; Институту атомной энергии им. И.В. Курчатова – научному руководителю; НИИ НПО «Луч» – технологу и конструктору по разработке ЭГК и элементов активной зоны; Сухумскому физико-техническому институту – разработчику систем автоматического управления.

В качестве ядерной энергетической установки разработчиками была предложена КЯЭУ «Енисей», разрабатываемая с 1963 года на основе термоэмиссионной системы преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электричество с использованием одноэлементных ЭГК, встроенных в активную зону реактора. В то же время в кооперации НПО «Красная Звезда» и ГНЦ РФ–ФЭИ в качестве дублера установки «БУК» для КА УС-А разрабатывался (с некоторым опережением по времени) вариант термоэмиссионной КЯЭУ «Топаз» на основе многоэлементных ЭГК той же электрической мощности, но с меньшим ресурсом (под задачу 5 кВт в космосе на ресурс 1,5 месяца с доведением до года) [16]. По данным работы [17] в США в это время были широко развернуты исследования по термоэмиссионным преобразователям для космических реакторных установок. Хронология этих работ представлена в таб. 2.1 [17].

## Хронология работ в США по термоэмиссионным реакторным установкам [17]

Год начала работ, интервал	Заказчик работ	Содержание	Примечание
1958	Комиссия по атомной энергии (АЕС)	Исследование в АЕС-ANP. «Дженерал электрик» (GE) изобретает термоэмиссионные приборы, работающие в режиме зажигания дуги (Volney Wilson)	
1959	АЕС	Первый опыт термоэмиссионного преобразования, с нагревом эмиттера урановым сердечником в петлевом канале реактора, работа доктора Д. Гровера и его сотрудников	Подобный эксперимент в 1961 г. был проведен ФЭИ на реакторе АМ [16]
1959	АЕС-AF (Аэрофорс)	Программа по усовершенствованному реактору SNAP. Изобретение многоэлементного электрогенерирующего канала (ЭГК) N. Rasor и др.	
1960-1961	АЕС	Испытания в реакторе фирмы «Вестингауз» 2-каскадного термоэмиссионного термоэлектрического преобразователя	Источник: Nucleonics, July 1960, p. 28; Nucleonics, August 1960, p. 84

1961–1965	АЕС	Разработка термоэмиссионной технологии. «Дженерал электрик» (GE) конкурирует с «Дженерал Атомик» –Термоэлектрон корп. (TECO)	В ФЭИ, ИАЭ, ТМ КБ «Союз», ОКБ-1, ФТИ организованы научные группы по изучению термоэмиссионных преобразователей для реакторов космических и морских применений. В СССР группой Г.М. Грязнова в 1963 г. выпущен эскизный проект термоэмиссионной КЯЭУ с многоэлементными ЭГК [16]. В ФТИ (г. Ленинград) совместно с ТМ КБ «Союз», ФЭИ, ЦКБМ и затем с ИАЭ начаты работы по одноэлементному термоэмиссионному ЭГК для реактора космической ЯЭУ. Группе специалистов указанных предприятий выдано авторское свидетельство на изобретение одноэлементных ЭГК с приоритетом от 17 апреля 1965 г.
1972–1982	ERDA	Малобюджетные исследования для поддержания программы разработки технологий на фирмах Rasor Assoc-TECO. Изобретение N. Rasor термоэмиссионной установки «Ромашка»	В 1970 г. впервые в мире на стенде ФЭИ проведены ядерные энергетические испытания первого образца термоэмиссионной КЯЭУ «Топаз» разработки ГП «Красная Звезда» и ФЭИ, всего в период 1970–1986 годов проведено 7 ядерных энергетических испытаний [16]. В период 1975–1986 годов в ИАЭ и НИИП проведены 6 ядерных энергетических испытаний опытных образцов КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2») разработки ЦКБМ, ИАЭ им. И.В. Курчатова и НИИ НПО «Луч» [3]

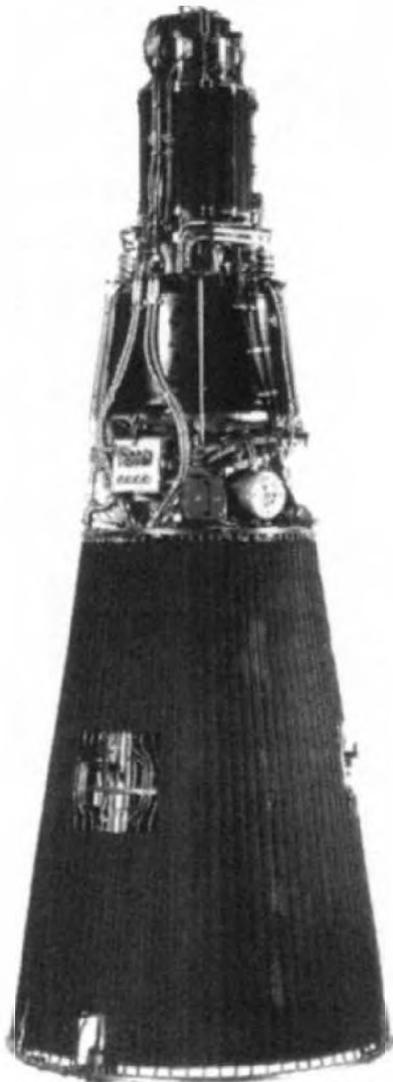
Октябрь 1983 г		Фирма SPI получила утешительный контракт на оценку термоэмиссионного реактора	
Октябрь 1986	SDI-DOE	Программа проверки характеристик ЭГК на фирмах «Дженерал Атомик» (GA) – TECO-RAI	В GA испытаны с ресурсом до 10 000 ч в петле реактора ЭГК с одним, двумя и шестью электрогенерирующими элементами
1987	AF- Lockheed-GA	Изучение и проектные проработки термоэмиссионной установки «Ромашка» (STAR-C)	В 1987–1988 гг. в СССР впервые в мире в составе КА «Космос-1818» и «Космос-1867» испытаны на орбите две установки «Топаз» (разработчики ГП «Красная Звезда» и ФЭИ) с ресурсом 0,5 и 1,0 год электрической мощностью ~5,0 кВт [16]
Январь 1989		Начало переговоров фирмы SPI и ИАЭ им. И.В. Курчатова о сотрудничестве в области космических термоэмиссионных установок для гражданских применений	

Общий вид космической ядерной энергоустановки «ЕНИСЕЙ» представлен на рис. 2.1.

Техническим заданием на разработку КЯЭУ «Енисей», выданным КБПМ, предусматривалось создание термоэмиссионной ЯЭУ электрической мощностью 6,8 кВт с ресурсом 1,5 года на первом этапе и доведением ресурса до 3 лет на последующих этапах отработки. Масса КЯЭУ должна быть ~1000 кг. По мере продвижения работ по созданию космического аппарата и КЯЭУ «Енисей» уточнялось техническое задание (ТЗ). В окончательном варианте ТЗ электрическая мощность должна быть до 4,5–5,5 кВт (эл), ужесточились требования к радиационной обстановке в районе приборного контейнера (до  $5 \cdot 10^4$  рад по гамма-излучению) и, соответственно, на 200 кг была увеличена масса блока защиты; неизменным оставалось требование по ресурсу установки 1,5–3,0 года.

Все оборудование скомпоновано в единый блок, называемый «реакторным» или «головным», в виде усеченного конуса. В вершине располагается реактор, непосредственно за реактором размещается радиационная защита, в «тени» которой находится остальное оборудование.

В реакторе КЯЭУ «Енисей» применяется термоэмиссионный преобразователь (ТЭП) одноэлементной конструкции.



Электрическая мощность, кВт	4,5–5,5
Тепловая мощность, кВт	≤135
Загрузка по урану-235, кг	25
Масса, кг	980 (780 с легким блоком защиты)
Подтвержденный ресурс (по результатам ядерных энергетических испытаний), лет	1,5 (с прогнозируемым увеличением до 3,0 лет)

Рис. 2.1. Общий вид космической ядерной энергоустановки «Енисей»

Свободный доступ в катодную полость одноэлементного ЭГК, где размещается ядерное топливо, позволял на стадии отработки проводить полномасштабные тепловые испытания ЭГК, реактора, а также КЯЭУ в целом, размещая в полости катода специальные электронагреватели соответствующей мощности. Аналогичный прием позволял при изготовлении КЯЭУ проводить полномасштабные контрольные электроэнергетические испытания и определять выходные характеристики установки.

Эта особенность ЭГК положительно сказывалась и при работе с КЯЭУ на этапах ее наземной отработки и эксплуатации в части обеспечения ядерной и радиационной безопасности за счет выбора наиболее удобного момента и места загрузки реактора ядерным топливом и проведения большинства регламентных проверок до операции загрузки. Возможность отработки ЭГК и установки в целом с электронагревом позволила существенно увеличить объем отработки для подтверждения длительного ресурса (1,5–3,0 года) и надежности установки. Это было невозможно в установке с многоэлементными ЭГК. Одноэлементная конструкция ЭГК обеспечивала также разделение топливной полости и полости межэлектродного зазора (МЭЗ) и исключала попадание осколков деления и технологических газов в МЭЗ.

## **2.2. Описание систем КЯЭУ «Енисей», конструктивных особенностей ее отдельных элементов и основные параметры**

В состав систем и оборудования КЯЭУ «Енисей» входят:

- малогабаритный гетерогенный реактор на промежуточных нейтронах с гидридциркониевым замедлителем, бериллиевыми отражателями и встроенными в активную зону одноэлементными термоэмиссионными преобразователями (ТЭП), совмещенными с твэлами;
- система отвода от реактора неиспользованного тепла, в которую входят циркуляционный электромагнитный насос (ЦЭМН) для прокачки жидкометаллического теплоносителя, холодильник-излучатель ребристо-трубчатого типа (ХИ), газовый компенсатор объема с сильфонным разделительным элементом (КО), «ловушка» окислов с титановым поглотителем окислов, электронагреватели предстартового разогрева кон-

- тура теплоносителя (ТЭН), соединительные трубопроводы;
- система автоматического управления установкой (САУ), обеспечивающая пуск и автоматическое управление на всех этапах эксплуатации;
- система контроля параметров КЯЭУ и передачи их в наземный центр управления, которая включает датчики САУ и телеметрического контроля параметров установки: температуры, давления, нейтронного потока;
- система электропитания потребителя и собственных нужд КЯЭУ;
- цезиевая система, включающая генератор паров цезия и безмоментную систему выброса паров цезия и продуктов остаточного газовыделения;
- исполнительные органы СУЗ – привод автоматического регулирования (АР) и три привода аварийной стартовой защиты реактора (АЗС);
- пусковой блок (ПБ), включающий в себя аккумуляторную батарею (АПБ), обеспечивающий собственные нужды и питание ЦЭМН на пусковом режиме КЯЭУ;
- теневая радиационная защита (блок защиты – БЗ);
- силовая рама – основной элемент несущей конструкции реакторного блока (РБ) и стыковки с КА;
- термочехол, который осуществляет тепловую защиту РБ, устанавливает и поддерживает требуемый тепловой режим КЯЭУ до пуска реактора, исключая затвердение теплоносителя в контуре охлаждения при неработающем реакторе;
- газовые системы (гелиевая и окислителя) и др.

Оборудование крепится к силовой раме, которая вместе с последовательно с ней соединенными корпусами защиты и реактора составляет несущую конструкцию реакторного блока.

САУ располагается в приборном контейнере КА наиболее защищенном от реакторных излучений. Реакторный блок соединен с аппаратурой САУ кабелями.

На рабочей орбите реакторный блок отодвигается от КА на определенное расстояние при помощи механизма раздвижения.

На рис. 2.2 приведена пневмогидравлическая схема установки «Енисей».

Рис. 2.3 иллюстрирует функциональные связи реакторного блока с системами управления.

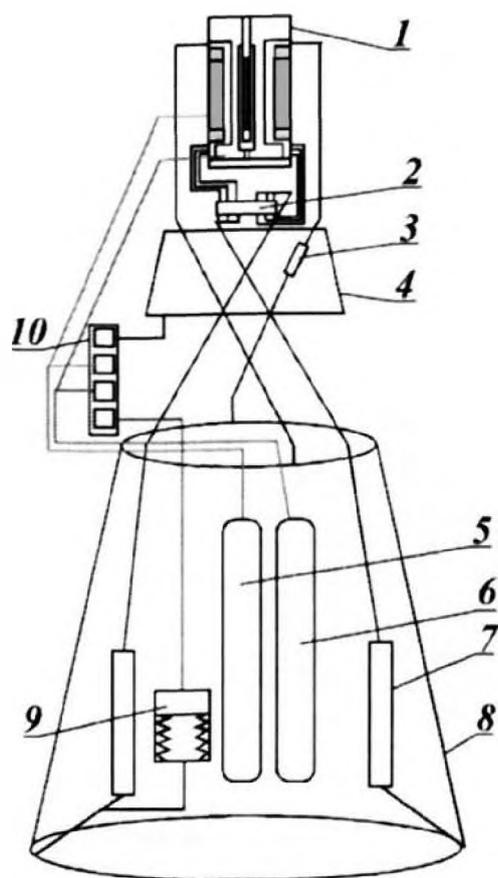


Рис. 2.2. Схема пневмогидравлическая установки «Енисей»:  
 1 – реактор; 2 – электромагнитный насос; 3 – ловушка; 4 – блок защиты; 5 – баллон газовой смеси; 6 – баллон инертных газов; 7 – нагревательное устройство; 8 – холодильник-излучатель; 9 – компенсатор объема; 10 – блок датчиков давления

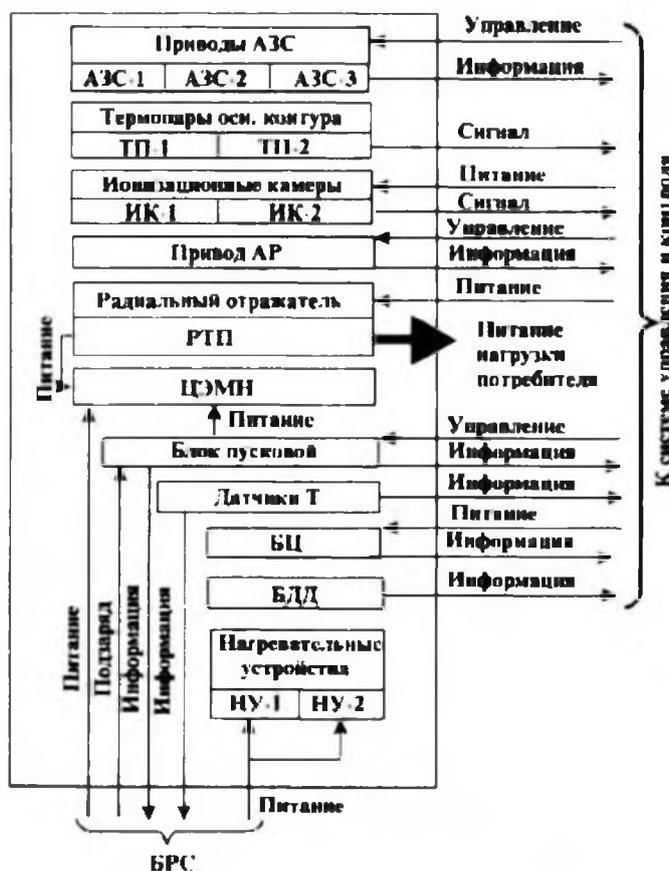
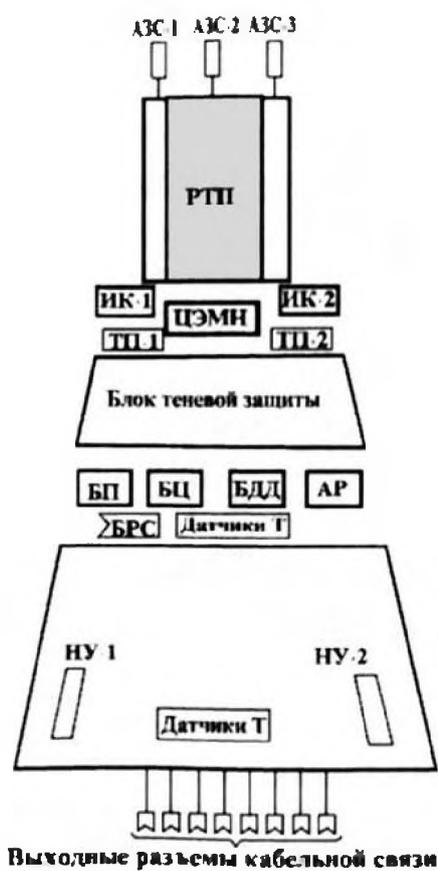


Рис. 2.3. Функциональная схема реакторного блока

**Реактор.** Общий вид реактора и его схема представлены на рис. 2.4, 2.5 и 2.6.

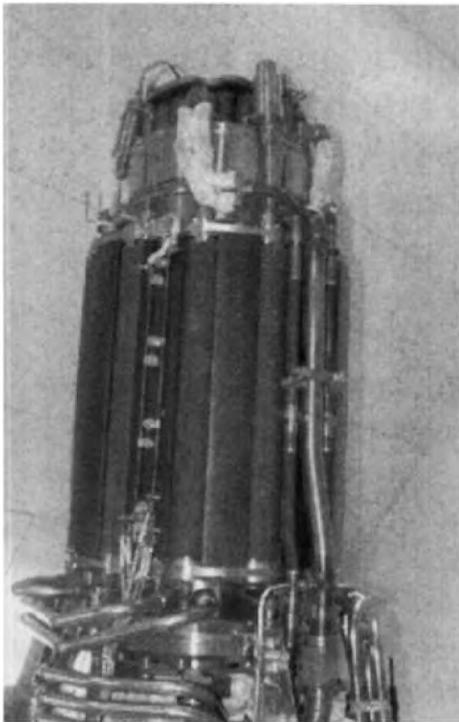


Рис. 2.4. Общий вид реактора установки «Енисей»

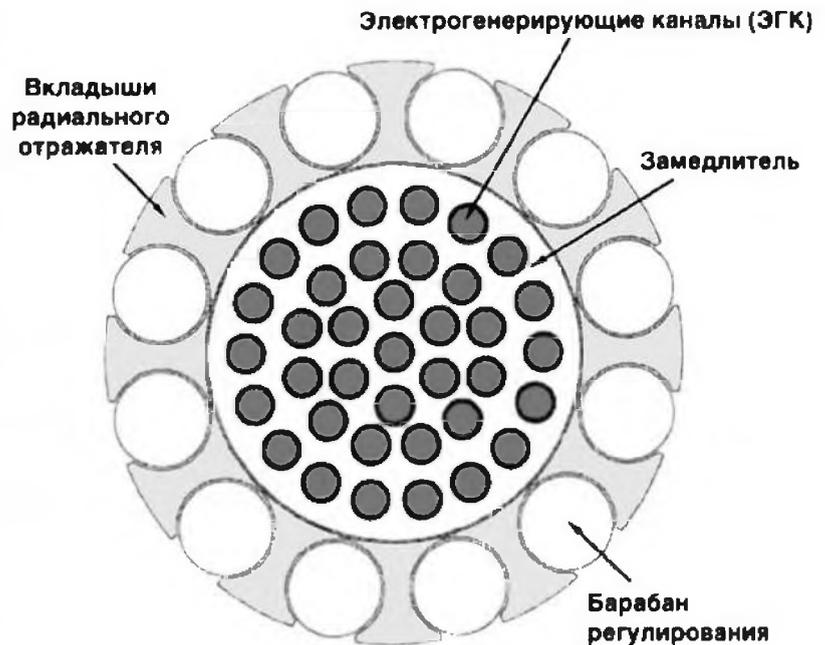


Рис. 2.5. Поперечное сечение реактора установки «Енисей»

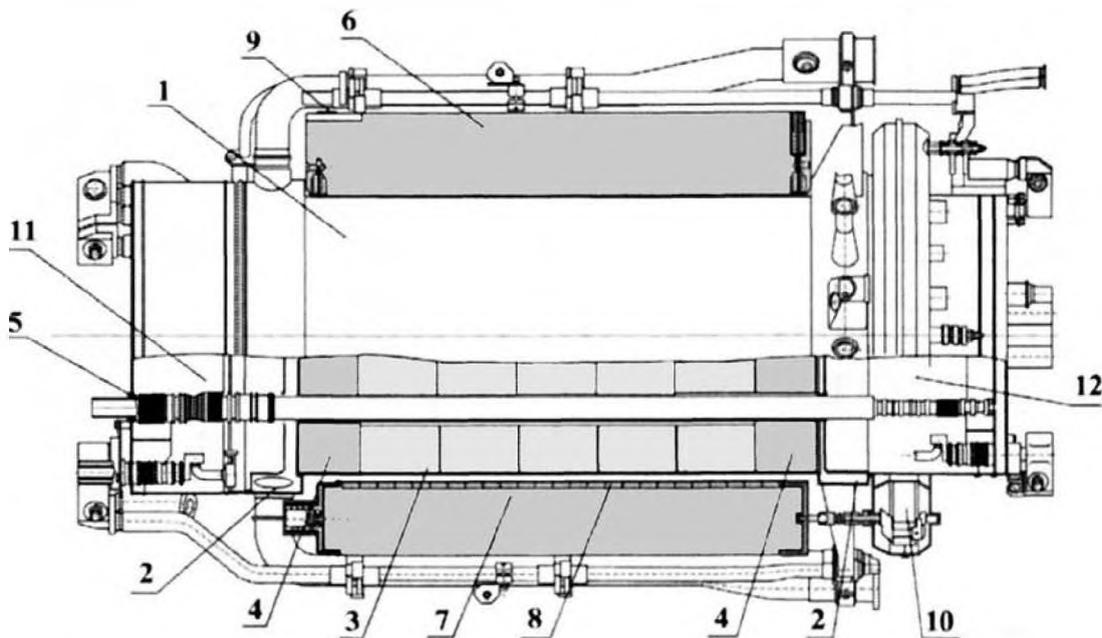


Рис. 2.6. Схема реактора установки «Енисей»:

1 – корпус реактора; 2 – коллектор теплоносителя; 3 – блоки замедлителя; 4 – торцевой отражатель; 5 – ЭГК; 6 – радиальный отражатель (вкладыш); 7 – стержни регулирования; 8 – поглощающие накладки; 9 – ленточные бандажи; 10 – механизм поворота; 11 – верхняя гелиевая камера; 12 – нижняя гелиевая камера

Корпус реактора представляет собой стальную тонкостенную цилиндрическую обечайку, по торцам которой расположены коллекторы теплоносителя с сваренными в них внутренними и наружными трубными досками.

Внутри цилиндрической обечайки размещаются комплект блоков замедлителя из гидрида циркония и блоки торцевых отражателей из бериллия. В блоках замедлителя и отражателя выполнены отверстия, которые образуют каналы для установки ЭГК. Трубные доски соединены между собой парами коаксиальных трубок, приваренных к этим доскам. Наружные трубки отделяют полость теплоносителя от полости замедлителя, во внутренних трубках размещаются ЭГК. Замедлитель изготавливается из гидрида циркония (ГЦ) ядерной чистоты, полученного методом сквозного насыщения водородом малолегированного циркония. Содержание водорода в материале на основе гидрида циркония составляет 2,06% мас. Для выравнивания тепловыделения по высоте может быть использовано профилирование активной зоны реактора по водороду с использованием в блоке замедлителя различного состава гидрида циркония (содержание водорода 1,74% мас.). Проблема удержания водорода в замедлителе решается нанесением защитных покрытий непосредственно на элементы гидридного замедлителя и на «окружающие» металлические элементы конструкции, внутри которых он размещается (корпус реактора, трубные доски, каналные трубы).

Теплоноситель проходит по зазору между трубками. Дистанционирование зазора обеспечивается ребрами на поверхности внутренней трубки. Оребрение обеспечивает также турбулизацию потока теплоносителя для повышения эффективности теплопередачи.

ЭГК вставляются внутрь трубки с зазором, заполняемым гелием при изготовлении реактора. Этим создаются условия стабильности теплопередачи тепла от коллектора ЭГК к теплоносителю. Крепятся ЭГК к наружной трубной доске верхнего коллектора теплоносителя реактора. Устройство ЭГК представлено на рис. 2.7.

Материал катода – монокристалл молибдена с покрытием из обогащенного по изотопу 184 вольфрама, материал коллектора – сплав молибдена. Вывод тока осуществляется с обоих концов ЭГК вне активной зоны реактора. Электроизоляция электродов ЭГК между собой и от корпуса реактора осуществляется с помощью вакуумноплотных металлокерамических узлов на концевых частях электродов.

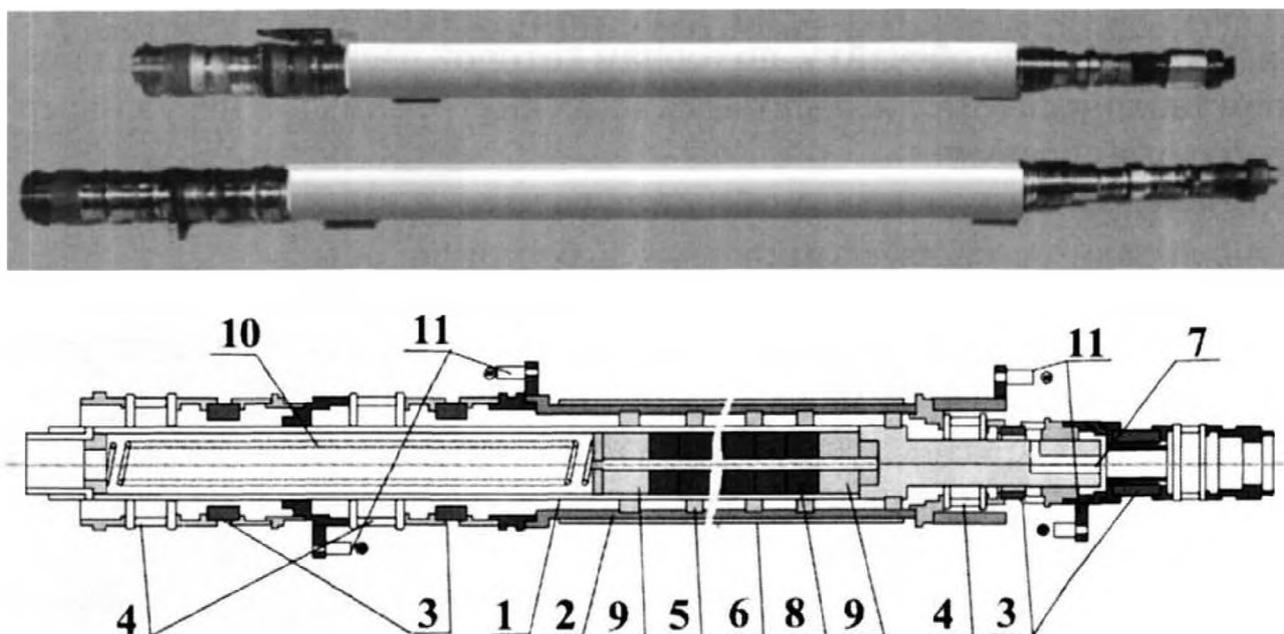


Рис. 2.7. Общий вид и схема ЭГК установки «Енисей» и одноэлементного ЭГК повышенной мощности:

1 – эмиттер; 2 – коллектор; 3 – металлокерамические узлы; 4 – сильфонные узлы; 5 – дистанционаторы; 6 – наружная изоляция; 7 – канал подачи цезия в МЭЗ; 8 – топливо; 9 – торцевой отражатель; 10 – фиксирующее устройство; 11 – токовыводы

Схема коммутации ЭГК в реакторе «Енисей» представлена на рис. 2.8.

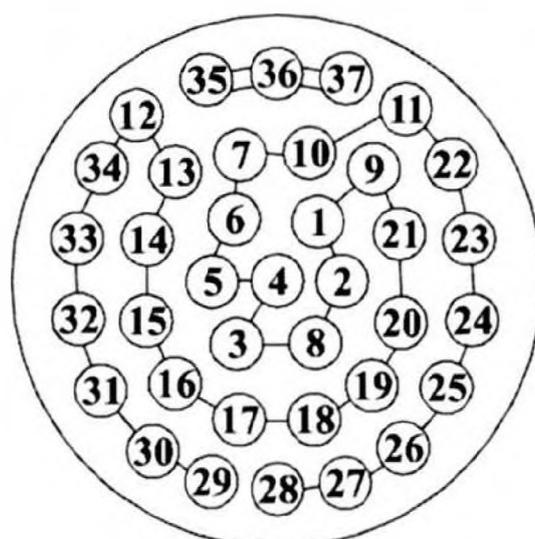


Рис. 2.8. Схема коммутации ЭГК в реакторе «Енисей»:  
1–34 – рабочая секция; 35–37 – насосная секция

Сильфонные узлы ЭГК обеспечивают механическую развязку электродов при температурных деформациях. Электроизолирующие функции несут на себе также дистанционаторы МЭЗ и покрытие из двуокиси алюминия на наружной поверхности коллектора.

Межэлектродное пространство при пуске реактора и разогреве РБ заполняется парами цезия заданного давления.

Ядерное топливо выполнено в виде таблеток из двуокиси урана с обогащением по урану-235 96%. Таблетки имеют отверстия различного диаметра, что обеспечивает профилирование тепловыделения по радиусу активной зоны. По обеим сторонам топлива внутри эмиттера размещены таблетки элементов торцевого отражателя из окиси бериллия. Специальные устройства удерживают таблетки от перемещения и предотвращают выход токсичной пыли наружу при наземных операциях с КЯЭУ. При этом обеспечивается свободный выход газообразных продуктов деления в космическое пространство.

ЭГК скоммутированы в две секции: рабочую – из 34 последовательно соединенных ЭГК и насосную – из трех параллельно соединенных ЭГК. Через гермовводы каждая из секций с обеих сторон торцов реактора выведена наружу и подключена к соответствующим реакторным токосъемным шинам.

Снаружи корпуса между верхним и нижним коллекторами теплоносителя размещен радиальный отражатель. Он состоит из двенадцати вращающихся цилиндрических бериллиевых стержней (барабанов) в тонкостенных стальных оболочках и двенадцати неподвижных бериллиевых вкладышей между барабанами, плотно прижатых к корпусу реактора и с небольшим зазором отстоящих от стержней.

Стержни регулирования вращаются в подшипниках скольжения. Двумя ленточными бандажами вкладыши и вместе с ними стержни прижаты к корпусу реактора. Бандажи имеют электрические замки, фиксирующие бандажи и радиальный отражатель в собранном состоянии.

Открытие замков бандажей при подаче на них электропитания приводит к быстрому развалу радиального отражателя за счет пружинных толкателей, установленных между вкладышами отражателя и корпусом реактора. Развал отражателя является одной из мер защиты в аварийных ситуациях.

На стержнях регулирования в пазах по всей высоте стержней установлены поглощающие элементы из карбида бора, занимающие 1/3 периметра стержня. 12 стержней разбиты на две группы: 9 стержней системы регулирования и 3 стержня аварийной защиты. Через

муфты стержни АР соединяются с механизмом поворота, стержни АЗС – с индивидуальными электроприводами.

Механизм поворота является распределительным устройством и передает крутящий момент девяти стержням АР от единого привода. Люфт ведущего стержня регулирования относительно ведущего кривошипа устраняется с помощью встроенного торсиона. Вследствие этого на номинальном режиме работы ЯЭУ регулирование, в основном, осуществляется только ведущим стержнем, а остальные стержни регулирования остаются неподвижными за счет своих люфтов относительно венца. В процессах грубого регулирования работают и остальные стержни (в частности, во время пуска – все стержни).

**Система охлаждения реактора.** Система обеспечивает отвод от реактора и сброс в космическое пространство неиспользованного тепла. Кроме того, при подводе внешнего электропитания система обеспечивает возможность разогрева реакторного блока при неработающем реакторе и поддержание теплового режима РБ на уровне, исключающем затвердевание теплоносителя в процессе выведения, за счет тепла, запасенного в конструкциях РБ.

В своем составе система имеет холодильник-излучатель (ХИ), циркуляционный насос, компенсатор объема, ловушку окислов, электронагреватели предварительного разогрева, трубопроводы и датчики температуры, установленные в различных местах на коллекторах ХИ и трубопроводах. В качестве теплоносителя используется эвтектический сплав натрий–калий.

ХИ ребристо-трубчатой конструкции наиболее полно отвечал задаче создания теплообменника минимального веса и высокой надежности. Сварная конструкция в виде усеченного конуса с кольцевидными верхним и нижним коллекторами, с оребренными медными пластинами, рабочими трубками представлялась предельно простой и надежной.

Практически все элементы такой конструкции работают по прямому назначению – отдача тепла в окружающую среду.

Для повышения эффективности сброса тепла в космическое пространство излучающие элементы холодильника покрыты теплостойкой эмалью с высокой степенью черноты (0,86–0,88), обладающей высокой адгезией. Эффективная излучающая поверхность холодильника-излучателя составляет 7,2 м<sup>2</sup>.

В КЯЭУ «Енисей» для прокачки теплоносителя применяется кондукционный магнетогидродинамический насос постоянного тока. Насос полностью герметичен и не имеет подвижных частей.

Прокачка теплоносителя осуществляется за счет взаимодействия постоянного тока, пропускаемого через теплоноситель, и магнитного поля, создаваемого магнитопроводом с электромагнитом постоянного тока, обмотка которого включена последовательно с основной цепью насоса.

Насос обеспечивает прокачку двух встречных потоков теплоносителя по двум каналам с одинаковым расходом в каждом. Каждый канал выполнен в виде трех расположенных параллельно тонкостенных камер прямоугольного сечения, имеющих электрический контакт между собой и разобщенный электрически за пределами магнитопровода.

В номинальном режиме насос потребляет 1050 А при напряжении от 0,40 до 0,45 В, обеспечивая расход 1,5 кг/с. В этом режиме питание насоса осуществляется от насосной секции реактора. В пусковом режиме насос потребляет 600 А и обеспечивает расход 0,75 кг/с. В этом режиме насос питается от пускового блока, основным элементом которого является аккумулятор, подключаемый к шинам насоса через дистанционно управляемые выключатели, установленные внутри пускового блока.

Компенсатор объема сильфонного типа с компенсирующей газовой полостью предназначен для компенсации температурных расширений теплоносителя при разогреве установки и поддержания заданного давления в контуре охлаждения. Был разработан оригинальный сильфонный узел пилообразного профиля, получаемый сваркой набора кольцевых металлических диафрагм по внутреннему и наружному периметрам. Сжимаясь в рабочем режиме, элементы не оставляют практически паразитных зон, сводя до расчетного минимума объем теплоносителя, остающегося в компенсаторе. Прямыми ресурсными испытаниями был подтвержден трехлетний ресурс компенсатора объема (КО).

Система теплоносителя представлена на пневмогидравлической схеме (см. рис. 2.2). Компоновка трубопроводов жидкометаллического профиля (ЖМК) выполнена с обеспечением минимальной величины нескомпенсированных кинетических моментов движущихся масс теплоносителя.

В установке применен генератор паров цезия фитильного типа, обогреваемый на всех этапах работы контуром теплоносителя и не требующий электропитания. Крепится генератор паров на специальной платформе, вваренной в трубопровод теплоносителя. Оригинальная конструкция и специальная технология изготовления

фитиля, представляющего собой канал, образуемый проволочной спиралью, помещенной в радиальном зазоре двух концентричных стальных втулок, обеспечивают номинальный расчетный расход цезия 0,5 г/сут с превращением цезия в пар по ходу прохождения его по фитилю. Требуемое рабочее давление паров, находящееся в диапазоне 0,4–4,0 мм рт. ст., устанавливается с помощью регулирующего выходного дросселя при первых энергетических испытаниях РБ и автоматически поддерживается с точностью не хуже 10% в широком диапазоне температуры теплоносителя (350–600 °С). Ресурсный запас цезия рассчитан на 5 лет работы РБ.

На сборку реакторный блок (РБ) поступает в собранном виде, заправленный цезием и прошедший проверку на работоспособность на специальном стенде тепловых испытаний.

Успех отработки РБ во многом определялся созданием уникальных стендов, обеспечивавших всесторонние исследования и полномасштабные испытания РБ, в том числе ресурсные.

**Блок защиты.** Является радиационной защитой космического аппарата и обеспечивает снижение потоков нейтронного и гамма-излучения. Одновременно блок защиты (БЗ) является составной частью силовой конструкции РБ.

Конструкция БЗ представляет собой стальную обечайку, заполненную водородосодержащим компонентом — гидридом лития. Защита разработана в двух вариантах: с тонкостенными днищами корпуса и с днищами толщиной в несколько сантиметров для повышения эффективности защиты по гамма-излучению. К оригинальным конструктивным решениям по БЗ относится создание внутри монолита гидрида лития сквозных наклонных каналов для прокладки наиболее громоздких трубопроводов ЖМК и валопровода системы приводов стержней АР.

При внешней кажущейся конструктивной простоте конструкция БЗ потребовала длительной отработки технологии заполнения корпуса гидридом лития.

Программа автономной отработки БЗ включала в себя реакторные исследования ослабляющей способности БЗ на макетных сборках и штатных образцах БЗ с отработкой методики контроля заполнения гидридом лития, тепловые испытания с целью исследования реальных температурных полей конструкции БЗ, исследование прочностных характеристик при статических и динамических испытаниях, определение реальных оптических характеристик теплоизлучающих поверхностей, проверку работоспособности валопровода системы привода

стержней АР реактора. Физические испытания БЗ проводились на стенде ОР-М с экспериментальным реактором ОР ИАЭ (рис. 2.19)

Рама является составной частью силовой конструкции реакторного блока и предназначена для размещения и закрепления различных узлов (блока защиты, холодильника, компенсатора объема, газовых баллонов, трубопроводов и кабелей).

**Система автоматического управления КЯЭУ.** Система автоматического управления (САУ) предназначена для обеспечения работы установки в заданном режиме. Функциональные связи основных подсистем САУ и ЯЭУ показаны на рис. 2.3 и 2.9, функциональная схема реакторного блока представлена на рис. 2.3, схема бортового комплекса управления – на рис. 2.9.

САУ выполняет следующие основные функции:

- пуск и вывод ЯЭУ на номинальный режим;
- поддержание номинального режима, поддержание напряжения на выходе САУ;
- подключение перед пуском аккумуляторной батареи (АБ) пускового блока для обеспечения технологических нужд ЯЭУ,
- обеспечение заряда, разряда и подзаряда АБ при функционировании ЯЭУ;

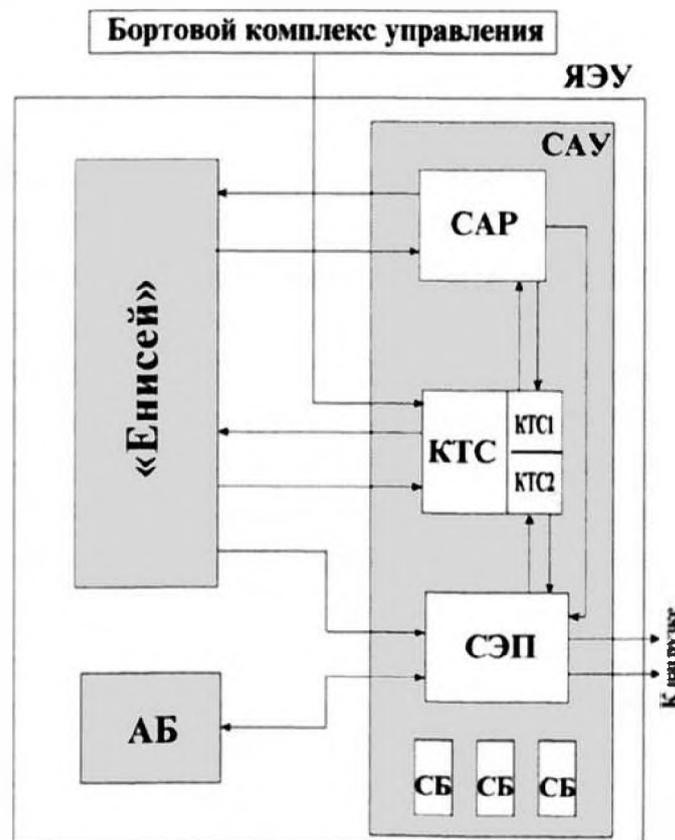


Рис. 2.9. Схема бортового комплекса управления

- обеспечение телеметрического контроля параметров ЯЭУ при наземной подготовке, выведении на орбиту и при работе на ней;
- обеспечение ядерной и радиационной безопасности при проведении работ с реактором, загруженным ядерным топливом;
- обеспечение возможности проверок работоспособности ЯЭУ при наземной подготовке.

САУ состоит из следующих функциональных частей:

- командно-телеметрической системы (КТС);
- системы автоматического регулирования (САР);
- системы электропитания (СЭП).

КТС выполняет следующие функции:

- принимает, анализирует, тиражирует (выдает в САР и СЭП) поступающие команды;
- преобразует сигналы, поступающие из РБ, САР и СЭП, в стандартную телеметрическую информацию;
- обеспечивает исполнение команд САР на поддержание требуемого теплового состояния РБ, аварийный останов реактора, аварийный развал отражателя и др.

САР выполняет следующие функции:

- принимает и обрабатывает сигналы от датчиков РБ, датчиков тока САУ и команды от КТС;
- управляет реактором в процессе запуска, номинального режима работы и остановки по заданной логике;
- обеспечивает возможность управления реактором (двигателем провода АР) от бортового комплекса управления.

Пуск ЯЭУ осуществляется САР в два этапа: сначала программным перемещением органов регулирования (до момента достижения нейтронной мощностью минимально контролируемого уровня), затем увеличением нейтронной мощности по заданному закону с использованием связи по мощности реактора. На номинальном режиме САР обеспечивает поддержание требуемых величин нейтронной мощности реактора, электрической мощности преобразователя и температурного режима ЯЭУ.

СЭП выполняет следующие функции:

- обеспечивает заданную электрическую нагрузку в период запуска реактора и при любом отключении полезной нагрузки;
- стабилизирует напряжение на выходе САУ в номинальном

режиме работы;

- обеспечивает напряжение питания САР и КТС;
- обеспечивает режим работы АБ по заданной логике.

Для проверки функционирования САУ разработана контрольно-проверочная аппаратура (КПА САУ), которая позволяет имитировать режимы работы ЯЭУ и осуществляет проверку технических характеристик. КПА САУ позволяет (в качестве имитатора бортового комплекса управления) проводить наземные ядерно-энергетические испытания ЯЭУ совместно с САУ. С помощью КПА осуществляется проверка правильности стыковки всех составных частей ЯЭУ, логики работы, режимов пуска и поддержания номинальной мощности, качества выходного напряжения, телеметрируемой информации.

Конструктивно аппаратура САУ состоит из трех блоков (Б1, Б2, Б3), трех балластных сопротивлений и соединительных кабелей. Каждый блок и балластное сопротивление представляет собой законченную конструкцию с элементами крепления.

Аппаратура САУ разработана по заданию ЦКБМ и ИАЭ Сухумским ФТИ полностью на отечественной элементной базе.

Блоки Б1, Б2 и Б3 размещаются в приборном контейнере космического аппарата, три балластных сопротивления крепятся на внешней поверхности конструкции космического аппарата.

Несмотря на то, что приборный контейнер отделен от реакторного блока теневой радиационной защитой - блоком защиты, снижающим потоки нейтронного и гамма-излучения, а на рабочей орбите реакторный блок отодвигается от космического аппарата на определенное расстояние при помощи механизма раздвижения, при разработке аппаратурных блоков САУ приняты особые меры, повышающие радиационную стойкость аппаратуры: максимально снижены коэффициенты нагрузок на примененные комплектующие полупроводниковые приборы, введено дополнительное резервирование наиболее уязвимых электронных цепей. Основные узлы САУ, а также отдельные аппаратурные блоки были успешно испытаны на радиационную стойкость.

Балластная нагрузка СЭП КЯЭУ «Топаз» размещена непосредственно в системе охлаждения реактора-преобразователя. Три балластных сопротивления СЭП КЯЭУ «Енисей» размещаются на наружной поверхности космического аппарата и сбрасывают избыточную мощность в космическое пространство за счёт теплового

излучения. Особенность конструкции балластных сопротивлений состоит в том, что они в равной мере работоспособны как в наземных условиях при наземных проверках и испытаниях, так и в космическом пространстве. Балластные сопротивления этого типа были успешно применены в системах электропитания геостационарных спутников связи «Радуга», «Горизонт» и «Экран».

Были проведены совместные испытания одного из опытных образцов САУ с реальной ЯЭУ по программе, предусматривающей работу ЯЭУ во всех возможных режимах. При этом КПА САУ использовалась как составная часть испытательного стенда ЯЭУ. Суммарная наработка этого образца САУ в процессе ресурсных испытаний с ЯЭУ составила около 5000 часов, отказов не было зарегистрировано. Одновременно с этими совместными испытаниями были начаты испытания еще четырех опытных образцов САУ на воздействие механических, температурно-климатических и других факторов. Испытания были прерваны в 1989 году из-за прекращения финансирования.

Аппаратура САУ и КПА САУ разработана, изготовлена и испытана отделом радиофизического и радиотехнического приборостроения, конструкторским отделом и Опытным производством Сухумского физико-технического института. Ведущие исполнители — разработчики САУ и КПА САУ в СФТИ: Аветисов Э.М., Басин Ю.Г., Бесараб Я.А., Браварец В.И., Васильев В.И., Венедиктов Ю.П., Вознюк А.С., Гоман Н.Б., Гриц Ю.А., Джоджуа А.С., Журавлёв П.П., Олифирчук Н.Л.

В разделе 2.5 представлены фото основных участников разработки САУ и КПА САУ в СФТИ.

Контрольной стыковкой РБ и САУ и проверкой электроцепей и функционирования оборудования завершается этап изготовления КЯЭУ «Енисей».

Привод автоматического регулирования предназначен для поворота регулирующих барабанов реактора из исходного положения на любой угол в пределах от 0 до 180°. Управление приводом производится от САУ. Привод герметичен, заполнен аргоном. Он работоспособен в условиях глубокого вакуума, высоких температур и высоких радиационных потоков.

Крепление РБ и КА в варианте стартового положения РБ на КА «реактором вниз» осуществляется с помощью «переходного отсека»

оригинальной, клепанной из алюминиевых элементов конструкции.

В качестве тепловой защиты ЖМК РБ на стартовой позиции и на участке выведения используется термочехол, который состоит из трех угловых и одной донной секции и снабжен устройствами развала и отстрела угловых секций от РБ.

После выполнения своей штатной функции тепловой защиты по команде САУ термочехол сбрасывается. Происходит это за счет подрыва пирочки, раскрытия фиксирующих секции замков и срабатывания шести пар пружинных толкателей, обеспечивающих скорость отстрела секций от РБ не менее 0,5 м/с.

Основные энергетические характеристики ТЭП были подтверждены при полугодовых ресурсных петлевых испытаниях, что позволило специалистам ЦКБМ совместно со специалистами ИАЭ приступить к разработке опытного образца ЭГК и на его основе первого реактора термоэмиссионного преобразователя с ЭГК одноэлементного типа.

С учетом реально полученной при реакторных испытаниях в петлевых каналах реакторов МР и ВВР величины удельной электрической мощности ТЭП – 0,8–1,0 Вт/см<sup>2</sup> при размещении в реакторе 31 ЭГК мощность на клеммах реактора могла составить величину, близкую к 5–5,5 кВт. Специалистами ЦКБМ и ИАЭ были предварительно оценены нейтронно-физические характеристики реактора с новым типом ЭГК и подтверждена возможность создания реактора с размерами активной зоны: высотой 340 мм и диаметром 260 мм.

С 1969 года разработка, отработка и изготовление ЭГК проводились в ПНИТИ (НПО «Луч», г. Подольск).

Специфика создания космической ядерной установки предполагала в соответствии с ТЗ:

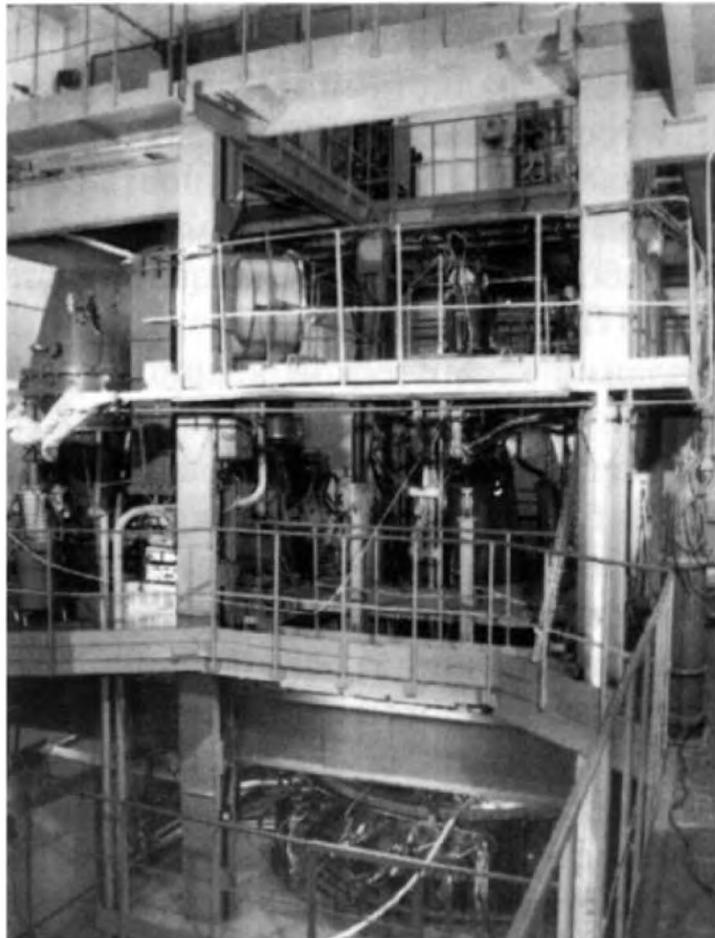
- разработку плана мероприятий по обеспечению ядерной и радиационной безопасности на всех этапах работы с КЯЭУ при наземной и летной эксплуатации, а также необходимой документации и аппаратуры контроля;
- разработку планов наземной подготовки КЯЭУ, регламентных проверок и обеспечение этих работ эксплуатационной документацией, технологическим оборудованием, инструментом и контрольно-измерительной аппаратурой.

В силу необходимости подтверждения длительного ресурса отработка КЯЭУ заняла относительно большой срок и продолжалась с момента выпуска первого ТЗ на КЯЭУ.

Важнейшими этапами обработки были элементная и узловая отработка, освоение в производстве, комплексная отработка установки, в том числе на электроэнергетических (с имитацией ядерных тепловыделений электронагревом активной зоны реактора) и ядерных испытаниях. На всех этапах реализовывались целевые программы по отработке надежности, прочности, герметичности, радиационной стойкости материалов, безопасности и др.

При ядерных испытаниях опытного образца КЯЭУ был получен ресурс 1,5 года. Ресурс отдельных узлов при автономных испытаниях составил около трех лет.

Начиная с 1974 года завод «Двигатель» (г. Таллин) выпускал полномасштабные опытные образцы реакторных блоков, на которых проводились теплофизические, электроэнергетические, прочностные, позднее и ядерные энергетические испытания. Этап сборки реакторного блока завершался в ЦКБМ на стенде «Байкал» – специальном стенде, на котором проводилась термовакуумная обработка систем и их заправка теплоносителем и газами (рис. 2.10).



*Рис. 2.10. Общий вид стенда «Байкал» (ЦКБМ)*

Цезиевый блок заправляется цезием на специальном стенде на завершающем этапе его изготовления и в готовом виде монтируется на РБ. Основные технические характеристики КЯЭУ «Енисей»:

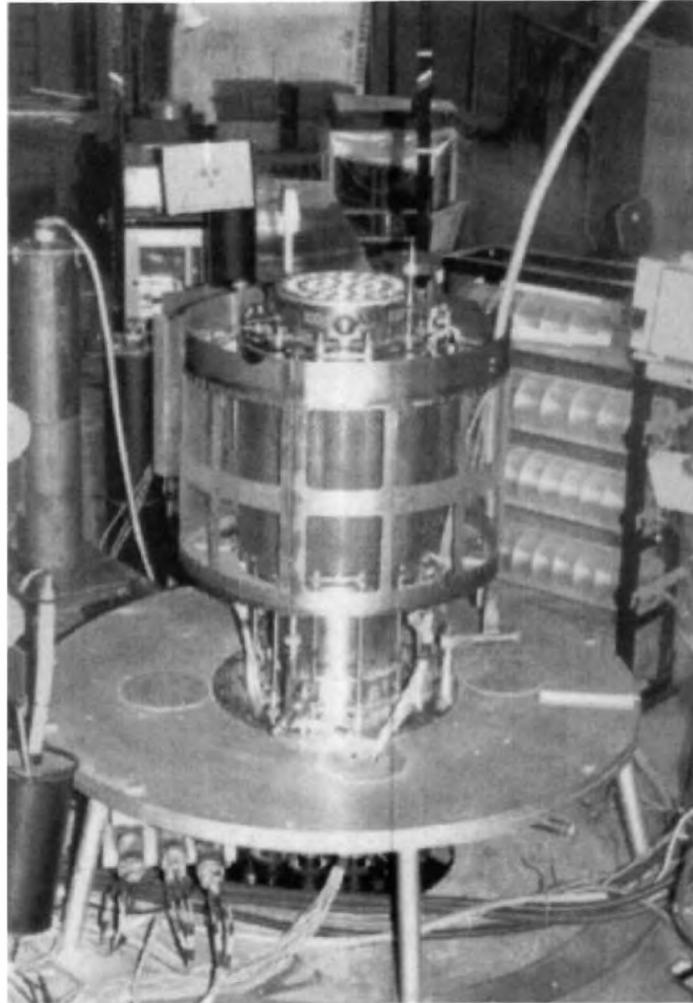
Максимальная электрическая мощность на клеммах реакторного блока, отдаваемая потребителю, кВт	5, 5
Род тока	Постоянный
Напряжение, В	27
Тепловая мощность реактора, кВт	Не более 136
Максимальная температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	550
Максимальная температура эмиттера, °С	1650
Ресурс, подтвержденный при ядерных испытаниях, год	1,5
Масса реакторного блока, кг	1000
Габариты РБ	
длина, мм	3900
максимальный диаметр, мм	1400
Радиационная обстановка в плоскости диаметром 1,5 м на расстоянии 6,5 от центра активной зоны:	
флюенс нейтронов с энергией > 0,1 МэВ, н/см <sup>2</sup>	5 × 10 <sup>12</sup>
экспозиционная доза гамма-излучения, Р	5 × 10 <sup>5</sup>

Заключительная операция изготовления РБ – сдаточные электроэнергетические испытания с контролем выходных электрических параметров, автономным пуском и наработкой несколько сотен часов на номинальном режиме.

Физический пуск реактора, в процессе которого происходят загрузка ядерного топлива, контроль нейтронно-физических характеристик реактора и тарировка ионизационных камер, производится на полностью собранном (без термочехла) и проверенном РБ. В принципе загрузка реактора ядерным топливом может быть как завершающей операцией изготовления, так и операцией наземной эксплуатации (предстартовой подготовки) РБ и КЯЭУ.

Процесс проведения физпуска и загрузки ядерного топлива был успешно отработан и проверен практически на целом ряде ядерных прототипов РБ на нейтронно-физическом стенде «Нарцисс» ИАЭ (рис. 2.11).

При разработке реактора были внесены конструктивные изменения. Наиболее существенные доработки были обусловлены «внешними» причинами:



*Рис. 2.11. Нейтронно-физический стенд «Нарцисс» с прототипом реактора «Енисей»*

- переход от 31-канальной конструкции реактора к 37-канальной (без увеличения диаметральных размеров реактора) и увеличение на 25 мм высоты активной зоны (вследствие соответствующего увеличения рабочей зоны ЭГК) для повышения выходной мощности рабочей секции;
- изменение схемы действия осевых нагрузок на РБ на участке выведения в связи с переходом на схему размещения РБ на КА «реактором вниз»;
- изменение конструкции торцевых элементов реактора вследствие модернизации НПО «Луч» концевых частей ЭГК.

Отработка ЭГК во многом определяла надежность и ресурс реактора. Весь период отработки КЯЭУ в НПО «Луч» шла напряженная и кропотливая работа по доводке параметров ЭГК. Одними из главных являлись проблемы герметичности ЭГК и стабильности величины межэлектродного зазора, исключаяющей короткое замыкание пары

эмиттер–коллектор. Первая, в основном, обуславливалась работоспособностью концевых металлокерамических узлов. Вторая – конструкцией дистанционаторов межэлектродного зазора и конструктивной схемой связи эмиттер–коллектор в условиях высоких рабочих температур и нестационарных режимов. Обе проблемы со временем были решены. Существенными и также успешно решенными были проблемы геометрии эмиттера при ресурсном распухании ядерного топлива, технология получения высокопрочной монокристаллической структуры молибденового эмиттера, технология нанесения вольфрамового покрытия на поверхность эмиттера для повышения КПД ТЭП и ряд других проблем. Все эти уникальные работы хронологически были проведены в четыре этапа, приведшие на практике к созданию ЭГК четырех поколений, каждое из которых превосходило предыдущее по надежности и ресурсу, а параметры ЭГК подтверждались автономными испытаниями, заключительными из которых были петлевые и реакторные испытания.

#### **Основные массогабаритные параметры реактора:**

Размер активной зоны, мм:	
высота	375
диаметр	260
Масса (без теплоносителя), кг	290
Габариты, мм:	
высота (размер между крышками гелиевых камер)	800
диаметр по радиальному отражателю	412

#### **Тепловая характеристика номинального режима КЯЭУ:**

Температура топлива максимальная, °С	2000
Температура эмиттера максимальная, °С	1650
Температура коллектора средняя ЭГК, °С	750
Температура теплоносителя средняя, °С	500
Температура верхней крышки гелиевой камеры, °С	700
Температура на поверхности радиального отражателя, °С	680

По программе экспериментальной отработки реактора был проведен большой объем испытаний элементов реактора, автономных и комплексных, в составе РБ, испытаний реактора в целом.

Физические характеристики реактора исследовались и отрабатывались по реакторным целевым программам:

- отработка нейтронно-физических характеристик;
- отработка распределения тепловыделений в активной зоне;
- отработка методики по физическому взвешиванию реактивности блоков замедлителя.

По этим программам определялись и отрабатывались важнейшие параметры и характеристики реактора: начальная подкритичность, высота топливных сердечников, величина загрузки топливом по урану-235, температурный эффект реактивности, браковочные признаки блоков замедлителя, ресурсные изменения реактивности, эффективность органов регулирования, распределение энерговыделения по топливным сердечникам. Отработка велась на нейтронно-физических сборках, прототипах реакторных блоков и на опытных образцах РБ при ядерно-энергетических испытаниях.

#### **Основные нейтронно-физические характеристики:**

Диаметр активной зоны, мм	260
Высота активной зоны, мм	375
Количество ЭГК в активной зоне	37
Количество поворотных органов регулирования в боковом отражателе	12
Загрузка урана-235 в активной зоне, кг	25
Эффективный коэффициент размножения нейтронов (органы регулирования выведены, холодное состояние), $K_{эф}$	1,005
Суммарный температурный эффект реактивности, $\Delta K/K$	0,012
Эффективность 12 органов регулирования $\Delta K/K$	0,055
Коэффициент неравномерности тепловыделения:	
по радиусу активной зона, $K_r$	1,1
по высоте активной зоны, $K_z$	1,26
Ресурс, обеспеченный запасом реактивности, лет	3

Характеристики реактора отрабатывались по общеобъектовым целевым программам:

- исследование радиационной стойкости материалов;
- отработка процессов вывода на мощность и регулирования;
- отработка ядерной, радиационной и токсической безопасности;
- отработка герметичности и ряд других характеристик.

Результатом обработки стал достигнутый полуторагодовой ресурс при наземных ядерных испытаниях реакторного блока.

По результатам разделки и материаловедческим исследованиям элементов реактора гарантируемый ресурс составил не менее 3 лет.

### **2.3. Результаты комплексных испытаний КЯЭУ «Енисей»**

В соответствии с общими техническими требованиями к КЯЭУ, действующими в нашей стране, установка «Енисей» прошла полный цикл наземной обработки, включая ее комплексные испытания на стендах ЦКБМ с электронагревом (рис. 2.10), транспортные и динамические испытания на соответствие действующим нагрузкам при транспортировке и выводе КА на орбиту, испытания в криогенных камерах на захлаживание и как завершающий этап испытаний – ядерные энергетические испытания в ИАЭ им. И.В. Курчатова на стендах «Р» (установки Я-23, Э-31, Я-81, Э-38) и в НИИП на стенде «Т» (установки Я-24, Э-82). Схема ядерных энергетических испытаний представлена на рис. 2.12.

Для проведения этих испытаний на ГСЗ «Двигатель» было изготовлено ~30 опытных образцов КЯЭУ «Енисей». Из них шесть опытных образцов прошли ядерные энергетические испытания на ядерных стендах «Р» и «Т», специально созданных для наземных ядерных испытаний.

Таким образом, к 1988 году установка «Енисей» прошла полный цикл наземных испытаний, необходимых перед этапом летных конструкторских испытаний (ЛКИ) в составе КА, подтвердив требуемые по ТЗ параметры и ресурс 1,5 года с возможностью достижения ресурса не менее 3 лет. Основные результаты испытаний представлены в табл. 2.2.

В составе шести реакторных блоков, прошедших ядерные энергетические испытания, прошли обработку 93 ЭГК 2-го поколения и 111 ЭГК 3-го поколения (Е-16МО). Проведенные мероприятия по повышению надежности ЭГК привели к тому, что в ходе ядерных испытаний ЭГК 3-го поколения не было зарегистрировано ни одного отказа приборов и подтверждена стабильность основных параметров реактора-преобразователя (Я-81) в течение 12 380 ч. Ресурсные изменения основных параметров реактора-преобразователя опытного образца КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2») представлены на рис. 2.13.

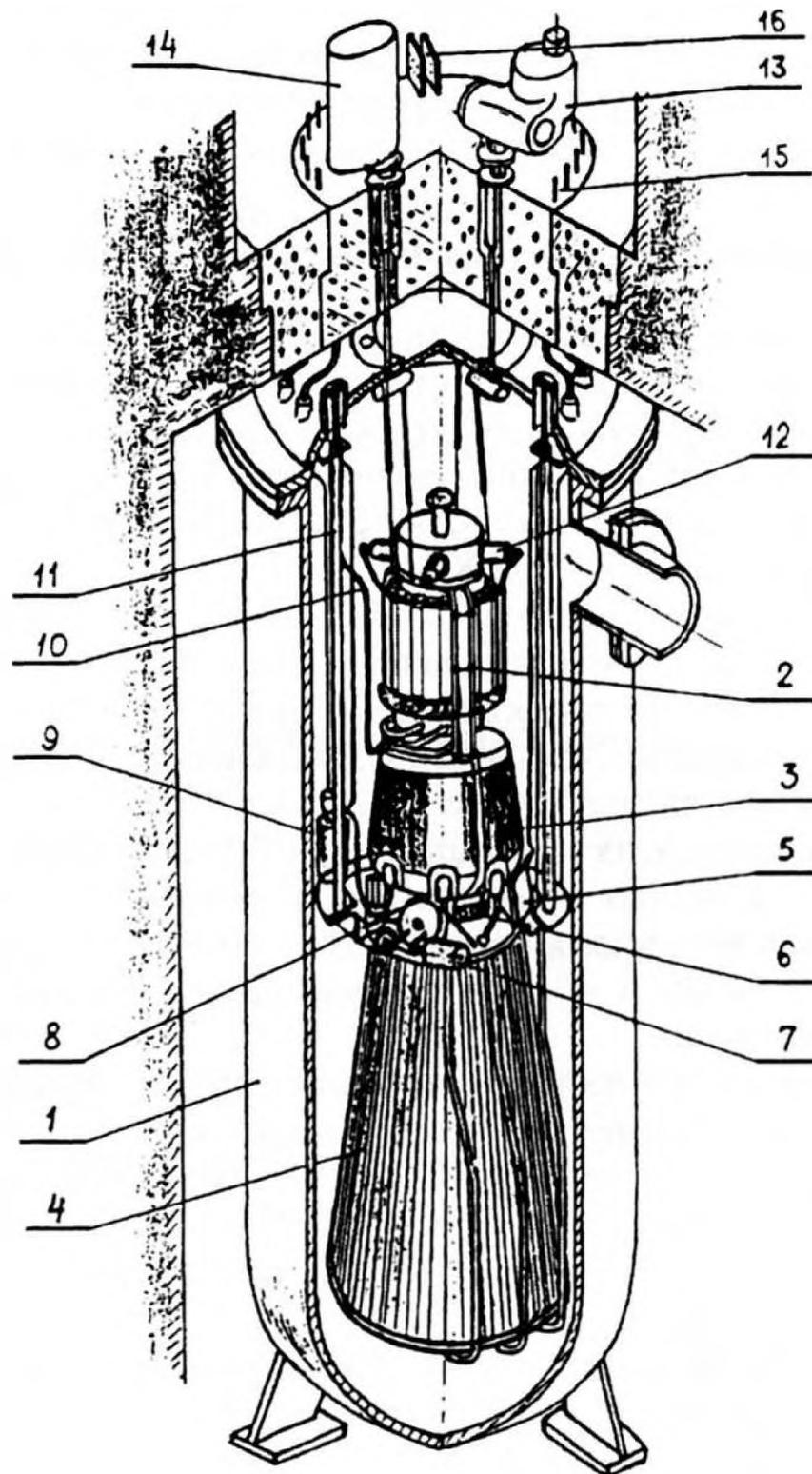


Рис. 2.12. Схема ядерных энергетических испытаний:

1 – вакуумная камера; 2 – реактор-преобразователь; 3 – блок защиты; 4 – холодильник-излучатель; 5 – привод автоматического регулирования; 6 – блок датчиков давления; 7 – привод блока рабочего тела; 8 – блок рабочего тела; 9 – конденсатор термостата; 10 – токовая шина; 11 – стойка люльки; 12 – токовыводы; 13 – привод аварийной защиты стендовый; 14 – привод ручного регулирования; 15 – проходки; 16 – силовые шины

Таблица 2.2

### Информация о реакторных блоках и ЭГК, прошедших ядерные энергетические испытания

Реакторные блоки	Годы испытаний	Время испытаний, ч	Поколение ЭГК	Количество ЭГК
Я-23	1975–1976	5 000	2	31
Э-31	1978	3 000	2	31
Я-24	1979–1981	14 000	2	31
Я-81	1980–1983	12 380	3	37
Я- 82	1983–1984	8 200	3	37
Э-38	1986	4 600	3	37

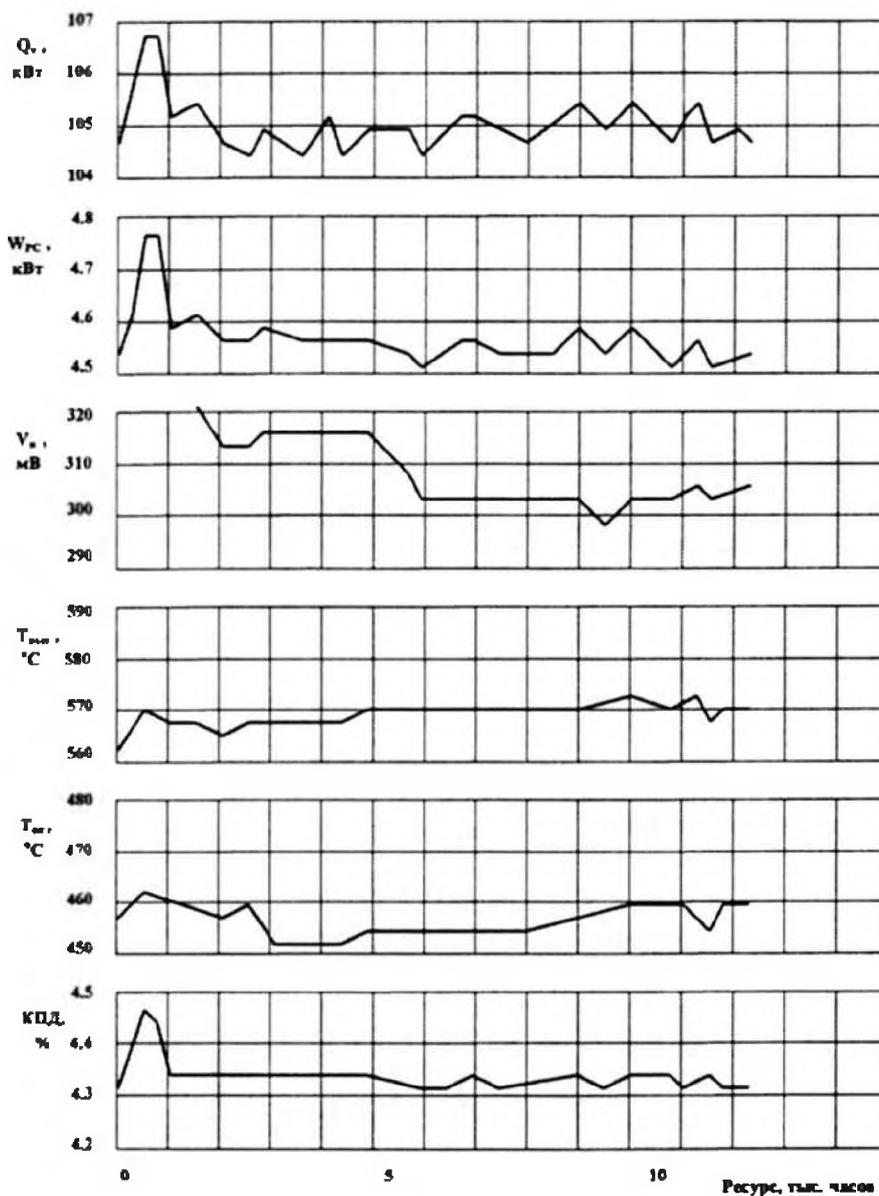


Рис. 2.13. Ресурсные изменения основных параметров реактора-преобразователя опытного образца КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2») Я-81

КПД, вычисленное как отношение  $W_{рс}$  (при  $V_{рс} = 29$  В) к  $Q_r$ , сохраняет значение  $4,33 \pm 0,03\%$  на всей временной базе испытаний  $\sim 1,5$  года.

Последующая разделка ЭГК в горячих камерах и изучение структуры топлива, распухания и деформации катодов позволили создать модель поведения ЭГК в ресурсе и провести расчетное прогнозирование ресурса ЭГК типа Е-16 МО по предельно допустимой деформации эмиттера.

На рис. 2.14 представлены прогнозные зависимости ресурса эмиттера ЭГК типа Е-16 МО от выходной электрической мощности КЯЭУ «Енисей».

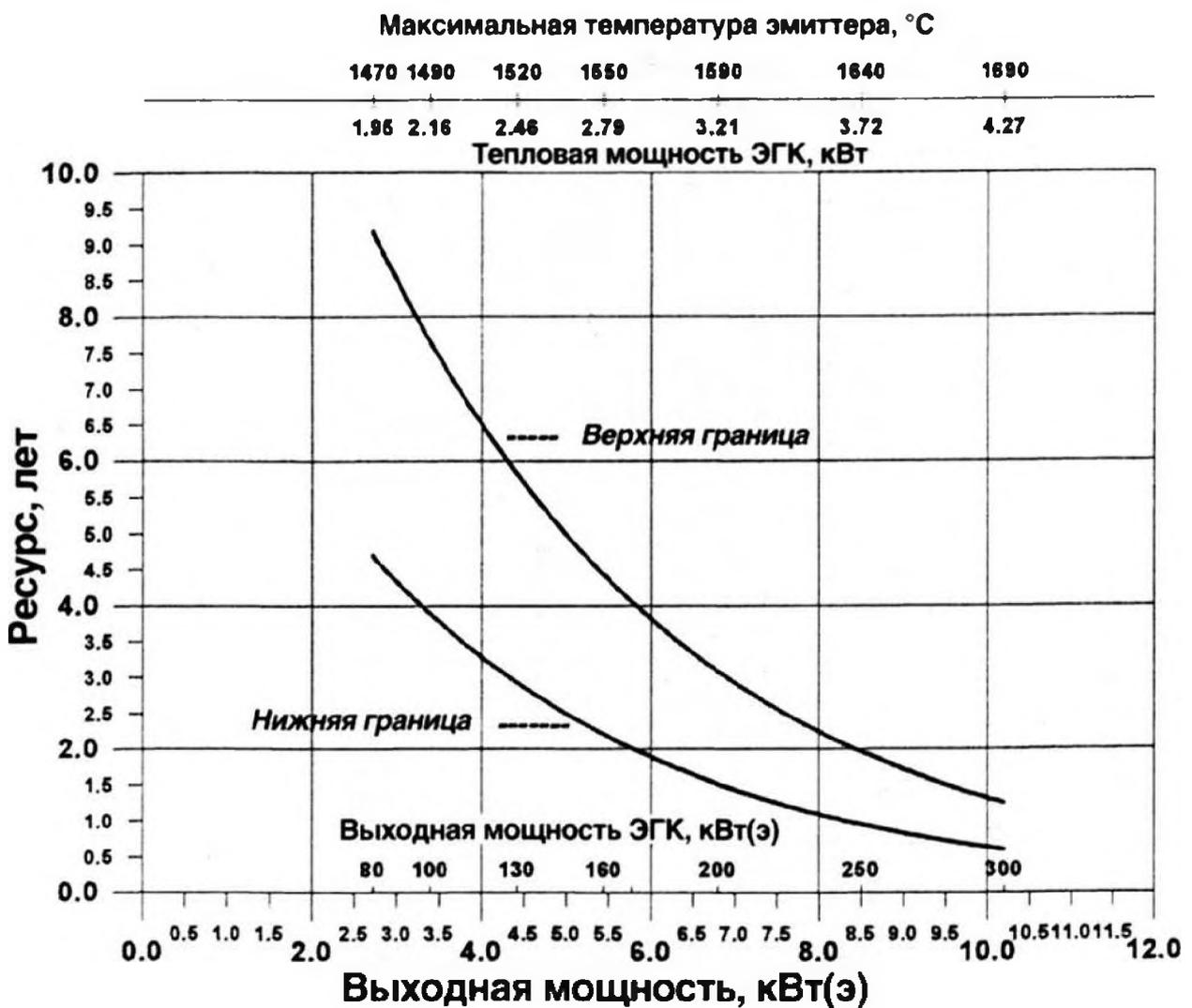


Рис. 2.14. Прогнозная зависимость ресурса по допустимой предельной деформации эмиттера ЭГК типа Е-16 МО от выходной электрической мощности КЯЭУ «Енисей»

На графике приведены две кривые, соответствующие верхней и нижней границе оценки ресурса, что связано с разбросом экспериментальных данных по размерам зерен, и доле границ, занятых каналами. Таким образом, можно предположить, что в диапазоне полезной электрической мощности КЯЭУ «Енисей» от 4,5 до 5,5 кВт ресурс может составлять от 2,2 до 5,5 лет [18].

Разделка и изучение гидрида циркония после ядерных энергетических испытаний позволили так же сделать положительный вывод, что принятый для реактора способ защиты гидроциркониевых дисков от потерь водорода позволит гарантированно обеспечить ресурс установки в течение 3 лет [19].

После ядерных испытаний изучено также поведение блоков защиты (БЗ) пяти опытных образцов. На рис. 2.15 представлена зависимость распухания наполнителя LiH в блоке защиты от времени испытаний и флюенса нейтронов всех энергий, Н/см<sup>2</sup>.

За время ~15 000 ч испытаний опытного образца Я-24 распухание наполнителя  $\Delta V/V$  составило ~2,3% при суммарной величине свободного объема ~9%. Из проведенного анализа можно сделать заключение, что условия функционирования радиационной защиты

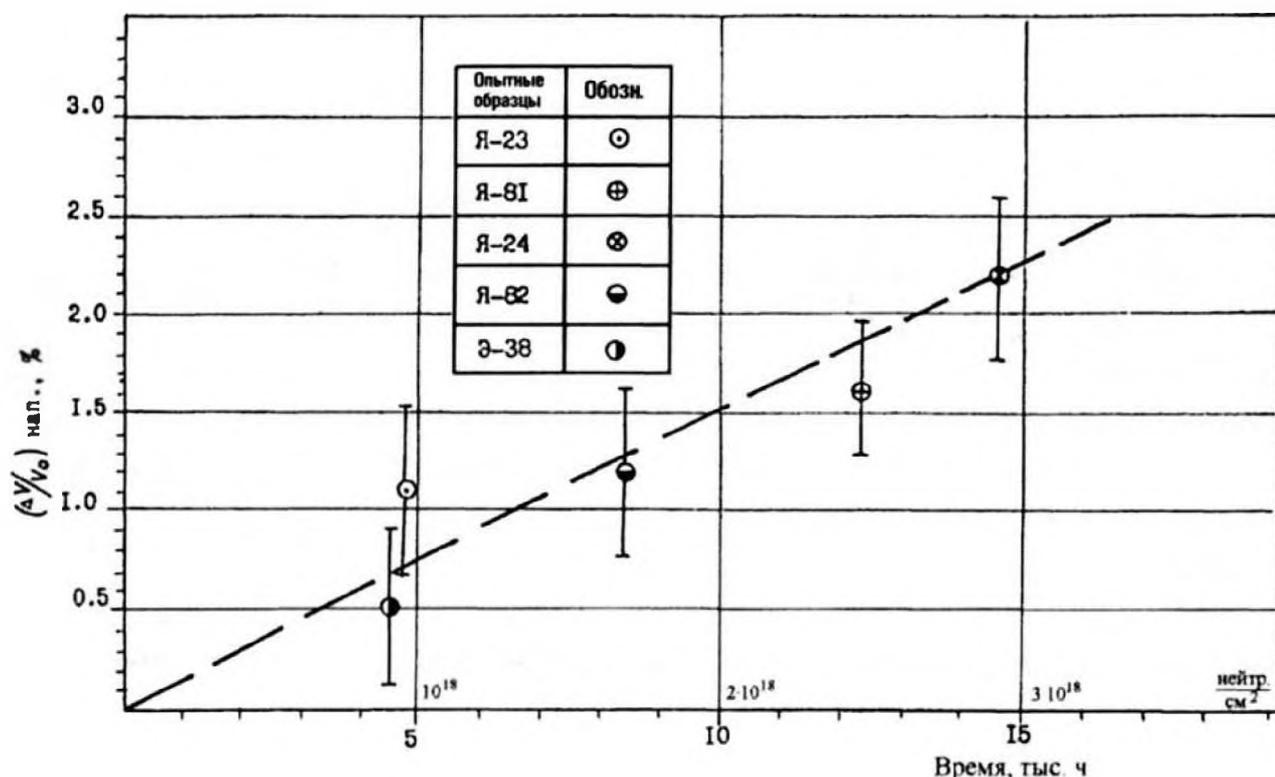


Рис. 2.15. Зависимость распухания наполнителя в блоке защиты от времени испытаний установок и флюенса нейтронов всех энергий, нейтр./см<sup>2</sup>

и принятая технология изготовления обеспечат работоспособность защиты в течение 3 лет.

Накопленный опыт при отработке всех других элементов установки главным конструктором (ЦКБМ) (блока рабочего тела, приводов регулирования, подвесок ионизированных камер, электромагнитного насоса и других) позволил прогнозировать получение ресурса установок не менее 3 лет.

По результатам экспериментальной отработки КЯЭУ «Енисей» могла быть рекомендована к летным испытаниям.

Однако в 1988 году вследствие экономических трудностей в стране, перестройки экономики и реакции на аварию на Чернобыльской АЭС разработка космического аппарата в КБПМ была прекращена и, соответственно, прекратилось финансирование работ по КЯЭУ «Енисей».

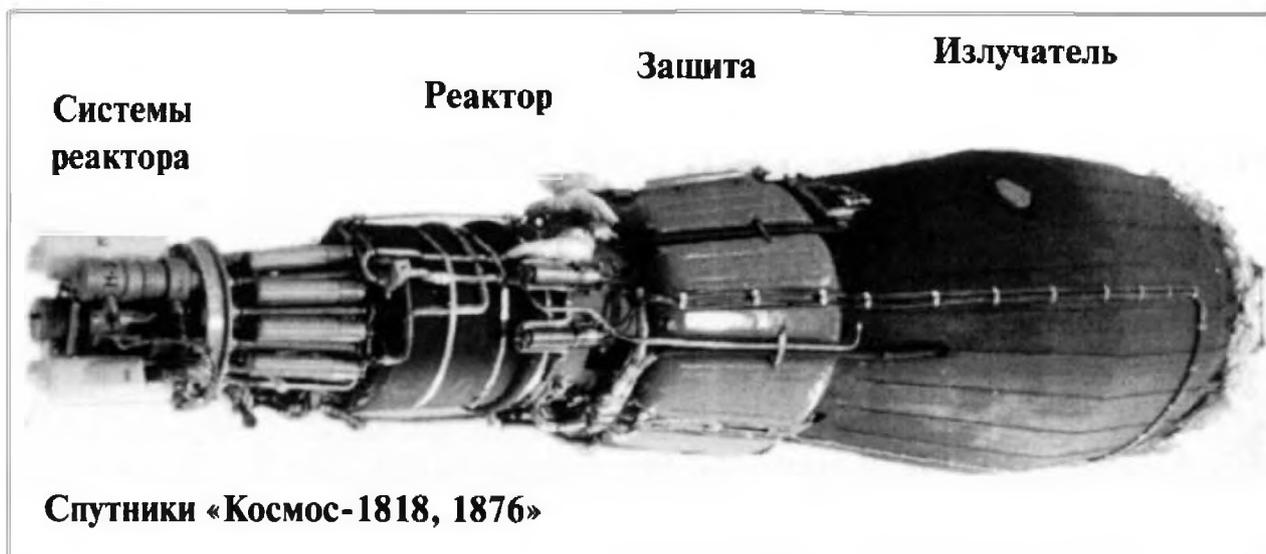
Разработчик КА предоставил возможность распоряжаться созданным заделом по установке «Енисей» (включая опытные образцы, подготовленные для проведения ЛКИ) на усмотрение разработчиков установки.

К этому времени вариант термоэмиссионной установки «Топаз», разрабатывавшийся в ГП «Красная Звезда» и ФЭИ, с многоэлементными ЭГК с меньшим требуемым ресурсом успел пройти наземные межведомственные испытания и был испытан в составе двух космических аппаратов серии «Космос-1818» и «Космос-1867» с ресурсом 0,5 и 1,0 год.

Это были первые в мире испытания в космосе термоэмиссионных ядерных энергоустановок [16]. Общий вид и основные параметры космической ядерной термоэмиссионной энергетической установки «Топаз» представлен на рис. 2.16.

Для сравнения на рис. 2.17 представлены российские космические ядерные энергетические установки первого поколения с термоэмиссионными преобразователями энергии (КЯЭУ «Топаз» и КЯЭУ «Енисей»).

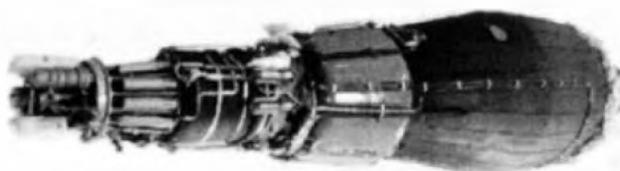
В табл 2.3 и 2.4 представлены для сравнения результаты наземных и летных испытаний КЯЭУ в СССР и США с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием.



Мощность электрическая, кВт	5
Мощность тепловая, кВт	150
Загрузка урана-235, кг	11,5
Масса, кг	980

Рис. 2.16. Общий вид и основные параметры космической ядерной термоэмиссионной энергетической установки «Топаз», разработанной ГП «Красная Звезда» и ГНЦ РФ–ФЭИ

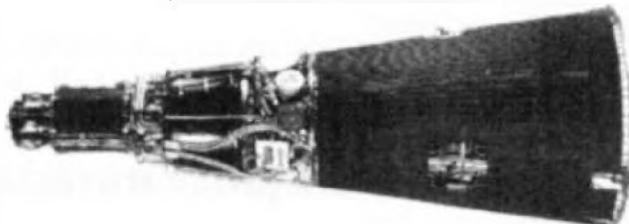
Космическая ядерная энергетическая установка «Топаз»



Разработка ГП «Красная Звезда»

Мощность электрическая, кВт	5,0
Мощность тепловая, кВт	150
Загрузка урана-235, кг	11,5
Масса, кг	980
Подтвержденный ресурс, год	1

Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей»



Мощность электрическая, кВт	4,5-5,5
Мощность тепловая, кВт	≤135
Загрузка урана-235, кг	25
Масса, кг	980 (780 с легким блоком защиты)
Подтвержденный ресурс (при ядерных энергетических испытаниях), год	1,5 (с прогнозом до 3,0 лет)

Рис. 2.17. Российские космические ядерные энергетические установки первого поколения с термоэмиссионными преобразователями энергии

Таблица 2.3

### Основные результаты наземных ядерных энергетических испытаний КЯЭУ в СССР и США

Параметр	«Ромашка»	SNAP-10а	«БУК»	«Топаз»	«Енисей»
Тепловая мощность, кВт	28,2	38	100	150	≤135
Электрическая мощность, кВт	0,45	0,4	2,5	5	5
Ресурс, мес.	24	14	3–6	6–12	18
Количество запусков	1	1	4	7	6
Год запуска	1964	1965	1966–1984	1970–1984	1975–1988

Таблица 2.4

### Основные результаты летных испытаний КЯЭУ в США и СССР

Параметр	SNAP-10а	«БУК»	«Топаз»
Тепловая мощность, кВт	42	100	150
Электрическая мощность, кВт	0,54	2,5	7
Ресурс, мес.	1,4	6	12
Масса, т	0,45	0,9	1,2
Количество запусков	1	32	2
Год запуска	1965	1970–1988	1987

## 2.4. Ядерные энергодвигательные установки

Проведенные проработки и результаты исследований последних лет показывают, что использование ядерных энергодвигательных установок (ЯЭДУ) различных схем, обеспечивающих космический аппарат электрической энергией и тягой, особенно перспективно для решения различных космических задач. Наиболее целесообразно и эффективно применение ЯЭДУ в составе транспортно-энергетических модулей (ТЭМ) для выведения КА на рабочие орбиты (в том числе на геостационарные и межпланетные) и энергоснабжения бортовых систем в течение всего времени их активного функционирования. Энергодвигательные установки

могут быть реализованы как с использованием ядерной, так и солнечной энергии. Одним из примеров ядерной энергодвигательной установки является проект NEPSTP, выполненный в США (фирмой APL) с использованием российской КЯЭУ «Топаз-2» («Енисей») и электрореактивных двигателей.

При этом ядерные энергодвигательные установки могут быть созданы на основе сочетания разработанных технологий ядерных термоэмиссионных установок типа «Топаз» со встроенными в активную зону электрогенерирующими каналами либо с вынесенными из активной зоны термоэмиссионными преобразователями, либо с комбинированными схемами преобразования и технологии наиболее эффективных электрореактивных двигателей типа стационарных плазменных двигателей на ксеноне с удельным импульсом  $\sim 1800$  с или ионных двигателей. Этот вариант ЭДУ является наиболее подготовленным к реализации и обеспечивает вывод на высокоэнергетические орбиты (ГСО, межпланетные орбиты) наибольшей массы полезных нагрузок. Недостатком схемы является длительное (до 0,5 года) время вывода полезной нагрузки на ГСО даже при условии форсирования ( $\sim 2,5$  раза) энергоустановки по электрической мощности.

Основные проектные характеристики термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения, рассматриваемые для энергодвигательных установок, представлены в табл. 2.5.

Более короткое время вывода (от десятка часов до  $\sim 1$  месяца) полезных нагрузок на ГСО может быть обеспечено при создании энергодвигательных установок на основе технологии ракетных двигателей на водороде и турбомашинных замкнутых систем преобразования энергии либо создании бимодальных реакторов, обеспечивающих получение в реакторе как электроэнергии с помощью термоэмиссионных преобразователей, так и тяги за счет продувки активной зоны водородом.

Для миссий, требующих быстрого выведения (особенно в случае пилотируемых межпланетных полетов), предпочтительно использование ЯЭДУ на базе ЯРД с турбомашинным способом преобразования энергии, а для транспортировки грузов – ЯЭДУ на базе ЯЭУ с электрореактивной двигательной установкой (ЭРДУ).

Как показывают оценки, выведение с использованием электрореактивных двигателей и ядерной энергоустановки обеспечивает

## Проектные характеристики термоэмиссионных ЯЭУ 2-го поколения на основе унифицированных ЭГК, совмещенных с активной зоной [16]

Характеристика	ЯЭУ-25М	ЯЭУ-25	ЯЭУ-50	ЯЭУ-100		ЯЭУ-400
Тип РП	На промежуточных нейтронах			На быстрых нейтронах		
Теплоноситель	Сплав NaK			Сплав NaK	Литий	
Полезная электрическая мощность, кВт:						
форсированный режим	35	65–87	100	150	150	400
номинальный режим	10	25	50	70	80	160
Максимальная температура теплоносителя, К	873			973	1173	
Загрузка по урану-235, кг	32,5	38,5	51	250	230	280
Габариты ЯЭБ в стартовом положении, м:						
диаметр	3,0	3,3	3,7	3,7	3,7	3,7
длина	4,1	3,6	4,0	4,5	4,0	4,5
Масса ЯЭУ, кг	1820	3000	4200	5600	5200	7250
Удельная масса ЯЭУ (в расчете на форсированную мощность), кг/кВт(э)	55,7	37,5	40	37,3	34,7	18
Возможные средства выведения (тип ракеты-носителя)	«Русь»	«Протон», «Протон-М», «Ангара»		«Ангара-А5»		

существенную экономию средств, позволяя заменить тяжелые ракеты-носители ракетами-носителями среднего класса либо выводить на высокие орбиты полезные нагрузки в 2–3 большей массы.

**Ядерная энергетика для межпланетных полетов.** Использование ядерной энергетики может коренным образом изменить возможности межпланетных космических аппаратов. По сравнению с применяемыми в настоящее время двигательными установками для межпланетных полетов ядерные электроракетные двигательные установки (ЯЭРДУ), представляющие собой комбинацию ЯЭУ с ЭРД, обеспечат, во-первых, значительно более высокий прирост скорости и/или доставку более тяжелой полезной нагрузки или использование более дешевой ракеты-носителя и, во-вторых, использование траектории прямого движения с простыми программами полета без гравитационных маневров при сокращенном времени полета и расширенных «окнах запуска».

В результате с помощью ЯЭРДУ могут быть преодолены современные энергетические барьеры и осуществлены принципиально новые научные проекты. При проведении исследований в области внешних планет Солнечной системы (на расстояниях более 5 а.е.) ядерная энергетика является безальтернативной, так как мощность солнечных батарей в этой области падает до неприемлемого уровня. При этом для решения целого ряда научных задач ближайшей перспективы достаточен уровень электрической мощности порядка 30–100 кВт как на этапе перелета, так и на этапе исследований. Таким образом, энергодвигательное обеспечение таких КА может быть реализовано с помощью ТЭМ на основе однорежимных ЯЭУ или бимодальных ЯЭДУ умеренной мощности [9–15].

Благодаря использованию ядерной энергетики продолжительность большинства экспедиций даже в отдаленные области Солнечной системы не превысит 10 лет, а длительность полетов в области до Юпитера – 5 лет.

Многие специалисты считают, что для такой задачи по совокупности факторов наиболее продвинута к практической реализации на сегодняшний день концепция ЯЭУ с термоэмиссионным реактором-преобразователем энергии. Ближайшим конкурентом такой ЯЭУ по степени готовности является ЯЭУ с турбомашинным преобразованием энергии, обладающим более высоким энергетическим потенциалом и нуждающимся в дальнейшем совершенствовании технологии.

Внедрение ядерной энергетики в космос может быть ускорено в случае ее реализации на основе международного сотрудничества. В настоящее время складываются благоприятные предпосылки для такого взаимодействия. Деятельность NASA по реализации инициатив Президента США может достаточно хорошо коррелироваться с российскими работами по космической ядерной энергетике. Это является хорошей основой для сотрудничества в данной области.

Россия может внести достойный вклад в реализацию двигатель-но-энергетического комплекса марсианской экспедиции на основе имеющегося уникального научно-технического задела по космической ядерной энергетике. Для экспериментальной отработки КЯЭУ 2-го поколения может быть использована после некоторой модернизации созданная разработчиками экспериментальная стендовая база. Экспериментальная база РНЦ «Курчатовский институт» для отработки нейтронно-физических характеристик реакторов, отработки защиты и параметров термоэмиссионных преобразователей представлена на рис. 2.18–2.23.

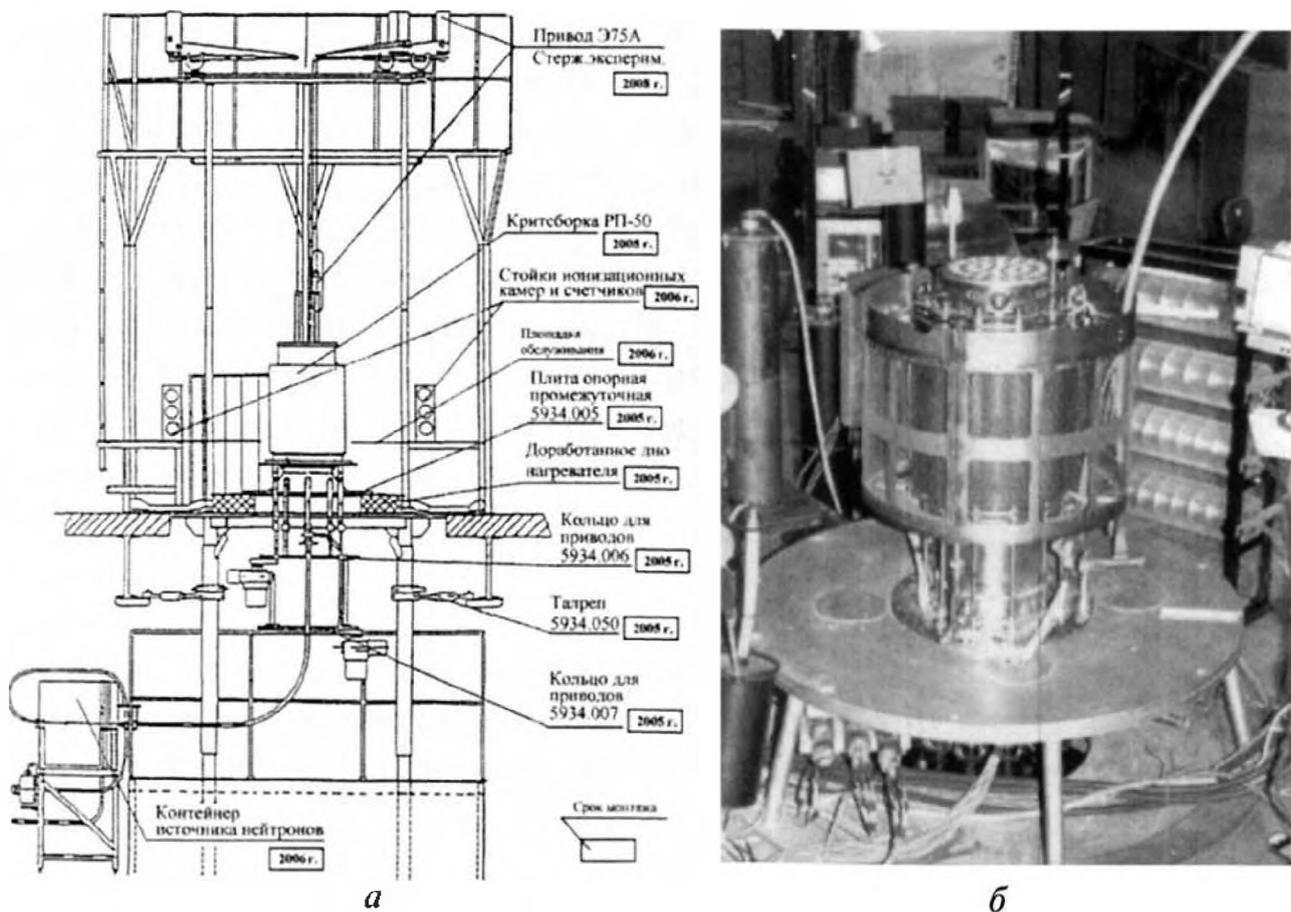
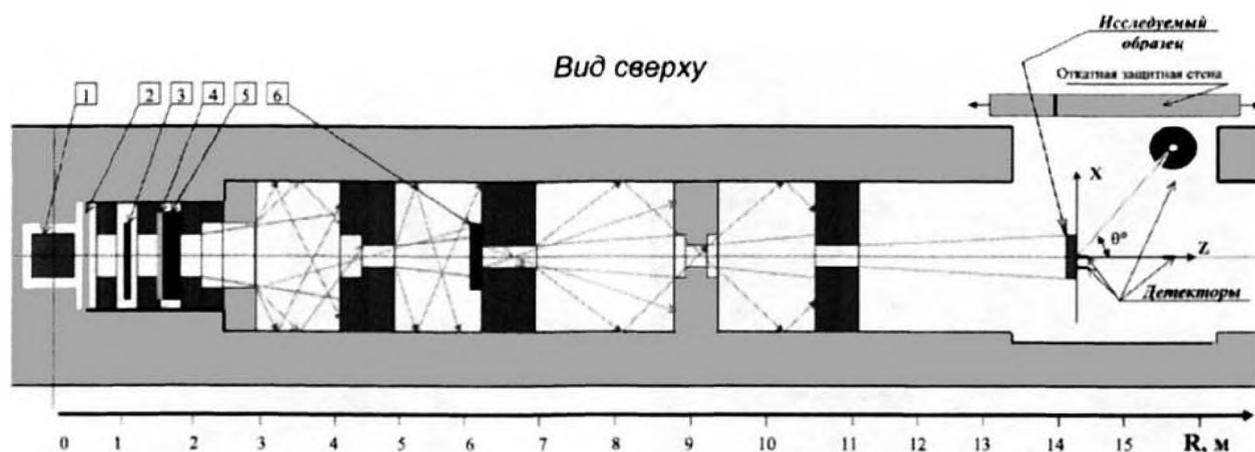


Рис. 2.18. Критические стенды «Аksamит» (а) и «Нарцисс» (б)



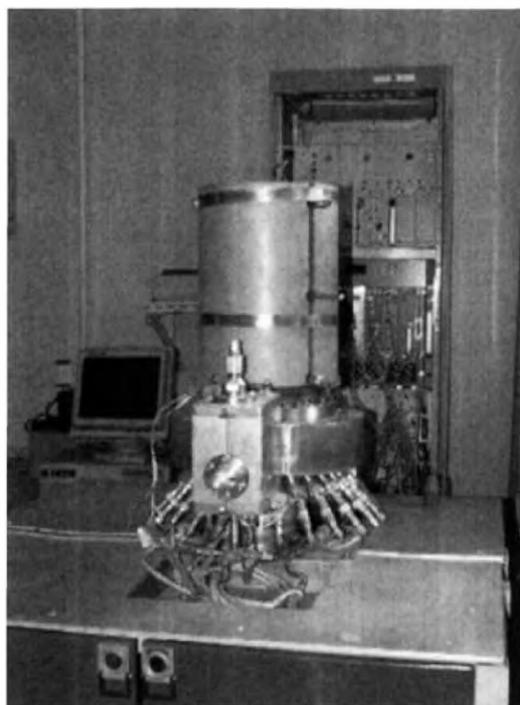
**Схема формирования «нейтронного» пучка**

- 1 - водо-водяной реактор ОР мощностью 300 кВт
- 2 - нейтронный фильтр В<sub>2</sub>С толщиной 40 мм
- 3 - фотонный фильтр Рb толщиной 30 мм
- 4 - нейтронный фильтр (СН)<sub>2</sub>В толщиной 5 мм
- 5 - фотонный фильтр Рb толщиной 70 мм
- 6 - фотонный фильтр Рb толщиной 35 мм

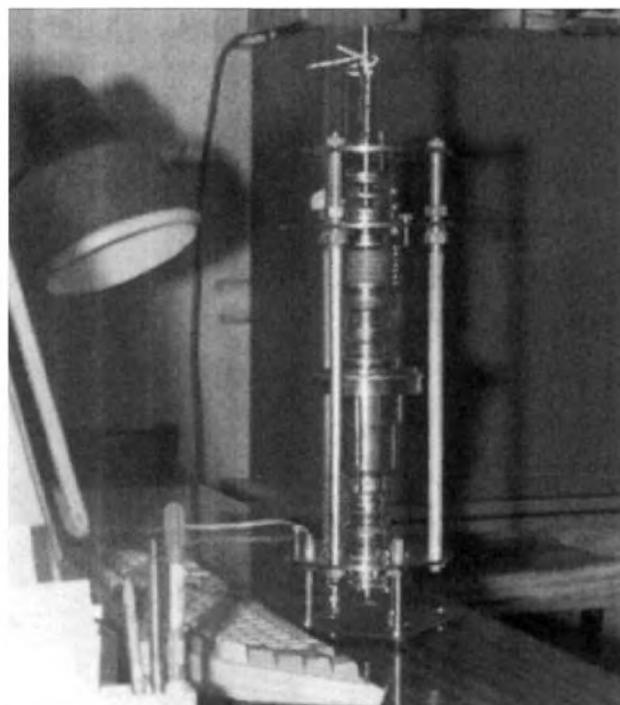
**Направления экспериментальных исследований на установке ОР-М:**

- 1. Исследования и оптимизация БЗ из LiH и профилированных слоев тяжелого компонента с повышенной кратностью ослабления гамма-излучения.
- 2. Изучение эффективности и оптимизация массовых характеристик локальных защит для экранировки оборудования приборных модулей
- 3. Измерение выхода вторичного гамма-излучения из защитных и конструкционных материалов
- 4. Нейтронно-гамма сканирование защитных композиций и изделий техники в пучке Ø 1,5 м.

Рис. 2.19. Установка ОР-М



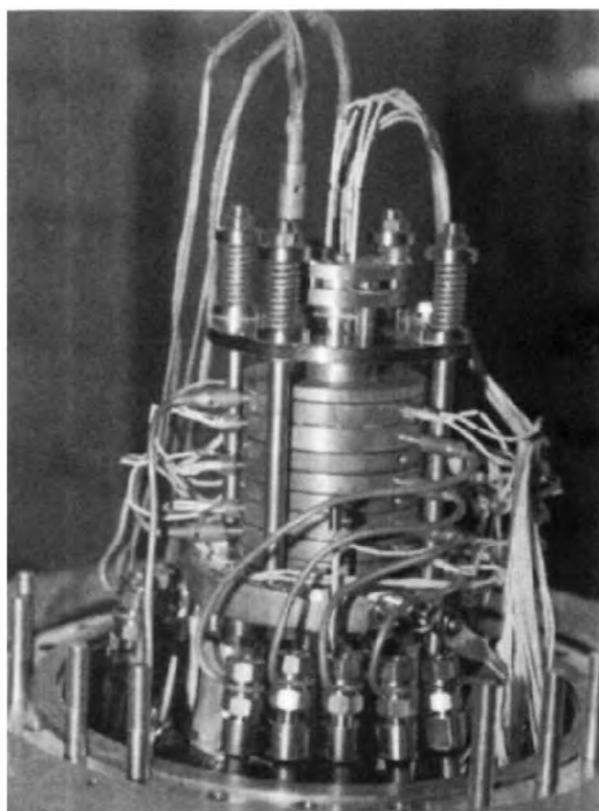
а



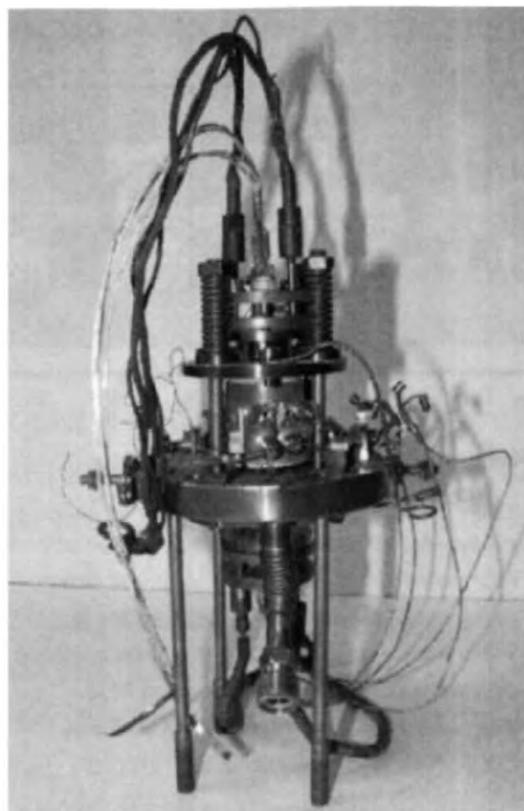
б

Рис. 2.20. Экспериментальная база по исследованию термоэмиссионных преобразователей:

- а – экспериментальный стенд с автоматизированной системой измерений;
- б – макет цезий-бариевого таситрона



*а*



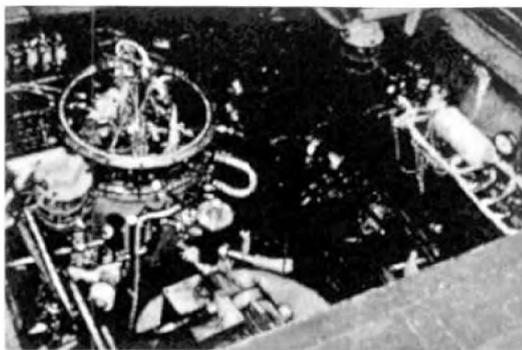
*б*

*Рис. 2.21. Экспериментальная база по исследованию термоэмиссионных преобразователей:*

*а – ТЭП с цилиндрической геометрией электродов; б – ТЭП с плоской геометрией электродов*



*Рис. 2.22. Экспериментальная база по исследованию термоэмиссионных преобразователей (стенд для исследования газорегулируемой тепловой трубы)*



Электровакуумный стенд



Система нагрева и измерения ВАХ ЭГК

Рис. 2.23. Экспериментальная база по исследованию термоэмиссионных преобразователей (испытательный комплекс «НОТ-КОМПАС»)

**Технологии создания ядерных энергодвигательных установок и их использование для коммерческих применений.** Создание космических ядерных энергетических и энергодвигательных установок является весьма сложным и дорогим процессом. Он доступен только экономически развитым странам, обладающим ядерными технологиями получения высокообогащенных ураном-235 (до 90–96%) высокотемпературных топливных материалов ( $UO_2$ ,  $UC_2$ ,  $UN$ , карбидные и карбонитридные композиции), специальных высокотемпературных материалов активных зон и отражателей (гидрида циркония, металлического бериллия) и уникальных по прочностным свойствам конструкционных материалов, таких, как монокристаллы молибдена, вольфрама (в том числе обогащенного по изотопу 184), и их сплавов. При высоких температурах сброса тепла в космических реакторах (600–900 °С) для охлаждения активных зон должны применяться высокотемпературные жидкометаллические теплоносители — эвтектика К–Na и Li.

Особенностью космических ядерных энергетических установок является недоступность прямого вмешательства человека в работу системы в космическом пространстве, в связи с чем главными задачами при создании этой техники являются высокая надежность всех компонентов системы, автоматизированная система управления, исключение возможности ремонта в процессе эксплуатации и многое другое. При этом параметры работы космических ядерных реакторов лежат на пределе работы материалов, что также требует нетрадиционных решений как в процессе разработки конструкции, так и в процессе доводки.

Ряд технических решений при создании космических реакторов не имеет аналогов ни в реакторостроении, ни в других отраслях промышленности. Успешное решение задачи создания первого поколения космических ядерных энергетических установок не могло быть обеспечено без разработки принципиально новых высоких технологий.

Представляем некоторые из созданных высоких технологий в качестве примера:

- технология высокотемпературных топливных материалов, высокообогащенных по изотопу  $U^{235}$  (дикарбид урана, сплавы уран–молибден, двуокись урана, карбидные и карбонитридные композиции), и тепловыделяющих элементов малогабаритных активных зон реакторов на быстрых и промежуточных нейтронах;
- технология получения высокотемпературных сверхпрочных монокристаллических материалов сплавов (Mo–Nb и W, обогащенный по изотопу 184 для оболочек эмиттеров ЭГК);
- технология работы с высокотемпературными жидкометаллическими теплоносителями (эвтектика K–Na и Li);
- технология высокотемпературных и среднетемпературных термоэлектрических материалов и термоэлектрических преобразователей на их основе;
- технология нанесения защитных покрытий на гидридциркониевый замедлитель, обеспечивающая удержание водорода в течение длительного до 5–7 (до 10) лет ресурса при температуре до 630 °С;
- технология горячего прессования бериллия, обеспечивающая необходимую радиационную стойкость бериллиевых отражателей и органов регулирования ЯЭУ в течение заданного ресурса;

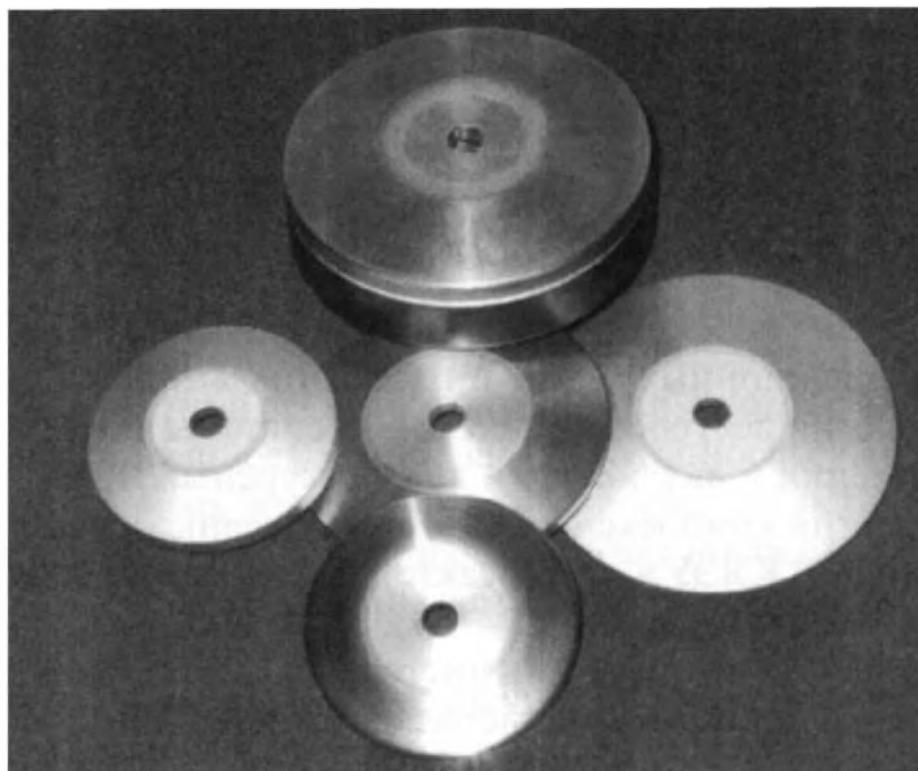
- технология обработки и оптимизации конструкции тепловыделяющего сердечника одно- и многоэлементного канала с целью подтверждения длительного ресурса;
- технология подготовки и обезгаживания электрогенерирующих каналов для натуральных испытаний автономно и в составе ЯЭУ;
- технология обоснования нейтронно-физических характеристик реактора КЯЭУ и обоснования ядерной безопасности на всех этапах штатной эксплуатации ЯЭУ и в аварийных ситуациях;
- технология обоснования нейтронно-физических характеристик радиационных защит и их изготовления;
- технология построения и создания системы автоматического управления и диагностики долгоресурсных ЯЭУ;
- технология комплексных наземных ядерных энергетических испытаний КЯЭУ и послереакторных исследований основных элементов установки;
- технология изготовления эмиттера, коллектора и электроизоляции на основе монокристаллов окиси алюминия и окиси скандия;
- технология изготовления герметичных электрических проходов.

Большое число приведенных высоких технологий будет использоваться для КЯЭУ 2-го поколения и применений в интересах создания изделий, оборудования и веществ, востребованных внутренним и внешним рынками.

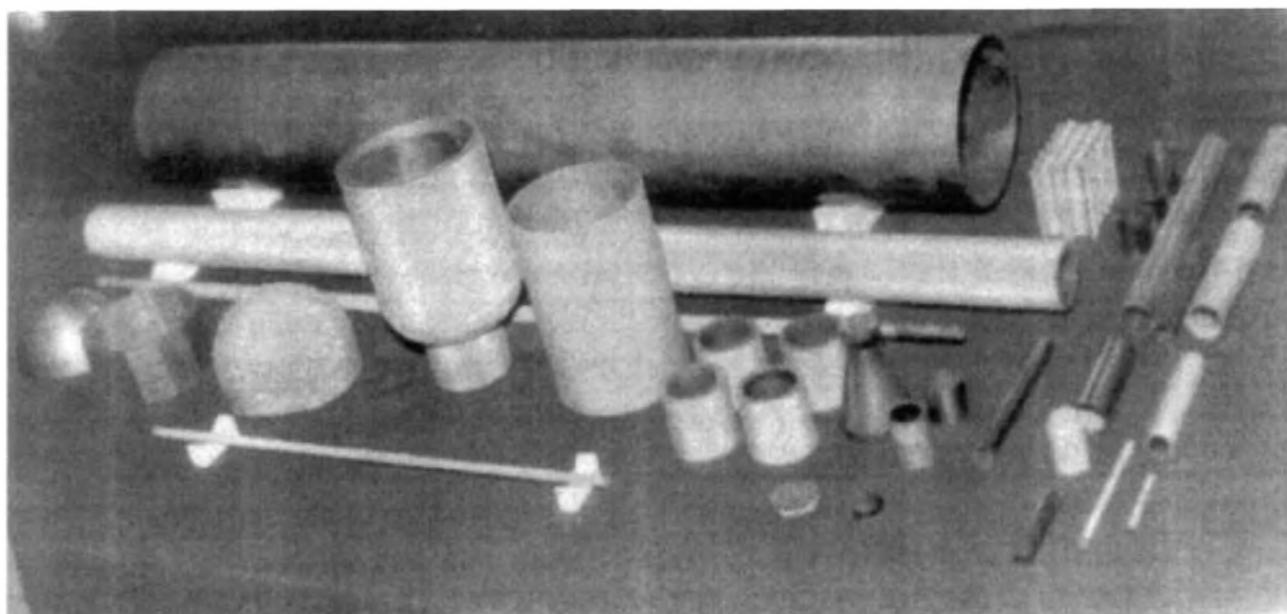
Некоторые из высоких технологий оказались полезными для использования в смежных областях:

- наземной ядерной энергетике,
- системах прямого преобразования,
- медицине,
- лазерной технике,
- электровакуумной технике,
- оптике,
- часовой промышленности,
- холодильной технике и других областях человеческой деятельности.

На рис. 2.24–2.29 показаны примеры использования некоторых из перечисленных высокотехнологичных продуктов в различных областях.



*Рис. 2.24. Аноды для мощных рентгеновских трубок медицинского назначения с W- и W-Re-покрытием, полученные газофазным осаждением*



*Рис. 2.25. Крупногабаритные изделия из вольфрама и его сплавов, полученные газофазным осаждением*

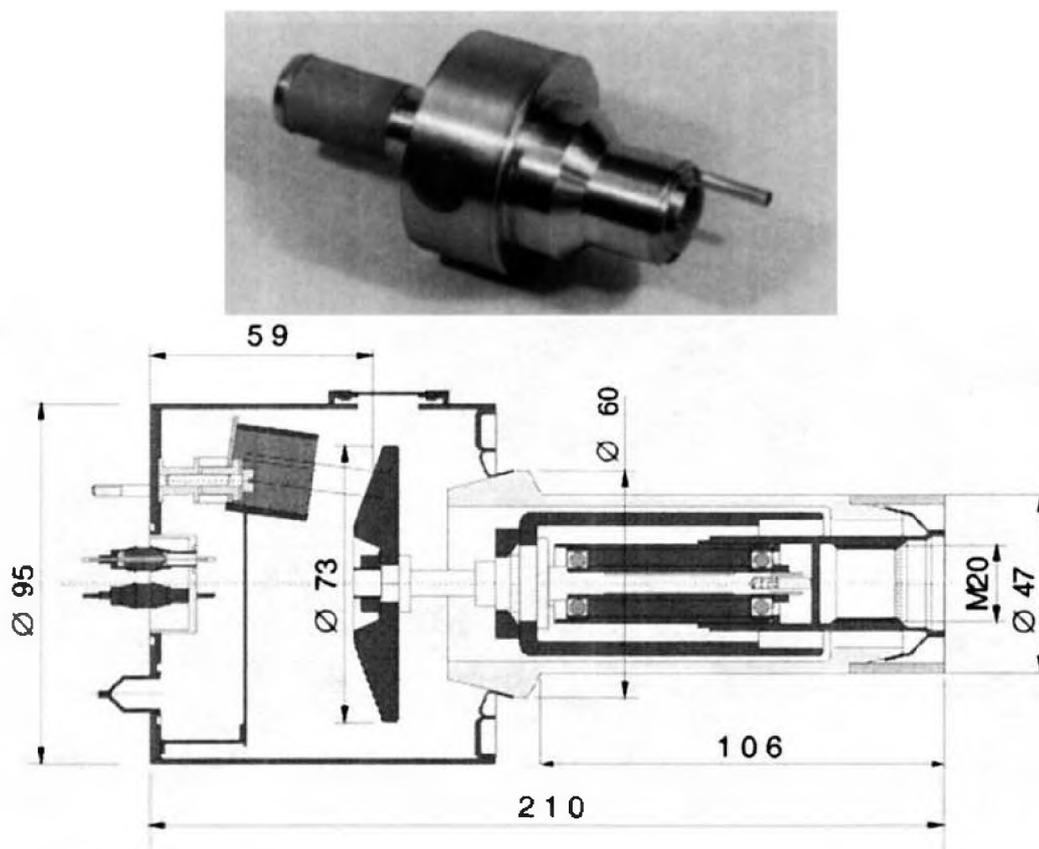
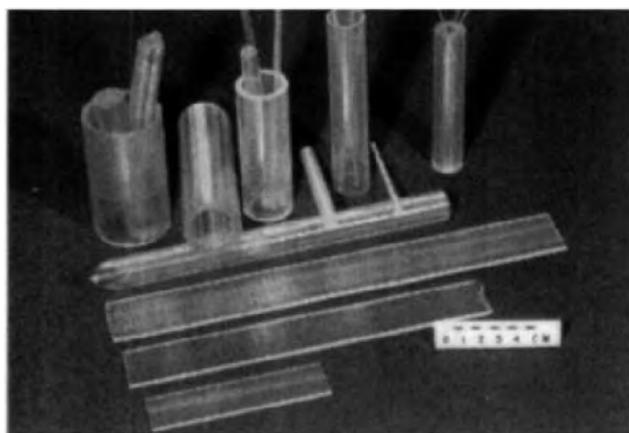


Рис. 2.26. Металлокерамическая вращающаяся анодная рентгеновская трубка



а

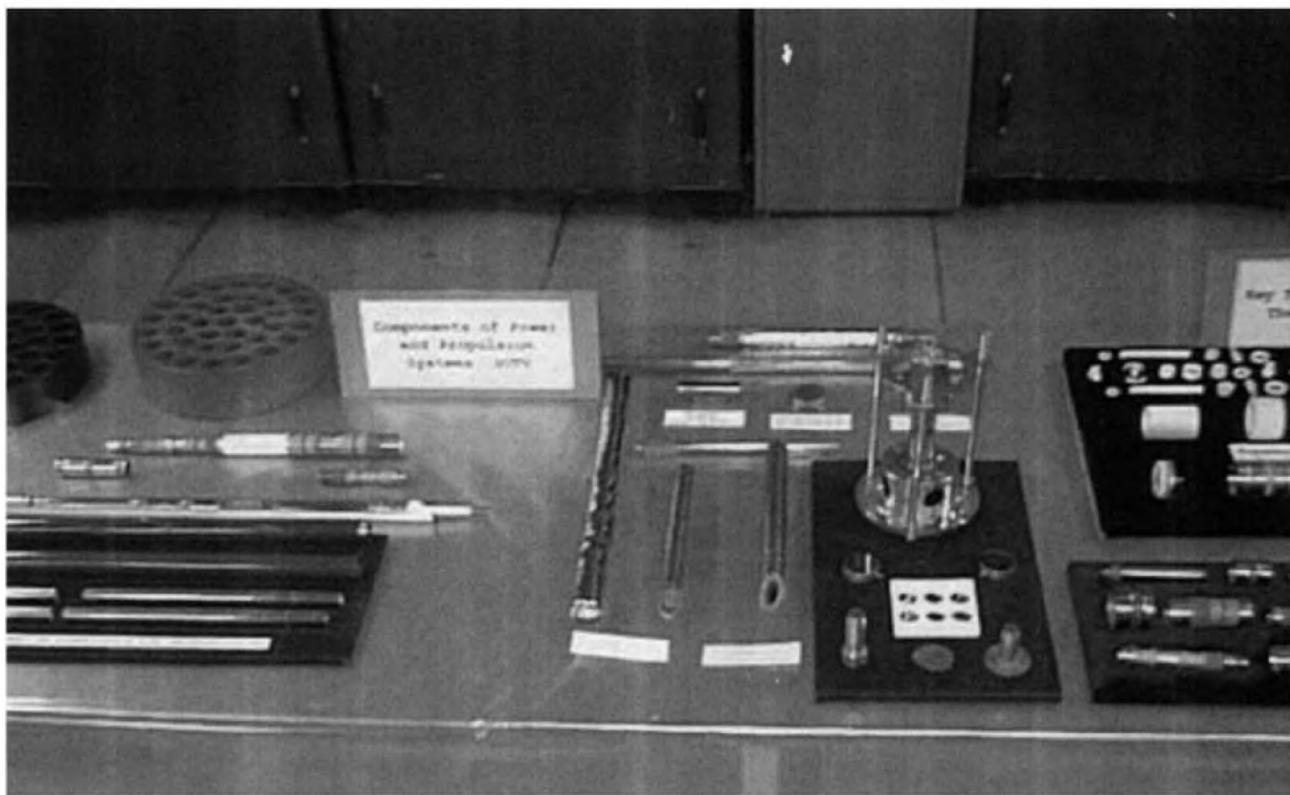
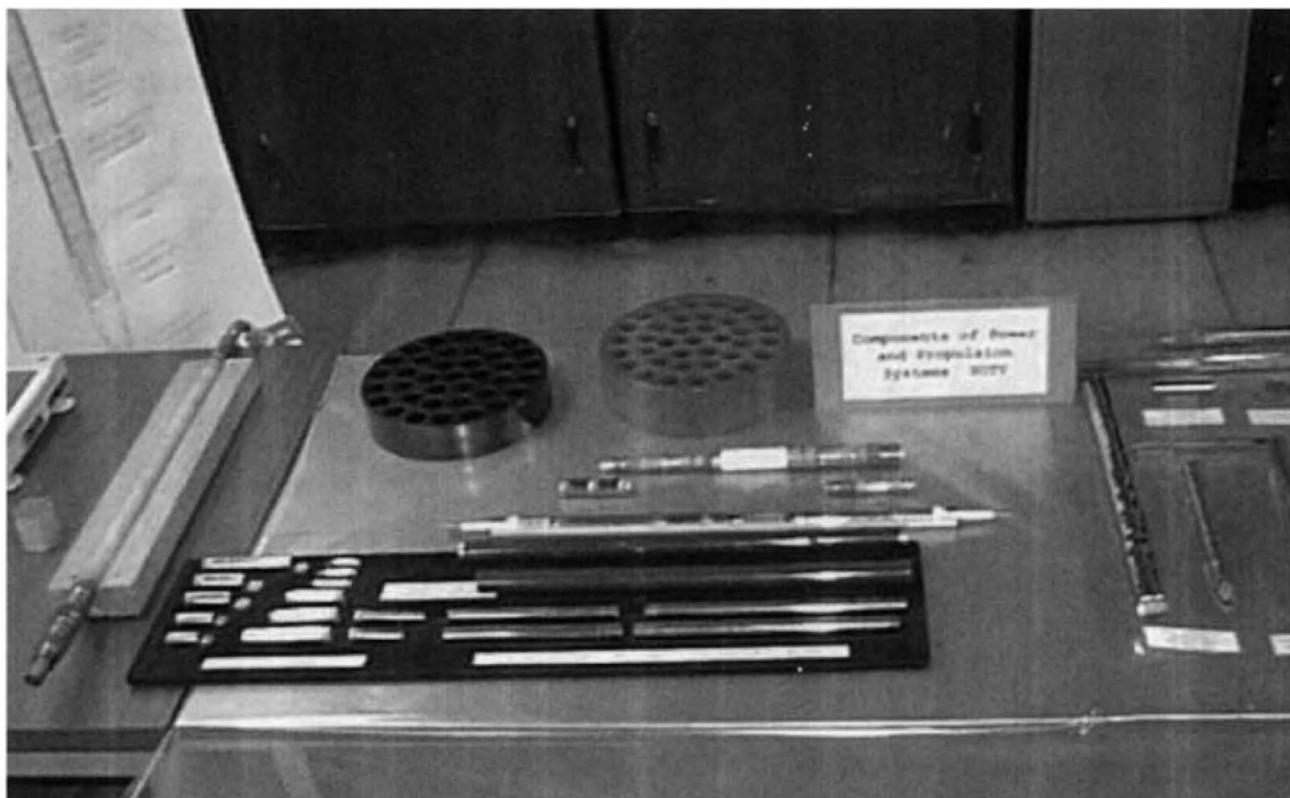


б



в

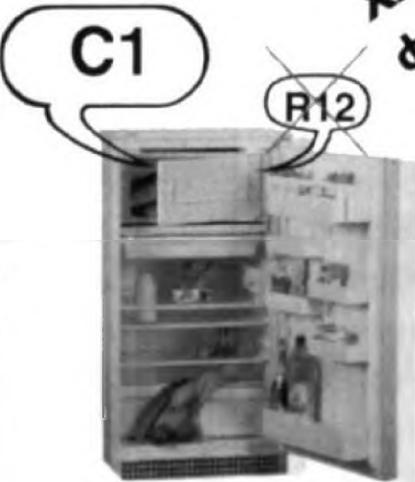
Рис. 2.27. Искусственный корунд (лейкосапфир) и изделия из него: а – профилированные кристаллы; б – шлифованные и полированные изделия; в – металлокерамические узлы с изоляторами из лейкосапфира



*Рис. 2.28. Монокристаллы – конструкционные материалы XXI века*

**НОВИНКА**

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ  
ОЗОНОНЕРАЗРУШАЮЩИЙ  
ХЛАДАГЕНТ С1 — заменитель  
фреона R12**



- По своим показателям не уступает R12.
- Может применяться в холодильниках, спроектированных для работы на R12, без изменения их конструкции.
- Освоено опытное производство /ТУ-2412-040-00480689-94/.
- Защищен патентом РФ № 2088626 от 27.04.94 г. и международным приоритетом в Patent Cooperation Treaty-PCT/RU94/00191 от 27.04.94 г.
- На 43-й Международной выставке изобретений (43-nd World Exhibition of Invention, Research and Innovation) АО «ИНЕРТЕК» за хладагент С1 получил диплом и бронзовую медаль.



Рис. 2.29. Озононеразрушающий хладагент С1

## 2.5. Люди, создавшие КЯЭУ «Енисей»

Около 25 лет заняли работы по созданию ядерной термоэмиссионной космической установки с одноэлементными ЭГК, получившей название КЯЭУ «Енисей» по имени Сибирской реки, на берегах которой расположена фирма КБ «Прикладной механики» МОМ, руководимая в то время М.Ф. Решетневым. КБ ПМ МОМ являлась Генеральным заказчиком КЯЭУ «Енисей» с реактором-преобразователем на основе одноэлементных электрогенерирующих каналов электрической мощностью до 6.8 квт и ресурсом до 3.0 лет для разрабатываемой КБ ПМ МОМ космической системы непосредственного телевизионного вещания (СНТВ) на удаленные районы Дальнего Востока. Создание такой установки являлось уникальной задачей, не имевшей аналогов в Мире. Решение этой задачи Постановлением Правительства СССР было поручено предприятиям МСМ: Центральному конструкторскому бюро машиностроения (ЦКБМ) – Главному конструктору энергетической установки; Институту атомной энергии – научному руководителю; ПНИТИ-технологу и конструктору по разработке ЭГК и элементов активной зоны; Сухумскому физико-техническому институту-разработчику системы автоматического управления. Разработчики установки осознавали сложность поставленной задачи подтверждения надежности, ресурса и стабильности электроэнергетических характеристик. Для разработки был принят термоэмиссионный реактор-преобразователь на основе одноэлементных ЭГК, имевший принципиальные, положительные особенности, указанные в разделе 2.1, и допускаящий отработку электроэнергетических характеристик и ресурса на стендах с электрическим нагревом, что расширяло возможности отработки ЭГК, реактора и установки в целом. Решить поставленную задачу было невозможно на основе разрабатываемого в то время предприятием ТМКБ «Союз» Г.М.Грязновым реактора «Топаз» с многоэлементными ЭГК примерно той же мощности, но существенно (примерно на порядок) меньшим ресурсом. Первые предложения по схеме одноэлементных ЭГК были сделаны группой Ленинградского физико-технического института во главе с Ю.А.Дунаевым, М.Б.Барабашем и др. с участием сотрудника ИАЭ Г.В. Компанейца. На рис.2.30 приведена копия авторского свидетельства на изобретение №30025 с приоритетом от 17 ноября 1964г.

Разработку конструкции одноэлементного ЭГК для космического термоэмиссионного реактора осуществляли в то время специалисты ЦКБМ Б.Г. Оглоблин, Ю.К.Вишняков, А.А. Пташников и др. Первоначально разработанная конструкция одноэлементного ЭГК была предложена ТМКБ «Союз» МАП (Степанову, В.Г. Грязнову Г.М.) для разрабатываемого ими с 1963г.термоэмиссионного реактора-преобразователя «Топаз». Однако, это предложение не было принято, т.к. для его реализации требовалось разработать новый вариант реактора-преобразователя [16]. Для разработки термоэмиссионного реактора-преобразователя с одноэлементными ЭГК по предложению ЦКБМ (Бычков И.Ф., Аркин Э.С.А.) была сформирована решением Комиссии С.М.СССР новая кооперация предприятий в составе ЦКБМ, ИАЭ, ПНИТИ и была разработана конструкция нового термоэмиссионного реактора-преобразователя, первоначально получившая название МАК-Э, а затем (после получения ТЗ от КБПМ, МОМ) – «Енисей». На рис. 2.31 представлена копия объединенного авторского свидетельства № 43943 с приоритетом от 26 мая 1965 г на оба варианта термоэмиссионных реакторов с одноэлементными и многоэлементными ЭГК. Авторами реактора - преобразователя с многоэлементными ЭГК зарегистрированы:

- от ТМКБ «Союз» - Грязнов Г.М., Лившиц Г.А., Туманов Б.П. и др.;
- от ФЭИ – Засорин И.П., Купцов Г.А., Понимаш И.Д., Иевлева Ж.И. и др.

От кооперации организаций ЦКБМ, ИАЭ, ПНИТИ авторами реактора – преобразователя с одноэлементными ЭГК зарегистрированы:

- от ЦКБМ – Бычков И.Ф. , Аркин Э.С.А., Оглоблин Б.Г. , Вишняков Ю.К. , Пташников А.А.;
- от ИАЭ – Пономарев-Степной Н.Н. , Мосевичкий И.С. , Компаниец Г.В.;
- от ПНИТИ – Киселев А.А.

После выхода Постановления Правительства СССР о разработке для СНТВ КЯЭУ с термоэмиссионным реактором-преобразователем на основе одноэлементных ЭГК эта задача явилась одной из главных задач для созданной кооперации, в которую вошли разработчики системы управления КЯЭУ – Сухумский Физико-технический институт (Гведцители И.Г.).

Кроме указанных предприятий в работах по КЯЭУ «Енисей» принимали участие большое количество смежников по разработке (изготовлению) отдельных элементов установки:

- по электромагнитному насосу (НИИЭФА);
- по ионизационным камерам (НИИВТ);
- по конструкционным материалам (ЦИИИ «Прометей»);
- по технологии К-На теплоносителя (ФЭИ);
- по блоку защиты (НЗХК);
- по технологии изготовления блоков из гидрида циркония и их защите от утечки водорода (ВНИИНМ);
- по материалам органов регулирования (НИИСИ, ВИАМ) и др.

В процессе разработки КЯЭУ «Енисей» была создана крупная экспериментально-стендовая база для автономной отработки, как отдельных элементов, так и установок в целом, включая стенды ядерных энергетических испытаний (стенд комплекса «Р» в ИАЭ и стенд НИИП), на которых проведены испытания 6 головных блоков КЯЭУ «Енисей» с ресурсом до 1,5 лет. В ЦКБМ создан стенд «Байкал» для контрольных и приемосдаточных испытаний установок с электронагревом. На ГСЗ «Двигатель» в Эстонии (г. Таллин) создан специальный сборочный участок для изготовления головных блоков КЯЭУ «Енисей». Для отработки КЯЭУ «Енисей» всего было изготовлено 31 изделие с разной степенью приближения к штатному, которые комплектовались различными модификациями (3-х поколений) ЭГК, двумя вариантами реакторов-преобразователей (с 31 и 37 ЭГК), двумя вариантами блоков радиационной защиты (с легкой и тяжелой компонентами) для различных условий работы по гамма и нейтронному излучению в области приборного контейнера. Большой объем отработки был проведен для подтверждения электроэнергетических характеристик одноэлементных ЭГК на тепловых стендах и в петлях реакторов МР и ВВР в ИАЭ. Всего было испытано 15 петлевых каналов с максимальным ресурсом до 2 лет при стабильных электроэнергетических характеристиках. Такой же ресурс был достигнут и при испытаниях в СФТИ и ПНИТИ на стендах с электронагревом. На завершающей стадии работ для проведения летных испытаний были изготовлены 2 штатных изделия и несколько макетов для стыковки с космическим аппаратом. Однако, использовать их по назначению не удалось. В 1988 г из-за сокра-

щения средств на космические программы Генеральный Заказчик прекратил финансирование работ по ЛКИ установки «Енисей». На принятие этого решения также повлияла авария на Чернобыльской атомной станции в 1986 г.

В работах по созданию КЯЭУ «Енисей» участвовало большое количество специалистов от перечисленных предприятий. Всех их упомянуть в данной книге не представляется возможным. Ниже приведены фотографии и фамилии только основных участников работ.

КЯЭУ «Енисей» по объективным причинам не использовалась в космосе, но созданный при ее разработке задел, впоследствии, был использован при реализации российско-американской программы «Топаз». Установка не слетала в космос, но слетала в США и обратно, проложив путь к международному сотрудничеству в области высоких технологий.



Рис. 2.30 Одноэлементный ЭГК.  
Авторское свидетельство №30025



Рис. 2.31 Реакторы - преобразователи «Енисей» и «Топаз».  
Авторское свидетельство №43943

## Руководители работ по КЭЯУ «Енисей» в ЦКБМ



Черепанов П.З.



Аркин Э.-С.А.



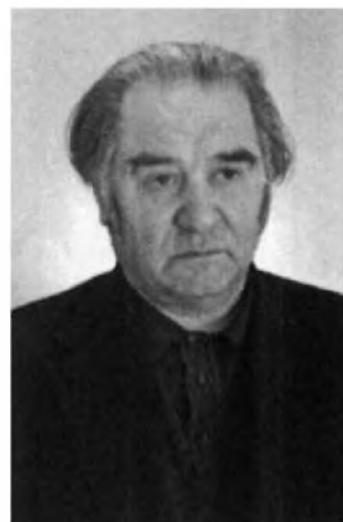
Никитин В.П.



Оглоблин Б.Г.



Антипов В.В.



Вишняков Ю.К.



Габрусев В.Н.



Дорф-Горский И.А.



Ельчанинов А.А.



Казеннов Б.Г.



Кириллов Е.Я.



Климов А.В.



Луппов А.Н.



Лутов Е.И.



Сахаров В.Н.



Синкевич В.Г.



Соколов Е.Н.



Фомичев В.В.

**Руководители работ по КЯЭУ «Енисей»  
в ИАЭ им. И.В. Курчатова**



Миллионщиков М.Д.



Пономарёв-Степной  
Н.Н.



Кухаркин Н.Е.



Нечаев.Ю.А.



Самарин Е.Н.



Косовский В.Г.



Усов В.А.



Глушков Е.С.



Компаниец Г.В.



Мосевичкий И.С.



Степеннов Б.С.



Дроздов А.А.



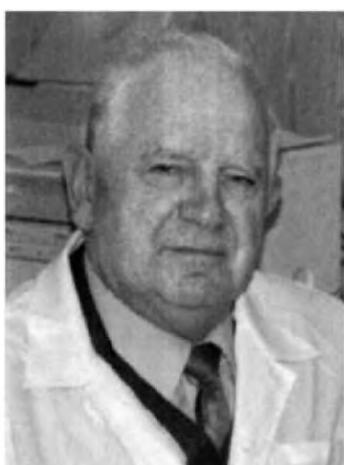
Дегальцев Ю.Г.



Слабкий В.Д.



Хрулёв А.А.



Мадеев В.Г.



Ухин Н.А.



Кайбышев В.З.

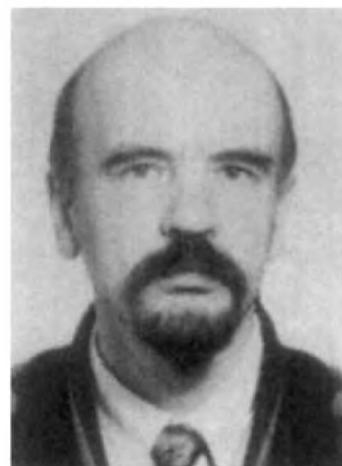
**Руководители работ по КЯЭУ «Енисей»  
в ПНИТИ (НПО «Луч»)**



Гвердцители И.Г.



Николаев Ю.В.



Выбыванец В.И.



Белоусенко А.П.



Гонтарь А.С.



Гординский В.Л.



Ерёмин С.А.



Кишмахов Б.Ш.



Кучеров Р.Я.



Лапочкин Н.В.



Рымашевский Г.А.



Сёмин Р.Н.



Цецхладзе Д.Л.



Чебоненко В.П.



Чижова Э.М.



Ястребков А.А.

**Руководители работ по САУ и КПА САУ КЯЭУ «Енисей»  
в СФТИ.**



Басин Ю.Г.



Браварец В.И.



Васильев С.И.



Венедиктов Ю.П.



Вознюк А.С.



Гриц Ю.А.



Джджуа А.С.



Журавлев П.П.



Олиферчук Н.Л.

**Список сотрудников ЦКБМ, принимавших активное участие  
в работах по КЯЭУ «Енисей»**

1	Антипов В.В.	31	Казеннов Б.Г.	61	Прошин Ю.Ю.
2	Аркин Э.-С.А.	32	Камалин Ю.А.	62	Предовский Ф.А.
3	Бариненков В.М.	33	Киселев В.А.	63	Прикот К.Н.
4	Батрунов А.Б.	34	Каширин А.А.	64	Пташников А.А.
5	Белоусов И.М.	36	Кириллов Е.Я.	65	Рева А.Ф.
6	Белоусов В.Г.	36	Климов А.В.	66	Рожков В.Ф.
7	Блохин О.И.	37	Киселев-Федоров В.П.	67	Романенко Ю.П.
8	Бочаров А.Ф.	38	Корешев М.Н.	68	Сазонов А.Г.
9	Богданов А.А.	39	Кузнецов Л.В.	69	Сахаров В.Н.
10	Бондаренко В.А.	40	Ларин А.С.	70	Свищев А.М.
11	Бугаев Л.К.	41	Лещев Н.И.	71	Синкевич В.Г.
12	Бусин С.П.	42	Лисочкин Г.А.	72	Скобелев В.Е.
13	Василенко В.Г.	43	Лосев Л.Н.	73	Спицлоз В.С.
14	Вишняков Ю.К.	44	Лутов Е.И.	74	Смирнов Б.Н.
15	Вдовин Б.М.	45	Луппов А.Н.	75	Соколов Е.Н.
16	Габрусев В.Н.	46	Матвеев П.С.	76	Соколов О.А.
17	Галкин С.Н.	47	Михненко Л.А.	77	Тарасов Г.А.
18	Гордецов Б.Н.	48	Муринсон Х.А.	78	Титов В.С.
19	Гринченко А.И.	49	Митрофанов Г.Ф.	79	Ухин Г.В.
20	Гриднев Л.К.	50	Никитин В.А.	80	Фомичев В.В.
21	Гольдентрейстер Л.Я.	51	Никитин В.П.	81	Черепанов П.З.
22	Данилов Г.П.	52	Образцов А.Ф.	82	Шалаев А.И.
23	Дмитриевский Н.И.	53	Овладеев Ю.В.	83	Шумов Д.П.
24	Дорф-Горский И.А.	54	Оглоблин Б.Г.	84	Швец Э.Т.
25	Дробинцев И.Ф.	55	Окунев В.Б.	85	Шевчук О.И.
26	Ельчанинов А.А.	56	Панов И.А.	86	Яцук С.П.
27	Жуков С.В.	57	Пафнухин В.Г.		
28	Зайцев Ю.А.	58	Першин Ю.Ф.		
29	Иванов В.И.	59	Пивоваренок А.М.		
30	Иголкин Н.И.	60	Перцовский Ю.Е.		

## Список сотрудников лабораторий Отделения высокотемпературных установок ИАЭ им. И.В. Курчатова, принимавших участие в работах по КЯЭУ «Енисей»

### ЛНФИ

1. Бирюк Г.И.
2. Глушков Е.С.
3. Демин В.Е.
4. Зимин А.А.
5. Компаниец Г.В.
6. Кулева Р.В.
7. Лобынцев В.А.
8. Носов В.И.
9. Петрушенко Р.П.
10. Смирнов О.Н.
11. Поляков Д.Н.
12. Петушкова Н.А.
13. Ходаков В.А.
14. Хрусталеv А.В.

### ЛЗ

1. Александров В.Л.
2. Авдонин В.И.
3. Базаров А.М.
4. Бакланов А.Е.
5. Большак А.В.
6. Гавриков И.В.
7. Евфанов В.Я.
8. Королев Е.Н.
9. Кожевников А.Н.
10. Кириллов А.И.
11. Кустов В.В.
12. Мадеев В.Г.
13. Мамонов П.С.
14. Никольский В.А.

15. Олейник И.Е.
16. Папин В.К.
17. Рубцов И.Н.
18. Рудаков А.Н.
19. Савинский А.К.
20. Соловьев Б.А.
21. Строганов В.В.
22. Тетерюков В.В.
23. Уксусов Е.И.
24. Уткин В.А.
25. Чешигин И.В.
26. Шумова С.В.

### ЛПР

1. Гнеденко В.Г.
2. Иванов А.М.
3. Кузнецов В.Ф.
4. Кузьмин Ю.Г.
5. Ткаченко В.Д.
6. Усов В.А.

### ЛТЭП

1. Джашиашвили Ю.М.
2. Каретников Д.В.
3. Кайбышев В.З.
4. Корюкин В.А.
5. Обрезумов В.П.
6. Синютин Г.В.
7. Талдонов Ю.В.

### ЛПД

1. Авдеев В.П.
2. Закржевская И.В.

3. Мельников В.Г.
4. Момот Г.В.
5. Озерицкая Э.М.
6. Соленков В.Ф.
7. Хрулев А.А.
8. Шмелев В.П.

### ЛРСО

1. Ветров Е.Ф.
2. Зарудский В.Ф.
3. Ухин Н.А.
4. Шапкин А.А.

### ВВР (Газовый завод)

1. Баталов А.А.
2. Гудков А.С.
3. Дмитриев Н.Л.
4. Дроздов А.А.
5. Колеснев В.А.
6. Каландарашвили А.Г.

### ЛВРМ

1. Байков А.С.
2. Беленов В.С.
3. Борвинок М.С.
4. Василевский А.В.
5. Веселкин Ю.А.
6. Власов В.В.
7. Волков С.П.
8. Герасев Ю.А.
9. Головина Л.Е.
10. Городецкий Г.Г.
11. Громов Д.Ф.

12. Дегальцев Ю.Г.
13. Евсеев Ю.А.
14. Жуков Н.И.
15. Калашников В.И.
16. Карташов Е.Г.
17. Киселев А.Н.
18. Косточка Н.В.
19. Ковалев А.М.
20. Кроль А.Л.
21. Минин С.А.
22. Новгородцев Г.А.
23. Овчинников В.П.
24. Пикунова Т.Д.
25. Потапов Б.И.
26. Садковский М.М.
27. Сиротин В.П.
28. Слабкий В.Д.
29. Сопленков Ю.И.
30. Терешкин С.Ф.
31. Трушкин В.М.
32. Урлапов Л.Ю.
33. Уткин Ю.М.
34. Чернышов О.Н.
35. Чурин В.П.
36. Шилов В.В.
37. Юровских Ю.Н.

**ЛП**

1. Борзых Л.Н.
2. Заровный А.И.
3. Карлов О.Г.
4. Мальцев В.С.
5. Тихонов Н.И.

**ЛВРИ**

1. Амелехин Н.В.
2. Антипов А.
3. Беспалов А.М.
4. Головин Д.Т.
5. Долбик Г.Н.
6. Захаров Е.Н.
7. Ильин Э.П.
8. Карабухин А.
9. Костюткин Ю.И.
10. Крутов М.А.
11. Лазаренко Р.Ю.
12. Мосевицкий И.С.
13. Мотенко В.Г.
14. Мурзинов А.Ф.
15. Новоселов М.А.
16. Новоселов В.А.
17. Огнев А.Н.
18. Павлов Г.М.
19. Пяткин А.А.
20. Седых Ю.Н.
21. Серов В.Я.
22. Сладков Л.Е.
23. Стебеньков Ю.А.
24. Степеннов Б.С.
25. Сурмин А.Д.
26. Таланкин Г.М.
27. Харламов А.Г.

**Гр. ЖМ**

1. Адамов Е.О.
2. Борохович А.Е.
3. Кузнецов Ю.Е.
4. Макаров В.В.
5. Плюхов А.Д.

## **Список сотрудников ПНИТИ, принимавших активное участие в работах по КЯЭУ «Енисей»**

- |                     |                      |                      |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1. Белоусенко А.П.  | 12. Кишмаков Б.М.    | 23. Портнов Ю.Б.     |
| 2. Вдовин О.И.      | 13. Колесов В.С.     | 24. Ракитская Е.М.   |
| 3. Выбыванцев В.И.  | 14. Коробов А.В.     | 25. Рымашевский Г.А. |
| 4. Гвердцители И.Г. | 15. Кучеров Р.Я.     | 26. Семин Р.М.       |
| 5. Гординский В.Л.  | 16. Лапочкин Н.В.    | 27. Соколов Н.М.     |
| 6. Гонтарь А.С.     | 17. Лебедев А.М.     | 28. Смирнов Г.Н.     |
| 7. Дементьев Л.Н.   | 18. Лесников В.М.    | 29. Фрайштут Р.Г.    |
| 8. Еремин С.А.      | 19. Магамедов Г.Т.   | 30. Цецхладзе Д.Л.   |
| 9. Ижванов Л.А.     | 20. Марагинский Р.Н. | 31. Чижова Э.М.      |
| 10. Ижванов О.Л.    | 21. Модин В.А.       | 32. Чебоненко В.П.   |
| 11. Калмыков С.С.   | 22. Николаев Ю.В.    | 33. Ястребков А.Н.   |

**Список сотрудников ЗАО «Инертек», СФТИ, НИИП,  
ГСЗ «Двигатель» и КБМП, принимавших участие в работах  
по КЯЭУ «Енисей».**

**ЗАО «ИНЕРТЭК»**

1. Завьялов В.В.
2. Нахапетян А.В.
3. Новикова Л.П.
4. Степеннов Д.Б.
5. Усольцева Л.П.

**СФТИ**

1. Аветисов Э.М.
2. Басин Ю.Г.
3. Бахтазян А.Б.
4. Бессараб Я.С.
5. Браварец В.И.
6. Васильев С.И.
7. Венедиктов Ю.П.
8. Возняк А.С.
9. Гвердцители И.Г
10. Гоман Н.Б.
11. Гриц Ю.А.
12. Кулдамашвили А.М.
13. Джоджау А.С
14. Журавлев П.П
15. Каландарашвили А.Г
16. Карагозян Р.М.
17. Карумидзе Г.С.
18. Кобяков В.П
19. Кудзиев А.И.
20. Маилов Г.М.
21. Менабде И.Е.
22. Овакимян А.К.
23. Олиферчук Н.Л.
24. Ткешелашвили Г.И.
25. Судак Н.М.
26. Цакадзе Л.М.
27. Цецхладзе Д.Л.
28. Цхакая В.К.

**НИИП**

1. Истомин И.А.
2. Суворов Л.Д.

**ГСЗ «Двигатель»,  
Эстония**

1. Берглезов В.А.
2. Буловацкий А.Я.
3. Кузнецов Н.И
4. Святушенко В.А.
5. Топтунов Ф.И.

**КБМП**

1. Верхотуров В.Н.
2. Исляев Ш.Н.
3. Князев Б.Н.
4. Козлов А.Г
5. Козлов Алб. Гав.
6. Корчагин Е.Н
7. Решетнев М.Ф.
8. Смирнов-Васильев
9. Федосов В.В.
10. Чернявский Г.М.
11. Эвенов Г.Д.

## Список сотрудников организаций МСМ, МОМ, МВЭС и ГУКОС, принимавших участие в работах по КЯЭУ «Енисей»

### МСМ

1. Ермаков Н.И.
2. Морохов И.Д.
3. Мешков А.Г..
4. Поляков А.С
5. Ошанин А.С.
6. Рябев Л.Д.
7. Тюгин В.М.

### МОМ

1. Дымоховский В.В.
2. Коптев Ю.Н.
3. Милов Ю.Г.

### МВЭС

- Буйкин Ю.А.

### ГУКОС

1. Богданович Б.Н.
2. Буловацкий А.Я.
3. Ерохов В.П.
4. Колядко Г.С.
5. Космынин Ж.Ф.
6. Павлов К.А.
7. Шевцов Г.А.

**Список сотрудников комплекса «Р» Отделения высокотемпературных установок ИАЭ им. И.В. Курчатова, принимавших участие в ядерных энергетических испытаниях КЯЭУ «Енисей»**

1. Аносов А.И.	30 Дубровин А.Б.	59 Крутов М.А.
2. Алпатов В.П.	31 Евлентьев С.В.	60 Кулагин В.Е.
3. Арапова Р.И.	32 Егорова Л.И.	61 Кухаркин Н.Е.
4. Арашкевич Г.В.	33 Ермолаев Б.М.	62 Лебедев Г.В.
5. Архангельский А.Ю.	34 Есин В.Н.	63 Лобковский Б.С.
6. Арсеньев Н.Г.	35 Ерофеев В.П.	64 Макаров В.П.
7. Афонин А.М.	36 Ерохин В.С.	65 Маликова Г.Г.
8. Банщиков Н.Н.	37 Ефремов Л.Г.	66 Малкин Г.Г.
9. Баталов С.А.	38 Завидонов М.С.	67 Максимов Н.Г.
10. Бать Л.Г.	39 Захаров С.М.	68 Максимов А.А.
11. Безруков Г.С.	40 Зенгер Ю.Н.	69 Малыгин Е.П.
12. Белов Б.В.	41 Иванова Т.С.	70 Мартынов О.А.
13. Боков В.С.	42 Ильина Л.П.	71 Мельников А.А.
14. Братищев О.С.	43 Истомин Г.В.	72 Мирошин Г.С.
15. Бубелев В.Г.	44 Каманин А.А.	73 Миляев Д.Д.
16. Буланов А.А.	45 Камыщенко А.И.	74 Митрохин Ю.К.
17. Войтеховский А.И.	46 Каратов А.В.	75 Михайлов П.В.
18. Володин В.П.	47 Карпова Т.В.	76 Мичурин М.М.
19. Вьюков С.В.	48 Кислов И.К.	77 Моисеенко Г.Л.
20. Газин Р.Х.	49 Клейменов В.А.	78 Мороз Н.П.
21. Галицкий В.И.	50 Колесов В.Г.	79 Морозов В.И.
22. Гарин В.П.	51 Колотилина К.В.	80 Небосенко С.В.
23. Гоголев Е.Б.	52 Комаров В.В.	81 Недорезов С.Г.
24. Горбунов А.Ю.	53 Кононов А.И.	82 Нечаев Ю.А.
25. Григорьев А.С.	54 Корнеев Е.Н.	83 Новиков Л.И.
26. Громов А.А.	55 Косовский В.Г.	84 Новосельцев Е.И.
27. Давыдов А.А.	56 Кравцов В.И.	85 Оброскин Д.С.
28. Дорожкин С.Н.	57 Кротов В.А.	86 Паялин Б.Г.
29. Драпкин В.В.	58 Крутов А.М.	87 Попов В.П.

**Список сотрудников комплекса «Р» Отделения высокотемпературных установок ИАЭ им. И.В. Курчатова, принимавших участие в ядерных энергетических испытаниях КЯЭУ «Енисей» (Продолжение)**

88	Потапов С.Г.	103	Скорлыгин В.В.	118	Федин Г.И.
89	Привалова Л.А.	104	Скорлыгина Т.О.	119	Федоров В.М.
90	Проплетин А.Н.	105	Скляревский А.З.	120	Хазанович И.М.
91	Простаков А.С.	106	Смирнов В.В.	121	Царапаев А.И.
92	Пушкин О.С.	107	Смирнов Л.Н.	122	Чуняев Е.И.
93	Рудинский М.С.	108	Соколов В.Е.	123	Чуняев С.И.
94	Руднев Б.В.	109	Соколов И.А.	124	Чупраков С.И.
95	Самарин Е.Н.	110	Соколов М.В.	125	Шаталова Л.А.
96	Самоделов В.Н.	111	Стрелков Н.Н.	126	Ширнин В.Н.
97	Самойлова З.Д.	112	Стебеньков А.П.	127	Юферева А.К.
98	Сарбуков А.В.	113	Степанов А.А.	128	Яковлев Ю.Б.
999	Сафроненок Т.Д.	114	Таланов А.И.	129	Яницкий Г.К.
100	Селезнев А.А.	115	Титов Н.Н.	130	Яницкая В.П.
101	Семенов Г.Н.	116	Тищенко В.А.	131	Янушевич И.В.
102	Симановская И.С.	117	Трифонов Б.И.	132	Ярымов Н.С.

В реконструкции стенда ядерных испытаний, создании и наладке новых экспериментальных систем и оборудования активно участвовали:

начальник комплекса «Р» Кухаркин Н.Е., главный инженер Самарин Е.Н.,

начальники смен, старшие инженеры-операторы и инженеры операторы (служба управления): Митрохин Ю.К., Бать Л.Г., Недорезов С.Г., Новосельцев Е.И., Лебедев Г.В., Чуняев Е.И., Чупраков С.И., Федин Г.И., Янушевич И.В., Захаров С.М., Клейменов В.А., Моисеенко Г.Л., Руднев Б.В., Сарбуков А.В., Сафронёнок Т.Д., Юферева А.К., Яницкий Г.К., Вьюков С.В., Горбунов А.Ю., Мороз Н.П., Таланов А.И., Тищенко В.А.,

Основная нагрузка при проведении монтажных и наладочных работ, а впоследствии по обеспечению надёжной эксплуатации, легла на персонал служб и бюро.

В работах участвовали:

Механико-технологическая служба: Садыков Р.А., Кононов А.И., Лобковский Б.С., Афонин А.М., Газин Р.Х., Драпкин В.В., Евлентьев С.В., Ерофеев В.П., Есин В.Н., Коренской А.С., Кравцов В.И., Крутов М.А., Макаров В.П., Макаров С.В., Мичурин М.М., Николаев А.В., Простаков А.С., Селезнёв А.А., Семёнов Г.Н., Силин Б.И., Стебеньков А.П., Стрелков Н.Н., Титов Н.Н., Тищенко В.А., Трифонов Б.И., Фёдоров В.М., Ширнин В.Н.; Ярымов Н.С.,

Служба СУЗ и КИП: Малкин Г.Г., Смирнов Л.Н., Архангельский А.Ю., Банщиков Н.Н., Баталов С.А., Белов Б.В., Боков В.С., Гоголев Е.Б., Ефремов Л.Г., Ивашов М.Ю., Ильина Л.П., Истомин Г.В., Корнеев Е.Н., Миляев Д.Д., Мартынов О.А., Оброскин Д.С., Привалова Л.А., Смирнов В.В., Соколов В.Е., Соловьёв В.Б., Ткаченко В.Д., Чуняев С.И.;

Электрослужба: Арашкевич Г.В., Степанов А.А., Складчиков А.З., Войтеховский А.И., Журавлёв А.П., Завидонов М.С., Зайцев А.В., Зенгер Ю.Н., Ильиных Г.Н., Каманин А.А., Комаров В.В., Комиссаров П.И., Кротов В.А., Паялин Б.Г., Рудинский М.С., Самарин А.И., Юферев В.Б.;

В активной подготовке к испытаниям и в проведении исследований участвовали начальники и сотрудники научно-исследовательских лабораторий и групп комплекса «Р»:

Лаборатория экспериментальных нейтронно-физических исследований: Косовский В.Г., Бубелев В.Г., Крутов А.М., Арсеньев И.Г., Громов А.А., Иванова Т.С., Крутов М.А., Максимов А.А., Морозов В.И., Царапаев А.И., Давыдов А.А., Проплетин А.Н., Самойлова З.Д.,

Группа нестационарных исследований: Гарин В.П., Ермошин М.Ю., Ильяшенко К.А., Камышенко А.И., Каратов А.В., Михайлов П.В., Мирошин Г.К., Скорлыгин В.В., Янушевич И.В.;

Группа энергетических исследований: Нечаев Ю.А., Аносов А.И., Афанасьев А.С., Григорьев А.С., Егорова Л.И., Карпова Т.В., Курочкина В.А., Максимов Н.Г., Малыгин Е.П., Новиков Л.И., Самоделов В.Н., Хазанович И.М.;

Служба автоматизации эксперимента: Гнеденко В.Г., Дорожкин С.Н., Смирнов В.В., Ильиных Г.Н., Щербаков С.А.

Бюро автоматизации реакторных измерений: Фомин В.А., Яковлев Ю.Б., Алпатов В.П., Арапова Р.И., Ермолаев Б.М., Ильин Е.П., Петров Н.А., Сальникова Т.А., Симановская И.С., Скорлыгина Т.О., Соколов М.В., Шаталова Л.А., Яницкая В.П.;

Бюро подготовки и эксплуатации нестандартного экспериментального оборудования: Колесов В.Г., Ерохин В.С., Кулагин В.Е., Маликова Г.Г.

Значительный вклад в подготовку и проведение испытаний и экспериментальных исследований внесли сотрудники подразделений сектора 6 (ОВЭ) и ИАЭ: Адамов Е.О., Борохович А.Е., Глушков Е.С., Дегальцев Ю.Г., Мадеев В.Г., Хрулёв А.А., Мосевичкий И.С., Степеннов Б.С., Мотенко В.Г., Соленков В.Ф., Уткин Ю.М., Авдеев В.П., Сладков Л.Е., Слабкий В.Д., Дёмин В.Е., Смирнов О.Н., Волков С.П. и др.

## Список литературы

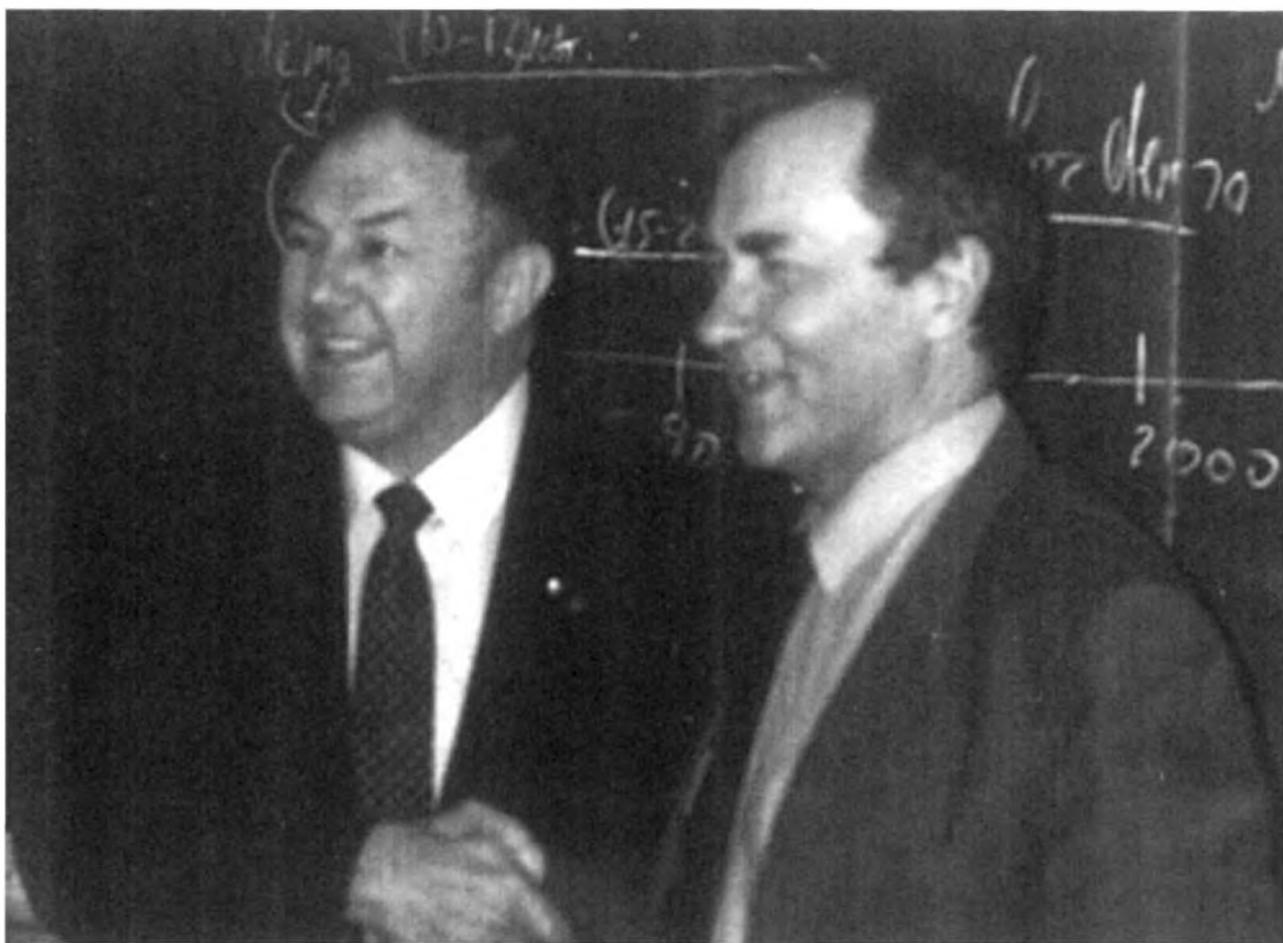
1. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. – Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371.
2. Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Зродников А.В. и др. Термоэмиссионные реакторы-преобразователи космических ЯЭУ. – Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6.
3. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Соколов Е.Н., Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Николаев Ю.В. Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей». – Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 2, с. 95–108.
4. Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е. и др. Основные задачи и результаты летных испытаний ЯЭУ по программе «Топаз». – Атомная энергия, 1990, т. 70, вып. 4.
5. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Луппов А.Н. и др. Перспективы развития термоэмиссионных космических ЯЭУ на базе существующих одноэлементных ЭГК. – В сб.: Конференция «Ядерная энергетика в космосе». Обнинск, 1990.
6. Ponomarev-Stepnoi N.N., Usov V.A. et al. Space nuclear power system based on thermionic reactor with single-cell TFE'S. – In: 10th Symp. on Space Nuclear Power and Propulsion, Part 3, 1993.
7. Космические ядерные энергетические установки. Ядерной науке и технике России 50 лет. – В сб.: Труды юбилейной конф. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. – М.: ИздАТ, 1996.
8. «ТОПАЗ». International Program. Booz. Allen @ Hamilton, Inc. 1995.
9. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Талызин В.М., Павшук В.Н. Российские космические ядерные энергетические установки и ядерные ракетные двигатели. Перспективы использования энергодвигательных установок и технологии их создания для мирных применений. – В сб.: Доклады 10-го межд. семинара по космическим двигателям 10-JWC. Италия, г. Лерика, 2003.
10. Пономарев-Степной Н.Н., Талызин В.М. и др. Работы по созданию отечественного ЯРД. – Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 4, с. 296.
11. Ponomarev-Stepnoi N.N., Usov V.A. Conceptual design of the bimodal nuclear power system based on the «Romashka» type reactor the thermionic energy conversion system. – In: 12 Symp. on Space Nuclear Power System. USA, Albuquerque, 1995.

12. Ponomarev-Stepnoi N.N., Usov V.A. et al. Conceptual design of the bimodal nuclear power and propulsion system based on the «Topaz-2» reactor with the modernized single-Sell TFE. – In: 12 Symp. on Space Nuclear Power System. USA, Albuquerque, 1995.
13. Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А., Пономарев-Степной Н.Н., Компаниец Г.В., Усов В.А. Проблемы космической энергетики и роль ядерных энергетических установок в их решении. – EUCASS, 2005.
14. Н.Н. Пономарев-Степной, В.М. Талызин, В.А. Усов. Российские космические ядерные энергетические установки и ядерные ракетные двигатели. – Журнал Nuclear News, декабрь 2000.
15. Пономарев-Степной Н.Н., Павшук В.Н., Усов В.А. Российский опыт разработки ядерных энергоустановок и ядерных ракетных двигателей первого поколения как основа создания перспективных энергодвигательных комплексов для мирных исследований ближнего и дальнего космоса. – В сб.: Доклады международного астронавтического конгресса. Япония, Фукуока, октябрь 2005, секция С.47/С35, с. 13.
16. Грязнов Г.М. Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора). – М.: ФГУП ЦНИИатоминформ, 2007.
17. Wetch J.R. History of space nuclear power short course notes. – In: 7th Symp. on Space Nuclear Power. Albuquerque, New Mexico, 1990.
18. Дегальцев Ю.Г., Кузнецов В.Ф., Пономарев-Степной Н.Н. Физическая и математическая модель распухания высокотемпературного твэла с керамическим топливом.: Препринт ИАЭ-5250/11, 1990.
19. Волков С.П., Глушков Е.С., Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Концепция обеспечения ресурса гидридного замедлителя ЯЭУ повышенной мощности. – В сб.: Доклады 8-го симпозиума по космическим ядерным энергетическим системам. Альбукерке, США, 6–9 января 1991.

## Глава 3. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ПО КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

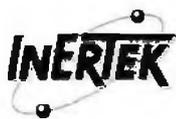
### 3.1. Сотрудничество с США

В апреле 1989 года в ИАЭ им. И.В. Курчатова состоялись переговоры с представителями американской фирмы «Спейс Пауэр Инкорпорейтед» (SPI) (рис. 3.1).



*Рис. 3.1. Участники совещания после подписания протокола о намерениях между ИАЭ (Пономарев-Степной Н.Н.) и американской фирмой SPI (Джозеф. Р. Ветч)*

Переговоры касались возможности сотрудничества и использования имеющегося задела в России в области космических ЯЭУ в качестве альтернативы солнечным энергоустановкам для гражданских, коммерческих и научных применений. Фирма SPI проявила заинтересованность в сотрудничестве и предложила на первом этапе совместно подготовить и провести демонстрационные



## Совет директоров, учредители ЗАО «ИНЕРТЭК»



Председатель Совета директоров,  
Н.Н. Пономарев-Степной,  
вице-президент  
РНЦ «Курчатовский институт»



Заместитель председателя  
Совета директоров  
Джозеф Р. Ветч,  
президент фирмы SPI/ISP

### Члены Совета Директоров



Ю.В. Николаев,  
первый заместитель  
директора НПО «Луч»



Е.Н. Соколов,  
директор ЦКБМ  
(2000—2006 гг.)



В.П. Никитин,  
директор ЦКБМ  
(1991—2000 гг.)



А.С. Коротеев,  
директор ИЦ  
им. М.В. Келдыша



В.А. Усов,  
директор  
ЗАО «Энерготех»



Эдвард Дж. Бритт,  
вице-президент  
фирмы SPI/ISP



## Исполнительная дирекция ЗАО «ИНЕРТЭК»



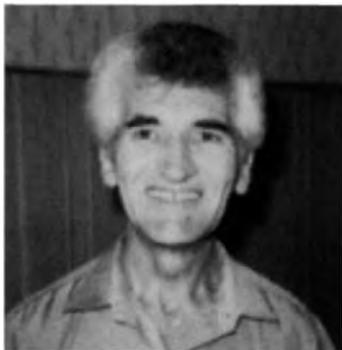
Генеральный директор  
(1991—1998 гг.),  
заместитель  
генерального  
директора  
В.А. Усов



Генеральный директор  
Ю.В. Николаев  
(1998—2006 гг.)



Заместитель генерального  
директора по производству  
Б.С. Степеннов



Заместитель генерального  
директора по финансовой  
деятельности  
Г.Т. Магамедов



Заместитель генерального  
директора, директор  
Подольского филиала  
В.С. Колесов



Президент  
страховой компании (СК),  
г. С-Петербург  
А. В. Сумбаров



Директор  
С-Петербургского  
филиала  
Е.И. Лутов

испытания в США изготовленных образцов КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2») без ядерного топлива на стендах с электронагревом. Стороны пришли к мнению о необходимости реализации этих предложений через совместное российско-американское предприятие «ИНЕРТЕК», которое и было учреждено в последствии в конце 1990 года.

Официально программа совместных работ с США (получившая название по решению 16 ГУ МСМ Программы «Топаз») была начата в 1991 году, когда по договору между ЗАО «ИНЕРТЕК» и фирмой SPI/ISP на условиях неразделки и обратного возвращения испытанных в США изделий были поставлены в США для проведения наземных испытаний с электронагревом две установки «Енисей» (именуемые по решению 16 ГУ МСМ в дальнейшем «Топаз-2») без ядерного топлива (рис. 3.2, 3.3) и оборудование стендов «Байкал» и «РИГ» для испытаний с электронагревом установок «Енисей» и ЭГК (рис. 3.4, 3.5).



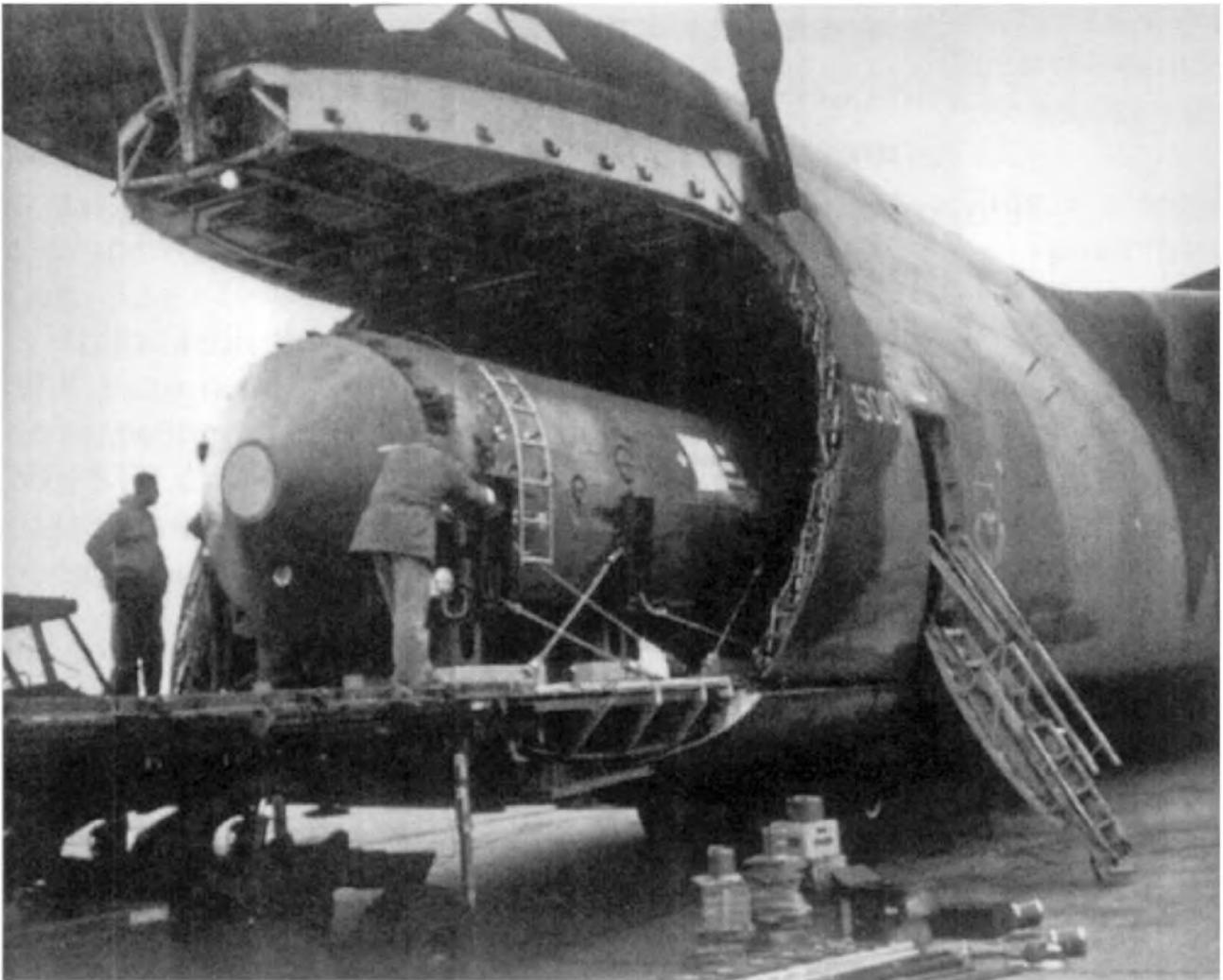
*Рис. 3.2. Прибытие в аэропорт Пулково американского транспортного самолета С-5 для доставки в США, г. Альбукерк, КЯЭУ «Топаз-2», оборудования стендов «Байкал» и «РИГ» для испытаний с электронагревом установки «Топаз-2» (без ядерного топлива) и одноэлементного термоэмиссионного ЭГК*

испытания в США изготовленных образцов КЯЭУ «Енисей» («Топаз-2») без ядерного топлива на стендах с электронагревом. Стороны пришли к мнению о необходимости реализации этих предложений через совместное российско-американское предприятие «ИНЕРТЕК», которое и было учреждено в последствии в конце 1990 года.

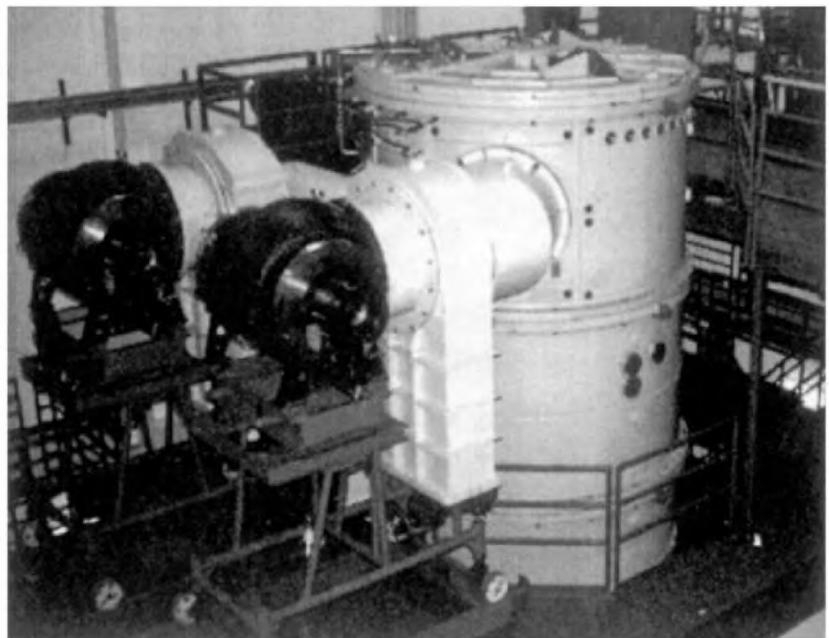
Официально программа совместных работ с США (получившая название по решению 16 ГУ МСМ Программы «Топаз») была начата в 1991 году, когда по договору между ЗАО «ИНЕРТЕК» и фирмой SPI/ISP на условиях неразделки и обратного возвращения испытанных в США изделий были поставлены в США для проведения наземных испытаний с электронагревом две установки «Енисей» (именуемые по решению 16 ГУ МСМ в дальнейшем «Топаз-2») без ядерного топлива (рис. 3.2, 3.3) и оборудование стендов «Байкал» и «РИГ» для испытаний с электронагревом установок «Енисей» и ЭГК (рис. 3.4, 3.5).



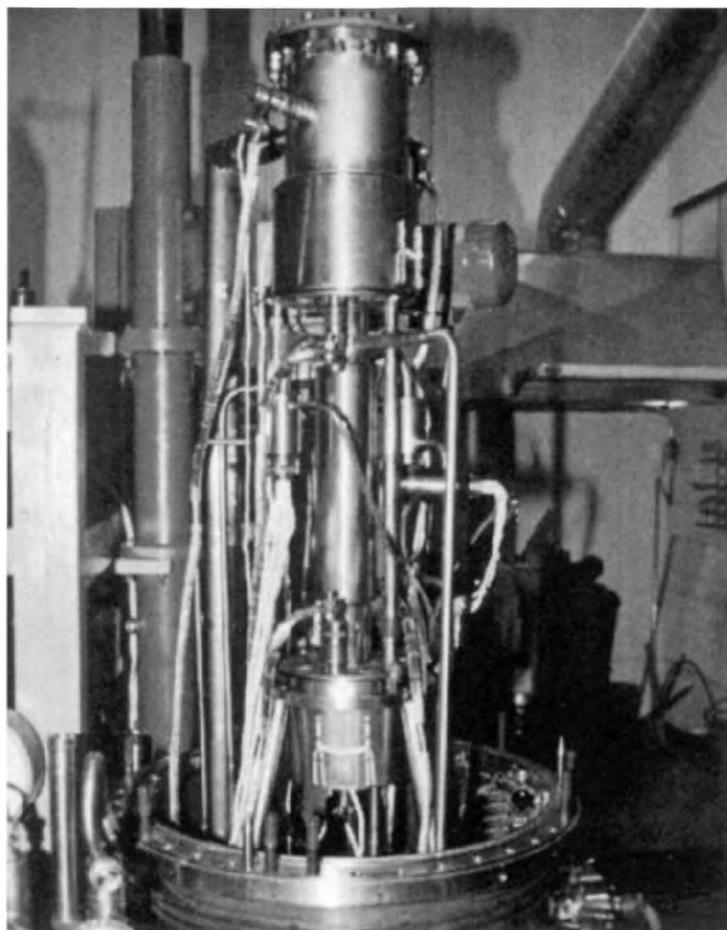
*Рис. 3.2. Прибытие в аэропорт Пулково американского транспортного самолета С-5 для доставки в США, г. Альбукерк, КЯЭУ «Топаз-2», оборудования стендов «Байкал» и «РИГ» для испытаний с электронагревом установки «Топаз-2» (без ядерного топлива) и одноэлементного термоэмиссионного ЭГК*



*Рис. 3.3. Загрузка КЯЭУ «Топаз-2» в транспортном контейнере в самолет С-5*



*Рис. 3.4. Общий вид стенда «Байкал» в США*



*Рис. 3.5. Общий вид стенда «РИГ» в США*

Программа предусматривала проведение наземных испытаний на стендах с электронагревом опытных образцов установки, поставку еще четырех установок «Топаз-2» для подготовки ЛКИ в составе КА NEPSTR и создание американской космической ядерной энергетической установки с термоэмиссионной системой преобразователя тепла в электричество на базе опыта и технологий российских ученых.

В течение 1993–1996 годов после закрытия в США Программы SP-100, Программа «Топаз» была единственной действующей в США программой работ по термоэмиссионным КЯЭУ.

Программа была одобрена Правительством РФ и постоянно находилась в центре внимания Правительства США и научно-технической общественности, и ход ее выполнения неоднократно рассматривался представительными комиссиями США.

В результате выполнения первого этапа Программы «Топаз» в 1992–1993 годах на вновь созданных стендах с электронагревом в Университете Нью-Мехико в г. Альбукерке (см. рис. 3.4 и 3.5) с участием российских специалистов, специалистов США, Англии

и Франции были проведены энергетические испытания двух опытных образцов КЯЭУ (изделия В-71 и Я-21У) и испытания одноэлементных ЭГК, продемонстрировавшие получение требуемых по ТЗ параметров.

На фото Российские участники Программы «Топаз» вместе с руководителем Программы в 1991–1993 г Фредом Тарантино (рис. 3.6).

Проведенные успешные испытания установок В-71 и Я-21У и ЭГК дали основание американским специалистам начать работу по разработке проекта экспериментального космического аппарата NEPSTR с КЯЭУ «Топаз-2» и электрореактивными двигателями различного типа для перевода КА с радиационно-безопасной орбиты на ГСО ( $H = 36\,000$  км) и начать разработку проекта термоэмиссионной КЯЭУ SPACE-R электрической мощностью 40 кВт с использованием технологии «Топаз-2».

Для выполнения этих работ по договору с фирмой ISP/SPI в марте 1994 года были поставлены в США дополнительно четыре опытных образца установки «Топаз-2». Два из них – для наземной отработки вопросов стыковки с КА (изделия Э-41, Э-42) и два – для ЛКИ в составе КА NEPSTR (изделия Э-43, Э-44) (рис. 3.7 и 3.8).



*Рис. 3.6. Российские участники Программы «Топаз» совместно с руководителем Программы в 1991–1993 гг. Фредом Тарантино*



*Рис.3.7. Фото после подписания контракта на поставку в США дополнительных четырёх образцов КЯЭУ «Топаз-2»*



*Рис. 3.8. Отправка в США четырёх КЯЭУ «Топаз-2» транспортным самолетом АН-124 (Волга–Днепр)*

Разработка проекта экспериментального космического аппарата NEPSTR с ядерной энергетической установкой «Топаз-2» и различного типа электрореактивными двигателями (в том числе разработанными КБ «Факел» и Центром Келдыша) была осуществлена Лабораторией прикладной физики (APL) в г. Мериленде с участием специалистов ЗАО «ИНЕРТЕК» и SPI. Общий вид КА NEPSTR представлен на рис. 3.9.

Фирмой SPI был разработан также и проект термоэмиссионной космической ядерной установки SRACE-R на основе технологий установки «Топаз-2» электрической мощностью 40 кВт. В разработке проекта участвовали специалисты ЗАО «ИНЕРТЕК». Общий вид термоэмиссионного реактора-преобразователя 150 одноэлементными ЭГК представлен на рис. 3.10.

Хотя Программа «Топаз» не была выполнена в полном объеме, она явилась выдающимся примером сотрудничества между Россией

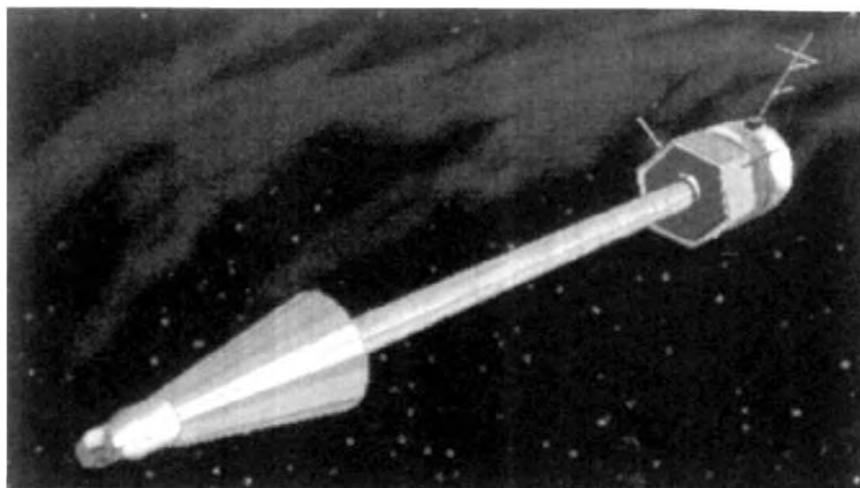


Рис. 3.9. Компонировка установки «Топаз-2» в составе американского экспериментального космического аппарата NEPSTP с электрореактивными двигателями (проект APL USA)

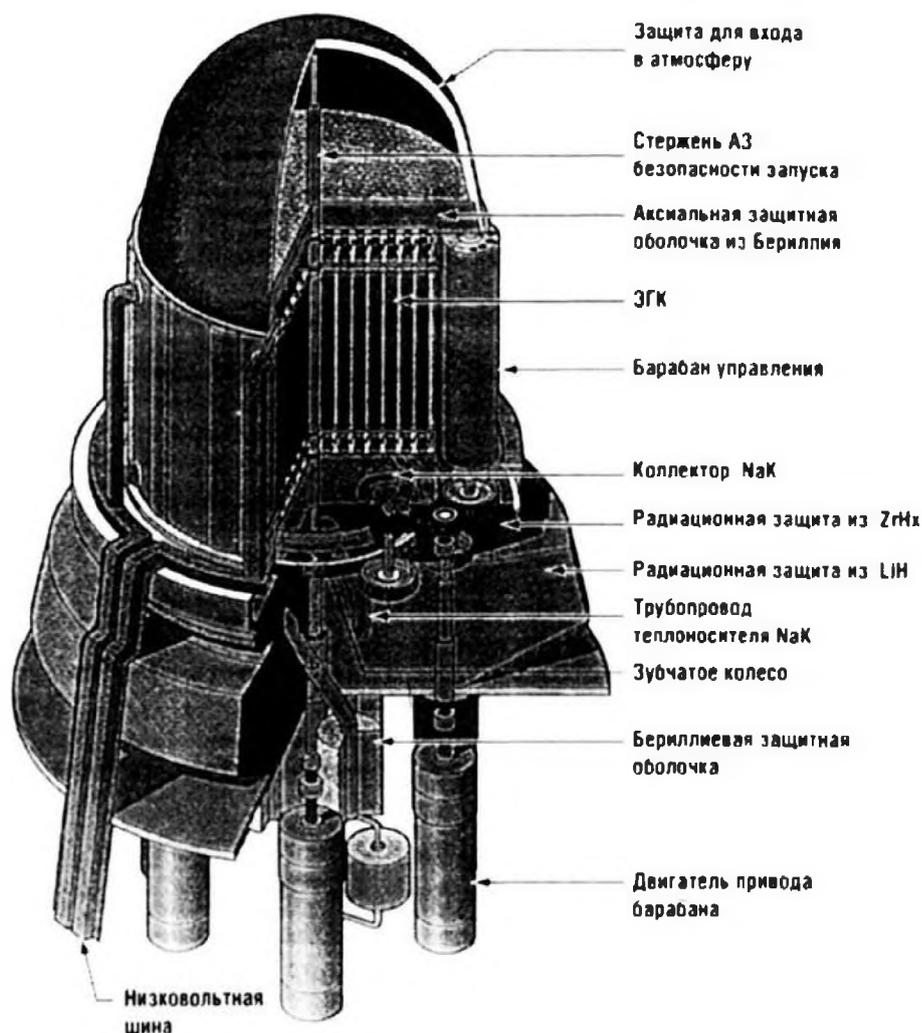


Рис. 3.10. Конструктивная схема термоэмиссионного реактора-преобразователя SPACE-R с одноэлементными ЭГК электрической мощностью 40 кВт на основе разработанных технологий реактора «Топаз-2» (проект SPI, США)

и США и ее реализация способствовала достижению новых передовых технических знаний, преодолению барьеров напряженности между нашими странами, решению организационных проблем.

В работах по программе «Топаз» в течение пяти лет приняли участие около 250 специалистов российских предприятий. Постоянно в программе участвовали два британских и один французский ученые, около двадцати специалистов из Национальной лаборатории Лос-Аламоса (LANL), около 30 человек научно-технического персонала Национальной лаборатории «Сандия» и пять административных сотрудников из Университета UNM (г. Альбукерк).

Бюджет программы за пять лет составил около 65 миллионов долларов США.

Менее чем за один год были спроектированы и сооружены в США стенды «Байкал» и «РИГ» для испытаний с электронагревом установок «Топаз» и ЭГК и в течение 1993–1995 годов проведены испытания этих изделий. Эта программа позволила в трудные годы перестройки продолжить в России активную деятельность по космической ядерной энергетике. Программа «Топаз» проложила путь к международному сотрудничеству в этой области.

### **Хронология международной программы «ТОПАЗ» (TIP)**

- Январь 1989 г. Первые контакты специалистов России и США в области научно-технического сотрудничества по космической ядерной энергетике (посещение делегацией России 6-го Симпозиума США по КЯЭУ с докладом по разработке космических ЯЭУ).
- Апрель 1989 г. Подписание протокола о намерениях между SPI и ИАЭ им. И.В. Курчатова о сотрудничестве в области космических ядерных энергетических установок для гражданского, коммерческого применения.
- Март 1990 г. Посещение делегацией США конференции по ядерной космической энергетике в Обнинске и предприятий ЦКБМ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, ФЭИ, МАИ, НИИТП, ГП «Красная Звезда», НИИ НПО «Луч», Сухумского ФТИ.
- Декабрь 1990 г. Создание Совместного российско-американского предприятия «ИНЕРТЕК». Свидетельство о регистрации выдано Минфином СССР № 2811 от 14.12.1990 г.

- Январь 1991 г. Демонстрация первого экспериментального образца «Топаз-2» на выставке 8-го Симпозиума по космической ядерной энергетике в США на советско-американском научно-техническом Симпозиуме и выставке «Наука–Космос–Конверсия» при Мерилендском Университете в Смитсоновском музее в Вашингтоне.  
Согласие Министра атомной энергетики и промышленности Коновалова В.Ф. на показ установки «Топаз-2» на выставке в США (исх. № ГЖ-1333 от 29.11.1990г.)
- Апрель 1992г. Возврат выставочного образца «Топаз-2» после решения комиссий США по ядерному регулированию.
- Май 1991г. Подписание контракта между фирмой ISP и ЗАО «ИНЕРТЕК» о поставке в США для демонстрационных испытаний на стенде с электронагревателями 2 образцов установки «Топаз-2», стендового оборудования и документации.  
Согласие кабинета Министров СССР с предложением Минатомэнергопрома СССР о проведении демонстрационных испытаний в США экспериментального образца и компонентов установки «Топаз-2» (без ядерного топлива с электронагревом) при условии возврата их в СССР без разделки.
- Апрель 1992 г. Поездка специалистов РНЦ «Курчатовский институт», ЦКБМ, НИИ НПО «Луч» в США (г. Альбукерк) с курсом лекций по особенностям конструкции и основным параметрам КЯЭУ «Топаз-2».
- Январь 1992 г. Подписание ЗАО «ИНЕРТЕК» с фирмой SPI (США) протоколов о намерениях:  
апрель 1992 г. – Разработать проект перспективной термоэмиссионной установки SPACE-R электрической мощностью ~40 кВт;  
– Провести ЛКИ ЯЭУ «Топаз-2».
- Май 1992 г. Отправка в США (г. Альбукерк) самолетом С-5 из Санкт-Петербурга (аэропорт Пулково) 2 образцов установки «Топаз-2» и стендового оборудования для проведения демонстрационных испытаний на стенде с электронагревом.
- Октябрь 1992 г. Монтаж оборудования стендов «Байкал» и «РИГ» в UNM (г. Альбукерке).

- Ноябрь 1992 г. – май 1993 г. Первые испытания в США установки «Топаз-2» (В-71) на стенде «Байкал» ( $N_{эл} = 3,5$  кВт) с подтверждением требуемых параметров.
- Апрель 1993 г. Разработка фирмой APL (США) проекта экспериментального космического аппарата NEPSTR с КЯЭУ «Топаз-2» и различными типами электрореактивных двигателей для перевода КА с радиационно-безопасной орбиты на ГСО ( $H = 36000$  км)  
Участие российских специалистов в разработке осуществлялось по контракту с UNM.
- Октябрь 1993 г. Разработка фирмой SPI (США) проекта термоэмиссионной КЯЭУ SPACE-R с использованием технологий «Топаз-2».  
Участие российских специалистов в разработке осуществлялось по контракту с фирмой SPI.
- Август-октябрь 1993 г. 1000 ч Испытания в США второй установки «Топаз-2» (Я-21У).
- Ноябрь 1993 г. Согласие Совета Министров – Правительства Российской Федерации с предложением Минатома России о проведении демонстрационных летных испытаний в США установок «Топаз-2» (четыре экспериментальных образца установки, два комплекта ядерного топлива, вспомогательное наземное оборудование и техническая документация) при условии возврата их в Россию без разделки.
- Ноябрь 1993 г. Подписание между фирмой SPI и ЗАО «ИНЕРТЕК» дополнения к контракту на поставку дополнительных 4 установок «Топаз-2» для подготовки ЛКИ.
- Март 1994 г. Поставка в США самолетом АН-124 4 установок «Топаз-2» для подготовки ЛКИ в составе КА NEPSTR.  
  
Объявление DNA форс-мажорных обстоятельств в интересах правительства США по испытаниям установок «Топаз-2» и предложения по модернизации программы TIP (с акцентом на технологический задел для будущего).

- Февраль 1996 г. Возврат установок В-71 и Я-21У после испытаний в Россию.
- Март 1997 г. Подписание поправки к договору об урегулировании контракта и условиях компенсации за прекращение договора.
- Апрель 1997 г. Подписание контрактов на выполнение работ по модернизированной программе ТИР.
- Июнь 1997 г. Возврат четырех установок «Топаз-2» в Россию.
- С 1997 г. Продолжение совместных работ с организациями и фирмами США (DTRA, General Atomic) по программе термоэмиссионных преобразователей для встроенных преобразователей в активную зону реактора на быстрых нейтронах и энергетических систем с солнечными концентраторами.

## **Хронология руководства США программой «Топаз»**

- С 1990 по 1995 год всё управление программой обеспечивалось SDI/BMDO, которое включало в себя вопросы политики технического руководства всей программой, и переговоры по закупке Российских реакторов «Топаз» по двум контрактам.
- Руководители SDI/BMDO всей программы «Топаз»:
  - Ричард Верга (МО США) — с марта 1990 по август, 1991 года;
  - Подполковник Фред Тарантино (Армия США) — с сентября 1991 по август 1993 года;
  - Майк Эванс (представитель НАСА) — с сентября 1993 по сентябрь 1994 года;
  - Капитан Фрэд Николс (представитель штаб-квартиры DNA) — с октября 1994 по сентябрь 1995 года.
- Штаб-квартира DNA приняла на себя управление программой по 1 октября 1995 года, при этом капитан Фрэд Николс продолжал руководить программой «Топаз».
- С 1990 по 1995 год лаборатория «Филлипс», как представитель SDI/BMDO, выбирала руководителей проекта, обязанности которых включали испытание установки, разработку и эксплуатацию, оценку реакторов «Топаз», их компонентов, и управления технической поддержки контрактов.

- Руководители Проекта «Топаз» из лаборатории «Филлипс»:
  - Фрэнк Томэ (представитель Национальной лаборатории Сандия) — с декабря 1990 по март 1995 года.
  - Джим Ли (представитель Национальной лаборатории Сандия) — с января 1992 по ноябрь 1992 года.
- Фрэнк Томэ взял на себя обязанности руководителя программы испытаний космического электрического двигателя с декабря 1992 по сентябрь 1993 года, до отмены программы.
  - Дэн Малдер (представитель Национальной лаборатории Сандия) исполнял обязанности с апреля по май 1995 года.
  - Чарльз Хармон (представитель Национальной лаборатории Сандия) исполнял обязанности с июня 1995 года.

### **Из воспоминаний участников программы «Топаз» – специалистов США**

#### **Джо Веч (президент фирмы SPI/ISP):**

«...Где-то в 1987–1988 годах, когда мы работали над программой SPACE-R, русские запустили два реактора, бывшие для нас загадкой. Мы размышляли, не могли ли это быть термоэмиссионные реакторы? Наши догадки подтвердились сообщением в прессе от Агентства ТАСС в конце 1988 года. Несколько месяцев спустя, в январе 1989 года, перед началом Симпозиума по космической ядерной энергии в Альбукерке всех подрядчиков, работающих на Министерство энергетики, ВВС США и НАСА, собрали и предупредили, что на симпозиуме будет русская делегация. Во время приема доктор Нед Рейзер, который бывал раньше в России, схватил меня за руку, выпихнул навстречу академику Н.Н. Пономареву-Степному и официально представил нас друг другу. Я был очень удивлен тому, что академик знал обо мне и о том, над чем я работал в последние 3 года. Я спросил, зачем они приехали в Америку. Он сказал, что чувствует, что могли бы продвинуться еще дальше и быстрее, если бы был хороший партнер.

Доктор Георгий Грязнов, директор организации «Красная Звезда», которая проводила заключительные летные квалифика-

ционные испытания ранней версии термоэлектрического реактора и двух новых реакторов «Топаз», сделал официальный доклад, в котором рассказал о конструкции нового реактора «Топаз», прошедшего летные испытания. Это был реактор малой мощности, многоэлементный, термоэмиссионный, на двуокиси урана, с гидридциркониевым замедлителем, с гетерогенным расположением замедлителя и ЭГК, с охлаждением натрий–калий, очень напоминавшим наш SPACE-R.

На следующее утро я заметил, как академик Пономарев-Степной внимательно изучал наш экспонат SPACE-R. Мы обменялись впечатлениями и некоторыми замечаниями технического характера. Он подметил, что я несколько отстал и что российский проект гораздо лучше. В последний день симпозиума, покидая отель, академик Пономарев-Степной выглядел понурым. Получилось, что никто из американских подрядчиков не проявил должного интереса и не подал надежды на будущее сотрудничество. Мы пригласили русских на ужин. По дороге в ресторан я объяснил значение эмблемы SPI на значке. Там изображены три геостационарных спутника, передающих сигналы на Землю. Идея родилась 30 лет назад за ужином с Давидом Сарновым из РКА. Доктор Сарнов объяснил, что, если сделать 30-кВт космическую установку, то можно разместить три геостационарных спутника для одновременного телевидения на разных языках и, таким образом, будет создана экономичная телевизионная система образования для слаборазвитых стран. Я поделился этой идеей с Гари Фингером из НАСА 30 лет назад, что инициировало разработку 30-кВт ядерного реактора SNAP-8. Вся русская делегация была в восторге от такого предложения. Это была концепция, которую могло бы поддержать российское правительство. Мы обменялись рукопожатиями и подняли тост за Российско-Американское совместное предприятие, которое послужит миру во всем мире».

## **Фрэнк Томэ (руководитель программы «Топаз» в 1991–1995 годах):**

«...Значение программы «Топаз» трудно переоценить. Ее технологическое значение велико – это и обмен опытом работы, и мощный стимул для новых работ. У нас были три главных технических направления: оценочные испытания установок «Топаз» (объект TSET), научные исследования материалов и сборок ЭГК с целью лучшего понимания термоэмиссии (испытательный стенд «РИГ») и NEPSTP – программа космических испытаний ядерного электрического двигателя, летные испытания установки «Топаз». С последней частью мы, наверно, слишком далеко замахнулись и слишком рано, но тем не менее нам удалось аналитически продемонстрировать, что реакторная установка безопасна для запуска и не представляет угрозы для населения Земли. Это было сделано на реальных результатах испытаний установки «Топаз». В США такого не было с конца 1960-х годов.

Программа NEPSTP была закрыта в связи с изменением национальных приоритетов после очередных президентских выборов, когда начался отход от всего, что называлось «ядерным». Русский проект «Топаз» был уникален по сравнению со всем, что создавалось в США. Используя электронагрев для имитации топлива в наземных испытаниях, можно было запустить «чистый» холодный реактор. Мы задавали себе вопрос: «Как мы не могли до этого додуматься?»

Для наших специалистов это была прекрасная возможность сделать оценку безопасности установки на реальном реакторе, а не на вымышленных американских установках 1969–1993 годов.

После окончания программы «Топаз» в США стартовала другая космическая ядерная программа под названием «Прометей», которая предполагает запуск космического аппарата на орбиту ледовой луны Юпитера. Для питания электрического двигателя используется ядерная энергия. Программа включает проведение неядерных наземных испытаний, чему мы научились у русских.

Наша программа «Топаз» стала основой для более крупной программы между Россией и США по нераспространению ядерного оружия (Nunn-Lugar Program), которая продолжается до сегодняшнего дня.

Когда мне предложили работу в программе «Топаз», я отказывался, а ведь она навсегда изменила мою жизнь. После ее окончания мне досталась самая лучшая часть — в 1999 году я женился на Любе Усольцевой. И сейчас мы вместе с Любой делим свою жизнь между США и Россией. Мы строим деревянный дом в России у озера Селигер и очень надеемся видеть у себя в гостях всех наших дорогих друзей по программе «Топаз».

## **Альберт Маршалл (руководитель группы ядерной безопасности):**

### **Личный взгляд**

«...Помню, каким шоком для меня была весть о том, что США собираются приобрести советский космический реактор. Если это правда, подумал я, то это явный признак серьезных изменений в советско-американских отношениях. Я в это время был прикомандирован к Министерству энергетики в качестве консультанта. Следующим сюрпризом для меня стало предложение Министерства энергетики представлять это ведомство в составе американской делегации, отправляющейся в Советский Союз. Целью поездки было посещение институтов и объектов, где создавалась и отработывалась реакторная установка «Топаз», ознакомление с работами, обсуждение возможностей и заключение договоренностей по ее использованию.

Какой случай! Не зная, на что иду, я с радостью принял предложение...

После окончания моей командировки в Министерство энергетики я вернулся обратно в Сандию и попал на встречу с группой русских специалистов, приехавших в Альбукерк с визитом. Послушав выступления, я сказал Фрэнку Томэ и Дэну Гэлопу: «Это потрясающе, я должен участвовать в этой программе».

Началась программа NEPSTR, которая предполагала запуск реактора «Топаз» на американском носителе. К моему счастью, мне была предложена должность руководителя группы ядерной безопасности. Это был грандиозный проект. И работа была интересная, и люди. Что касается американской стороны, должен сказать, что я никогда не участвовал в проекте, где было бы одновременно столько оригинальных и сильных характеров.

Программа «Топаз» – NEPSTP дала нам возможность применить самые последние достижения в области философии реакторной безопасности, разработанной Межведомственной группой ядерной безопасности США. Идея заключалась в том, чтобы вместо того, чтобы преждевременно устанавливать перспективные требования к безопасности, которые по ходу разработки конструкции установки могут оказаться совсем неподходящими, начинать с руководящих принципов самого верхнего уровня. Такой подход позволял нам сконцентрироваться на самых главных вопросах и решать их таким образом, чтобы, улучшая безопасность установки, сохранить ее экономичность. Как следствие, нам удалось убедить критиков и откровенных противников программы в том, что реализация программы NEPSTP является безопасной.

Разумная международная политика открыла двери для программы «Топаз», которая, в свою очередь, заложила фундаменты для добрых отношений между США и Россией. Я могу только надеяться на то, что нынешние неуклюжие действия политиков США не скажутся отрицательно на отношениях между нашими странами, бережно взлелеянных программой «Топаз». Здесь есть повод для оптимизма – дружба, посеянная и взращенная программой «Топаз», сохранится не смотря ни на какие изменения политического климата».

### **Дэн Малдер (руководитель программы «Топаз» в 1995 году)**

#### **«Топаз» – размышления: так начиналась мечта**

«...В апреле 1990 года мы с доктором Майком Шуллером были на семинаре по космической энергии. Дик Верга рассказал нам о намерении приобрести у русских реактор «Топаз» и спросил, не заинтересует ли нас возможность провести испытания этого реактора. И Майк, и я ответили, что если США купит реактор, то мы с большим интересом возьмемся за проведение испытаний. Позже мы нашли Фрэнка Томэ, у которого был необходимый опыт руководства крупными программами, и в декабре 1990 года мы приняли его на работу в соответствии с правительственным законом о перемещении персонала. Фрэнк собрал команду, капитан Том Вутче подготовил контракт на аренду и модификацию

зданий и сооружений, и в январе 1991 года началась работа по подготовке объекта...

Что касается русско-американской команды, это был замечательный коллектив, какая теплая и крепкая дружба зародилась между нами за время работы! Самые дорогие для меня воспоминания – это как Владимир Никитин играл на пианино у меня дома, наши барбекью во время обеденного перерыва в NMERI, поездки в Россию, ночной поезд из Москвы в Петербург, обед у Ник-Ника с Майей и девочками, у Бориса Степеннова, вечеринки у русских в их апартаментах в Альбукерке, приключения во время ночной рыбалки в Казахстане близ Семипалатинска, организованной для меня Ник-Ником, и, конечно, самоотверженная работа всех русских специалистов в Альбукерке и в России, инженеров, техников, ученых.

Спасибо всем, кто принимал участие в программе «Топаз», за их труд, за их усилия, которые помогли нам лучше понимать друг друга и на работе, и в неформальном общении. Мы смогли преодолеть различия и увидеть, что люди есть люди, не важно – русские или американцы, у нас у всех одни надежды и мечты, заботы о своих семьях, о будущем».

### **Тим Степетик (администратор программы Топаз)**

«...Я считаю, что работа по программе Топаз для меня была самой блестящей возможностью в моей рабочей биографии. В этой программе переплеталось столько всего необычного и методы администрирования, и культурные аспекты, и феноменальные характеры. Я бесконечно благодарен всем, кто работал со мной и с кем я встречался в течение пяти лет работы по программе.

Моя деятельность была связана с контрактами, финансированием и логистикой. К счастью для меня NMERI присоединился к программе Топаз в тот момент, когда моя контрактная работа была в состоянии затишья и я был подходящим кандидатом на должность. Так что не смотря на то, что начальство NMERI меня предупредило о том, что Фрэнк Томэ человек жесткий, я с радостью решил отдать свое мастерство администратора этой новой работе. Да, Фрэнк действительно жесткий человек, но и один из достойнейших людей, с которыми мне выпала честь работать, и до сих пор я считаю его

одним из моих самых лучших друзей.

Университет Нью-Мексико всегда старался идти навстречу нашей программе и позволял нам использовать особые финансовые механизмы, удобные для финансирования контрактов ИНЕРТЭК и ЛУЧ в части выплаты суточных, оплаты проживания и общих расходов на командировки для работавших здесь русских. Мы использовали текущий счет с чековой книжкой, чего, я думаю, не было никогда ни до, ни после Топаза. За 4-5 лет программы я подписал чеков примерно на 400 тыс. долларов. Когда об этом стало известно из текущего аудита, эта ситуация моментально привлекла к себе внимание всей гвардии правительственных аудиторских и следственных комиссий от Альбукерке до Денвера, Лос Анжелеса и Вашингтона. Нас непрерывно проверяли в течение 6 месяцев, и в конце концов нашли одну единственную ошибку в 11 долларов в дорожном ваучере для нашего водителя Мисти. И после этого – ни извинений, ни открытого отчета... Но это уже было, когда программа шла к закату.

Благодарю за данную мне возможность на время оторваться мыслями от текущих дел и написать несколько строк, погрузившись в богатый поток воспоминаний, и еще некоторое время в них пожить»

### **OK, Topaz Memories (by Fred Tarantino)**

We got to Russia and it was definitely different. Winter was gone but spring had not yet arrived. Chilly, brown grass, overcast skies. On our second night Kurchatov hosted a dinner for us. I knew how the Russians could drink, but wanted to stray away from it and keep my wits about me. A friend told me that while the Russians liked to toast and drink, they also respected their Mothers very much. Tell them that your Mother said you should not drink, and they would understand. Hangover avoided, and no making a fool out of yourself.

We sat at the table in a restaurant hall. Tiny glasses and bottles of water with “gas.” A huge fish on a plate. Vodka was being poured, toasts prepared and speakers began extolling the virtues of the program. I raised my glass for each toast and put a sip to my lips to not offend our hosts. Russians and Americans continued celebrating our partnership. The vodka emerged to recharge glasses. Mine was still full.

Niki-Niki saw my glass and leaned towards me. “You are not drinking,” he said through a translator. “I have promised my Mother that I would not,” I replied. I do not know Russian now, and certainly didn’t then, but what he said came through pretty clearly. “Yeah right, what a bunch of bullshit” I heard without needing any translation.

Fred Tarantino

## **Topaz Remembrances (by Ned Britt)**

The TSET ground test effort was only one part of larger program to develop nuclear power for space applications. First step was to be the TSET ground test of the TOPAZ II reactor performance; next would be a space flight test known as NEPSTP (I believe that acronym stood for Nuclear Electric Propulsion Space Test Program?); finally design and development of a new U.S. space reactor with a nominal power of 40 kWe. Only the TSET program was accomplished, because a new administration cancelled nearly all other activity in space nuclear power development. It turns out that electric propulsion technology is the real legacy of TOPAZ program.

To satisfy both TSET and NEPSTP projects, there were two purchases and two shipments to Albuquerque of TOPAZ reactors and associated technology. First of the purchase/shipments involved the Baikal vacuum test facility and two non-flight qualified reactors without fuel. The second purchase/shipment transported four reactors (unfueled), of which two of them were space flight qualified. One of these flight-qualified units was expected to be launched into orbit as the power source for spacecraft being designed by Johns Hopkins Applied Physics Laboratory. This NEPSTP flight would demonstrate several candidate electric propulsion thrusters.

The lead-up to first shipment involved a lot of drama and some humor among various government agencies and contractors. By the time of the second shipment, things went a bit easier. Recall that, before TOPAZ reactors were purchased, a display unit TOPAZ was shown at an exhibit in one of annual conferences at Albuquerque. Once in the USA, the display unit became trapped in tangle of bureaucratic red tape, which prevented it from being returned to Russia. It turns out that it was illegal to export a “Nuclear Utilization Facility”. Never mind that this was just a non-functioning exhibit; the government authorities claimed it might be possible to modify and convert it into a functioning unit, and therefore it could not

be exported. A lot of government agency personnel went through hand wringing over the export dilemma, until it literally took an act of Congress to define the TOPAZ exhibit as not a “Nuclear Utilization Facility” so it could be sent home.

In view of the problems with the TOPAZ display unit and other issues related to license needed to import a nuclear system, we decided that it would be desirable to bring the unfueled reactors into the USA as property of the U.S. government. This created a complication, because the reactors were to be purchased from INERTEK (a Russian Joint Venture company) by International Scientific Products (a private U.S. corporation). It was intended that ISP would then resell the reactors to the U.S. government. To solve this problem, government officials and their attorneys traveled to St. Petersburg and joined us, when we were ready to make the shipment. After the first reactors and the all of the crates with the Baikal facility had been loaded on the C-5 cargo planes, we held a signing ceremony inside one of the aircraft before it took off. As the vice president of ISP, I signed the contract to purchase the hardware from INERTEK and immediately signed another set of papers to resell the same items to U.S. government. In this way, by the time the planes landed in Albuquerque, all of the cargo was already government property and exempt from most of the difficulties for importing nuclear hardware. A similar procedure was used for the second shipment of four reactors. However, I believe I recall that this time we signed the papers to transfer ownership to the government while during the flight we were riding inside the airplane carrying the reactors.

There was a significant struggle to get approvals for the first TOPAZ shipment. A spirited procedural dispute between State Department and DOD was ongoing. The U.S. government planned to send four large military aircraft, two C-5 cargo planes, a C-140, and a C-133, which required permission and space to land at the civilian Pulkovo airport in St. Petersburg. The U.S. personnel were anxious about loading process so that foreign people would not have access to the military airplanes. The Russians were a little concerned about dealing with U.S. military aircraft on their airport. The shipment was to be carried onboard the C-5 planes. The other two aircraft brought in loading/communication equipment along with military personnel, who were experts at loading air cargo. One of the small European countries was refusing to allow aircraft carrying reactors to fly over their airspace.

Major Fred Tarantino led the efforts of the SDIO team on the ground

in St. Petersburg to resolve the issues for approval of the first shipment. Fred showed some diplomacy and also some of his “tank driver” attributes in these struggles. There was a tense meeting at the U.S. Consulate in St. Petersburg. It was difficult to make telephone calls from Russia to U.S., but a call from the United States could reach us in our hotel. To solve this problem, I had our offices of ISP back in California call my hotel room, and keep a person on this open long distance line all night long (it was daytime in USA). We would then use this open line to arrange 3-way conference calls to facilitate communication for the government team (Tarantino, et al.). Eventually the difficulties were sorted out and loading proceeded with a Russian crane lifting crates off of trucks and U.S. loaders taking them out to the aircraft. All seemed to go OK, until it came to loading the extremely delicate tungsten heaters, which go inside the TFE’s. Although these units were packed in special cases, there was great concern about vibration and jostling during flight. We could not find any packing material like “bubble-wrap” to cushion the cases containing the heaters. Finally, I gave our people some money and told them to go to furniture stores in St. Petersburg and buy mattresses, which would normally be used for beds. We nestled the heater cases between stacks of mattress and strapped them down on top of the crates — this worked because the heaters arrived intact.

For the second shipment, we decided to charter a commercial transport aircraft, rather than use military planes. ISP worked together with an American cargo pilot, Dr. William A. Good, to arrange a charter flight with Russian Volga Dnepr airlines for an Antonov-124. The An-124 is the largest cargo aircraft, and this plane was able to haul all four of the TOPAZ reactors in their shipping containers. There a few administrative problems, but not so difficult as occurred with the first shipment. The An-124 lifted off from Pulkovo with several of the U.S. personnel onboard as passengers. The American passengers included Dan Mulder from New Mexico, Mike Evans from Washington, Bill Good with his young son, Andy, and me. Riding on that Antonov was a really interesting experience. We went first to Kevlavik, Iceland for a crew rest; then to Winnipeg, Manitoba for fuel; and finally to our destination at Albuquerque, NM.

One day, some time later at the NMERI facility, I was with Jon Shapiro and we were talking our expert fabricator, John Hammill, a former SPI member, who left us when he moved from California to Albuquerque. Hammill had stimulated a friendly competition between the American

team and the Russian specialists in the efforts to adapt and build equipment needed for the test apparatus. Shapiro made the observation, "Do you realize that we are living a story, which would make a great novel?" I think he was correct.

### **The Walking Stick (by Glen Schmidt, PhD)**

I worked for Joe and Herman Diekamp at Atomics International (AI), a Division of North American Aviation, during the late 1950's where the World's first space nuclear reactor power system, SNAP 10A, was designed, developed, built, tested, qualified, accepted for launch, and successfully launched on April 4, 1965.

During the 1960-65 time period, we developed and tested flight sub-systems and systems as I grew with the program from Responsible Engineer, thru Supervisor, Group Leader, and Project Engineer. This required «hands-on» participation with SNAP critical nuclear assemblies, prototypes, non-nuclear and nuclear flight systems. It was this experience and capability which we previously shared that brought us together again during the TOPAZ International Program (TIP) that was born by 1990.

My intimate relationship with TOPAZ II began when I was at the DOE Energy Technology Engineering Center (ETEC) at AI. The Air Force requested that I prepare a detailed plan «to buy and test» Russian made TOPAZ II systems. A few system design descriptions were initially provided by the Air Force, but Joe Wetch at Space Power, Inc. (SPI/ISP) had the most information I really needed. Thus, the completed Buy and Test Plan report was the beginning of my forthcoming direct involvement with Joe Wetch & ISP, Russian engineers, and Russian space nuclear reactor power system technology. After 33 years at AI and ending at the Energy Technology Engineering Center (ETEC), I was free/retired and ready to get involved with ISP, Russians, and TOPAZ II.

#### **TOPAZ II Visits America:**

My first «hands-on» experience with a real Russian space nuclear reactor power system involved displaying the TOPAZ II at the 8th Symposium on Space Nuclear Power held in Albuquerque, NM in January 1991. My assignment was to meet the Russian ship Vyborg at the Red Hook Harbor in New York City (near Manhattan) before Christmas 1990, monitor

unloading and processing through Customs, and then to monitor loading on a transporter and unloading a display TOPAZ II system at the Albuquerque Conference Center. Joe Wetch and Academician Ponomarev-Stepnoi (NIK-NIK) unveiled the stately TOPAZ II before a gathering of amazed space nuclear scientists at the Symposium.

Previously, I was invited/requested by Joe Wetch to accompany him on three different trips to review Russian space nuclear reactor technology and become intimately familiar with TOPAZ II systems, test systems, and testing programs. The details of those three trips will remain in my memory as long as I am able to breathe. The experiences of those trips follow:

### **My First Trip:**

This was a trip to become acquainted with Russian organizations, management personnel and structure, locations of major TOPAZ II development and test facilities, technology centers, and key personnel at these facilities. A high point of this trip was to attend the meeting between Joe Wetch and Russian «decision-makers» to organize the previously approved Joint Venture (JV) entitled «International Nuclear Energy Research and Technology (INERTEK). Joe Wetch asked me to take notes of the discussions and follow-up actions required. **I did not know then how important this meeting would become until many months later.**

### **My Second Trip:**

This was a technical trip to become more acquainted with specific technical details of the TOPAZ II system, subsystems, major components and test system/test facility interfaces. This was a «walk and talk» tour of all levels of the test facilities and related test systems, gas systems, electrical systems, and ground support equipment.

During this trip, I became acquainted with Boris Oglobin(sp) who was second in charge of the Central Design Bureau of Machine Building (CDBMB) and his familiar answers to specific questions asked of him during the technical tours. For example, after each question was interpreted for him to answer, his immediate response was «NYET» (no!) and then he would try to answer the question, if he was permitted to provide the answer.

I had studied the TOPAZ II system schematics and design details

very carefully before making this second trip and I wanted to know the composition of fluids use in the various systems and stored in its gas cylinders. Boris was making the presentation in front of a TOPAZ II schematic. So I asked him, «What gas is in that specific gas cylinder?» His reply was,» NYET!» So I asked the question again, «Is the gas in that specific gas cylinder carbon dioxide?» His reply was, «NYET!» I did not get an answer because it may have revealed more restricted information than he wanted me to know.

As we were walking to the next presentation, the interpreter, **Elena**, came up beside me and told me, «the gas in that cylinder was «CARBON DIOXIDE»! (It was an important component for preventing Hydrogen migration out of the ZrH moderator). I knew then that she should be the interpreter to accompany the Russian technicians that were coming to Albuquerque, NM to help with the reassembly of the test equipment and testing of TOPAZ II systems. (She did come to Albuquerque, is now a USA citizen, is an interpreter at the Johnson NASA Space Center in Houston, TX, and is my loving wife for more than ten years.)

### **My Third and Last Trip:**

The purpose of this trip was: 1. to identify specific test facility components and their installation interfaces and requirements; 2. to identify each of the TOPAZ II systems, their test histories and limitations, and special shipping and handling equipment and procedures and; 3. to meet and become acquainted with key technical persons that I would be working with after delivery of shipments.

At the end of my third and last trip, I was very sad upon leaving because I knew this would be the last time I would see my many Russian friends living in Russia. (I am still sad!).

### **The Walking Stick:**

The big expensive question and task following delivery to the Thermionic System Evaluation Test(TSET) facility at Albuquerque, NM of six TOPAZ II systems, many boxes of electronic test equipment, lots of ground support equipment, many spare parts, boxes and boxes of Russian documents, and other things unimaginable was, «What will we do with all of this Russian stuff?».

The answer was simple:

- Each and every item delivered was unpacked, identified, sorted, assigned, tagged, cleaned, inspected, tested, recorded, rejected or accepted, and stored until needed.
- The tags were yellow, green, and red.
- Each item removed from shipping boxes was tagged with a yellow tag to indicate that the item had been received, identified, sorted, and assigned.
- After cleaning, inspection, testing, recording, and acceptance or rejection of each item, the yellow tag would be removed and filed and replaced with either a red tag to indicate rejection and/or need for maintenance or a green tag to indicate acceptance for test system installation, assembly and use/operation.

Valerie Sinkavich, a Russian engineer and I together checked each item to determine if the item were rejected and requiring additional work or accepted and ready for test system integration. A work sheet accompanied each item to record/report name of the assigned person, work performed, results obtained and more work, if required, and both signatures of the Russian engineer and me.

Large schematics of the Baikal test system were displayed in the high bay of the test facility and used to indicate the status of Baikal test systems and subsystems. A yellow line or yellow outline on a specific item indicated installation of the piping or item had been made. A green line or green outline indicated the piping or item had been made and was ready for checkout. Piping or items failing checkout were identified by red lines.

A standup meeting was held each morning before testing and assembly began to make sure all personnel were present, knew their assignments for the day, and had the resources they needed for that day. Questions were asked and replies were given attention. During the day, the Russian engineer and I would walk around the work areas and observe, inquire, and/or assist each person, as needed. We spent minimal time away from the work areas. At the end of the work day, a standup meeting was held to review progress, problems, and identify actions to be taken during the night or next day. The Russian engineers and technicians called me «the walking stick» and I told them that my management style was: «Management by Walking Around.»

The estimated time required for installation and test was **more than 9 months** from start to completion of the TOPAZ II test systems and successful demonstration of an operational thermal cycle of the V-71 TOPAZ II power

system. The actual elapsed time was **6 1\2 months** from start to completion of the acceptance test.

The foreshortened time from start to successful completion of the V-71 TOPAZ II thermal-vacuum test saved a lot of money for the fixed price ISP/SPI effort and gained future programmatic respect.

Because time and money were being saved by the joint efforts of Russians and Americans, I recommended to Joe Wetch and Dr. Ned Britt that a bonus be paid to each Russian to show appreciation for their unusual accomplishment. They both agreed to my recommendation and bonuses were paid in relationship to their technical assignment, duration of performance, and quality of workmanship. This was the first time that any of the Russians had been paid a bonus.

About a month after the first bonuses were paid, several Russians asked if they would/could get another bonus if even more time was saved. My answer to them was a qualified «perhaps.» They did save more time and they were given another smaller bonus.

After the successful acceptance test of V-71 TOPOAZ II, my assignment with SPI/ISP was completed and I became a space power consultant to the University of New Mexico Engineering Research Institute (NMERI) during follow-on testing and evaluation of TOPAZ II systems V-71 and YA-21u at TSET. Thereafter, I wrote the system test evaluation report of the YA-21u TOPAZ II system tests.

I have retired again and am now working part time on the Interagency Nuclear Safety Review Panel (INSRP) for the Mars Science Lab (MSL) multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) and part time on my own lithium-deuterium cavitation experiments.

## **Do a Good Job, and Don't Break Anything (Scott Wold)**

In early 1991, one of the first conversations I had with my wife on the TOPAZ program went something like this:

- “Hey LaWanda, remember that guy Frank Thome I've been telling you about?”
- “The one that used to work at the ACRR reactor?”
- “That's the one, anyway, he and a Major Dan Mulder have been talking to me about a possible career move.”
- “Define “career move” and why are you talking with Majors?”
- “Well, Major Mulder works with for the Air Force Weapons Lab

and they're working on a new project to buy a space nuclear power system from the Soviet Union, ship it to Albuquerque, and run a bunch of tests on it."

- "This would be the same Soviet Union as in cold war, communism, Gorbachev and Reagan, and the reason you spent nine years in the Navy, that Soviet Union?"
- "That's the one, anyway, they'd like me to help them set up the facility and get things ready to receive the space nuclear power systems. Should be fun, they already have some of the Soviet's plans and drawings of the equipment which are being translated right now. If they get the funding they're hoping for, it will be a three year project and they'd like me to start April 1."
- "So what you're saying is that you're ready to chuck your reactor operations career and go to work on a project that may or may not be funded and involves the red tape and bureaucracy of not just our government, but the Soviet Union?"
- "Yeah, sounds cool, huh?"
- "You also realize that April 1 is April Fool's day right? Are you sure you want to make a major career move on that day? How well do you know this Frank Thome and Dan Mulder?"
- "The date is just a coincidence, it's a Monday and it's also when two other guys, Earl Peterson, an electronics tech from Los Alamos, and Bill Champion, a mechanical tech working at Sandia are available as well. And Frank and Dan both seem like good guys. I don't think I'll ever get an opportunity like this again, and I'd like to go for it."

LaWanda gave me one of those "looks" and said if this is what I wanted to do, she'd support me a 120%. So on April 1, 1991, my TOPAZ journey began with a field trip with Earl and Bill to retrieve an excess mill from LANL that was originally used to build parts and equipment for defense activities. This was the start of a massive equipment re-application effort that resulted saving the project over a half million dollars by picking up and re-utilizing equipment from Sandia, Los Alamos, and the Weapons Labs for use on the project. The equipment included the mill, a lathe, drill presses, vacuum pumps, a liquid nitrogen storage tank, and numerous pieces of electrical and electronic equipment.

The technical aspects and accomplishments of the TOPAZ programs have been well documented in the numerous papers and presentations

published over the life of the project, but my memories of the project are based around the people and personal interactions, and that is what I'd like to share.

The first year was spent getting the facility ready to receive the Baikal test stand and the TOPAZ units. My job was easy, all I had to do was start with nothing and create a training program, an operations program, and a safety and health program based on sketches, pictures, and descriptions of the equipment and facilities located in St. Petersburg, Russia. The reason I say my job was easy, is that the two expectations Frank had for me were 1) You know what needs to be done, go do it and let me know if you need anything, and 2) Do a good job, and don't break anything.

Having the freedom to just go to work was incredible. One of the reasons for the success of the program was the fact that Frank and Dan provided the top cover we needed to be able to focus on tasks at hand without getting involved in the politics associated with the project. For example, there was more than one occasion where we would be notified by some outside organization, that after careful consideration, they concluded that an experiment we proposed to do wouldn't be possible and that we should just stop all work on the project as it was obviously a waste of time. Our typical response would be to provide them with the results of the experiment we just wrapped up.

In one of the initial meetings, Frank mentioned how fortunate he was that he had an opportunity to work on what was definitely a "once in a lifetime project" near the end of his career. I remember sitting there thinking, "Great, I'm only 32 years old and everything I do after this will never live up to this project, but I'm damn glad I'm here". Some of the "once in a lifetime" experiences I had were:

- Meeting the Russian engineers and techs at the airport, and the appreciation they had for having fresh fruit waiting for them in the apartments.
- Taking the Russian engineers and techs on tours of the local electrical, valve and fitting, hardware, and fastener supply companies and explaining that we can get almost anything we may need at anytime.
- Learning Russian and working with the Russian documents and drawings. Even more challenging than trying to translate Russian was helping Corrine Hurtado translate Frank's so-called hand writing so that she could type up his memos and letters.

- Having the Russian engineers sitting in our training courses, only to find out that even though they worked on the project for years, they only knew what their system did, but only a few had knowledge of how the entire system operated.
- Having discussions with Valeri Sinkevich on the concept of “cross-training” and how we didn’t need a large number of people on site for operations.
- Changing from ties and coats after the landing ceremony of the first C-5 transport plane to jeans and t-shirts to help unload the 90 tons of equipment.
- Working together with the Russians as a team to invert the nine foot diameter vacuum chamber sections (they were shipped upside down to protect the knife edge of the section).
- Having discussions of electrical grounding theory. In order to save wire (which was hard to obtain in Russia), the Russian engineers would not require a separate ground wire. Earl Peterson tried and tried to get the Russian engineers to require a separate ground, and after a number of discussions, he came to me for some help. Earl and I went out to high bay where the work was and had another philosophical discussion on the need for separate ground wires. Earl and I told them that we understood that electrically the ground wire was the same as the neutral wire, but US standards required the separate ground for protection of equipment, and more importantly, of people. We were at a stalemate until I pulled a large pair of wire cutters out of my back pocket and had the translator explain that the Russians could do whatever they thought was necessary, but that I would personally inspect all the wiring. The Russians, looked at me, looked at the wire cutters, and decided that all power connections would include a separate ground wire.
- Meeting with the Russians and describing the game of baseball prior to a field trip to the local ball field. (Try explaining the infield fly rule to an American, let alone a Russian.) I don’t think any one Russian caught on to more than a few concepts, but they all caught on to the beer and hot dogs.
- Speaking of games, the Russians were introduced to an air war computer game at my home. They thought it was interesting that the “enemy” all flew MIGs with red stars on them and typically

- lost the battle scenarios. I had no comment.
- The Russian team had returned to Russia and wanted to renegotiate terms. I was given instructions to start up and run tests on the TOPAZ unit we had ready and Frank again reminded me of his expectation for me to “Do a good job, and don’t break anything”. The test was successful and the Russian delegation returned to Albuquerque. I remember how nervous I was during the tests and how appreciative I was when Valeri reviewed the operating logs and test data, and said that we had done a good job (and didn’t break anything).
  - Having the Russians pitch in to help us move from a house we were leasing to a new home we purchased. I remember LaWanda explaining to Sergei (who had a door in his hands) that the doors to the bedrooms and the cupboards in the kitchen did not have to be removed and packed up to move, but had to stay in the house.
  - The Russians would not waste anything. The process to disconnect a TOPAZ from the Baikal test stand included the use of a hydraulic press to crimp the cesium exhaust line prior to cutting and sealing it. In order to ensure that there would be no contaminant in the vacuum chamber, the hydraulic fluid was composed of a mixture of pure grain alcohol and medicinal grade glucose. When asked what they did with the fluid after they were done with the process, the Russians said they’d drink it (the hydraulic cocktail didn’t taste too bad).
  - The Russian custom to “wash” anything new with vodka, and that our new home was no exception. I told LaWanda that I’d like to have a barbeque and that some people from work would be coming over. She couldn’t understand why people were bringing over extra barbeque grills, why I was stretching tarps across the back yard to provide shade, and why a half dozen wives showed up to help prepare the meal. All her questions were answered when Mistee Thompson pulled up to our house in a bus and the entire Russian delegation began filing off. We’ll also never forget how each and every Russian met us at the door, shook our hands, told us how glad they were to be invited to our home, and gave us a small housewarming present, all of which are in our home in Idaho. We also kept a small bit of strawberry margarita mix

- on the ceiling in our kitchen as a reminder of Sergei operating a blender for the first time (the second time he put the lid on).
- Our three daughters grew up with many Russian “god-parents” and with many of the Russian children. This included many camping trips to the Jemez Mountains and other activities including participation in our daughters’ Girl Scout troops, Disney cartoon marathons, and sleep-over slumber parties.
  - Thanksgiving dinners at our home with ten or more of the Russians usually started out by taking pictures of a whole turkey. While they had turkey in St. Petersburg, some of the Russians had never seen a whole bird. After one dinner, we were talking and one of the engineers would be returning to St. Petersburg the next day as his son was undergoing surgery to remove a brain tumor. He said that the doctor asked him to bring back Tylenol in a suppository form for his son, and asked if it was possible to get some that night. The drugstores and pharmacies were closed by then but we were able to get the medicine from one of the hospitals in town. As with many of the experiences I had, it was amazing to think of a country where they could perform brain surgery, but lacked the resources to provide basic medicine we take for granted.
  - We also worked with the Albuquerque Fire Department HazMat team to teach them how to handle NaK and to coordinate efforts in the event we had a problem at the facility. Afterwards, they provided us with an escort service complete with lights and sirens whenever possible when we transported a TOPAZ unit to Kirtland or Sandia for displays or testing. The look on the gate guards face when we’d pull up with our HazMat and Fire Department escort was priceless.
  - I also remember thinking “What the hell is a guy like me from a small town in Idaho doing at an impromptu meeting with Russians in a side wing of the Louvre Museum in Paris?” Frank Thome, Frank Wyant, Al Marshall, and I went to Paris to participate in meetings with the French CEA. We arrived a day early and took the opportunity to do some sightseeing and ran into the Russian delegation led by Yuri Nicholaev at the Louvre. We took advantage of the opportunity to find a quiet spot and discuss our upcoming meeting with the French the following day.

- During that same trip, Yuri asked me to accompany him to an electronics store to help him pick out a stereo for his son. We walked to a store he had found about ten blocks from our hotel. Yuri knew a little English, I knew a little Russian and even less French, and the salesman only spoke French. After a few minutes, a woman who was shopping in the store came over to help. So Yuri would tell me what he wanted in Russian, I'd translate to English, and the woman would translate to French for the salesman. After about 20 minutes of negotiation, Yuri got the stereo he wanted packaged the way he needed to carry on to the plane. I also remember Yuri pulling out this huge wad of cash to pay for the stereo, and me thinking that we were never going to make it back to the hotel in one piece (we made it back safely and proceeded to “wash” the new stereo with vodka in Yuri's room).
- During the planning for a nuclear ground test, part of the discussion was on how we would transport the nuclear fuel from Russia to Albuquerque. Oleg Ishvanov told me that the Soviet Union had a number of vehicles designed to transport nuclear material to the United States (typically on a ballistic trajectory) and he was sure the directions to Albuquerque were programmed on one or more of these “transport vehicles”. He thought that we just needed to find the right code to start the process (I think he was kidding).

These are just a few of the memories I have of the TOPAZ program. It doesn't do justice to the hours and hours of work and planning that went into the project by the US team of young engineers, technicians and staff, the participation of the French and British (although my daughter was surprised to find out she didn't need to speak Russian to Paul Agnew because he spoke “real” English), the mentoring of a large number of summer students (including Don and Mary Bragg's daughters) and interns, and only briefly touched on the teamwork and friendships. For my family and I, the best experience was learning that no matter where we come from, we are all just people, we all have the same fears and worries, and that we can all be good friends who work and play together well. Frank was right, this was a “once in a lifetime” project and we were all blessed to be a part of it.

## **TOPAZ: TSET Summary (by Paul Agnew UK)**

In May 1992, with a shiny new PhD under my belt in radiation effects in insulators, I was asked if I was interested in joining an exciting new project based in Albuquerque, New Mexico. I found out a bit more about the project with a visit to the Ministry of Defence in Whitehall, and then at an SDIO meeting in Edinburgh. It sounded like an opportunity too good to miss: chances like this come along once in a lifetime. In August '92 I flew out (courtesy of the RAF) to Washington to visit the embassy. Graham Gaston and I then flew out to Albuquerque to get acquainted with the project for a few days and to sort out domestic details. After the most turbulent flight I have ever experienced, flying over the Rockies, we landed in the Duke City. A wave of heat and a brown, moon-like landscape greeted me – so very different from green and gentle Oxfordshire whence I had come from. I did not like it much. Back to the UK for a month and then back once again to Albuquerque for real, no-going back now.

I set up home in Presidio at the Northeast Heights and looked out on Sandia Crest – Oxfordshire had nothing to match this view. I shared an office with Oleg Izhvanov and he was a constant source of help, information and friendship. In the early stages of my arrival at NMERI I learned about the technical issues related to TFEs and observed the TSET team at work. Glen Schmidt's morning briefing to the Russian team would start the day off. The core US TSET team consisted of USAF staff and ex-US navy nuclear engineers. Coming from a civilian academic background, the professionalism of the whole team was highly impressive to me and the speed at which tasks were accomplished was amazing.

Degradation of the insulating spacers separating the concentric electrodes was a major life-limiting factors for TFEs. I started to design a test facility to evaluate the influence of long-term exposure to cesium vapour on the surface electrical properties of various insulating ceramics, including sapphire and scandium oxide. Across the road from NMERI was AML – the Advanced Materials Laboratory. Kevin Ewsuk and Kevin Zavadil helped with scientific advice and the loan of equipment. At NMERI we began construction of the experimental facility in a corner of the bay housing the TFE TISA test rig. Initially John Hamill helped and with his brilliant practical engineering skills we soon had

something to work with. John was in much demand and busy with the main TOPAZ testing so I was joined on the project by Jim Watson. Jim was terrific to work with and with his colourful past experience of just about every job imaginable he was able to help with all the experimental problems we encountered. Working with cesium metal was interesting. It is one of the most reactive chemical elements. In the gaseous state it is the largest of any atom and is the easiest to ionize – that's why it is used in thermionics. It is a gold-coloured solid at room temperature, and arrived packaged in small glass ampoules. When you held them in your hand the cesium would melt and flow. I was joined by Judith Ing from the UK and we set about determining the electrical characteristics of insulators in the cesium environment. Judith also worked closely with Kevin Zavadil at AML, studying the surface physics of cesium-on-sapphire. Our materials studies were very much a 'side show of the big show', but everyone made us feel part of the team and that our work was important. I think that was one of the strongest aspects of TSET: a group of highly committed people working toward a clear aim, in a supportive environment with a 'can-do' attitude. At the head of it all stood Frank Thome. Frank's determination and focus charged everyone with an urgency to get the job done and overcome problems. His inspirational leadership made the project move forward and made everyone feel that their contribution could make a difference.

It is impossible to write a TSET retrospective without recalling the social aspects. The parties at Gatewood were a highlight: Russian dumplings ('only half a one for me please!'), Russian vodka and friendship in abundance; camping trips to the Jemez mountains and soccer games, a trip to the Grand Canyon; the international character of the project, with Russian, American, British and French (when we were joined by Francois Linnet from CNRS).

After three years in Albuquerque, what had seemed like a foreign landscape was now home: the Southwest has a way of getting inside your soul and it was hard to leave. I feel proud to have been part of the TSET/TOPAZ story and privileged to have worked with such a fine group of people. Today I look back on those three years as the highlight of my life.

## **Topaz Memories (by Judith Ing, Formerly at Harwell now Rutherford Laboratory)**

I have so many great memories of the Topaz International Program that it's hard to know where to start. I think the one thing that stands out to me was that it was a real project, with Russian and American scientists working together, "on the ground". It wasn't just an exercise in shaking hands and posing for photographs. Not only that, it was an extremely exciting and effective working environment which achieved a huge amount in a short period of time. It maybe doesn't sound so extraordinary now, but this was the early 1990s and the cold war was a very recent memory.

There was always such a large amount of enthusiasm for the project from the participants and their many parent institutions, a real team spirit. This doesn't happen by accident, it needs strong, convincing leadership and a belief among everyone that they're doing something worthwhile. It is impossible to single out individual contributions. One possibly overlooked area of excellence was the amazing abilities of the translators who worked on the project, particularly when translating a multitude of technical terms during a rapidly moving discussion. Without them nothing would have been achieved!

On a personal level, working on the materials research part of the program, it was exciting to gain and use technical skills in developing methods to deposit extremely thin layers of cesium on sapphire substrates, then use different surface analysis techniques to analyse their growth patterns. This work provided a valuable understanding of how electrical insulators begin to degrade in the harsh environment of a thermionic fuel element. To have access to the facilities of the nearby Sandia Advanced Materials Laboratory was a great benefit and avoided the costly development of new surface analysis facilities for the program.

There are many highlights of the program that stay in my mind. One which I will always remember is the arrival of the 4 new reactors at Kirtland AFB in March 1994. Seeing the arrival of the Antonov cargo plane, the reception speeches and the tour of the aircraft made for an amazing morning.

On a more personal level I was so impressed by the warm welcome from the Americans for the overseas participants. This manifested itself in so many ways, not least invitations to their homes (particularly over holidays) and their education into the unique way of life in the Southwestern US. It's very important to know which chilli is the hottest...

## **Из воспоминаний участников программы Топаз - специалистов России**

### **Вениамин Усов (Генеральный директор ЗАО «Инертэк» в 1991-1998 гг)**

#### **Воспоминание об одном критическом моменте программы.**

«... 16 мая 1991 г Кабинетом Министров СССР дано согласие на проведение демонстрационных испытаний в США на коммерческой основе экспериментального образца и компонентов установки Топаз-2 (без ядерного топлива с электронагревом) при условии возврата их без разделки. В конце 1991г испытательное оборудование и две установки Топаз-2 были подготовлены ЦКБМ и Санкт-Петербургским филиалом «Инертэк» для отгрузки в США с оформлением в установленном порядке таможенных документов. Однако, в связи с отсутствием к этому времени согласия Госорганов США на ввоз установок и проведения испытаний фирма ISP известила о приостановке контракта и объявила форс-мажор.

Обстоятельства форс-мажора были сняты американской стороной в апреле 1992г. К этому времени для транспортировки установок Топаз-2 и испытательного оборудования в США были задействованы два самолета военно-транспортной авиации США, которые должны были прибыть в аэропорт Пулково 28 и 30 апреля 1992г. Для приемки изделий в Санкт-Петербург прибыла представительная делегация США во главе с F. Tarantino – руководителем программы.

При повторном оформлении таможенных документов, в связи с изменением ранее действующих правил, таможня потребовала оформленной лицензии на отправку в США установок Топаз-2. Отсутствие лицензии могло привести к срыву всей операции.

Поздним вечером 27 апреля 1992 г Первый заместитель директора ИАЭ им. Курчатова академик Н.Н. Пономарев-Степной и Генеральный директор «Инертэк» В.А. Усов попадают на прием А.Н. Шохину – Первому заместителю Правительства России, исполнявшему в тот момент функции Председателя Правительства России.

А.Н. Шохин рассмотрел сложившуюся критическую ситуацию и по телефону дал указание Министру внешнеэкономических связей

С.В. Глазьеву срочно оформить разовую лицензию. На следующее утро 28 апреля В.А. Усов подписал у Первого заместителя министра атомной энергетики и промышленности А.Г. Мешкова заявку на лицензию. А затем прибывший из Санкт-Петербурга Б.С. Степеннов при содействии сотрудников МВЭС Ю.А. Буйкина получил 30.04 1992 г подписанную разовую лицензию на отправку в США установок Топаз-2.

К моменту прибытия самолетов лицензия была представлена в таможенную службу аэропорта Пулково, что вызвало огромное удивление руководства таможни и радость членов американской делегации, уверовавших в срыве всей операции.

Таким образом критическая ситуация с отправкой в США установок Топаз-2 была ликвидирована и 06 мая 1992 г самолет С-5 с загруженными 2-мя установками Топаз-2 и другим испытательным оборудованием убыл в США, г.Альбукерк, штат Нью-Мексико.

Установка Топаз-2 по объективным причинам не использовалась по прямому назначению в космосе, но она слетала в США и вернулась обратно, проложив путь к международному сотрудничеству России и США в области высоких технологий »

**Юрий Николаев (заместитель Генерального директора НИИ НПО «Луч», Генеральный директор ЗАО «Инертек» в 1998-2006 гг.)**

**Термоэмиссионные электрогенерирующие каналы (ЭГК) ядерной энергетической установки «Енисей» (Топаз-2).**

«ЭГК является одним из основных элементов термоэмиссионной ЯЭУ, в значительной степени определяющих её нейтронно-физические, весо-габаритные, тепловые и энергетические характеристики.

В 1964 году ИАЭ им. Курчатова, Ленинградский ЦКБМ, Сухумский ФТИ, Подольский НИИТВЭЛ начинают работы по созданию одноэлементного ЭГК и на его основе ядерной космической термоэмиссионной энергетической установки мощностью 5 кВт и длительным ресурсом работы. С тех пор на протяжении более 40 лет НИИ НПО «ЛУЧ» (НИИТВЭЛ, ПНИТИ) является разработчиком термоэмиссионных ЭГК.

Выбор в качестве первоочередного варианта ЭГК одноэлементной конструкции с расположением электродов по всей высоте активной зоны обусловлен рядом её преимуществ, таких как:

- открытая полость тепловыделяющего элемента, обеспечивающая возможность испытания как отдельного ЭГК так и реактора-преобразователя в целом на стендах с электронагревом;
- возможность загрузки ядерного топлива в окончательно собранную и проверенную установку;
- надежное разделение полости - ТВЭЛа и межэлектродного зазора;
- относительная простота конструкции.

Ведущим конструктором разработки ЭГК был тогда Ю.М. Конкин, технологические проработки проводились в лаборатории 45 (начальник А.В. Шибанов), в ней же проводилась сборка первых ЭГК. Начала разрабатываться производственная цепочка в цехе № 6 (начальник В.И. Баранов) опытного завода ПНИТИ.

В 1969 году директором ПНИТИ назначается ДФМН, профессор Гвердцители И.Г. бывший ранее директором СФТИ. Там им были организованы и развиты работы по физике, конструированию и испытаниям различных вариантов ЭГК.

С этого времени работы по одноэлементному ЭГК для установки Енисей получили в ПНИТИ активное и широкое развитие.

Разработки конструкции, технологии и испытания ЭГК были поручены вновь организованному отделу 50 (начальник Ю.В. Николаев) в состав которого входили три лаборатории:

- расчетно-теоретическая 51 (начальник ДФМН Кучеров Р.Я.)
- конструкторская 52 (начальник В.Л. Гординский)
- технологическая (начальник Ю.В. Николаев)

Расширение объёма предпетлевых и петлевых испытаний потребовало выделения из 53 лаборатории лаборатории испытаний ЭГК № 54 (Начальник Николаев Ю.В., с 1971 года Чижова Э.М.). Начальником технологической лаборатории стал Б.Ш. Кишмахов.

Организуется лаборатория 56 (начальник Белоусенко А.П.) для создания керамических материалов.

Лаборатория 52 пополнялась как опытными так и молодыми специалистами (Н.В. Плетнев, Н.В. Лапочкин, С.С. Калмыков, М.Д. Кочетков, В.В. Ромоданов, Т.Н. Калинина, Н.Б. Воробьева(Кочеткова),

Р.Н. Марагинский, В.М. Лесников, Ю.Б. Портнов из НПО «Красная звезда»).

Первый стенд «Стрела» был привезён из СФТИ, модернизирован и продолжает работать по настоящее время.

Руководителем группы В.И. Выбыванцем, В.Ф. Платоновым была разработана методика прогнозирования выходных характеристик ЭГК по его электрическим характеристикам в вакуумном режиме, успешно применяемая при выпуске продукции опытного завода.

Перечисленные лаборатории были лишь частью большого коллектива ПНИТИ, работающего над созданием материалов ЭГК, исследованием их прочностных, тепло-физических характеристик и др. К этим работам были привлечены 33 лаборатории из 17 отделов института и основные цеха опытного завода (6, 8, 3, 4)

Технологическо-материаловедческие работы по тугоплавким материалам поручаются отделу 160 (начальник Рымашевский Г.А.) Разработкой и исследованием топливных композиций занимается отдел 140 (начальник Б.Г. Игнатъев, затем Пермяков Л.Н.) отдел 130 (начальник Колесов В.С.) проводит расчетно-экспериментальные исследования прочности ЭГК и его узлов. Отдел 90 (начальник Пупынин В.Н., затем Олейников П.П.) выполняют метрологические разработки и неразрушающий контроль узлов и ЭГК.

В 1976 г. руководитель направления И.Г. Гвердцители был переведен на другую работу. Руководителем направления становится Ю.В. Николаев, назначенный заместителем директора института.

В результате выполненных комплексных исследований и разработок были достигнуты заданные параметры ЭГК по выходным электрическим характеристикам и ресурсу.

Так лабораторией Гонтаря А.С. (М.Н. Нелидов, Л.Н. Шулепов, В.Н. Сотников и др.) была разработана конструкция ТВЭЛа, обеспечивающая минимальную радиальную деформацию оболочки ТВЭЛа.

Группой Е.М. Ракитской был создан топливный материал со структурой обеспечивающей его минимальное распухание.

Лабораторией Ястребкова А.А. (Афанасьев Н.Г., Репий В.А.) созданы уникальные жаропрочные монокристаллические сплавы для оболочек ТВЭЛа.

Найдена керамика обеспечивающая стойкость дистанционаторов в цезиевой плазме МЭЗа (совместно с СФТИ Цецхладзе Д.Л.).

Разработана технология получения синтетического корунда, обеспечивающая требуемую электрическую прочность ЭГК.

Проведены стендовые, петлевые испытания ЭГК и испытания в наземных прототипов ЯЭУ.

Достигнута длительность стендовых испытаний свыше трех лет, петлевых двух лет.

При испытаниях наземных прототипов ЯЭУ не наблюдалось ни одного отказа ЭГК и его элементов.

Комплекты ЭГК поставлялись на сборку ЯЭУ на завод «Двигатель» (г. Таллин). Эта работа проводилась в тесном контакте с конструкторами и технологами ЭГК.

Несмотря на готовность ЯЭУ к летно-конструкторским испытаниям в 1986-1989 г.г. программа дальнейшей разработки ЯЭУ «Енисей» была прекращена заказчиком.

Итогом выполненных работ следует считать создание конструкторских, материаловедческих, физических и технологических основ научно-технической проблемы прямого преобразования ядерной энергии в электрическую методом термоэмиссии, создание основ разработки термоэмиссионных преобразователей (ЭГК) с большим ресурсом работы и высокой надежностью

Результаты работ по установкам Топаз-1 и Топаз-2 (Енисей) были доложены по приглашению Американской стороны на ежегодной конференции по космической ядерной энергетике в г. Альбукерк США.

Сравнение их с аналогичными работами в США и других странах показало существенное опережение уровня разработок в СССР и вызвало целесообразность проведения взаимного обмена информацией.

В 1990 году Правительство СССР и лично М.С. Горбачев приняли предложение США осуществить в рамках международной программы по космической энергетике (TSET) демонстрационные испытания одноэлементного ЭГК и двух прототипов установки «Енисей» на стендах с электронагревом эмиттера. Целью этой программы было подтверждение заявленных характеристик ЭГК и ЯЭУ «Енисей» и анализ возможностей её использования как перспективной энергодвигательной установки.

Выполнение этой работы от «ЛУЧА» было поручено созданному в 1992 году отделению «Научно-исследовательский центр источников

тока» (НТЦ «Исток») (директор В.Ю. Николаев)

Для выполнения в целом совместных работ российских и американских организаций было организовано совместное российско-американское предприятие «Инертэк» (президент Н.Н. Пономарев-Степной и Д. Ветч генеральный директор Усов В.А. позднее Николаев Ю.В.).

Первым этапом этой программы было совместно НТЦ «Исток» и ИАЭ им. Курчатова стенда для испытаний ЭГК с электронагревом и транспортировке его совместно с ЭГК в США в Университет Нью-Мексико (г. Альбукерк) в 1992 году. И уже в январе 1993 года были проведены испытания ЭГК. Полученные выходные характеристики соответствовали заявленным и подтвердили возможность создания на базе ЭГК Топаз-2 ЯЭУ с выходной мощностью до 20 кВт. Результаты испытаний получили высокую оценку сторон.

Но в августе 1996 года программа Топаз-2 была закрыта ввиду переориентации технической политики США в области космической ядерной техники.»

### **Георгий Компаниец, Юрий Нечаев, Борис Степеннов (Российский научный центр «Курчатовский институт»)**

«Новый 1992 г. для участников работ по международной программе Топаз начался неожиданно грустно. Дело в том, что мы все находились в эйфории, связанной с подписанием контракта на проведение наземных демонстрационных испытаний экспериментальных образцов космической ядерной энергетической установки Топаз-2 и ее компонентов без ядерного топлива с электронагревом на стенде в университете Нью-Мексико, США (проект TSET). И жили активной работой по подготовке к проведению испытаний, связанных с созданием теплового стенда в США, поставкой оборудования стендов Байкал и Риг, экспериментальных образцов установки, написанием лекций для обучения американских специалистов. Однако Правительство США объявило форс-мажорные обстоятельства на неопределенное время. Юридически работы по выполнению обязательств контракта приостановились, но фактически продолжались, даже расширялись. В этот период времени с американскими специалистами были подписаны протоколы о намерениях по подготовке отчета по анализу безопасности при

проведении космических летных испытаний Топаз-2 совместно с электродвижителями, по совместной проработке КЯЭУ на 40 квт эл., на разработку и поставку российских электрических двигателей. Наконец в конце марта 1992г. наступил долгожданный момент, когда из Белого Дома США пришло сообщение о режиме благоприятного отношения к приобретению продукции высоких технологий из республик бывшего Советского Союза и конкретно разрешение на покупку с возвратом после испытаний установок Топаз-2, четырех плазменных двигателей. Все закрутилось с удвоенной энергией и скоростью по решению вопросов получения лицензий на поставку оборудования, каким транспортом доставить оборудование и документацию в г. Альбукерке, о сроках обучения. Учитывая, что О.Ижванов и Б. Степеннов должны были участвовать в чтении лекций и одновременно в подготовке отправки оборудования Топаз-2 и стенда Риг, американская сторона предложила вариант, когда Олег Ижванов и Борис Степеннов едут в США в общей группе лекторов, а будут возвращены в Россию, как только будет известна дата перевозки оборудования. По жизни так и получилось. Но это другая история.

### **Лекции в Альбукерке. Прибытие.**

И вот мы 3 апреля 1992 г. летим в США. Мы – это команда из 14 человек из ИАЭ им И.В Курчатова, ЦКБМ и НПО Луч: В. Антипов, В. Озерной, Б. Оглоблин, О.Ижванов, А. Луппов, Т. Медведева, В. Скорлыгин, Ю. Нечаев, Г. Компаниец, Б. Степеннов, А. Бочаров, М. Костанян, П. Матвеев, Г. Оглоблина. Большая часть – бывшие «невыездные» и это их первый выход в свет. Почти сутки полёта, четыре пересадки. Первая часовая остановка для дозаправки самолета – аэропорт Шенон в Ирландии. Первые впечатления – тихо, спокойно, все организовано, мало народу, в магазинчиках много шерсти и изделий из неё, ну и конечно разливное пиво Гиннес. Кто его попробовал – все в восторге. Следующая остановка – Нью Йорк. Пересадка на внутренние линии. При прохождении таможенного контроля возникли первые не привычные для нас обстоятельства: из багажа некоторых наших специалистов служащие таможни в основном женщины негритянского происхождения безжалостно извлекали и выбрасывали в урну наши стратегические съестные

запасы. Горько было с ними прощаться, но Закон есть Закон. Два последних отрезка пути – внутренние авиалинии. Добирались в Альбукерке через Цинцинати и Канзас. Резкая смена публики. Парни в ковбойских шляпах, матроны с корзинками. Очень напоминает наш межобластной автобус. На последнем отрезке, уже перед Альбукерком, добавляется новый контингент – сотрудники многочисленных военных лабораторий. Мужчина рядом с Георгием Компанийцем что-то настукивал в ноутбуке, но за кофе начал разговор. Действительно, американцы очень коммуникабельны! Он представился майором, узнал, куда и зачем направляемся мы и тут же сообщил, что жена его работает как раз в Филипс лаб. Удивило, что запаса английского языка хватило на поддержание беседы.

Прилетели около полуночи. Шумная встреча в аэропорту – пришла вся американская команда во главе с Ф. Томе и Д. Молдером. Ведь для большинства – мы их первые русские (они тоже были невыездные!). Развезли нас по апартаментам – квартирам, по трое в каждой. Поразила подготовка мероприятия (и ещё много раз поражала). В холодильниках – запас еды на первые дни, включая молоко, фрукты. На каждой койке пакет с джентельменским набором – иголки, нитки, расчёска и т.п. Плюс несколько листовок полезной информации – схема расселения нашей команды с телефонами, список американских партнеров с телефонами и отдельно – говорящих по русски. Список телефонов экстренных служб. И наш точный адрес! Только к двум часам ночи мы повалились в койки, получив от хозяев указание – в 5 часов утра подъем и построение во дворе. Ничего уже не поняв, уснули..

Утром мы поняли смысл нашей ранней побудки и почему американские специалисты настаивали на том, что бы мы из Москвы улетели 3 апреля, а не 6 апреля. В США два дня в году первая суббота апреля и первая суббота октября открываются для посещения полигона в пустыне Аламогордо, место первого испытания первой атомной бомбы в 1945 г. И мы прибыли как раз в такой день, 4 апреля – суббота. Эти дни выбраны не случайно. По статистике в эти времена года наблюдаются спокойные погодные условия с минимальными ветровыми нагрузками. В результате не образуется и не переносится пыль радиоактивная, что обеспечивает безопасное пребывание посетителей.

На полигон Тринити Сити ехали большой группой на несколь-

ких микроавтобусах, помимо нас была вся американская команда. Многие с семьями, с детьми. Как на пикник. Вскоре за городом началась настоящая пустыня с колючками, как у нас в окрестностях г. Семипалатинск. Несмотря на утро – жара и влажность всего 10% (!!!). И вот на ровном месте КПП, женщина в форме и с кольцом на животе раздаёт памятки с правилами посещения, указанием возможной дозовой нагрузки и т.п. Дальше едем по территории полигона. Сейчас в будние дни там испытывают ракеты. Через несколько километров ограда и сама «зона». В эпицентре – пирамидка из стекловидной породы. В стороне – бомба «толстяк». Везде патрули. И посетители, и корреспонденты, за оградой – торговцы сувенирами, майками с бомбой и кусочками породы, якобы из эпицентра.

На нас сразу же обратили внимание. Канадское телевидение даже взяло интервью. Пришлось Борису Оглоблину и Борису Степеннову отвечать на многочисленные вопросы, в основном направленные на рассуждения, кто выиграл и кто проиграл в результате окончания



*Рис. 3.11. Посещение полигона в Аламогордо.*

холодной войны. В этой дискуссии очень помогли наши переводчицы Т. Медведева и М. Костянян. Потом посмотрели ранчо Мак-Дональдс, где находился пункт управления и собирался механизм бомбы. Все на удивление просто.

Усталые, но довольные вернулись мы из поездки. На следующий день – полдня воскресного отдыха, во второй половине уточнили программу лекций и в понедельник 6 апреля за работу. Остаток воскресного дня провели, разбирая конспекты лекций. Осмотрели ближайшие окрестности рядом с местом проживания. Первые впечатления – пешком ходили только мы, русские. Город Альбукерке стал интенсивно развиваться в сороковые годы для обеспечения работ по созданию и испытаниям первой атомной бомбы. Когда мы впервые в апреле появились – это уже был город с 500-тысячным населением. Он расположен на пустынном плато (1800 метров над уровнем моря) с кактусами, с кроликами, зайцами свободно гуляющими около домов, Рядом с городом гора Сандия высотой еще 1400 метров над плато. По длиннющей в 1.8 мили трассе фуникулер (SandiaPeakTramway)



*Рис. 3.12. Посещение ранчо Мак-Дональдс.*

поднимает желающих над южным склоном к ресторану, а на северном склоне лежит снег. Красота неопишуемая. В городе прекрасные дороги, полной чаши магазины, чистый воздух, отсутствие суэты мегаполисов- все это произвело на нас неизгладимое впечатление. И сегодня эти впечатления перед глазами, так как перед нашим отъездом американские специалисты подарили каждому плакат с видом ночного Альбукерка, снятого с фуникулера.

### **Лекции в Альбукерке. Начало.**

Отвозил и привозил нас кто-либо из американской команды. Первый день—оргвопросы. Нас сразу снабдили планами этажа с заштрихованными помещениями, куда вход нам был запрещен и расписанием наших лекций. Были предусмотрены и несколько сообщений с американской стороны – в основном по американским нормам и правилам безопасности и контроля. Выделили сержанта Рэнди для помощи в оформлении лекций, прозрочек и т.п. На общем собрании после приветственных речей – обзорный доклад нашего руководителя Б.Оглоблина. В зале (человек под сто) – некоторая нервозность. Почти после каждой фразы – выкрики, вопросы из зала. Похоже, слушатели уверены, что их дурят, но не могут понять где. С трудом Борис Оглоблин внедрил понимание, что он даёт только аннотацию. А на подробности у нас впереди ещё месяц.

И со следующего дня пошел процесс. Лекции шли на двух площадках . На одной – конструкция реактора, нейтронная физика, ядерная безопасность. На другой – термоэмиссия, конструкция ЭГК и т.п. Американская сторона по договоренности с нашим руководством установила в аудиториях видеокамеры и весь цикл лекций был отснят и вероятно сохранился до сих пор (вот бы сейчас посмотреть!). Первые дни ситуация повторялась – из аудитории во время доклада вопросы, в основном не попадая. Это очень мешало. Компанияец начинал второй день. Когда его совсем «достали», он сделал отступление и объяснил, что интересующие данные по ходу доклада у него предусмотрены на четвертой прозрочке. Если джентльмены дадут возможность излагать то, что для них приготовлено – они своевременно всё узнают, а если нет ... . Помогло! А дальше коллеги убедились, что мы приехали не с целью их дурить, не для «красной пропаганды», а по делу. Процесс наладился.

На работу с нами собрали специалистов очень высокого класса, разбавив перспективной молодежью. Так Эл Маршал был известен как специалист по ВТГР, Джо Сапир – работал по ЯРДам. Обстановка вполне корректная. Обсуждались за кофе только опубликованные темы. Хотя отдельные (два-три) участника готовы были копнуть глубже. Так один из них долго и хитроумно пытал нас, что за реактор упал в Канаду. Попотели! Дело в том, что американцы хорошо подготовились и имели конкретные вопросы. Помнится, как Сьюзен Восс загоняла нашу команду в угол. «Вот Юрий Николаев сказал на семинаре, что ....., а Николай Пономарев - Степной дал другие цифры в Альбукерке в 19.... году». Знал бы кто из нас, что сказал Юрий Николаев!!! А у неё в ноутбуке в сумочке все материалы. И если чего нет – она втыкается в телефонную розетку и скачивает всё из Лос-Аламоса. Против такой подготовки было трудно. Однако мастерство не пропьёшь. Наша команда выстояла достойно. И на лекциях начали обсуждать уже действительно принципиальные научно-технические вопросы.

Здесь уместно сказать ещё несколько слов об американской группе. Основу её составляли специалисты из лабораторий им. Филиппа, Сандии и Лос-Аламосской национальной лаборатории. Руководство программой на тот момент – Джим Ли, Фрэнк Томэ, Дэн Малдер. Из постоянных участников следует отметить таких, как Эл Маршал, Сьюзен Восс, Эми Прочко, Brent Моррис, Фрэнк Фэрчайлд, Глен Камерон, Сара Ланкастер, Леонард Коннел, Рой Харман, Джо Сапир. В это же время шла подготовка к приему нашей установки В-71. И технический персонал тоже использовал наш визит для подготовки. Это Билл Чемпион, Рэнди Барсон, Эрл Петерсон и др.

Проблемы взаимопонимания возникали только на почве перевода. Переводчицы у нас были высококлассные. Но с техническим жаргоном – беда. А способных подключиться в трудную минуту у нас было по два-три человека на группу. И то «со словарём». Так А. Бочаров дошёл до выбора люфта у барабана регулирования. И вдруг - американцы слегка прибалдели. Не сразу, но выясняется: переведено «choice» и они обсуждают, из каких соображений его выбирают и какие возможны варианты! Тихо на ухо поправили переводчицу. Но дальше только хуже (это был год выборов Президента). Она поправляется. Но следующее, что просится само - «vote». Слышим, начинаются гипотезы о процедуре выборов люфтов в

России. Докладчик не понимает, в чём дело, что с аудиторией. А слушатели имеют не менее пяти версий и готовы уже ухватить друг друга за галстуки. Пришлось объявлять внеочередной перерыв. Разобрались. А слово-то опять забылось!

### **Лекции в Альбукерке. Сенатор и другие.**

Такая большая группа российских «закрытых» специалистов впервые работала в Альбукерке. Поэтому интерес к ней был повышенным. Многие хотели познакомиться, пообщаться. В одном из отелей мы были приглашены на обед с группой католических священников. Некоторые из них собирались в ближайшее время посетить Россию и задавали много вопросов. На Пасху мы были приглашены на службу в православный храм. Значительная часть прихожан – русскоязычные ещё из послевоенных перемещенных лиц. Очень интересовались положением на родине: у многих там родственники. Больше на Украине. Кстати о службе – православные отмечают Пасху по новому стилю, как и все остальные христиане и, как и остальные здесь – сидят в храме. Несколько раз информацию о нашей группе давали по местному телевидению.

Не обошло нас вниманием и руководство Лаборатории. В честь нас был устроен прием прямо в рабочих помещениях. Руководство, генералитет прибыли с супругами и все желали перекинуться парой любезных фраз с гостями. Оказалось, что светские фуршеты на таком уровне – штука не очень простая. Однако вершиной нашей популярности был визит сенатора Доминичи. К нему готовились ну совсем как и у нас. Приборка, суета, приезд телевидения. Американских партнеров больше всего напрягла команда явиться при галстуках (их обычная форма джинсы, кроссовки). Визит стандартный – речи о дружбе, сотрудничестве. Но, видимо, политически значимый.

### **Лекции в Альбукерке. Культурная программа**

Американская половина команды (а с некоторого момента мы действительно стали действовать как одна команда) старалась максимально адаптировать нас к местной жизни, познакомить со всеми и со всем. Нас приглашали на все местные события. Мы посмотрели и бейсбольный матч, и посетили прекрасный концерт в местной филармонии.



*Рис. 3.13. Визит сенатора Доминичи.*

Отдельно нужно отметить посещение Атомного музея на авиабазе Кёртланд. Это действующая база. При проезде КПП берут подписку о согласии, в случае необходимости, на досмотр. В здании полное собрание вооружений – от первых бомб до очень изощренных выдумок, напр. миномёт для атомных мин. И мина. Как просто крупнокалиберная. Запихать туда заряд – это отдельное искусство. На улице – весь набор носителей: ракеты, самолёты, гаубицы. Фотографировать не возбраняется. Однако во всех залах спиной к нам всегда оказывался один и тот же тип в шляпе. Через год при следующем посещении (уже по другому поводу) удалось увидеть там во временной экспозиции и наш «Енисей» (Топаз-2).

Выходные дни отводились под загородные экскурсии. Посетили старую индейскую деревню с ряжеными индейцами, торгующими сувенирами. Были в заповеднике с пещерными поселениями древних. Заехали в Лос-Аламос, где осмотрели город, музей и заехали на ланч к Сьюзен Восс. Приняты были радушно.

Приемы – это отдельные мероприятия. За время пребывания мы были приняты во многих домах, нас знакомили с родственниками, с соседями и друзьями. Всем с этим полузакрытым городе было интересно посмотреть на людей «оттуда».



*Рис. 3.14. Атомный музей на авиабазе Кёртланд.*

Но вершиной культурной программы были два мероприятия — рафтинг по порогам Рио-Гранде и полёты (не во сне, но наяву) на воздушных шарах. Если к порогам мы оказались подготовлены лучше местных — для многих туризм, байдарка это их молодость, то полёты были в новинку. Оказалось, что основная проблема — это приземление. Лёгкий ветерок гонит спускающийся шар. Когда корзина касается земли, шар продолжает тащить её по колючкам волоком, повалив на бок. Главное, чтобы никто не выпал — иначе облегчённый шар взлетит обратно под облака. Здесь надежда только на наземную команду, которая на скачущем по кочкам фордике должна догнать и зафиксировать шар. И только после этого аэронавты покидают корзину, вычёсывая колючки от перекасти-поля и кактусов. Бррр....

Была еще одна проблема при приземлении. Ни в коем случае нельзя было приземлиться на землю предков коренного населения штата Нью-Мехико. Если бы это произошло, то этот факт рассматривался бы как посягательство на собственность земли индейцев и оскорбление предков. Один из воздушных шаров был унесен далеко от места взлета и должен был приземлиться на земле индейцев. Борис Степеннов был участником этого полета. Опытный командир осуществил посадку таким образом, что шар опустился не в чистом поле, а на дорогу, пересекающую его. После приземления по радиации связались с полицейским участком и представителем поселения, на которое была осуществлена посадка. Примерно через 10 минут на автомобилях приехали представители полицейского участка и поселения. Они зафиксировали место приземления, составили Акт, подписали его и пожали друг другу руки. Примечательно, что все время от приземления до подписания Акта шар находился на месте приземления. После подписания Акта группа сопровождения быстро собрала всю амуницию шара, и участники поехали на место общей встречи, где по традиции и определенному обряду участники первого в жизни полета на воздушном шаре были приняты в стратонавты. К новичкам, которые стояли на коленях, обращался старший стратонавт. Были речи, были присяги, было омовение затылков голов новичков шампанским и многие другие ритуалы. Память на всю жизнь!»

## Валерий Синкевич (представитель ЗАО «Инертек» и Главного конструктора в Альбукерке)

### Взгляд участника с расстояния в 20 лет

«Советский Союз мог позволить себе вести работы по созданию космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) «Бук», «Топаз», «Енисей(Топаз-2)» и содержать в течение более 30 лет всю инфраструктуру для обеспечения этих работ. Были вовлечены лучшие НИИ, КБ и производственные предприятия, тысячи людей. И сколько было *собраний, постановлений, решений*, определивших жизненную судьбу многих участников разработки. Затем последовал период перестройки и приватизации, когда перспективные разработки стали не в почёте, и все волнения, переживания, трагедии и взлёты, связанные с разработкой КЯЭУ, стали вопросом: зачем всё это было нужно?

Нужно сказать спасибо тем людям, которые в такой ситуации нашли возможность продолжить жизнь КЯЭУ «Енисей(Топаз-2)» в новом качестве под названием «Российско-американская программа «Топаз»».

Это было невероятно, что несколько сотен россиян, проработавших всю свою сознательную жизнь в режиме строжайшей секретности, смогли вдруг, сразу окунуться совсем в иной мир.

#### 1. По производству:

- на следующий день, как приехали в Альбукерк с грузом, Нед Бритт приказал мне, как представителю Главного конструктора и ЗАО «Инертек» в Альбукерке, начать работу: вскрывать ящики, расставлять оборудование. Как было принято и оговорено у нас, я сказал, что для этого нужна санкция нашего директора. Нед Бритт тут же берёт трубку, звонит в Россию, Никитину В.П. и говорит, что подобные вопросы должны решаться на месте или представителем или ... Никитин В.П. дал полномочия представителю.
- начиная с этого события и далее происходило очень разумное распределение полномочий между «Центром» в России и производственной площадкой в Альбукерке, что способствовало оперативному решению технических вопросов.
- процедура принятия технических решений на производ-

ственных совещаниях в Альбукерке отличалась от того, как это делалось в С.-Петербурге. В России контролирующие органы в лице ОТК и ПЗ в значительной степени влияли на производственный процесс, так как они его финансировали. Руководствовались они имеющимися КД, ИЭ, ГОСТ и прочими формальными документами, требования которых часто входило в противоречие с конкретной ситуацией на месте.

- нужно отдать должное той организации производственного процесса, который сложился в Альбукерке. Решения принимали технические специалисты, американские и российские, совместно. Конечно, с учётом требований имеющихся документов, но и с учётом конкретной ситуации на месте
- кредит доверия, который образовался между российской и американской стороной позволил в необычно короткие сроки закончить монтаж комплекса и продемонстрировать его технические возможности. Могу себе предположить, что результат нашей совместной работы произвёл хорошее впечатление и позволил продлиться проекту почти 5 лет, вместо запланированных ранее 1,5 – 2 лет.

## 2. По общественно-политической и личной:

- время реализации программы «Топаз» в Америке совпало со временем, которое в России называли «Лихие девяностые». Кино такое есть, документальное. Это было время, когда полным ходом шла приватизация госсобственности. Приватизировали эту собственность большей частью те, кто ближе к ней находился.
- так, что можно считать, что мы, российские участники, работавшие КЯЭУ «Енисей(Топаз-2)» более 30 лет, приватизировали возможность, предоставленную «Лихими девяностыми», продолжать нашу работу со всеми преимуществами, предоставленными российско-американской программой «Топаз».
- можно предположить, что, если бы КЯЭУ «Енисей(Топаз-2)» в эти лихие годы остался в России, то он остался бы там навсегда, как и многие другие новейшие разработки, лишившиеся финансового обеспечения. Получив международную известность через программу «Топаз», есть надежда, что придёт время, когда его технические возможности будут востребованы

странами, нуждающимися в новейших технологиях.

- уверенно могу сказать, что все ( ну, громадное большинство) российских участников программы «Топаз» благодарены этой программе так как она позволила продлить активную деятельность лет на 10 а то и более, найти своё место в трудный переходный период, получить наглядное представление о том, что есть в мире за нашими, бывшими очень крепкими границами.

С наилучшими пожеланиями ко всем участникам программы «Топаз».

## **Переводчики:**

### **Люба Томэ (Усольцева)**

«... Переводить было очень радостно. Чувствовался такой интерес, внимание и уважение к нашим специалистам со стороны американцев, что это не могло не вызывать чувства патриотизма, гордости за нашу страну, нашу науку, технические достижения. Ведь все это происходило сразу после развала Советского Союза. У нас на Родине все кругом рушилось, депрессия и безнадежность, а тут вдруг - кипит работа в самых лучших традициях соцсоревнования. И наши, и американцы работали с огромным энтузиазмом, дружно, слаженно. Американцам очень нравилась установка, они полюбили ее, как свое детище, искренне восхищались техническими решениями, предлагали множество своих идей. У всех была одна цель – запустить «Топаз».

А как мы пели... Наши посиделки в Гейт-Вуде, где мы жили.. Все, как один организм, одна душа. Конечно, были и проблемы, но об этом больше знает мэнеджер программы и мой муж Фрэнк Томэ.»

### **Лариса Мак Мэн:**

«Для меня лично программа «Топаз» открыла новые перспективы и возможности. С самого начала это был уникальный опыт, не похожий ни на что. Впервые в жизни я принимала участие в международном проекте, объединившим людей разных культур, традиций, характеров. В работе приходилось мгновенно переключаться от высокопарных технических дискуссий на более свободные, но не

менее сложные, с точки зрения перевода, темы. И мы, небольшая группа переводчиков, боролись за качество, старались изо всех сил соответствовать высоким требованиям нашей профессии. Конкуренция на переводческом фронте была довольно очевидной, но, в конечном счете, она помогала преодолевать страх и неуверенность. Я с благодарностью вспоминаю программу ТОПАЗ за то, что она дала мне так много, как в профессиональном, так и в личном плане».

### 3.2. Сотрудничество с КНР

Научно-исследовательские работы по мирному использованию космических ядерных энергетических установок до настоящего времени осуществлялись по отдельным контрактам между предприятиями России и КНР во исполнение Соглашения между Правительством Китайской Народной Республики и Правительством российской Федерации от 25 апреля 1996 года и в рамках рекомендаций Российско-Китайской подкомиссии по ядерным вопросам, образованной для подготовки встреч президентов России и КНР.

В работах участвовали с российской стороны РНЦ «Курчатовский институт», ФГУП «Красная Звезда», ФГУП НИИ НПО «Луч», ФГУП ЦКБМ, ЗАО «НП «Энерготех», с китайской стороны – Институт атомной энергии (СИАЕ) и Корпорация ядерной энергетической индустрии (СНЕИС).

С 2000 по 2007 год при финансировании со стороны Института атомной энергии Китая российскими предприятиями был выполнен ряд научно-исследовательских работ (НИР). Основные направления выполненных работ связаны с НИР по выбранному и оформленному техническим заданием СИАЕ варианту космического термоэмиссионного реактора-преобразователя с обслуживающими системами на основе одноэлементных электрогенерирующих каналов, аналогичного созданному в России в период 1969–1986 годов реактору-преобразователю КЯЭУ «Енисей».

В апреле 2001 года по техническому заданию Института атомной энергии Китая по договору между ФГУП «Красная Звезда» с СИАЕ и СНЕИС кооперацией российских предприятий ФГУП «Красная Звезда», РНЦ «Курчатовский институт», ФГУП ЦКБМ, ЗАО «ИНЕРТЕК» и ЗАО «НП «Энерготех» был разработан концептуальный проект китайской КЯЭУ, а в октябре 2007 года разработан технический

проект китайского термоэмиссионного реактора-преобразователя с обслуживающими системами. В декабре 2007 года технический проект был принят представителями CIAE и CNEIC.

Основной базой сотрудничества с КНР является научно-технический, технологический, производственный и экспериментально-стендовый задел по разработанным в России космическим ядерным энергетическим установкам «Енисей» и «Топаз». При этом задел по КЯЭУ «Енисей» не использовался для своего целевого назначения.

После окончания Программы «Топаз» в США все изделия «Топаз-2» и ЭГК, поставленные в США, были возвращены без разделки обратно в Россию. Возвращенные изделия и созданная в России, но не используемая экспериментально-стендовая база для испытаний изделий в настоящее время являются основой для продолжения международного сотрудничества с КНР. Этот задел по КЯЭУ «Топаз-2» может использоваться при совместной разработке варианта китайской космической ядерной энергетической установки.

Кроме финансовой поддержки со стороны КНР, участие российских предприятий в совместной разработке китайской КЯЭУ позволит укрепить взаимопонимание наших стран в такой чувствительной области высоких технологий двойного применения, как ядерная космическая энергетика, и перейти в дальнейшем к реализации совместных программ использования КЯЭУ.

Будучи убежденными, что космическая ядерная энергетика найдет достойное применение в будущем в различных космических миссиях и что разработка космических ЯЭУ может быть выполнена только на базе высоких технологий, включая технологию термоэмиссии, необходимо уже сейчас вести работу по созданию технологического задела с тем, чтобы быть готовыми в будущем создавать требуемые ЯЭУ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С 1990 года работы в России по созданию конкретных космических систем с использованием ядерной энергии прекращены. Работы по космической ядерной энергетике переведены из стадии ОКР в стадию НИР. Тем самым дальнейшее решение проблемы создания космических реакторов отложено на какое-то время.

Учитывая высокую актуальность создания ядерных энергодвигательных систем и для сохранения мирового приоритета России в этой области комиссия при Президенте РФ по модернизации экономики и технологическому развитию в 2010 г. приняла к реализации на этапе ОКР Проект «Создание транспортно-энергетического модуля (ТЭМ) на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и газотурбинной системы преобразования энергии. Реализация Проекта должна быть завершена к 2018 г. и позволит решить ряд новых перспективных задач в космосе:

- повышение эффективности транспортных средств за счет увеличения удельной тяги по сравнению с химическими двигателями;
- возможность реализации промышленных технологий в космосе;
- борьба с астероидной опасностью;
- отработка модулей энергодвигательных установок для будущих экспедиций на Луну и Марс.

Ответственность за реализацию проекта возложена на Федеральное Космическое Агентство (Роскосмос). Научным руководителем проекта назначен Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша; разработчиком ТЭМ определен РКК «Энергия». Госкорпорации «Росатом» поручена разработка ядерной реакторной установки, ОАО «НИКИЭТ» определен Главным исполнителем реакторной установки, а НИЦ «Курчатовский институт» - научным руководителем реакторной установки. Конструкторами-технологами вариантов ТВЭЛ определены ФГУП НИИ НПО «Луч» и ГНЦ РФ «ФЭИ».

В будущем космическая ядерная энергетика найдет достойное применение в различных космических миссиях, требующих больших мощностей и ресурсов работы. Размещение на геостационарных орбитах КА с достаточно мощными ЯЭУ позволит управлять информационными потоками.

Будут развиваться и высокие технологии. По разным причинам отдельные технологические процессы на Земле невозможны. В космосе можно разместить производство сверхчистых и наноматериалов, монокристаллов, неорганических материалов, которые так или иначе будут входить в жизнь людей. Все эти технологии и процессы потребуют энергообеспечения.

Актуальными становятся и вопросы транспортировки в околоземном пространстве и ближнем Космосе.

Очевидно, что человек никогда не ограничится только пределами Земли или околоземным пространством. Он обязательно захочет полететь на Марс, Юпитер, другие планеты. Будут продолжаться исследования дальнего Космоса. Все это требует значительных энергетических затрат и необходимости использования ядерных ракетных и ядерных энергодвигательных установок.

Разработка космических ядерных энергетических установок — сложное и дорогостоящее мероприятие. Для его успешного выполнения необходимы международное сотрудничество и объединение усилий в этой области. Основой такого сотрудничества могут явиться огромный технологический задел по разработке ядерных энергетических установок и ядерных ракетных двигателей, накопленный в США и России за предыдущий период, и опыт сотрудничества по Международной программе «Топаз».

Расширение масштабов космической деятельности, усложнение решаемых космическими средствами задач, рост требований к уровню энергодвигательного обеспечения космических операций объективно способствуют внедрению ядерной энергетики в космонавтику XXI века. Она является практически безальтернативной при выполнении полетов в дальний Космос и проведении операций на других небесных телах.

Эффективным путем развития космической ядерной энергетики должна стать организация международных программ, позволяющих использовать наивысшие достижения стран-участниц проектов. В качестве возможных направлений для международного сотрудничества могут рассматриваться унифицированный автоматический КА с ядерной электроракетной двигательной установкой для полетов к внешним планетам Солнечной системы и ядерные энергетические и энергодвигательные установки, обеспечивающие пилотируемую экспедицию на Марс.

Созданный в России задел по космической ядерной энергетике и разработанные при этом высокие технологии имеют не только узко-направленное значение для космической энергетике, но оказались полезными для применения в смежных областях.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы-составители настоящего издания отмечают огромный труд и выражают благодарность коллективам российских предприятий, создавших космические ядерные энергетические установки («Ромашка», «БУК», «Тополь», «Енисей»), разработавшие высокие технологии, способные найти применение для гражданских целей и в разработках космических ядерных установок следующего поколения.

Это коллективы предприятий:

Главных конструкторов – «Красная Звезда», ЦКБМ;

Научных руководителей: ФЭИ, РНЦ «Курчатовский институт», Исследовательский центр им. М.В. Келдыша;

Технологов-разработчиков отдельных элементов установок: НИИ НПО «Луч», СФТИ, ВНИИНМ и других;

Главных конструкторов космических аппаратов с КЯЭУ: КБ «Арсенал», НПО Прикладной механики, РКК «Энергия»

Авторы отмечают огромную роль руководителей и участников международной программы «Топаз», проложивших путь к международному сотрудничеству в области космической ядерной энергетики. В работах по созданию космических ядерных энергетических установок участвовали большие коллективы указанных выше предприятий. Некоторые из участников работ представлены в настоящей книге и в материалах, опубликованных на международных и национальных конференциях, симпозиумах, в журналах и книгах.

Авторы выражают им глубокую признательность и благодарность. Все они заслуживают поименного упоминания за их огромный вклад в космическую ядерную энергетику, но, к сожалению, это невозможно в рамках настоящей книги.

Авторы книги взяли на себя труд обобщить основные результаты работ, проведенные кооперацией предприятий ЦКБМ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, НИИ НПО «Луч» и других по разработке космических ядерных энергетических установок «Ромашка», «ЕНИСЕЙ» («Топаз-2»), и результаты работ по международной программе «Топаз».

Сегодня это уже история и многих из ее участников нет среди нас, но это героическая история, память о которой и о людях, сделавших ее, заслуживает уважения и благодарности.

## **Публикации и доклады на конференциях специалистов**

### **III Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964 год**

1. Миллионщиков М.Д., Гвердцители И.Г., Абрамов А.С., Горлов Л.В., Губанов Ю.Д., Ефремов А.А., Жуков В.Ф., Иванов В.Е., Ковырзин В.К., Коптелов Е.А., Косовский В.Г., Кухаркин Н.Е., Кучеров Р.Я., Лалыкин С.Н., Меркин В.И., Нечаев Ю.А., Поздняков Б.С., Пономарев-Степной Н.Н., Самарин Е.Н., Серов В.Я., Усов В.А., Фадин В.Г., Яковлев В.В., Якутович М.В., Ходаков В.А., Компаниец Г.В. Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка». — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 5, с. 329-336

### **Ежегодный американский симпозиум по космическим ядерным энергетическим системам. Альбукерк, США, 1989–1997 годы.**

#### **Американская конференция по преобразованию энергии.**

**Вашингтон, 1969 год**

### **Конференция по ядерной критической безопасности. Альбукерк, США, 1995 год**

2. Гвердцители И.Г., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Основные результаты 15 000-часовых испытаний высокотемпературного реактора-преобразователя «Ромашка». — В сб.: Доклады 4-й Американской конференции по преобразованию энергии. Вашингтон, 1969 г.
3. Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергия и космос. — В сб.: Доклады VI симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 1989 г.
4. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Реактор-преобразователь «Ромашка» и перспективы его развития. — В сб.: Доклады VII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 7–10 января 1990 г.
5. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Габрусев В.Н., Луппов А.Н., Лутов Е.И. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Нечаев Ю.А., Николаев Ю.В., Гординский В.Д., Кучеров Р.Я. Малогабаритная космическая ЯЭУ с термоэмиссионным реактором-преобразователем на основе одноэлементных ЭГК. — В сб.: Доклады VIII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 6–9 января 1999 г.

6. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Луппов А.Н., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Николаев Ю.В., Ветч Д. Космическая термоэмиссионная ядерная энергетическая установка «Топаз-2» и перспективы ее развития. — В сб.: Доклады VIII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 6–9 января 1991 г.
7. Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Косовский В.В., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Смирнов О.Н., Усов В.А. Нейтронно-физические аспекты реактора-преобразователя с одноэлементными ЭГК. — В сб.: Доклады VIII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 6–9 января 1991 г.
8. Волков С.П., Глушков Е.С., Дегальцев Ю.Г., Плюхов А.Д., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Концепция обеспечения ресурса гидридного замедлителя ЯЭУ повышенной мощности. — В сб.: Доклады VIII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 6–9 января 1991 г.
9. Гринберг Э.И., Николаев В.С., Усов В.А. Аэродинамическое разрушение космического аппарата и установки «Топаз-2» при возвращении. Log № 108. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.
10. Гарин В.П., Ермошин М.Н., Скорлыгин В.В. Использование температурных сигналов для достижения заданного уровня нейтронной мощности при пуске установки «Топаз-2». Log № 110. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.
11. Скорлыгин В.В., Луппов А.Н., Прикот К.И., Kwan Kwok. Механизм управления барабанами и особенности регулирования реактора «Топаз-2». Log № 262. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.
12. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Ермошин М.Н., Скорлыгин В.В. Исследования поведения критического реактора при аварии, связанной с попаданием установки «Топаз-2» в воду. Log № 109. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.
13. Глушков Е.С., Пономарев-Степной Н.Н., Jon Shapiro, Streetman R. Сравнение кодов и нейтронных данных, используемых в США и России для обоснования ядерной безопасности «Топаз-2». Log № 225. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.

14. Sapir D., Streetman R., Глушков Е.С., Пономарев-Степной Н.Н., Компаниец Г.В., Лобынцев В.А. Доорбитальная критическая безопасность реактора «Топаз-2». Log № 167. — В сб.: Доклады XI Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 9–13 января 1994 г.
15. Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Оглоблин Б.Г., Луппов А.Н., Климов А.В., Николаев Ю.В., Еремин С.И., Кучеров Р.Я. Концептуальные проработки бимодальной энергодвигательной установки со встроенными в активную зону модернизированными одноэлементными ЭГК. Log № 248. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
16. Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Еремин С.А., Кучеров Р.Я., Лапочкин Н.В., Жаботинский Е.Е., Галкин А.Я., Авдошин Е.Д. Концептуальные проработки бимодальной энергодвигательной установки на основе реактора типа «Ромашка» и ТЭП с малым зазором. Log № 249. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
17. Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Ефремов Г.А., Дегтярев Ю.С., Белоусов С.Е., Оглоблин Б.Г., Бочаров А.Ф. Возможности реализации американско-российской Программы NERSTEP с использованием российских систем запуска. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
18. Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Гарин В.П., Гриц Ю.Л., Скорлыгин В.В., Хазанович И.М., Гаврилин Б.Н., Привалов В.В., Фарафонов С.Ф. Система автоматического регулирования установки «Топаз-2». — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
19. Пономарев-Степной Н.Н., Бубелев В.Г., Гарин В.П., Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Чуняев Е.И. Основные результаты экспериментального исследования критической сборки «Нарцисс-М», окруженной песком. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
20. Пономарев-Степной Н.Н., El-Genk M.S., Thome F. Использование «Топаз-2» с различными преобразователями и машинными системами. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.

21. Пономарев-Степной Н.Н., Дегальцев Ю.Г., Кузнецов В.Ф. Слабкий В.Н. Послереакторные исследования и прогноз ресурса ЭГК установки «Топаз-2». — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
22. Досчатов В., Гринберг Э.И., Николаев В.С., Соколов Н.А., Гулидов А.И., Усов В.А. Разрушение реактора «Топаз-2» при спуске в атмосферу и при ударе о поверхность Земли. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г..
23. Николаев Ю.В., Еремин С.И., Колесов В.С., Лапочкин Н.В., Коробов В., Выбыванец В.И., Пономарев-Степной Н.Н., Ветч Д. Одноэлементный ЭГК для термоэмиссионной ядерной установки. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
24. Пономарев-Степной Н.Н., Николаев Ю.В., Никитин В.П. Недорогие космические ядерные энергоустановки на основе опыта и технологии США и бывшего Советского Союза. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
25. Pelowitz D., Sapir J., Глушков Е.С., Пономарев-Степной Н.Н., Бубелев В.Г., Компаниец Г.В., Крутов А.Н., Поляков Д.Н. Три критических эксперимента и расчетный анализ в поддержку программы безопасности «Топаз-2. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
26. Глушков Е.С., Пономарев-Степной Н.Н., Бубелев В.Г., Гарин В.П., Компаниец Г.В., Крутов А.Н., Лобынцев В.А., Майоров Л.В., Поляков Д.Н., Чуняев Е.И., Marshall A., Sapir J., Pelowitz D. Water / Sand Flooded and Immersed Critical Experiment and Analysis Performed in Support of the TOPAZ-2 Safety Programm. — В сб.: Доклады XII Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 8–12 января 1995 г.
27. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная критическая безопасность космических энергетических систем. — В сб.: Доклады 5-й Международной конф. по ядерной критической безопасности. (ICN'95). Альбукерк, N.M. USA, 17–21 сентября 1995 г., т. 2, с. 11.170—11.177.
28. Каландаришвили А.Г., Степеннов Б.С. Детекторы щелочных металлов для контроля утечки теплоносителя в термоэмиссионных ядерно-энергетических установках. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.

29. Каландаришвили А.Г. Основы технологии создания малого термоэлектродного зазора в термоэмиссионных преобразователях энергии с использованием двухфазных систем. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.
30. Гринберг Э.И., Досчатов В.В., Николаев В.С., Соколов Н.А., Назаренко А.И., Усов В.А. Столкновение ядерных источников энергии с космическим мусором. Log № 005. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.
31. Меньшиков В.А., Кузин А.И., Павлов К.А., Зацерковный С.П., Васильковский В.С., Зродников А.В., Николаев Ю.В., Калмыков А., Сорокин А., Буловацкий А., Андреев П.Н., Пономарев-Степной Н.Н., Беззубцев В.А., Адамов Е.О. Концепция разработки в России космической ядерной энергетике. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.
32. Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Зазноба В.А., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Проблемы разработки канала космической бимодальной энергетической установки. Log 018. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.
33. Пономарев-Степной Н.Н., Нечаев Ю.А., Хазанович И.М., Самоделов В.Н., Павлов К.А. Проблемы количественной оценки надежности реакторного блока космической ЯЭУ с термоэмиссионным преобразованием по результатам наземной отработки. Log 157. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.
34. Пономарев-Степной Н.Н., Нечаев Ю.А., Хазанович И.М., Самоделов В.Н., Захаров С.М. Количественная оценка надежности реакторного блока космической ЯЭУ «Топаз-2» по результатам наземной отработки. Log 158. — В сб.: Доклады XIV Симпозиума по космической ядерной энергетике. Альбукерк, США, 26–30 января 1997 г.

#### **Доклады на международных конференциях, проводимых в России**

35. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А. Реактор-преобразователь «Ромашка». — В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.

36. Кайбышев В.З. Результаты экспериментального исследования параметров нестационарного разряда в Cs-Wa таситроне. – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
37. Корюкин В.А. Ресурсные свойства электродов ЭГК ЯЭУ «Енисей». – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
38. Компаниец Г.В., Поляков Д.Н., Усов В.А. Нейтронно-физические особенности реакторов с одноканальными многоэлементными ЭГК. – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
39. Дегальцев Ю.Г., Кузнецов В.Ф., Хазанович И.М., Самоделов В.Н., Гонтарь А.С., Еремин С.А. Использование имитационных моделей функционирования термоэмиссионных ЭГК для формирования возможного облика ЯЭУ. – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
40. Кайбышев В.З., Лысиков А.В. Влияние эмиссионных свойств коллекторов на эффективность ТЭП в дуговом режиме. – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
41. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Соколов Е.Н., Климов А.В., Барабаншиков А.В., Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Николаев Ю.В. Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей». – В сб.: Доклады семинара «Космическая ядерная энергетика-2000». Обнинск, 19–21 апреля 2000 г.
42. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Талызин В.М., Усов В.А., Павшук В.А. Российские космические ядерные энергетические установки и ядерные ракетные двигатели. Перспективы использования энергодвигательных установок и технологий их создания для мирных применений. – В сб.: Совещание экспертов МАГАТЭ, декабрь 2002 г.
43. Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А., Пономарев-Степной Н.Н., Компаниец Г.В., Усов В.А., Василенко В.В., Данилюк А.Ю., Зубров В.Н., Павлов К.А., Рачев Л.А., Чупахин В.П., Шевцов Г.А., Витер В.В., Аракин М.В., Ксенофонтов Е.А., Тарарин Л.А., Полетаев Б.И., Лянной Е.Г., Павлов А.Ю., Романов А.В. Проблемы космической энергетики и роль ядерных энергетических установок в их решении. – В сб.: Конференция «Ядерная энергия в космосе – 2005». Москва, Подольск, 1–3 марта 2005 г.

44. Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Еремин С.А., Лапочкин Н.Е., Николаев Ю.В., Федик И.И., Цецхладзе Д.Л., Ястребов А.А., Пономарев-Степной Н.Н. Базовый электрогенерирующий канал двухрежимных термоэмиссионных ЯЭУ. Научно-технические проблемы разработки и создания. – В сб.: Конференция «Ядерная энергия в космосе – 2005». Москва, Подольск, 1–3 марта 2005 г.
45. Каторгин Б.И., Архангельский В.И., Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Суровцев И.Г., Кодочигов Н.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Федик И.И., Елисеев Ю.С., Гольдинский Э.И. Ядерная замкнутая газотурбинная энергоустановка геостационарного информационного спутника. – В сб.: Конференция «Ядерная энергия в космосе – 2005». Москва, Подольск, 1–3 марта 2005 г.

**Публикации работ по космической ядерной энергетике  
в иностранных и российских изданиях**

46. Миллионщиков М.Д., Гвердцители И.Г., Абрамов А.С., Горлов Л.В., Губанов Ю.Д., Ефремов А.А., Жуков В.Ф., Иванов В.Е., Ковырзин В.К., Коптелов Е.А., Косовский В.Г., Кухаркин Н.Е., Кучеров Р.Я., Лалыкин С.Н., Меркин В.И., Нечаев Ю.А., Поздняков Б.С., Пономарев-Степной Н.Н., Самарин Е.Н., Серов В.Я., Усов В.А., Фадин В.Г., Яковлев В.В., Якутович М.В., Ходаков В.А., Компаниец Г.В. Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка». – Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 5, с. 329–336.
47. Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературная атомная энергетика на земле и в космосе. – В сб.: Доклады научной конференции – Александровские чтения «Атомная наука, энергетика, промышленность». Москва, февраль 2003 г.
48. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.С., Калганов В., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Зродников А.В., Ионкин В., Федик И.И., Николаев Ю.В., Васильковский В.С., Андреев П.В., Рачук В., Белогузов А.Б. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. – Бюллетень по атомной энергии (ЦНИИУЭИ Минатома РФ), 2003 г, № 9, с. 10.
49. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. – Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371.
50. Ponomarev-Stepnoi N.N., Talyzin V.M., Usov V.A. Russian space nuclear power and nuclear thermal propulsion systems. – Nuclear News (USA), 2000, p. 33–46.

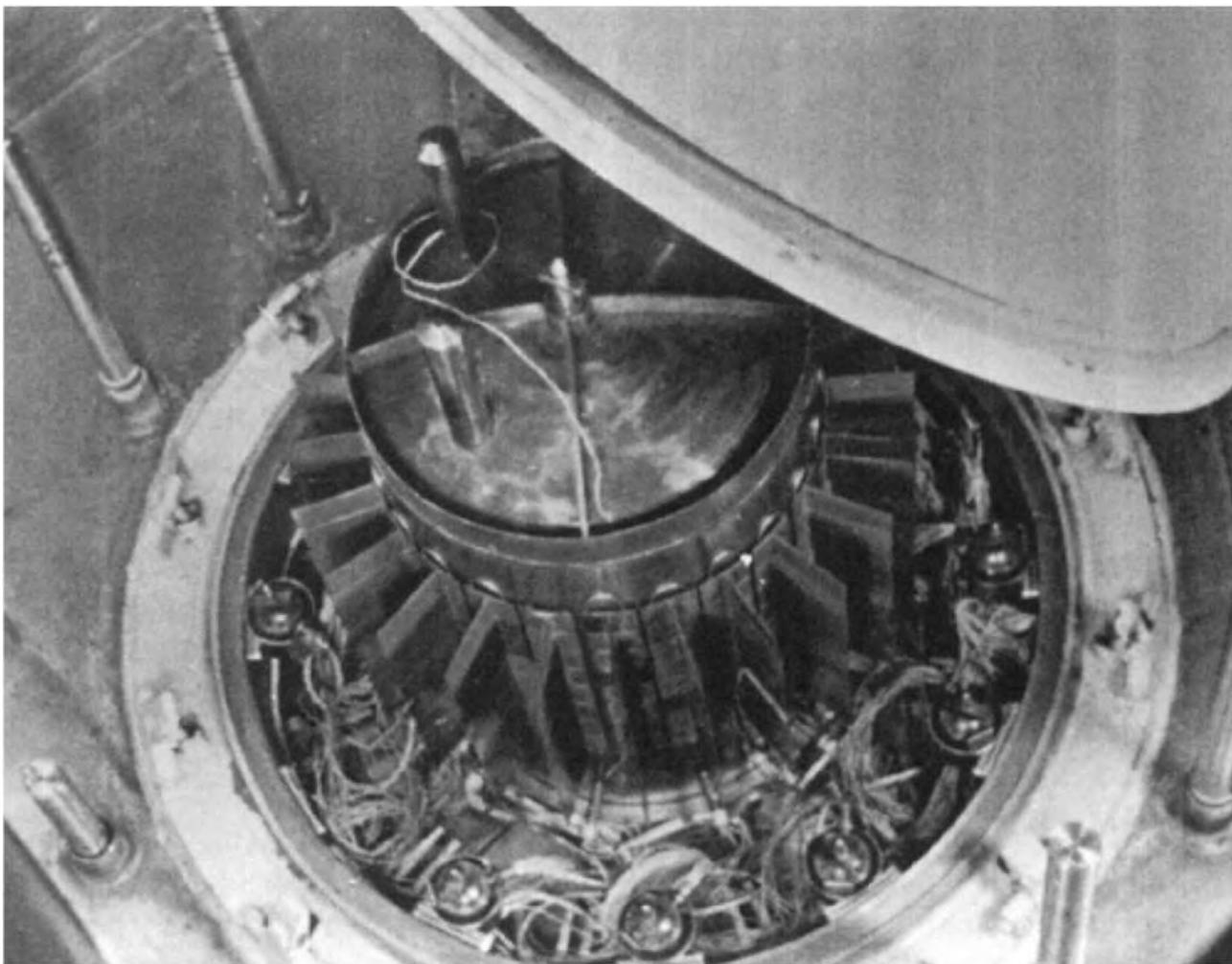
44. Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Еремин С.А., Лапочкин Н.Е., Николаев Ю.В., Федик И.И., Цецхладзе Д.Л., Ястребов А.А., Пономарев-Степной Н.Н. Базовый электрогенерирующий канал двухрежимных термоэмиссионных ЯЭУ. Научно-технические проблемы разработки и создания. – В сб.: Конференция «Ядерная энергия в космосе – 2005». Москва, Подольск, 1–3 марта 2005 г.
45. Каторгин Б.И., Архангельский В.И., Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Суровцев И.Г., Кодочигов Н.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Федик И.И., Елисеев Ю.С., Гольдинский Э.И. Ядерная замкнутая газотурбинная энергоустановка геостационарного информационного спутника. – В сб.: Конференция «Ядерная энергия в космосе – 2005». Москва, Подольск, 1–3 марта 2005 г.

**Публикации работ по космической ядерной энергетике  
в иностранных и российских изданиях**

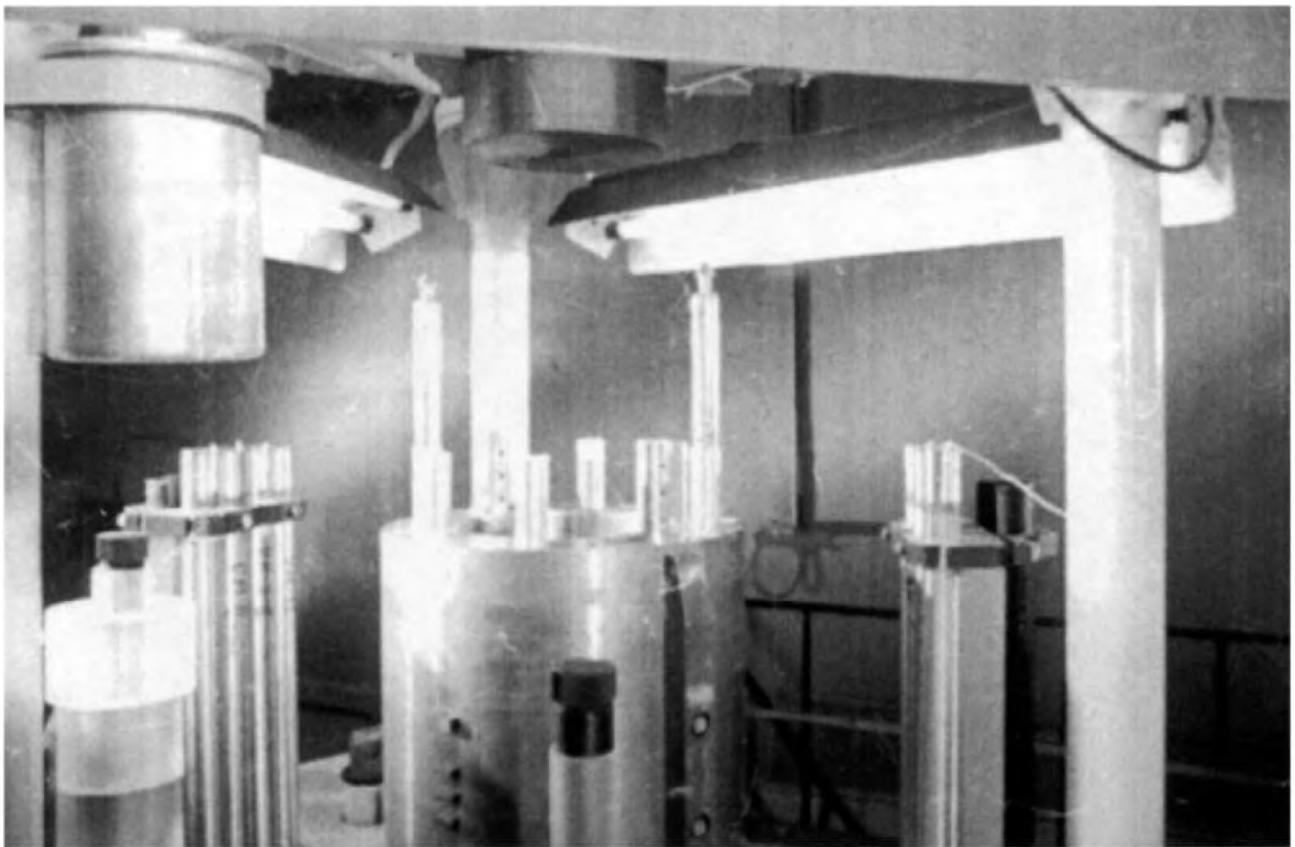
46. Миллионщиков М.Д., Гвердцители И.Г., Абрамов А.С., Горлов Л.В., Губанов Ю.Д., Ефремов А.А., Жуков В.Ф., Иванов В.Е., Ковырзин В.К., Коптелов Е.А., Косовский В.Г., Кухаркин Н.Е., Кучеров Р.Я., Лалыкин С.Н., Меркин В.И., Нечаев Ю.А., Поздняков Б.С., Пономарев-Степной Н.Н., Самарин Е.Н., Серов В.Я., Усов В.А., Фадин В.Г., Яковлев В.В., Якутович М.В., Ходаков В.А., Компаниец Г.В. Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка». – Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 5, с. 329–336.
47. Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературная атомная энергетика на земле и в космосе. – В сб.: Доклады научной конференции – Александровские чтения «Атомная наука, энергетика, промышленность». Москва, февраль 2003 г.
48. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.С., Калганов В., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Зродников А.В., Ионкин В., Федик И.И., Николаев Ю.В., Васильковский В.С., Андреев П.В., Рачук В., Белогузов А.Б. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. – Бюллетень по атомной энергии (ЦНИИУЭИ Минатома РФ), 2003 г, № 9, с. 10.
49. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. – Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371.
50. Ponomarev-Stepnoi N.N., Talyzin V.M., Usov V.A. Russian space nuclear power and nuclear thermal propulsion systems. – Nuclear News (USA), 2000, p. 33–46.

51. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А. Реактор-преобразователь «Ромашка». – Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 3.
52. Ponomarev-Stepnoi N.N. Russian Space Nuclear Reaktor Power Systems. – RSTD (France), 2001, № 53.
53. Ponomarev-Stepnoi N.N., Glushkov J.S., Garin V.P., Kompaniets G.V., Nosov V.I. Criticality and reactivity measurement method for nuclear material control and accountability. – Nuclear Science and Engineering, 2002, LA-UR-02-0512, p. 51.
54. Пилотируемая экспедиция на Марс. Под ред. Коротеева А.С. – Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006, 320 с.
55. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Соколов Е.Н., Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Николаев Ю.В. Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей». – Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 2, с. 95–108.
56. Корюкин В.А. Изменение свойств электродов термоэмиссионных одноэлементных ЭГК на начальном этапе работы. – Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 1, с. 48–57.
57. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Усов В.А., Талызин В.М., Павшук В.Н. Российские космические ядерные энергетические установки и ядерные ракетные двигатели. Перспективы использования энергодвигательных установок и технологии их создания для мирных применений. – В сб.: Доклады международного семинара по космическим двигателям 10-JWC. Италия, г. Лерика, 21–25 сентября 2003 г.
58. Пономарев-Степной Н.Н., Павшук В.Н., Усов В.А. Российский опыт разработки ядерных энергоустановок и ядерных ракетных двигателей первого поколения как основа создания перспективных энергодвигательных комплексов для мирных исследований ближнего и дальнего космоса. – В сб.: Докладов международного астронавтического конгресса. Япония, Фукуока, октябрь 2005, секция C.47/C35, с. 13.
59. Topaz International program. Booz. Allen@hamilton.inc, 1995.
60. Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А., Пономарев-Степной Н.Н., Компаниец Г.В., Усов В.А. Проблемы и роль космической энергетики ядерных энергетических установок в их решении. – В сб.: Доклады Европейской конференции EUCASS, 2005 г.

61. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.П., Колганов В.Д., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Зродников А.В., Ионкин В.И., Федик И.И., Николаев Ю.В., Васильковский В.С., Андреев П.В. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. – В сб.: Доклады Юбилейной международной научно-технической конференции НИКИЭТ. Москва, 27–28 мая 2002 г.
62. Коротеев А.С., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Азеотропный, озононеразрушающий хладагент C1 с невысоким потенциалом глобального потепления ( $GWP < 100$ ) – энергетически эффективный заменитель хладонов R12, R134a, R600a для бытовой и торговой холодильной техники и автокондиционеров. Буклет. Москва, декабрь 2005 г.



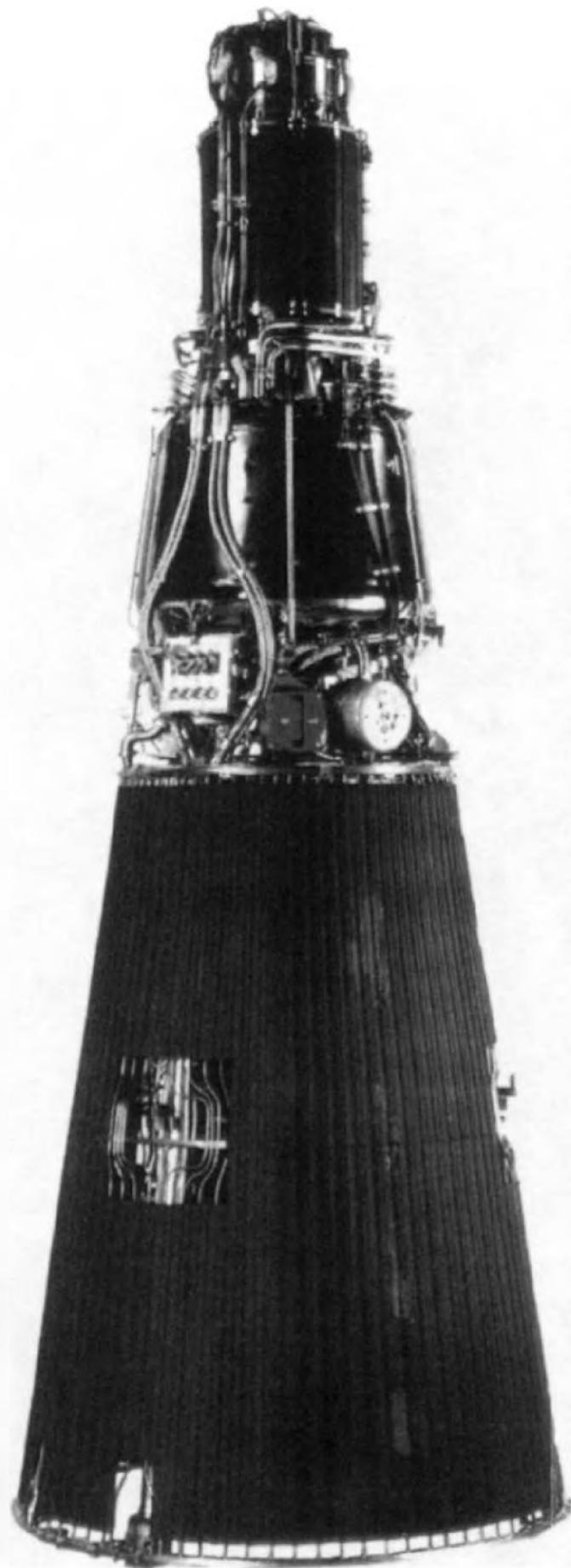
*Рис. 1.6. Общий вид установки «Ромашка»*



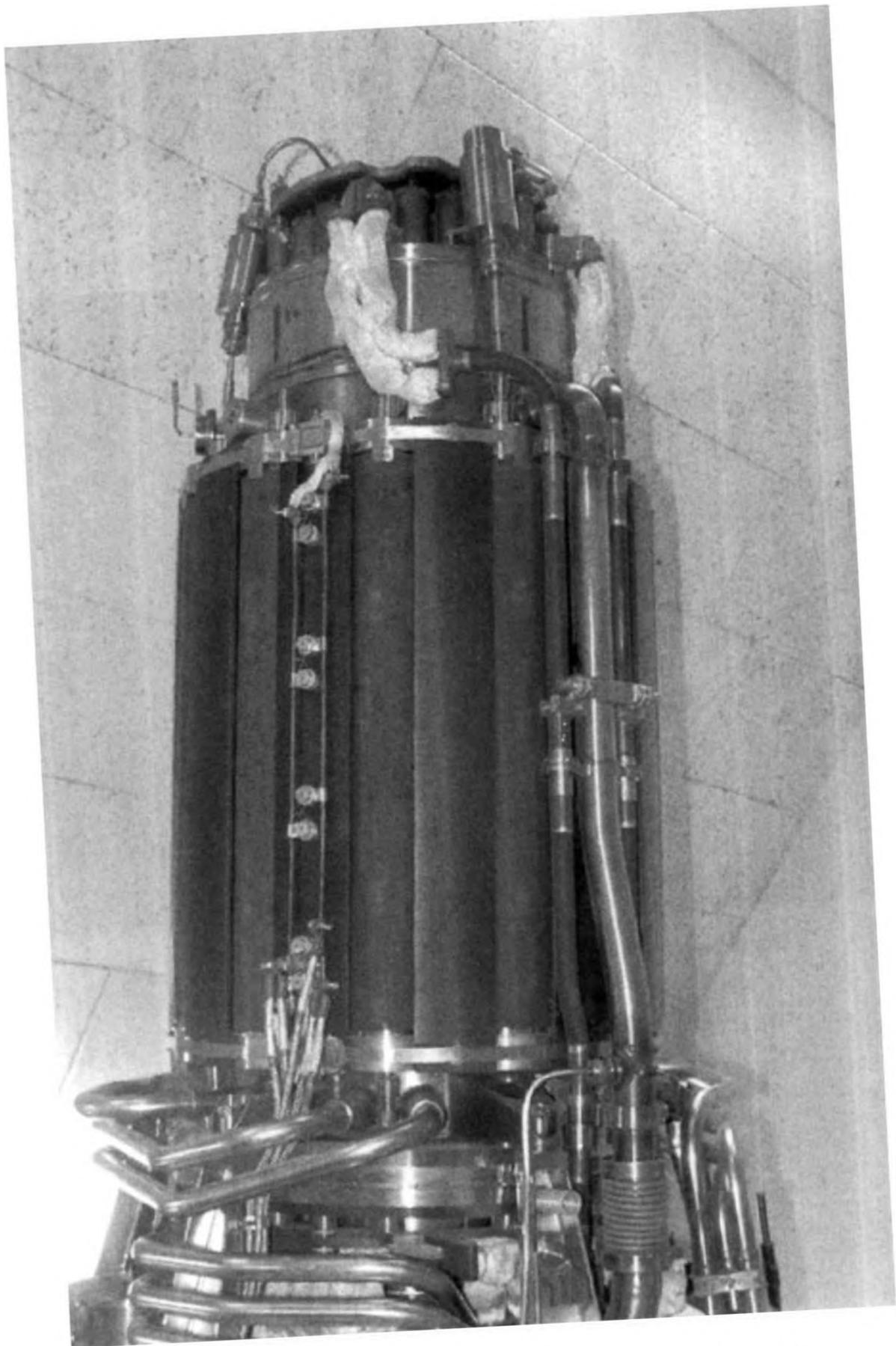
*Рис. 1.18. Критический стенд для исследования НФХ реактора-преобразователя установки «Ромашка»*



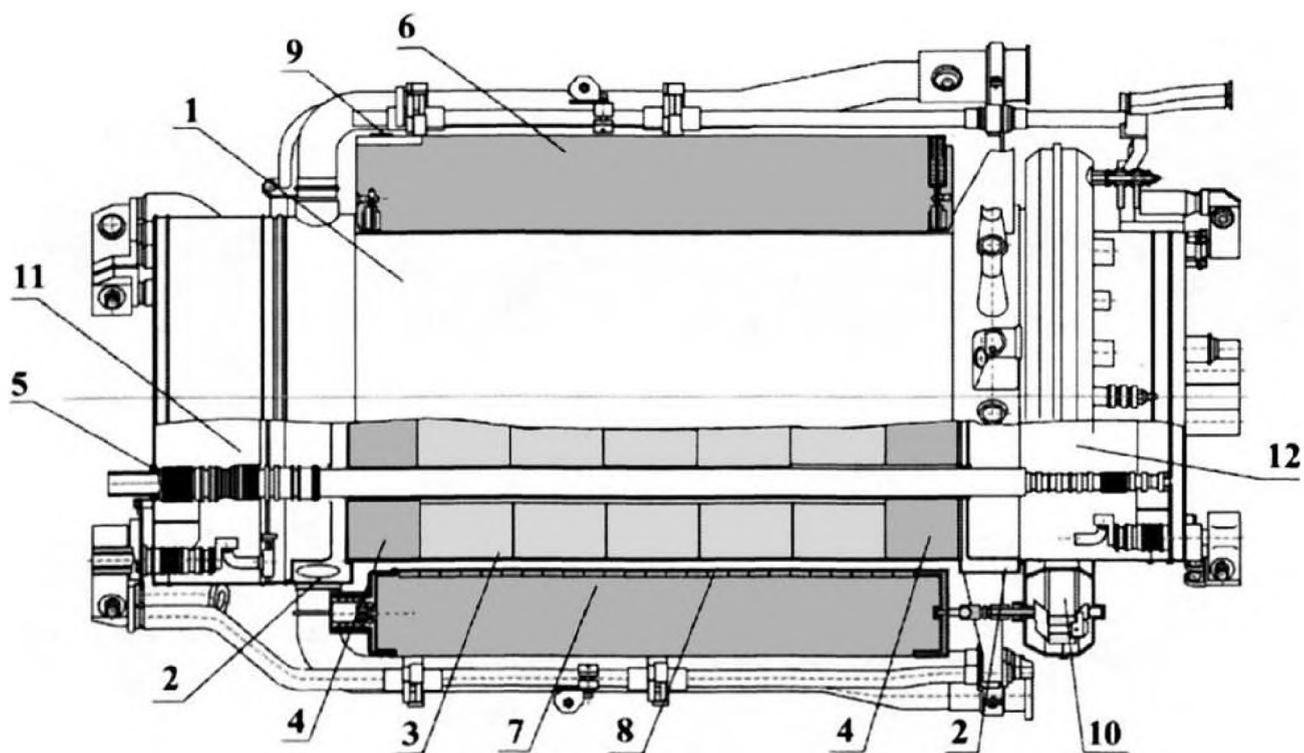
*Рис. 1.42. Участники 40-летнего юбилея со дня пуска реактора-преобразователя «Ромашка»*



*Рис. 2.1. Общий вид космической ядерной энергоустановки «Енисей»*

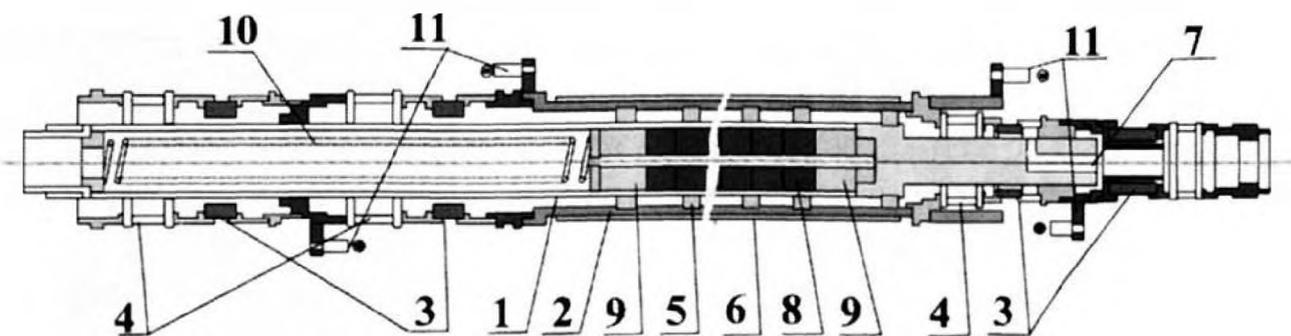
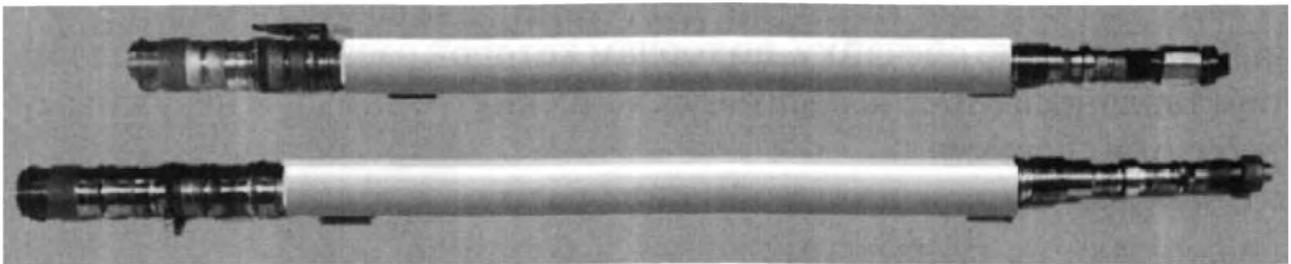


*Рис. 2.4. Общий вид реактора установки «Енисей»*



*Рис. 2.6. Схема реактора установки «Енисей»:*

*1 — корпус реактора; 2 — коллектор теплоносителя; 3 — блоки замедлителя; 4 — торцевой отражатель; 5 — ЭГК; 6 — радиальный отражатель (вкладыш); 7 — стержни регулирования; 8 — поглощающие накладки; 9 — ленточные бандажи; 10 — механизм поворота; 11 — верхняя гелиевая камера; 12 — нижняя гелиевая камера*

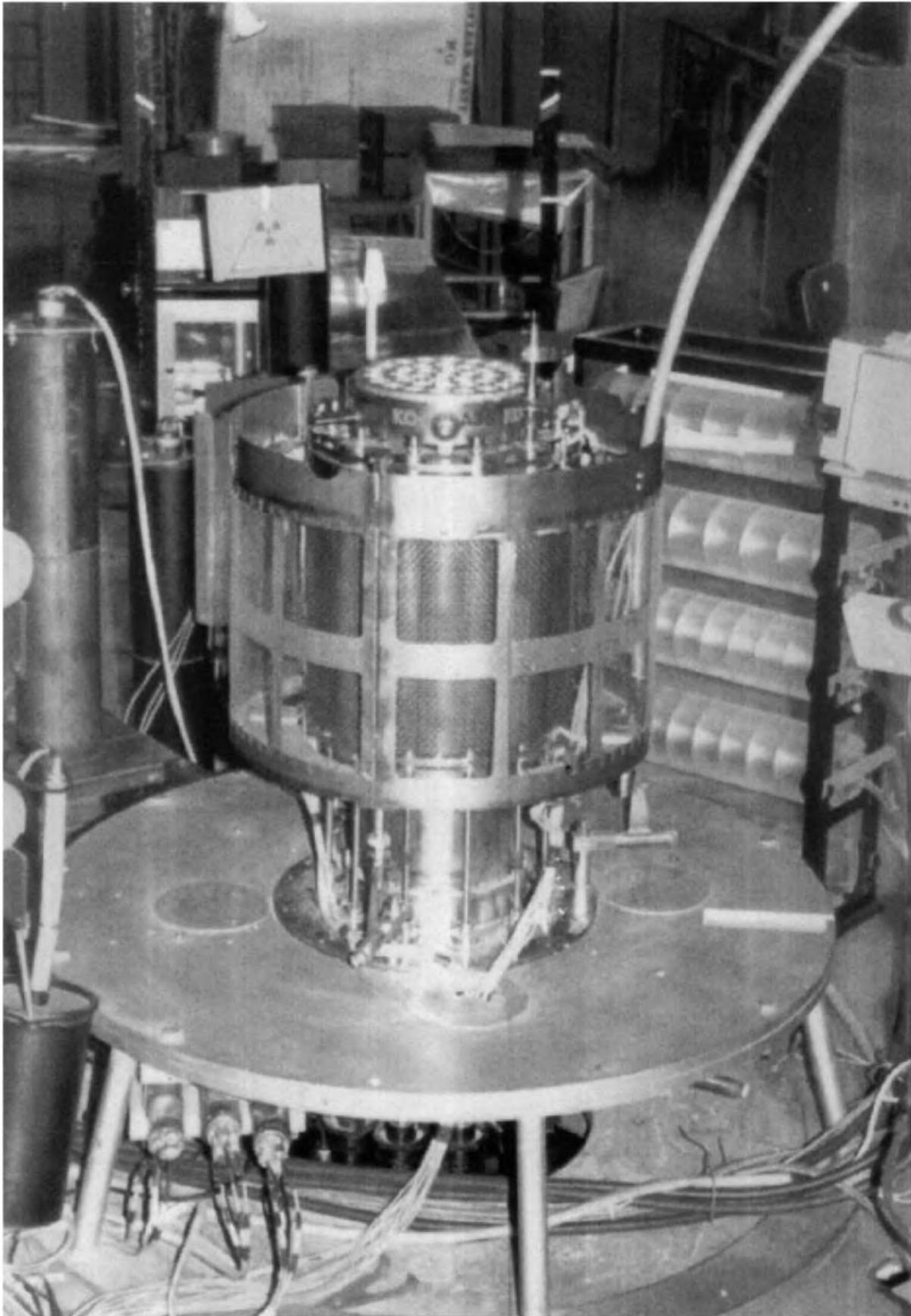


*Рис. 2.7. Общий вид и схема ЭГК установки «Енисей» и одноэлементного ЭГК повышенной мощности:*

*1 — эмиттер; 2 — коллектор; 3 — металлокерамические узлы; 4 — сильфонные узлы; 5 — дистанционаторы; 6 — наружная изоляция; 7 — канал подачи цезия в МЭЗ; 8 — топливо; 9 — торцевой отражатель; 10 — фиксирующее устройство; 11 — токовыводы*

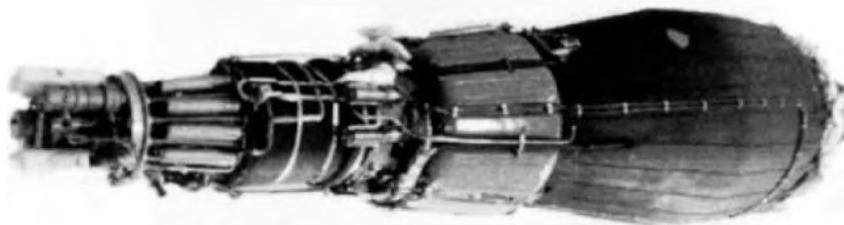


*Рис. 2.10. Общий вид стенда «Байкал» (ЦКБМ)*



*Рис. 2.11. Нейтронно-физический стенд «Нарцисс»  
с прототипом реактора «Енисей»*

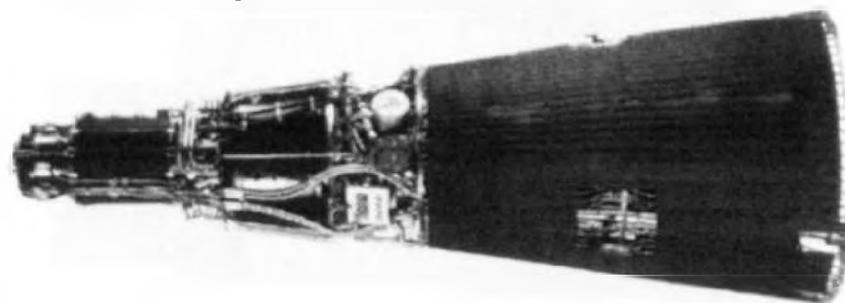
### Космическая ядерная энергетическая установка «Топаз»



Разработка ГП «Красная Звезда»

Мощность электрическая, кВт	5,0
Мощность тепловая, кВт	150
Загрузка урана-235, кг	11,5
Масса, кг	980
Подтвержденный ресурс, год	1

### Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей»

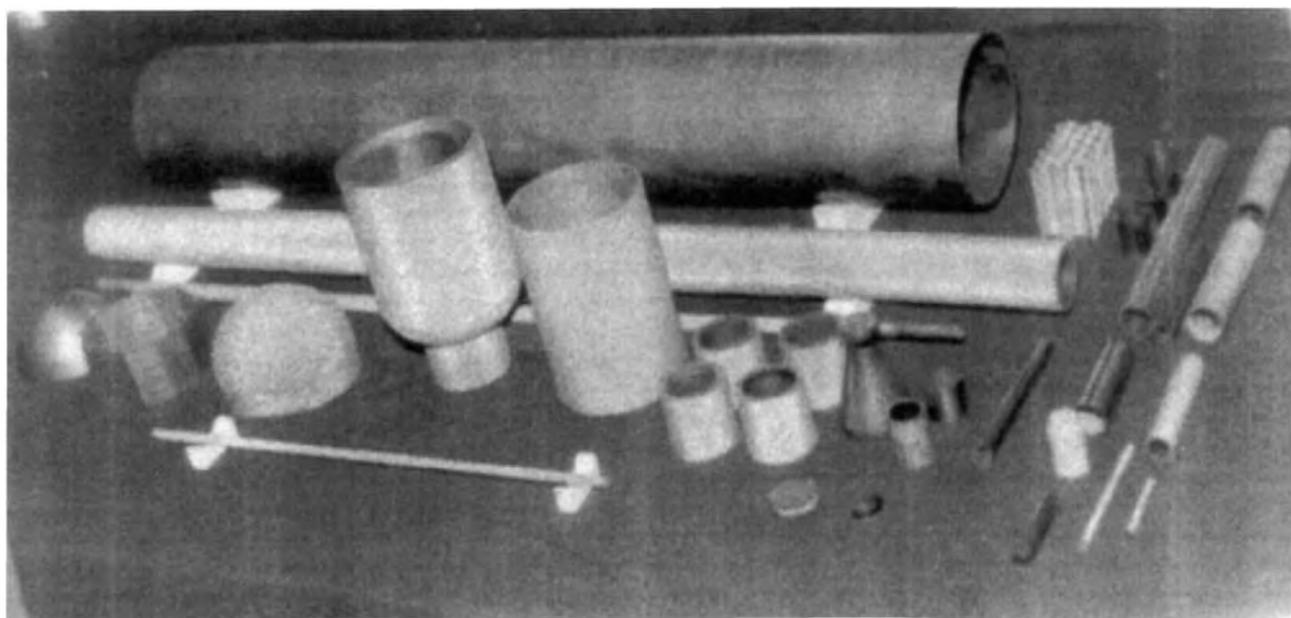


Мощность электрическая, кВт	4,5 + 5,5
Мощность тепловая, кВт	≤135
Загрузка урана-235, кг	25
Масса, кг	980 (780 с легким блоком защиты)
Подтвержденный ресурс (при ядерных энергетических испытаниях), год	1,5 (с прогнозом до 3,0 лет)

Рис. 2.17. Российские космические ядерные энергетические установки первого поколения с термоэмиссионными преобразователями энергии



*Рис. 2.24. Аноды для мощных рентгеновских трубок медицинского назначения с W- и W—Re-покрытием, полученные газофазным осаждением*



*Рис. 2.25. Крупногабаритные изделия из вольфрама и его сплавов, полученные газофазным осаждением*

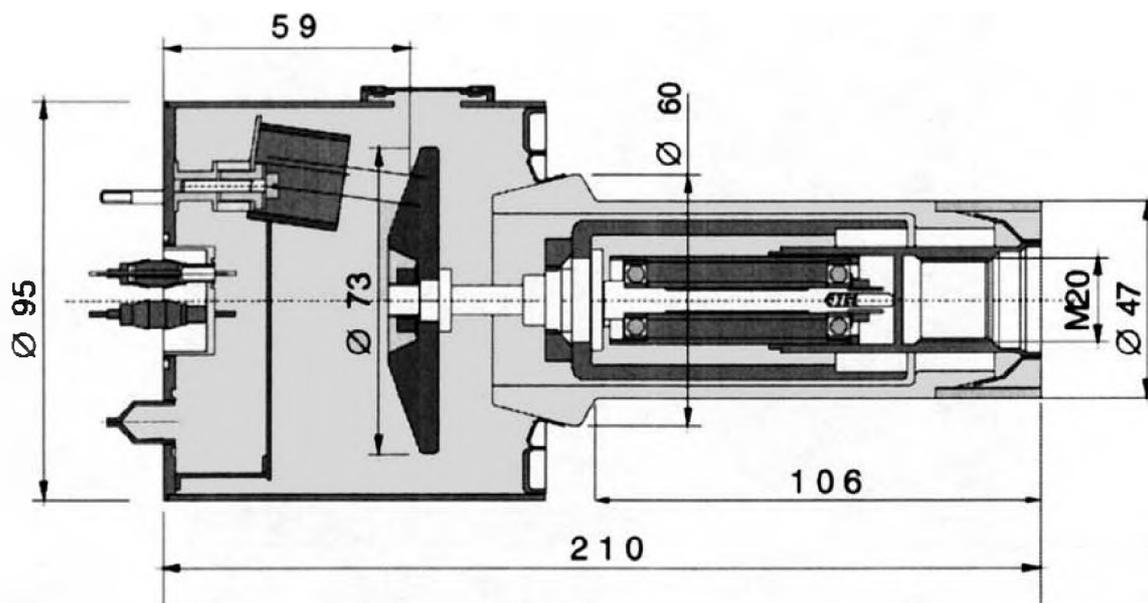
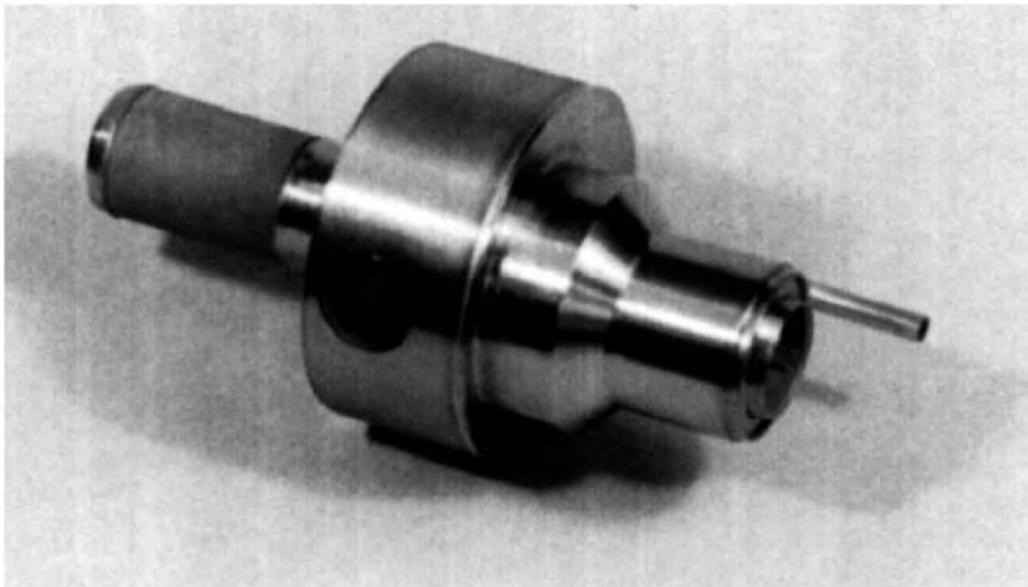
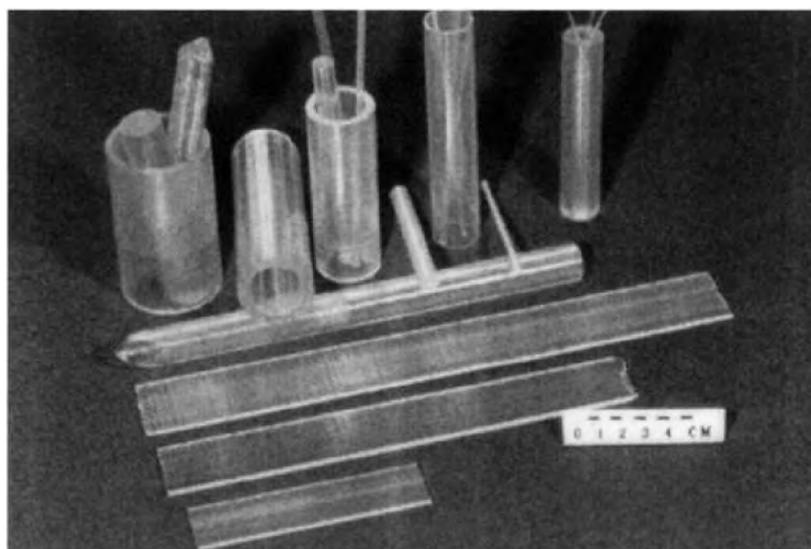


Рис. 2.26. Металлокерамическая вращающаяся анодная рентгеновская трубка



*a*

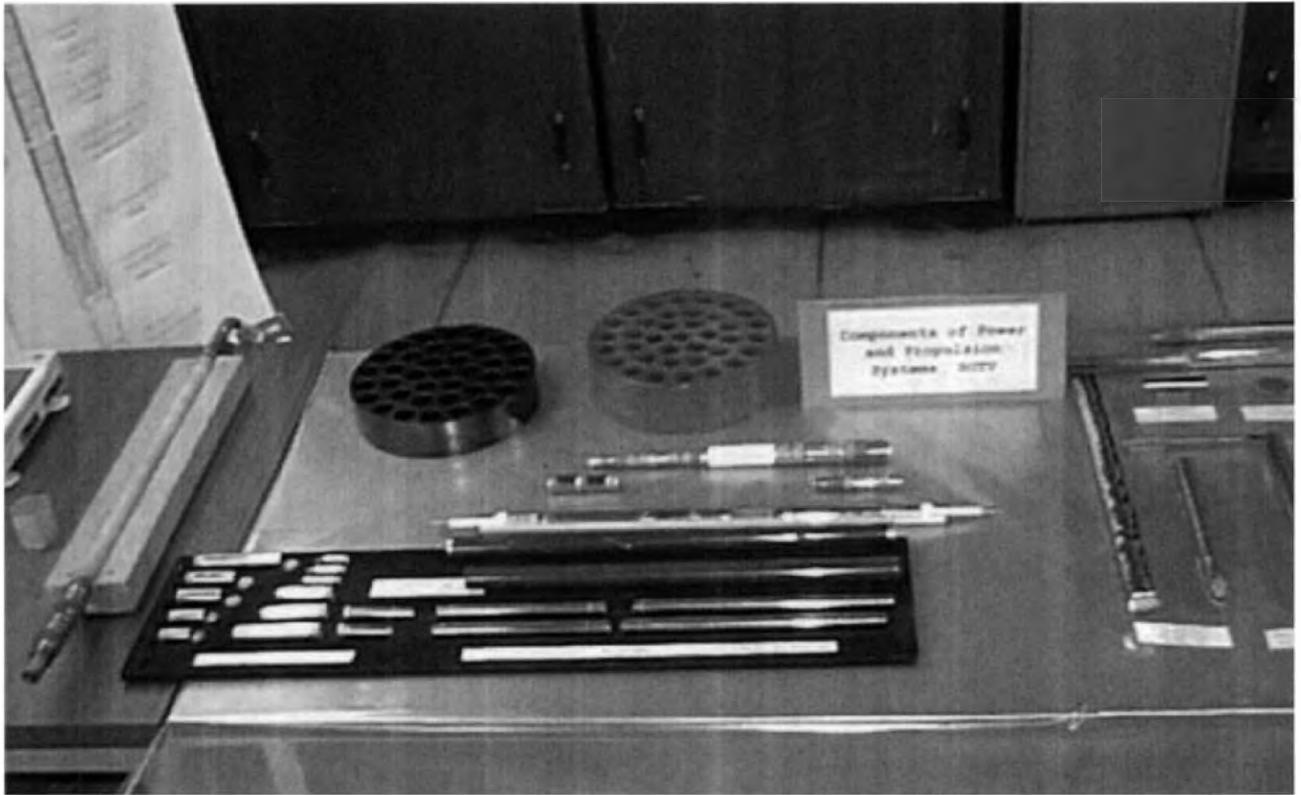


*б*



*в*

*Рис. 2.27. Искусственный корунд (лейкосапфир) и изделия из него: а – профилированные кристаллы; б – шлифованные и полированные изделия; в – металлокерамические узлы с изоляторами из лейкосапфира*



*Рис. 2.28. Монокристаллы — конструкционные материалы XXI века*

**НОВИНКА**

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ  
ОЗОНОНРАЗРУШАЮЩИЙ  
ХЛАДАГЕНТ С1 — заменитель  
фреона R12**



- По своим показателям не уступает R12.
- Может применяться в холодильниках, спроектированных для работы на R12, без изменения их конструкции.
- Освоено опытное производство /ТУ-2412-040-00480689-94/.
- Защищен патентом РФ № 2088626 от 27.04.94 г. и международным приоритетом в Patent Cooperation Treaty-PCT/RU94/00191 от 27.04.94 г.
- На 43-й Международной выставке изобретений (43-nd World Exhibition of Invention, Research and Innovation) АО «ИНЕРТЕК» за хладагент С1 получил диплом и бронзовую медаль.



*Рис. 2.29. Озоноразрушающий хладагент С1*

Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной, В.А. Усов

**Космическая ядерная энергетика  
(ядерные реакторы с термоэлектрическим  
и термоэмиссионным преобразованием –  
«Ромашка» и «Енисей»)**

*Под редакцией академика РАН Н.Н. Пономарева-Степного  
(издание второе, дополненное)*

Редактор: Бокша Н.В.

Художник: Пономарева-Степная М.Н.

Верстка: Никитин К.Э.

Подписано в печать 21.09.2012. Формат издания 60×90/16  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл.печ.л. 9.  
Тираж 300 экз. Заказ № 1331

Издательство по Атомной технике (ИздАТ)  
123182, Москва, ул. Живописная, д. 46, тел. 8-499-190-96-03

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»  
121099, Москва, Г-49, Шубинский пер., 6

*Т*рудности обеспечения нарастающего спроса на энергию

нацеливают общество на новую волну крупномасштабного использования атомной энергии. Одним из инновационных направлений развития атомной энергетики станут высокотемпературные реакторы, обеспечивающие расширение областей использования атомной энергии, включая производство водорода.

Колоссальный объем исследований и разработок, выполненных на предшествующих стадиях освоения атомной энергии, имеет неоценимое значение в предстоящей работе по созданию новых ядерных технологий, востребованных ныне и необходимых для ближней и отдаленной перспективы.

В предлагаемую серию "Физико-технические проблемы ядерной энергетики" вошли работы по

*высокотемпературной ядерной энергетике, направлениям ее использования,*

*атомно-водородной энергетике,*

*физике и технике высокотемпературных реакторов ,*

*высокотемпературным ядерным материалам и топливу,*

*термоэмиссионным преобразователям,*

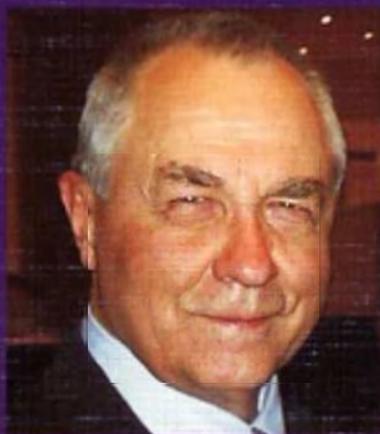
*моделированию процессов в системах на микро и макро уровне,*

*реабилитации территорий,*

*нераспространению и физической защите.*

Предлагаемые издания не исчерпывают накопленного объема информации, и следует надеяться, что

полезность этого издания стимулирует продолжение серии.



Н.Н. Пономарев-Степной  
Академик РАН.

