

УДК 629.19:621.039.578

### К 30-ЛЕТИЮ ПУСКА ПЕРВОГО В МИРЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА «Топаз»

*Грязнов Г.М. (ГП «Красная Звезда»)*

В газете «Правда» от 26 марта 1971 г. на первой полосе было опубликовано сообщение ТАСС: «В Советском Союзе успешно завершены комплексные испытания атомной термоэмиссионной энергетической установки электрической мощностью несколько киловатт, которая устойчиво отработала проектный ресурс при заданных электрических параметрах. В настоящее время проводятся испытания второго комплекта этой установки.

Советская установка с непосредственным (безмашинным) термоэмиссионным преобразованием атомной энергии в электрическую является первой в мире действующей установкой такого типа.

Создание этой установки — новое крупное достижение советской атомной науки и техники, открывающее еще одну важную область использования атомной энергии в мирных целях» [1].

В статье [2] отмечалось, что ядерные реакторы как источники энергоснабжения космических аппаратов начали рассматриваться в конце 1960 г. еще на начальном этапе исследования и освоения космического пространства одновременно в СССР и США. Энергоемкость и компактность таких источников энергии выгодно их отличали от получивших затем широкое распространение солнечных фотопреобразователей.

Идея создания космической энергетической системы с ядерным реактором и термоэмиссионным преобразованием энергии возникла в 1958 г. в ФЭИ у И.И. Бондаренко. В дальнейшем научное руководство работами по термоэмиссионным ЯЭУ в ФЭИ на различных стадиях осуществляли А.И. Лейпунский, В.А. Кузнецов, О.Д. Казачковский, М.Ф. Троянов, В.Я. Пупко, В.И. Субботин, В.А. Малых и многие другие талантливые ученые. Данное впоследствии этой системе наименование «Топаз» является сокращением слов, составляющих характеристику основного агрегата системы — ядерного реактора-преобразователя (термоэмиссионный, опытный, преобразователи в активной зоне). Плодотворность идеи установки «Топаз» заключалась в объединении в одном агрегате — реакторе-преобразователе источника тепла и термоэмиссионного преобразователя тепловой энергии в электрическую. Прежде всего это позволило с минимальными потерями реализовать высокую верхнюю температуру термодинамического цикла преобразования энергии. В то же время зона высокой температуры (1770—2070 К) ограничена лишь эмиттерами термоэмиссионного преобразователя, что облегчает условия создания остальных, более низкотемпературных компонентов системы. Свойственная циклу термоэмиссионного преобразования энергии высокая нижняя температура в условиях космического пространства, где интенсивность отвода тепла излучением пропорциональна температуре теплоотвода в четвертой степени, позволяет свести к минимуму габариты системы отвода непреобразованного в цикле тепла и создать наиболее компактную энергетическую систему. Вместе с тем создание термоэмиссионного реактора-преобразователя, объединяющего функции ядерного реактора и генератора электрической энергии, представляло собой несравненно более сложную научную и техническую задачу, чем реализация энергетической системы с отдельными реактором и генератором. Проблемы таких отличающихся областей науки и техники, как реакторная физика, термоэмиссионное преобразование энергии, теплофизика и гидродинамика жидкометаллических теплоносителей и т.д., в термо-

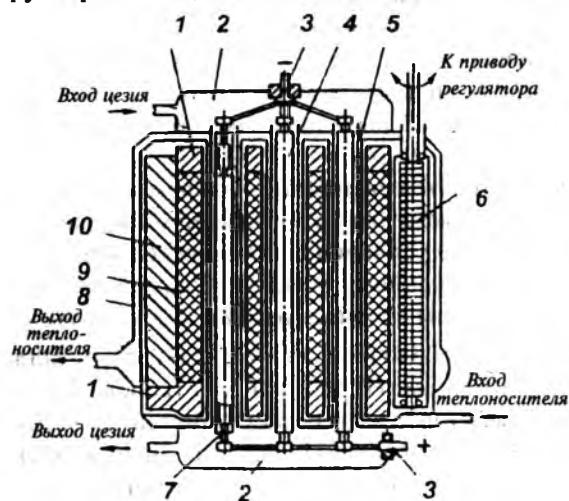
эмиссионном реакторе-преобразователе были связаны неразрывно и нуждались в комплексном решении. Создание такого реактора потребовало прорыва в области высокотемпературного материаловедения и технологии. Достаточно сказать, что нижняя температура цикла преобразования энергии в термоэмиссионном реакторе 770—870 К соответствует верхней температуре цикла преобразования энергии в современных паровых турбинах, на использовании которых основана стационарная энергетика. Основные конструкционные компоненты термоэмиссионного реактора-преобразователя работают при температуре, соответствующей диапазону от слабого красного (примерно при 820 К) до белого свечения (при температуре выше 1670 К), причем в условиях интенсивного воздействия нейтронов. В мировой практике подобная конструкция ранее не создавалась [2].

Схема работы термоэмиссионного преобразователя в принципиальном плане чрезвычайно проста. Он является в определенном смысле аналогом радиолампы (вакуумного диода), работающей в режиме генерации, а не усиления электрической мощности при подводе тепла. Применительно к термоэмиссионному реактору энергия преобразуется в электрогенерирующем элементе, в котором ядерное топливо (диоксид урана, обогащенный  $^{235}\text{U}$ ) размещено в сердечнике с оболочкой из тугоплавкого металла (молибдена, вольфрама), служащей катодом или эмиттером для электронов. Тепло, выделяющееся в реакции деления урана в реакторе, разогревает эмиттер до 1770—2070 К, в результате чего происходит эмиссия электронов. Попадая на анод (коллектор), электроны обладают достаточной энергией, чтобы во внешней замкнутой цепи между электродами (эмиттером и коллектором) произвести полезную работу во внешней нагрузке [2]. Пары цезия, вводимые в межэлектродное пространство термоэмиссионного преобразователя, ионизируются. Образовавшиеся положительные ионы цезия компенсируют объемный отрицательный заряд эмиттированных электронов и тем самым обеспечивают перенос электрического тока и получение электроэнергии в реакторе-преобразователе.

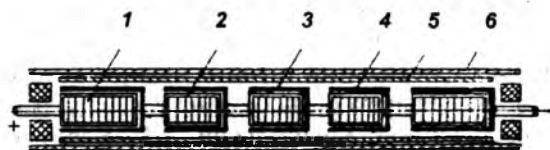
В начале 60-х годов к работам ФЭИ по созданию термоэмиссионной ядерной энергетической установки «Тополь» (проект «Топаз») подключилось авиационное конструкторское предприятие Московский машиностроительный завод «Союз», в котором под руководством ведущего конструктора Г.М. Грязнова была создана и начала работать группа конструкторов в следующем составе: И.А. Кокоревский, А.И. Каблучко, М.М. Маркович, В.В. Лапшов. Позже были созданы и другие группы, приступившие к работе по этой теме, получившей наименование «Изделие «Тополь»». Во главе разработки встали Г.Л. Лившиц, Г.М. Грязнов, Е.А. Кельшман, В.И. Сербин. Были созданы два специальных цеха под руководством Э.М. Ливертовского и В.В. Жукова, а также экспериментально-испытательный отдел в Тураеве под руководством О.П. Щербанюка (его ведущие сотрудники В.Г. Соловьев, В.С. Гарькавый, Ю.П. Юдников). В конце 1968 г. все работы по изделию «Тополь» были переданы (вместе с разработчиками) в Тураевское машиностроительное конструкторское бюро «Союз» (главный конструктор В.Г. Степанов). Эти предприятия как организации главного конструктора внесли в работу над проектом авиационную культуру и технологию, что во многом способствовало успешной реализации проекта ЯЭУ.

Для наземной отработки термоэмиссионных ЯЭУ типа «Топаз» в ФЭИ за короткий срок (3—4 года) был сооружен уникальный испытательный стенд с вакуумной камерой, позволяющей имитировать условия космического пространства при энергетических испытаниях ЯЭУ. На этом испытательном стенде были проведены ресурсные испытания на мощности семи образцов ЯЭУ «Тополь», причем два из них были зачетные и предшествовали летным испытаниям в космосе [2]. На этом стенде (руководитель испытательного комплекса А.И. Ельцов) весной 1970 г. впервые в мире были проведены ресурсные энергетические испытания первого образца ЯЭУ (изделие 4С) с термоэмиссионным реактором-преобразователем «Топаз» под руководством Межведомственной

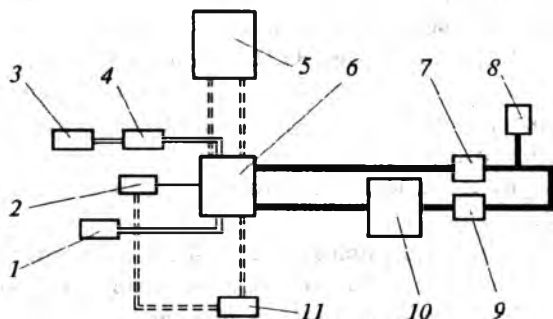
комиссии, которую возглавил председатель Комитета по использованию атомной энергии СССР А.М. Петросьянц. Оперативное руководство осуществлялось рабочей группой, состоящей из представителей научного руководителя (ФЭИ) и главного конструктора (впоследствии ГП «Красная Звезда»). Представителями главного конструктора в Межведомственной комиссии и рабочей группе были заместители главного конструктора по изделию «Тополь» и его испытаниям Г.М. Грязнов и В.И. Сербин.



Р и с. 1. Конструкционная схема термоэмиссионного реактора-преобразователя «Топаз»: 1 — торцевой отражатель; 2 — коммутационная камера; 3 — токовыводы реактора; 4 — ЭГК; 5 — полость теплоносителя; 6 — регулирующий цилиндр; 7 — токовывод ЭГК; 8 — корпус реактора; 9 — замедлитель; 10 — боковой отражатель



Р и с. 2. Конструкционная схема ЭГК реактора-преобразователя «Топаз»: 1 — тепловыделяющий сердечник; 2 — катод; 3 — анод; 4 — межэлектродный зазор; 5 — анодная изоляция; 6 — внешняя оболочка

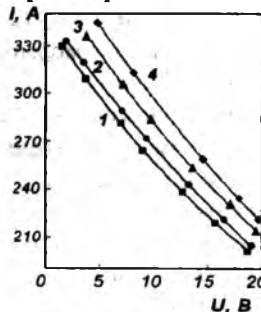


Р и с. 3. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — система подачи цезия; 2 — привод органов регулирования; 3 — емкость выдержки; 4 — вакуумный насос; 5 — система электрических измерений; 6 — реактор-преобразователь; 7 — нагреватель; 8 — компенсационный бак; 9 — насос; 10 — холодильник; 11 — система автоматического управления и защиты

Испытания подтвердили перспективность нового способа преобразования энергии, вызвав огромный интерес научно-технической общественности и многочисленные позитивные отклики как в нашей стране, так и за рубежом.

В 1971 г. на IV Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве российские ученые выступили с докладом [3], предоставив мировой научной общественности основные научно-технические решения и результаты. В докладе впервые были приведены конструктивные схемы реактора-преобразователя и его электрогенерирующего канала (рис. 1, 2), блок-схема экспериментальной испытательной термоэмиссионной установки (рис. 3) и вольт-амперные характеристики одной из секций реактора «Топаз» (рис. 4).

В 1972 г. на базе коллектива главного конструктора, занимавшегося разработкой изделия «Тополь», и ОКБ «Заря» была образована головная специализированная организация по разработке и созданию космических ядерных энергоустановок с организацией и ведением серийного производства и эксплуатацией на космических объектах НПО «Красная Звезда» (директор Г.М. Грязнов, главный конструктор В.И. Сербин), впоследствии в 1992 г. переименованное в Государственное предприятие «Красная Звезда». В НПО «Красная Звезда» были проведены все проектно-конструкторские работы по ЯЭУ «Тополь», изго-



Р и с. 4. Вольт-амперные характеристики одной из секций реактора «Топаз» при давлении паров цезия 9,3–13,3 кПа и тепловых потоках 130–150 кВт (1–4)

товлены макеты и штатные образцы для технологических, энергетических и летно-космических испытаний. По окончании экспериментально-доводочных испытаний и успешных зачетных испытаний двух образцов изделия «Тополь» по программе межведомственных испытаний в 80-х годах, в ходе которых были имитированы автономные пуски ЯЭУ от системы автоматического управления в космическом пространстве, появилась возможность перейти к летным испытаниям [4].

Для проведения летных испытаний была образована государственная комиссия во главе со вторым космонавтом Г. Титовым, его заместителем от Минатома в части ЯЭУ был назначен Г.М. Грязнов.

Первый в мире космический запуск термоэмиссионной ЯЭУ состоялся 2 февраля 1987 г. («Космос-1818», орбита высотой 810/970 км). После вывода от системы автоматического управления на режим номинальной мощности ЯЭУ проработала на орбите полгода до окончания запаса цезия. Пуск второй ЯЭУ был осуществлен 10 июля 1987 г. («Космос-1867», орбита высотой 797/813 км). Эта ЯЭУ также своевременно вышла на номинальную мощность от системы автоматического управления и до окончания запаса цезия проработала на орбите год, выработав 50 тыс. кВт·ч электроэнергии и установив, таким образом, мировой рекорд. Результаты испытаний ЯЭУ (рис. 5) были приняты Государственной комиссией с высокой оценкой и показали совпадение эксплуатационных параметров с характеристиками, полученными при наземных стендовых испытаниях. Основные параметры ЯЭУ «Топаз» следующие:



Р и с. 5. Общий вид ЯЭУ «Топаз»

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| Мощность, кВт:                                                      |      |
| электрическая . . .                                                 | 5    |
| тепловая . . .                                                      | 150  |
| Максимальная температура теплоносителя, К . . .                     | 883  |
| Загрузка $^{235}\text{U}$ , кг . . .                                | 11,5 |
| Масса (без аппаратуры системы автоматического управления), кг . . . | 980  |
| Ресурс («Космос-1867»), лет . . .                                   | 1    |

В общей сложности в работах по ЯЭУ «Топаз» участвовало несколько десятков предприятий и организаций министерств и ведомств, ведущими среди которых были предприятия Министерства среднего машиностроения (в настоящее время Минатом Российской Федерации) и Министерства авиационной промышленности. Большую организующую и координирующую роль сыграл аппарат Военно-правительственной комиссии (Л.В. Смирнов, А.П. Александров, Н.Н. Григорьев, Ю.М. Сускин и др.) и центральный аппарат Министерства среднего машиностроения во главе с его руководителями Е.П. Славским, И.Д. Мороховым, Л.Д. Рябевым, А.Г. Мешковым, А.М. Петросьянцем, В.Ф. Коноваловым, а также начальниками и ведущими работниками управлений и департаментов: Ю.И. Даниловым, В.М. Тюгиным, Н.С. Поляковым, А.С. Ошаниным, Э.И. Белоусовым и многими другими.

Работы по созданию термоэмиссионной ЯЭУ «Топаз» были высоко оценены правительством, наградившим коллектив разработчиков государственными наградами и премиями. Особенно большой вклад внесли специалисты-разработчики НПО «Красная Звезда» М.Е. Федотов, Е.Е. Жаботинский, В.В. Лапшов, М.М. Маркович, Ю.Л. Труханов, П.В. Андреев, М.С. Вольберг, А.В. Бушинский, Л.С. Коробков, А.С. Воробьев, И.П. Богуш, Б.С. Сазонкин, А.Н. Макаров, В.К. Молчанов, В.В. Кашелкин, А.С. Филimonенко, В.С. Николаев, Б.М. Вошедченко, А.Н. Макаров, В.А. Матвеев, В.Г. Сидоров, Б.В. Сливкин и другие, работавшие под руководством главного конструктора

В.И. Сербина, а также технологи, производственники и испытатели во главе с С.В. Поздняковым, Д.Д. Евреиновым, А.А. Соколовым, А.П. Силантьевым, Е.М. Сидоренко, В.Б. Давыдовым, Ю.В. Погониным, Б.М. Вошедченко, Ф.В. Филиным, многие другие рабочие и специалисты, например, В.С. Дронский, В.П. Евдокимов, И.А. Кузнецова, М.Г. Минин, сварщик В.Г. Годин, ведущий сварку реакторов-преобразователей, сотрудники отдела технического контроля и представителя заказчика А.С. Кузнецов, Р.П. Ковалев, Ж.Ф. Космынин, В.П. Щелчков, Б.Н. Богданович, А.И. Гришин. Большой вклад в общий успех внесли сотрудники испытательного комплекса ФЭИ под руководством А.И. Ельцова (рис. 6).

Успехи, достигнутые в создании космических ЯЭУ, до настоящего времени не превзойдены специалистами других стран. По оценкам иностранных специалистов опережение Россией других стран, работающих в этой области, составляет около 10—15 лет. Свидетельством мирового признания является получение Г.М. Грязновым (ГП «Красная Звезда») и В.Я. Пупко (ФЭИ) в 1994 г. памятного знака к премии Шрайбера—Спенса «За выдающиеся достижения в области космической ядерной энергетики» на ежегодной конференции в Альбукерке (США) [5].



Р и с. 6. Испытатели наземных прототипов установки «Топаз». В первом ряду (слева направо) Н.Н. Чежин, П.Т. Басков, А.М. Масленкин, В.И. Сербин, Г.М. Грязнов, А.И. Ельцов, Н.И. Грашук, Б.Д. Лелюшенко, Э.К. Смирнов, Е.П. Ларин, во втором ряду (слева направо) А.К. Забавин, В.И. Кувшинчиков

требностей космической техники с электрической мощностью от нескольких десятков до сотен киловатт и ресурсом до 7—10 лет [5], а также анализ возможностей схем космических ЯЭУ с вынесенными из активной зоны реактора термоэмиссионными преобразователями (в этих схемах термоэмиссионный преобразователь имеет лучшие ресурсные возможности, но для него требуется высокотемпературная система теплоподвода, например, тепловые трубы). При положительном решении новых технических проблем в таких ЯЭУ можно получить энергетическую систему с большим ресурсом, но и немного увеличенной массой (на 25—30%) по сравнению с ЯЭУ со встроенными в активную зону термоэмиссионными преобразователями.

Перечень возможного применения ЯЭУ на космических аппаратах ближайшего будущего включает новые задачи, такие, как глобальная спутниковая связь, экологический мониторинг, космическое производство материалов, межорбитальная транспортировка грузов с помощью ЯЭУ и электрореактивных двигательных установок, полеты к кометам и астероидам. Первые три задачи имеют огромный коммерческий потенциал, и термоэмиссионные ЯЭУ имеют здесь значительные перспективы применения.

Россия в конце XX столетия создала новую отрасль ядерной энергетики — космическую, запустив в космос более трех десятков атомных электростанций и заняв лидирующее место в мире. Этот успех необходимо развивать и далее, обеспечивая России стратегический прорыв в новые виды высокодоходной технологии XXI в.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сообщение ТАСС. — Газета «Правда», 26 марта 1971 г.
2. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка. — Природа, 1991, № 10, с. 29—36.

3. Грязнов Г.М., Ельцов А.И., Кузнецов В.А. и др. Создание и энергетические испытания термоэмиссионного реактора-преобразователя «Топаз». Материалы IV Межд. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1971.
4. Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. и др. Применение термоэмиссионных ЯЭУ с реактором-преобразователем на тепловых нейтронах для межорбитальных перелетов космических аппаратов. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 4, с. 221—247.
5. Грязнов Г.М. Космические ядерные энергетические установки. — В кн.: Труды юбилейной конференции Министерства Российской Федерации по атомной энергии «Ядерной науке и технике России — 50 лет». М., 1996, с. 174—183.

УДК 629.19:621.039.578

## СОЛНЕЧНАЯ БИМОДАЛЬНАЯ ТЕРМОЭМИССИОННАЯ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

*Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),  
Коротеев А.С., Акимов В.Н., Архангельский Н.И. (ИЦ им. М.В. Келдыша),  
Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Марагинский Р.Н. (НИИ НПО «Луч»),  
Соколов Е.Н., Климов А.В. (ЦКБМ), Авдошин Е.Д. (ЗАО «НП Энерготех»)*

Расширение научных, коммерческих и оборонных задач, решаемых космическими средствами, в значительной мере сдерживается высокой стоимостью их выведения на рабочую орбиту. В связи с этим крайне важным является повышение энергетической и экономической эффективности средств межорбитальной транспортировки, особенно на высокую орбиту.

Современные средства выведения характеризуются относительно высокой тяговооруженностью, малым временем выведения космического аппарата на геостационарную орбиту (часы-сутки) и ограниченными возможностями повышения их эффективности, которые близки к предельно возможным. Из сказанного понятен тот значительный интерес, который проявляется в последнее время к поиску эффективных путей применения в составе средств межорбитальной транспортировки нетрадиционных двигательных установок с солнечными и ядерными источниками энергии.

Перспективной в этом плане является реализация концепции самовыводящегося космического аппарата с использованием в его составе многофункциональной солнечной энергодвигательной установки. Такая установка при работе в двигательном режиме переводит космический аппарат с низкой опорной орбиты искусственного спутника земли на высокоэнергетическую целевую орбиту при высоком уровне удельного импульса тяги, в энергетическом режиме обеспечивает электроснабжение бортовой аппаратуры.

В 1997—1999 гг. был разработан концептуальный проект солнечной бимодальной (энергодвигательной) термоэмиссионной установки в привязке к ракете-носителю «Русь», стартующей с космодрома в Плесецке, с анализом всех основных ее компонентов и оценкой стоимости создания, рациональных режимов и циклограмм работы двигательной установки при доставке космического аппарата с опорной орбиты 200 км на геостационарную за 30—60 сут. Установка концентрирует солнечное излучение параболическими зеркалами на тепловой аккумулятор, который конструктивно объединен с тепловым двигателем и термоэмиссионным преобразователем, и по сравнению с установкой на базе солнечных батарей с фотоэлектронными преобразователями и электроракетным двигателем обеспечивает возможность использования энергетически более выгодных многоимпульсных схем межорбитальных перелетов и относительно малую продолжительность выведения космического аппарата на целевую орбиту при значительно более высоком по сравнению с жидкореактивным двигателем удельном импульсе тяги и, следовательно, более высокой баллистической эффективности. Это позволяет получить установку минимальной суммарной массы и, следовательно, добиться при прочих равных условиях максимальной массы целевого модуля космического аппарата на рабочей орбите.