

ТЕРМОЭМИССИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ¹

В.З. КАЙБЫШЕВ
(НИЦ “Курчатовский институт”)

II. ДОЛГАЯ ДОРОГА В КОСМОС

На явлении термоэлектронной эмиссии основана работа многих вакуумных электронных приборов, но только с начала 60-х гг. прошлого столетия начались интенсивные исследования нового метода преобразования тепловой энергии в электрическую с целью использования его в космических ядерных энергоустановках для выработки электроэнергии. Вначале эти исследования проводили на лабораторных моделях термоэмиссионного преобразователя, в которых в качестве источника тепловой энергии использовались электрические нагреватели. Изучали влияние многочисленных факторов на эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую и физику процессов в узком межэлектродном промежутке и на поверхности электродов. Экспериментальный стенд для выполнения исследований содержит вакуумную камеру, откачиваемую вакуумными насосами, источники пара цезия и других веществ, влияние которых изучают, нагревательные элементы, а также термодатчики для измерения поля температур макета и другую диагностическую аппаратуру. Примеры лабораторных моделей ТЭП и стендов, на которых эти модели испытывали в лаборатории термоэмиссионных преобразователей в РНЦ “Курчатовский институт”, показаны на рис. 1–3. Один из стендов,

оснащённый вспомогательными системами для подачи в межэлектродный зазор ТЭП цезия, различных инертных и активных газов, а также содержащий масс-спектрометр для измерения состава межэлектродной среды, показан на рис. 3. На нём были выполнены исследования по эффективности использования в ТЭП в качестве источника положительных ионов вспомогательного разряда в различных инертных газах. Измерены ВАХ в ТЭП с разными материалами электродов, отработана новая методика измерения и выполнены сами измерения электронного охлаждения эмиттера в режиме снятия тока.

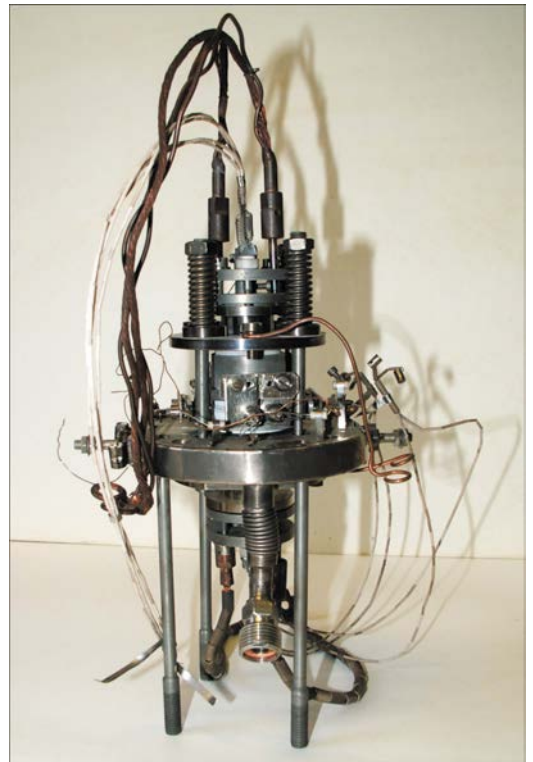


Рис. 1.
ТЭП с плоской геометрией электродов для измерения ВАХ в смеси паров цезия и бария и изучения его работы с промежуточным электродом между эмиттером и коллектором в режиме полностью управляемого вентиля для преобразования постоянного тока реактора-генератора в переменный ток.

¹Продолжение. Начало в № 3, 2018 г.

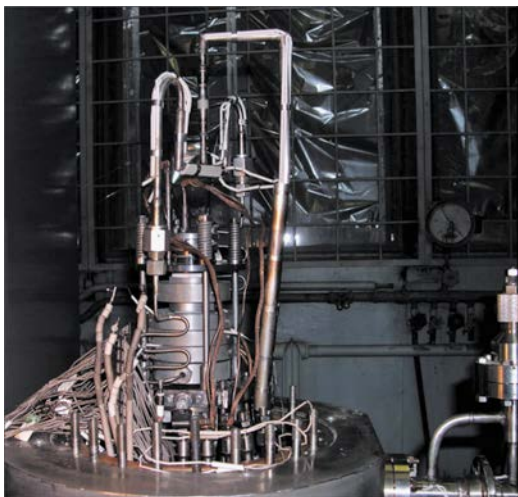


Рис. 2.
Модель ТЭП с цилиндрической геометрией электродов в процессе монтажа на стенде для широкого спектра исследований, связанных с влиянием состава межэлектродной среды при работе его в условиях реактора.

Рис. 3.
Экспериментальный вакуумный стенд, оснащённый вспомогательными системами для подачи в межэлектродный зазор ТЭП цезия, различных инертных и активных газов.

Ядерные энергетические установки с термоэмиссионным преобразованием энергии²

В 1969 г. КБ Прикладной механики в Красноярске было поручено создать космический аппарат, который должен обеспечить непосредственное вещание на отдаленные районы страны. Энергетическую установку для этого аппарата было поручено создать организациям Министерства среднего машиностроения (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”³ (рис. 4), разрабатываемая с 1963 г. на основе термоэмиссионной системы преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электричество с использованием одноэлементных ЭГК, встроенных в активную зону реактора.

С некоторым опережением по времени по отношению к установке “Енисей” в кооперации НПО “Красная Звезда” и ГНЦ РФ–ФЭИ в качестве дублёра установки “БУК” (вариант с термоэлектрическим преобразованием энергии) разрабатывался вариант термоэмиссионной КЯЭУ

²Раздел был подготовлен с использованием данных, опубликованных в книге: Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – “Ромашка” и “Енисей”). Москва: ИздАТ, 1912, авторы Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарёв-Степной, В.И. Усов.

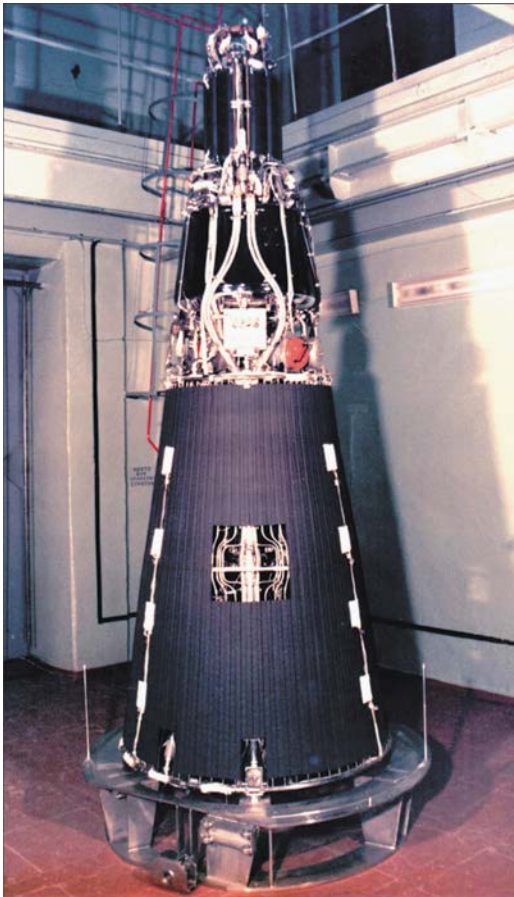
³В материалах об отечественных космических ядерных энергетических установках с термоэмиссионным реактором-преобразователем встречаются другие названия: “Топаз-1” называется “Тополь”, “Топаз-2” – “Енисей”, “Топаз-3” – “Топаз-100/40” (прим. ред.).

“Топаз”⁴ (рис. 5) 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). По данным, опубликованным в США, в это время и там были широко развёрнуты исследования по термоэмиссионным преобразователям для космических реакторных установок. Хронология этих работ представлена в таблице 1.

Всё оборудование скомпоновано в реакторном блоке, имеющем вид усечённого конуса, в вершине которого распо-

⁴Термоэмиссионный Опытный Преобразователь в Активной Зоне

Рис. 4.
Один из экспериментальных образцов космической ядерной энергоустановки “Енисей” на выставке 8-го Симпозиума по космической ядерной энергетике в США (январь 1991 г.).

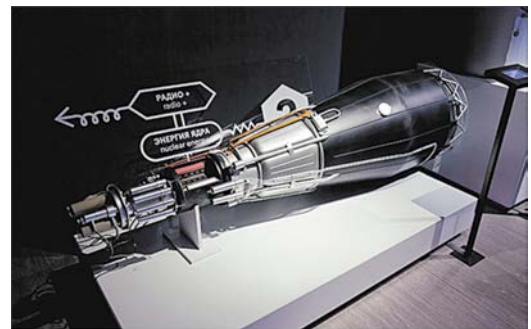


лагается реактор. За ним размещается радиационная защита, роль которой частично выполняет и холодильник-излучатель. В “тени” защиты находится остальное оборудование.

По энергетическим характеристикам установки “Топаз” и “Енисей” близки (рис. 6). Но они принципиально различаются конструкцией электрогенерирующего канала (ЭГК). В установке “Топаз” ЭГК состоит из пяти последовательно соединённых элементов, эмиттер каждого из которых содержит топливо. Поэтому нагрев эмиттера возможен только за счёт цепной реакции в топливе. А ЭГК установки “Енисей” представляет собой один сплошной элемент на всю длину активной зоны, а топливные полости всех ЭГК могут заправляться топливом после полной сборки реактора с его торца. Имеется возможность вместо топлива поместить в полости электронагреватели и проверить все системы без запуска реактора. Это значительно упрощает отработку установки и всех её многочисленных систем.

Имеется ещё одно важное преимущество одноэлементной конструкции ЭГК. Для предотвращения короткого замыкания между эмиттером и коллектором в результате распухания эмиттера под действием давления газообразных продуктов деления (ГПД) последние необходимо удалять из топливной полости. В конструкции одноэлементного ЭГК вывести ГПД минуя межэлектродный зазор гораздо проще, чем в многоэлементном ЭГК. Пока ещё отсутствует надёжная конструкция многоэлементного

Рис. 5.
Общий вид установки “Топаз” в демонстрационном зале политехнического музея.



Хронология работ в США по термоэмиссионным реакторным установкам

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
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" двухкаскадного 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 космического и морского применения. В СССР группой Г.М. Грязнова в 1963 г. выпущен эскизный проект термоэмиссионной КЯЭУ с многоэлементными ЭГК. 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.
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. В период 1975–1986 гг. 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".
Октябрь 1983		Фирма SPI получила утешительный контракт на оценку термоэмиссионного реактора	

Таблица 1 (окончание)

Год начала работ, интервал	Заказчик работ	Содержание	Примечание
Октябрь 1986	SDI-DDE	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 доработки 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
Январь 1989		Начало переговоров фирмы SPI и ИАЭ им. И.В. Курчатова о сотрудничестве в области космических термоэмиссионных установок для гражданских применений	

ЭГК, позволяющая выводить ГПД минуя межэлектродный зазор. В результате радиоактивного распада ГПД появляются элементы, которые могут конденсироваться на электродах, в первую очередь на более холодном коллекторе, увеличивая его работу выхода.

Но в ядерных энергоустановках повышенной мощности, в которых не только диаметр, но и высота активной зоны с точки зрения нейтронной физики должны быть выше, в одноэлементном ЭГК из-за большой длины электродов будут высоки омические потери напряжения. В этом случае многоэлементный ЭГК будет предпочтительней (табл. 2).

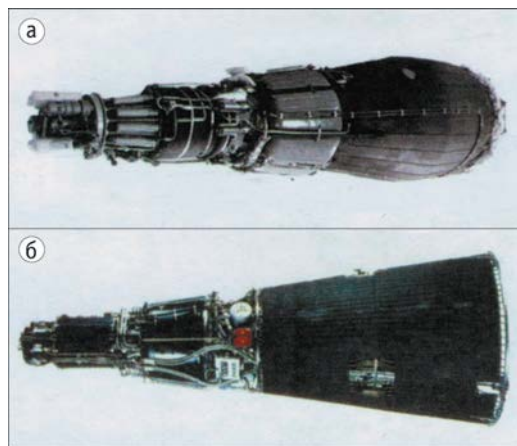
В 1987–1988 гг. в СССР впервые в мире в составе КА "Космос-1818" и "Космос-1867" испытаны на орбите две установки "Топаз" с ресурсом 0.5 и 1.0 год.

К 1988 г. установка "Енисей" прошла полный цикл наземных испытаний, необходимых перед этапом лётных конструкторских испытаний (ЛКИ) в составе КА, подтвердив требуемые по ТЗ параметры и ресурс 1.5 г. с возможностью достижения ресурса не менее 3 лет. Перед этим в период 1975–1986 гг. в ИАЭ им. Курчатова и НИИП проведено 6 ядерных энергетических испытаний опытных образцов КЯЭУ. По результатам экспериментальной обработки КЯЭУ "Енисей" могла

быть допущена к летным испытаниям. Однако в 1988 г. вследствие возникших экономических трудностей в стране, перестройки экономики и реакции на аварию на Чернобыльской АЭС разработка космического аппарата была прекращена и вследствие этого прекратилось финансирование работ по КЯЭУ "Енисей".

Основные проектные характеристики термоэмиссионных ЯЭУ второго

Рис. 6.
Основные параметры космических ядерных энергоустановок "Топаз" и "Енисей".



поколения, рассматриваемые для космических энергодвигательных установок, представлены в таблице 2.

О возможности международного сотрудничества в освоении космоса и...

Ядерные электрореактивные двигательные установки (ЯЭРДУ), представляющие собой комбинацию ЯЭУ и ЭРД (электрореактивные двигатели), являются единственно возможным в настоящее время средством для проведения исследований в области внешних планет Солнечной системы. Внедрение ядерной энергетики в космосе может быть ускорено в случае реализации международного сотрудничества. В апреле 1989 г. в ИАЭ им. И.В. Курчатова состоялась переписка с представителями американской фирмы "Спейс Пауэр Инкорпорейтед" (SPI) о возможности сотрудничества и использования имеющегося в России задела в области

космических ЯЭУ в качестве альтернативы солнечным энергоустановкам для гражданских, коммерческих и научных применений. Фирма SPI предложила на первом этапе совместно подготовить и провести демонстрационные испытания в США изготовленных образцов КЯЭУ "Енисей" без ядерного топлива на стендах с электронагревом. В результате 1990 г. было создано совместное российско-американское предприятие "ИНЕРТЕК". Программа работ была начата на условиях неразделки и обратного возвращения испытанных в США изделий. Для проведения наземных испытаний с электронагревом без ядерного топлива в США были поставлены две установки "Енисей" и необходимое для проведения испытаний оборудование. Программа также предусматривала поставку еще четырёх установок "Енисей" для подготовки ЛКИ в составе космического аппарата (КА) NEPSTP и создание американской КЯЭУ с термоэмиссионной

Таблица 2

Проектные характеристики термоэмиссионных ЯЭУ 2-го поколения на основе унифицированных ЭГК, совмещённых с активной зоной

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 расчёте на форсированную мощность), кг/кВт(э)	55.7	37.5	40	37.3	34.7	18
Возможные средства выведения (тип ракеты-носителя)	"Рось"	"Протон", "Протон-М", "Ангара"		"Ангара-А5"		

системой преобразования тепловой энергии в электрическую на базе опыта и технологий российских учёных.

В результате выполнения первого этапа Программы в 1992–1993 гг. на вновь созданных стендах с электронагревом в Университете Нью-Мексико в г. Альбукерке с участием специалистов России, США, Англии и Франции были проведены энергетические испытания двух опытных образцов КЯЭУ и испытания одноэлементных ЭГК, продемонстрировавшие получение требуемых по ТЗ параметров.

Успешно проведённые испытания дали основания американским специалистам начать работу по разработке проекта экспериментального космического аппарата NEPSTR с КЯЭУ “Енисей” и с электрореактивными двигателями для перевода КА с радиационно-безопасной орбиты на геостационарную орбиту, а также начать разработку проекта термоэмиссионной КЯЭУ SPACE-R электрической мощностью 40 кВт с использованием технологии “Енисей”.

Для выполнения этих работ в марте 1994 г. были поставлены в США дополнительно четыре опытных образца установки “Енисей”. Два из них – для наземной отработки стыковки с КА и два – для ЛКИ в составе КА NEPSTR. Однако провести запланированные испытания в полном объёме не удалось из-за сокращения бюджетного финансирования. В 1996 г. первые две установки “Енисей” после испытаний вернулись в Россию. Оставшиеся четыре установки также вернулись в Россию в июне 1997 г.

... в исследованиях физики процессов в термоэмиссионных устройствах для КЯЭУ

Напряжение на выходе из ЯЭУ ограничено электрической прочностью металлокерамических узлов в коммутационной камере. При мощности энергоустановки порядка 100 кВт и выше это приводит к необходимости передавать слишком большие токи от ЯЭУ до полезной нагрузки, находящейся на достаточно большом удалении от реактора. Омические потери напряжения в кабеле могут заметно понизить доставляемую мощность. На выходе из реактора

необходимо преобразовать постоянный ток в переменный, повысить напряжение и транспортировать к полезной нагрузке переменный ток более высокого напряжения. Полупроводниковая элементная база, используемая для этой цели в нормальных условиях, не пригодна в условиях высокой радиации и температуры вблизи реактора.

Предложенный в 1972 г. высокотемпературный радиационно-стойкий газоразрядный прибор⁵, работающий на смеси паров цезия и бария, является идеальным коммутирующим ток устройством для преобразования постоянного тока в переменный в космических ядерных энергетических установках.

Одновременно с предложением фирмы SPI о сотрудничестве в области космических ЯЭУ другая фирма из США Kiser Research, INC обратилась в ИАЭ им. И.В. Курчатова с предложением о сотрудничестве в области физики термоэмиссионных преобразователей тока. В результате с этой фирмой в 1990 г. был заключён контракт о поставке экспериментального стенда и макета экспериментального прибора в США, на которых можно подтвердить ранее опубликованные результаты (рис. 7). Экспериментальный прибор, названный нами цезий-бариевым таситроном⁶, смонтирован на стенде и нашёл своё местожительство в Университете Нью-Мексико в г. Альбукерке, США (рис. 8).

Приёмо-сдаточные испытания прошли успешно и превзошли все ожидания американских коллег. В течение 1991–1993 гг. были досконально исследованы характеристики цезий-бариевого таситрона как с цилиндрической, так и с плоской геометрии электродов (рис. 9), и продемонстрирована его работа в схеме двухфазного ин-

⁵ Кайбышев В.З., Кузин Г.А., Мельников М.В. ЖТФ. 1972. Т. 42. № 6.

⁶ Таситрон, 3-электродный ионный прибор с подогревным катодом, с водородным наполнением, по конструкции и назначению аналогичный импульсному водородному тиратрону и отличающийся от последнего лишь устройством управляющего электрода – сетки. Сетка таситрона – мелкоструктурная, с размером отверстий, не превышающим среднюю длину свободного пробега электронов в газе, что позволяет управлять как моментом зажигания, так и моментом гашения дугового разряда в таситроне без снижения анодного напряжения.



Рис. 7.
Передача
экспериментального
стенда
с экспериментальным
прибором,
изготовленных
в ИАЭ им.
И.В. Курчатова,
представителям
от фирмы Kiser
Research, INC.

вертора. Рабочие параметры прибора – падение напряжения в открытом состоянии 2–2.5 В, плотность тока 5–15 А/см², частота модуляции тока до 20 кГц, рабочие температуры основных элементов конструкции не ниже 1000–1050 К. Для более глубокого исследования физики процессов в таситроне нами было предложено разработать конструкцию таситрона, в которой можно разместить ленгмюровские зонды для измерения параметров плазмы в разных областях разряда. Такой экспериментальный таситрон был разработан и изготовлен в ИАЭ им. И.В. Курчатова и поставлен в Университет Нью-Мексико. В Москве у нас в институте на втором экземпляре прибора мы провели измерения и получили интересные результаты по физике процессов в плазме разряда при низком давлении пара цезия. В результате нашего сотрудничества было издано восемь совместных печатных работ в научных изданиях США и России. Помимо этого, два молодых специалиста из Университета в Колорадо защитили диссертации на базе поставленного нами оборудования и наших консультаций в процессе совместной работы. Каждый из них прислал мне письма с благодарностью и экземпляры своих диссертаций доктора философии в области электротехники. Замечательные ребята и очень приятно было с ними работать.

Вместо послесловия

Из воспоминаний участников программы “Топаз” – специалистов США. **Альберт Маршалл** (Руководитель группы ядерной безопасности): “...Началась программа NEPSTP, 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”.

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 стра-



Рис. 8.
Стенд с макетом экспериментального "таситрона" в США.

нами, бережно взлелеянных программой "Топаз". Здесь есть повод для оптимизма – дружба, посеянная и выращенная программой "Топаз", сохранится несмотря ни на какие изменения политического климата.

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". "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 NEPSTR 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

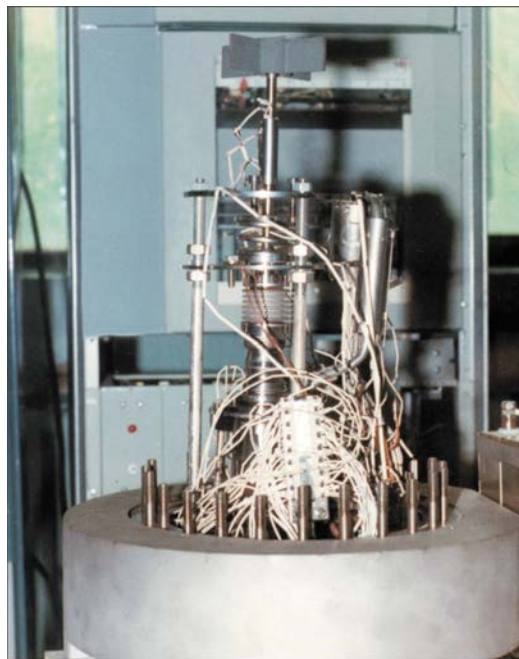


Рис. 9.
Макет герметичного таситрона с электродами плоской геометрии на испытательном стенде.

в США. Используя электронагрев для имитации топлива в наземных испытаниях, можно было запустить "чистый" холодный реактор. Мы задали 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".

...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".