

ГАЗОФАЗНЫЕ ЯДЕРНЫЕ

ДВИГАТЕЛИ

ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Григорий Лиознов, главный специалист НПО Энергомаш

Еще до полетов первых искусственных спутников и пилотируемых кораблей ученые и конструкторы задумывались над путями и способами достижения ближайших планет солнечной системы, и в первую очередь Марса. Обеспечить такой полет с экипажем на борту, как представлялось в то время, смогли бы двигатели, использующие энергию атома.

В соответствии с принятыми правительственными решениями в некоторых научных центрах и КБ уже со второй половины 50-х гг. начались разработки ядерных ракетных двигателей (ЯРД). Среди различных типов ядерных реакторов, которые предусматривались для применения в космических системах, особое место занимает высокотемпературный газофазный ядерный реактор (ГФЯР), обещающий достижение уникальных параметров.

Решение о разработке ЯРД и ядерных космических энергоустановок (ЯКЭУ) на основе ГФЯР было принято в 1963 г. руководителем НПО Энергомаш академиком В.П. Глушко, а затем утверждено постановлением ЦК КПСС и Совмина СССР. К этому времени научный коллектив НПО Энергомаш имел шестилетний опыт проектно-конструкторской и технологической разработки ЯРД с твердофазным реактором. Теоретические исследования по ГФЯР выполнялись с 1957 г. под руководством члена-корреспондента АН СССР В.М. Иевлева в НИИ тепловых процессов (ныне НИЦ имени М.В. Келдыша). На решение столь сложной (сопоставимой с проблемой управляемого термоядерного синтеза) и требующей колоссальных финансовых затрат научно-технической проблемы, какой является создание ГФЯР, в то время посягнули только две страны — СССР и США.

лей) и ведущие вузы страны под общим научным руководством НИИ тепловых процессов. Большое внимание и поддержку оказали такие видные ученые, как академики М.Д. Миллиончиков, А.А. Бочвар, Е.П. Велихов.

Разработчики столкнулись с большим, совершенно новым кругом проблем организации рабочих процессов и обеспечения работоспособности конструкции в высокотемпературном ГФЯР. Вполне естественно, что и у нас, и у американцев ни аналогов, ни прототипов до тех пор не было. Несколько месяцев ушло только на предварительное ознакомление с сущностью вопросов, прослушивание лекций ведущих сотрудников НИИ тепловых процессов, изучение научных отчетов и литературы, консультации во многих организациях.

В период 1963-1973 гг. численность специализированного отдела НПО Энергомаш, занимавшегося разработкой реактора и двигательно-энергетической установки, составляла около 90 человек. В этот период проводились интенсивные экспериментальные и производственные работы по подготовке демонстрационных реакторных испытаний в 1975 г. Однако в 1974 г. в НПО Энергомаш началась разработка РД-170/171 — мощного ЖРД для системы "Энергия-Буран", в связи с чем исследования по ГФЯР

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО ГФЯР

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ	СОДЕРЖАНИЕ
1. Реализация рабочего процесса в газофазном тепловыделяющем элементе	Проблема сопряжена с определением полей скоростей, температуры, концентраций ядерного горючего и рабочего тела и требует совместного решения следующих задач: — гидродинамики и магнитной гидродинамики; — массообмена; — лучистого и конвективного теплообмена; — теплозащиты стенок и торцов рабочей камеры, а также выходного канала
2. Достижение критичности ГФЯР	Определение геометрических параметров реактора и зависимости давления в твэлах от температуры, требующее решения следующих задач: — нейтронной физики полостных реакторов; — термодинамики ядерного горючего и рабочего тела
3. Обеспечение устойчивости работы ГФЯР	Проблема вызвана высокой подвижностью ядерного горючего Давление — 1000 кгс/см ² , температура ядерного горючего — 40 000...60 000 К, температура рабочего тела — 8 000...10 000 К
4. Запуск ГФЯР	
5. Обеспечение работоспособности элементов конструкции при экстремальных параметрах рабочих процессов	
6. Обеспечение коррозионной стойкости конструкционных материалов	Расплавленный уран при температуре 1500...2300 К, водород высокого давления при температуре до 2800 К, жидкометаллические щелочные металлы образуют крайне агрессивные среды
7. Обеспечение теплозащиты сопла, МГД-генератора	Проблема связана с чрезвычайно высокой температурой рабочего тела Потеря критичности реактора при накоплении в нем продуктов деления
8. Удаление продуктов деления в замкнутых схемах ГФЯР	

Ведущим подразделением в НПО Энергомаш по проблеме ГФЯР и двигательно-энергетических установок на его основе стал отдел под руководством Р.А. Глиника. Мы все, тогдашние участники начала разработок, были молоды и увлеклись заманчивыми революционными перспективами использования ГФЯР в космической технике, несмотря на огромные технические проблемы. Руководителям — Р.А. Глинику и В.М. Иевлеву было по 37 лет, а сами коллективы пополнялись специально подготовленными выпускниками МАИ, ХАИ, МВТУ, МГУ, МИФИ и МФТИ. Для успешного решения стоящих проблем к работам были привлечены многие институты (в первую очередь ракетно-космической и атомной отрас-

были приостановлены, а коллектив специализированного отдела сокращен до 30 человек. В течение восьми лет финансировались лишь "бумажные" работы. За это время оказались утраченными обширные технологические, производственные и экспериментальные заделы.

С 1982 г. производственные работы были возобновлены, около двух лет тот же коллектив конструкторов и расчетчиков восстанавливал технологию и экспериментальную базу. Но все же в конце 1989 г. финансирование, практически, полностью прекратилось. В США также не удалось довести дело до минимальных демонстрационных испытаний.

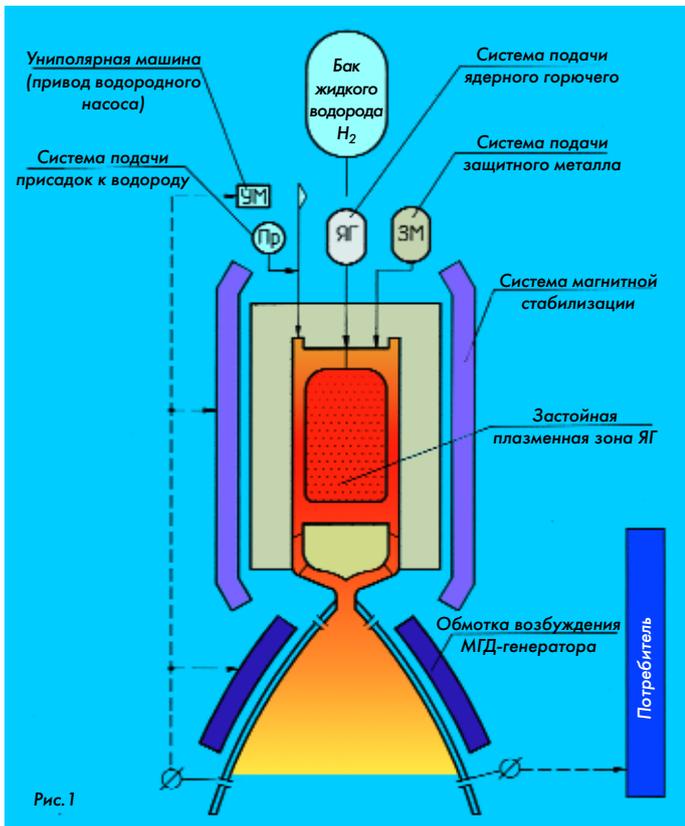


Рис. 1

Предполагалось, что основным элементом конструкции ГФЯР будет одна или несколько рабочих камер, окруженных замедлителем-отражателем нейтронов. Ядерное горючее внутри камер должно удерживаться изолированно от стенок в плазменном состоянии в количестве, необходимом для самоподдерживающейся цепной реакции. В промежутке между зоной делящейся плазмы и стенками организуется поток рабочего тела. Нагрев рабочего тела обеспечивается лучистым теплопереносом, при этом его средняя температура на выходе рабочей камеры достигает значений порядка 10^4 К. Поглощение лучистой энергии рабочим телом обеспечивает одновременно и тепловую защиту стенок.

При разработке газофазного реактора основной проблемой было снижение потерь делящегося вещества, которые не должны превышать долей процента от расхода рабочего тела. Приемлемый уровень выноса ядерного горючего из камеры предполагалось обеспечить ламинаризацией потока поступающего рабочего тела, профилированием поля его начальных скоростей, наложением внешнего магнитного поля, специальным подбором состава рабочих компонентов и выбором геометрии полости. Вынос ядерного горючего компенсировался его подачей в рабочую камеру либо в жидкометаллическом виде (1500К), либо в виде пастообразной смеси порошка с NaK эвтектикой (эвтектика — расплав, находящийся в равновесии с твердыми фазами).

Космические энергетические установки проектировались по открытой и замкнутой схемам. Если рабочее тело выбрасывается через реактивное сопло наружу, то установка представляет собой ядерный ракетный двигатель открытой схемы. В качестве рабочего тела используется водород, в который для обеспечения электропроводности и поглощения лучистого теплового потока добавляются присадки в виде паров NaK и Li, а также вольфрамового порошка (при этом одновременно достигается приемлемая температура водорода у стенки камеры). Такой ЯРД имел бы чрезвычайно высокие удельные характеристики (удельный импульс порядка 2000...3000 с). Если установка спроектирована таким образом, что рабочее тело выбрасывается наружу через МГД-генератор с высоким КПД, то имеем ЯКЭУ открытой схемы.

Двигательная энергетическая установка открытой схемы (рис. 1) включает в себя однополостный реактор с кольцевым выходным каналом и газофазным твэлом (ГФТЭ) с застойной плазменной зоной

ядерного горючего. Стабилизация зоны осуществляется с помощью мощного внешнего соленоида. Применение двигателя такой схемы по экологическим соображениям возможно лишь на космических аппаратах, но не на носителях, стартующих с Земли.

Для обеспечения энергией различных потребителей, в том числе соленоида и электропривода насосов, в установке предполагалось использовать комбинацию сопла и МГД-генератора. ЯРД и ЯКЭУ, помимо схемного различия, отличаются степенью использования энергии газового потока в МГД-генераторе: в первом случае преобразуется в электроэнергию не более 2 %, а во втором — 30...40 %.

В установках замкнутой схемы (рис. 2) преобразователем энергии является МГД-генератор, а все рабочие компоненты циркулируют по контуру, не имеющему связи с внешней средой. В этом случае получаем ЯКЭУ, имеющую весьма высокий КПД (30...40 %), низкие значения удельной массы преобразователя и удельного расхода рабочего тела. Присадки, вводимые в рабочее тело, помимо всего прочего, призваны способствовать МГД-взаимодействию. Кроме газофазного реактора и МГД-генератора в конструкции непременно должны присутствовать холодильники, сепараторы и насосы. Рабочим телом является пар NaK в смеси с гелием. Выделяющееся избыточное тепло сбрасывается в космическое пространство с помощью излучателей. Вырабатываемая энергия используется для различных целей, одним из ее потребителей может быть электроракетный двигатель.

Преимуществом использования в замкнутых схемах ГФЯР, в котором вместо твердых твэлов используются газообразные, является принципиальная возможность обеспечения весьма длительной функциональности за счет соответствующей подпитки горючим взамен выводимых из контура во внешнюю среду продуктов ядерных реакций.

Существенное значение имеет и то обстоятельство, что в замкнутых схемах требование к выносу ядерного горючего из реактора вместе с рабочим телом менее строгое, чем в открытых. Это позволяет рассматривать более простую организацию процессов, допускающих большую степень смешения ядерного горючего и рабочего тела. При этом отпадает необходимость в магнитной стабилизации — плазменная зона из застойной превращается в струйную. Использование нескольких таких зон (многополостный реактор) улучшает массогабаритные характеристики ГФЯР.

Известно, что между тепловой мощностью реактора и возможностями обеспечения приемлемого температурного режи-

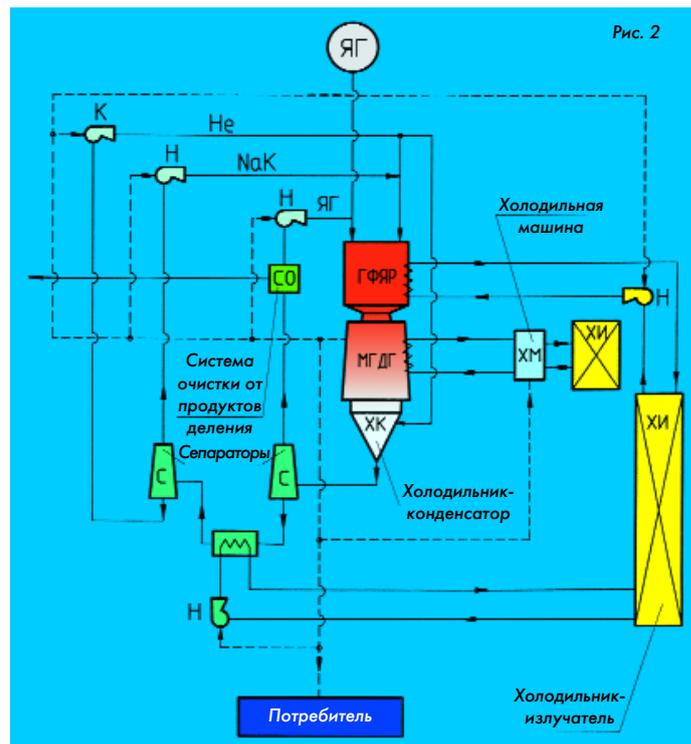


Рис. 2

ма элементов конструкции существует определенная зависимость. Исследованиями было установлено, что оптимальная тепловая мощность ГФЯР открытой схемы должна быть не ниже 2 ГВт, а замкнутой — 300 МВт (при давлении в рабочей камере порядка 1000 кгс/см²).

Концептуальная разработка ядерной двигательной-энергетической установки для обеспечения марсианской экспедиции является последней по времени, вобравшей в себя весь предшествующий опыт. Установка основана на комбинированном однополостном газофазно-твердофазном реакторе трансформируемой конструкции массой 57,5 т (рис. 3). Тепловая мощность реактора 2,14 ГВт. Твердофазные тепловыделяющие сборки (ТФТС), размещенные по кольцу вокруг центральной полости реактора и снабженные приводными механизмами, обеспечивают необходимый уровень нейтронного потока и критичность при запуске, когда ядерное горючее в полости газофазного твэла отсутствует. По мере подачи и накопления в центральной полости ядерного горючего, т.е. образования плазменной зоны и формирования газофазного твэла, ТФТС из активной зоны извлекаются, а реактор превращается в ГФЯР.

Благодаря трансформируемой конструкции установка может работать в двух режимах:

- двигательном (газофазном) тягой 17 т при удельном импульсе 2000 с — на разгонных и тормозных участках траектории;

- энергетическом (твердофазном) с электрической мощностью 200 кВт для обеспечения внутренних нужд космического аппарата без расхода рабочего тела — на маршевом участке траектории. Этот режим обеспечивается замкнутым газотурбинным контуром с гелий-ксеноновой смесью в качестве рабочего тела, преобразованием тепловой энергии в электрическую с КПД 20 % и сбросом избыточного тепла через холодильник-излучатель (цикл Брайтона).

На двигательном режиме работы электроснабжение обеспечивается встроенным в сопло многополюсным МГД-генератором мощностью 25 МВт с электродами и шинами возбуждения, ориентированными по образующим сопла.

Минимизацию массогабаритных характеристик ГФЯР обеспечивают:

- применение в качестве ядерного горючего урана-233;
- максимально возможное использование в замедлителе-отражателе реактора металлического, в том числе крупнокристаллического бериллия, а в остальной части — графита;

- максимально возможное использование для высокотемпературных элементов конструкций рабочей камеры тугоплавких металлов улучшенного изотопного состава, а для силовых корпусов реактора — высокопрочных титановых сплавов и упрочняющих углекомполитов;

- применение для сильноточных систем магнитной стабилизации, возбуждения МГД-генератора и электропривода насосов гиперпроводящего алюминия (чистотой 0,9999), допускающего при жидководородном охлаждении плотность тока 50...100 А/мм² при удельном сопротивлении в десятки раз ниже, чем у меди.

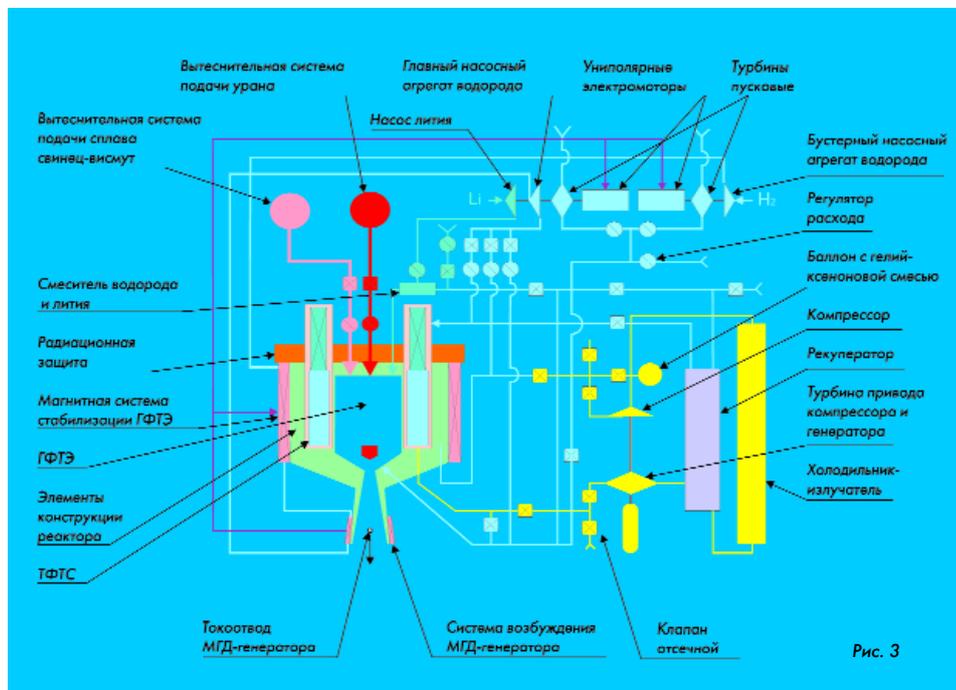


Рис. 3

Понятно, что экстремальные температурные режимы работы многих элементов конструкции ГФЯР и крайне агрессивная среда (расплавленный уран, водород высокого давления, щелочные металлы) потребовали проведения глубоких материаловедческих проработок. В результате для системы подачи ядерного горючего были разработаны и внедрены в экспериментальное производство тугоплавкие сплавы на основе тантала — вольфрама — гафния, а также ниобия. Для некоторых участков стенок рабочей камеры были разработаны пористые тугоплавкие материалы как на основе вольфрама, так и молибдена, а для высокотемпературных фильтроэлементов — никеля и нихрома.

Дальнейший анализ выявил исключительную эффективность применения рассмотренного выше ЯРД для марсианского экспедиционного комплекса.

(Окончание в следующем номере)

DIGEST

In 1963, "Energomash" Co. (the department headed by Dr. R.A.Glinkin) launched the development of nuclear rocket engines and powerplants on the basis of a gas-core nuclear reactor. "Keldysh Research Center" was a supervisor of studies (namely, V.M. Ievliev, a corresponding member of the USSR Science Academy). The nuclear powerplants were designed in 2 versions: an open type and a closed type.

The open-type powerplant includes a single-chamber reactor with an annular outlet and a gas fuel element with a stagnant plasma zone of nuclear fuel (fuel is kept in the chamber in plasma state, isolated from walls, and in quantity necessary for self-supporting a chain reaction). A powerful outer solenoid provides this zone stabilization. Propulsive mass is hydrogen with additives in the form of NaK and Li vapors as well as W-powder. In view of ecology this engine type can be used only in outer space.

In the closed scheme the propulsive mass components circulate in the closed circuit without any contact with environment and MGD-generator is used as an energy converter. This scheme provides a high enough efficiency (30-40%), a low specific mass of the converter and an acceptable specific propulsive mass consumption.

The conceptual design of a nuclear powerplant for powering a space rocket to Mars was the last development where acquired experience was used. The powerplant is based on the combined gas-solid single-chamber reactor of a transformable structure weighing as much as 57.5 tons. Its heat power is 2.14 GW. Solid fuel elements arranged around the reactor central zone are provided with actuators and support required neutron flow and start up critical conditions when there is no nuclear fuel in the gas fuel element. With starting fuel feeding and fuel accumulation in the central zone of the reactor (i.e. when plasma zone and gas fuel elements are formed), solid fuel elements are removed from the reaction zone and the reactor transforms into a gas reactor.

GAS-CORE NUCLEAR ENGINES FOR SPACE FLIGHT VEHICLES

ГАЗОФАЗНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Григорий Лиознов,
главный специалист
НПО Энергомаш

(Окончание. Начало в № 5)

Габаритно-компоновочная схема марсианского экспедиционного комплекса (МЭК), в котором предусмотрено использование блока из двух ядерных двигательных установок на основе ГФЯР, описанных ранее, показана на рис. 1. При полезной нагрузке 150 т, предполагаемой обычно для выполнения подобной задачи, расчетная стартовая масса МЭК на околоземной орбите составляла бы 520...540 т (в зависимости от даты старта). Для сопоставления можно указать, что в случае применения ЯРД с твердофазным реактором стартовая масса МЭК составляла бы 730...800 т, а с химическим ЖРД - 1700...2500 т.

Конкуренцию газозамкнутым ядерным двигателям открытой схемы (возможное преимущество в стартовой массе) составляли бы электроракетные двигатели с ядерными или солнечными источниками энергии. Но из-за неизбежной низкой тяговооруженности таких двигателей (отношение силы тяги к весу аппарата на Земле составляет приблизительно 10^{-4}), продолжительность полета значительно бы увеличилась. Особенно возрастало бы (до нескольких десятков суток) время прохождения радиационных поясов Земли, что создавало бы чрезвычайно трудные проблемы для обеспечения безопасности космонавтов. В этом случае представляет интерес применение газозамкнутых ядерных двигателей замкнутой схемы.

Была выполнена концептуальная проработка ЯКЭУ замкнутой схемы массой 125 т и электрической мощностью 150 МВт. В этой установке применены:

- 19-твэльный струйный реактор без магнитной стабилизации;
- фарадеевский коаксиально-вихревой МГД-генератор со сверхпроводящей системой возбуждения и холодильной машиной с излучателем;
- контур циркуляции с сепарацией ядерного горючего от рабочего тела (гелий с добавкой NaK).

Удельная масса установки составила 0,83 кг/кВт, что является весьма хорошим показателем. При этом масса реактора составила 35 % от массы установки, МГД-генератора - 17 %, систем теплосброса - 35 %.

Если энергетическую установку подобного типа использовать для питания электрореактивных плазменных двигателей, то при удельном импульсе 5000 с можно реализовать тягу примерно 450 кгс. МЭК с такой двигательной установкой имел бы тяговооруженность порядка 10^{-3} , что во много раз превосходило бы значение этого параметра для ядерных

двигательно-энергетических установок, использующих твердофазные твэлы.

Приведенные данные по концептуальным разработкам НПО Энергомаш доказывают принципиальную возможность обеспечения существенного превосходства двигателей на основе высокотемпературного ГФЯР над двигательными установками других типов, особенно для дальних ускоренных полетов или для многократных челночных перелетов.

Стратегия разработки ГФЯР и двигательной энергетической установки на его основе опиралась на три основных этапа. На первом этапе был задействован функционирующий до настоящего времени уникальный испытательный комплекс на основе импульсного графитового реактора (ИГР) на Семипалатинском полигоне. Он предусматривал кратковременные (до 5 с) натурные испытания малоразмерных моделей газозамкнутых теплоделяющих элементов диаметром до 100 мм и длиной до 250 мм.

На втором этапе предполагалось сооружение нового реактора "Нефрит" типа ИГР для обеспечения на порядок более длительных испытаний образцов, габаритные параметры которых в три раза превосходили параметры малоразмерных образцов.

На третьем этапе предусматривалось сооружение стендового прототипа натурального ГФЯР, точнее, комбинированного газозамкнуто-твердофазного реактора "Лампа" с размерами рабочей камеры, соответствующими застойному газозамкнутому твэлу.

Для выполнения последних этапов разработки проектировался стендовый комплекс "Байкал-2" на территории того же Семипалатинского полигона. По "Байкалу-2" был проведен большой комплекс исследований. При этом огромное внимание уделялось проблемам безопасности, в первую очередь, радиационной и ядерной; в частности, выхлоп из объектов испытаний планировался только закрытого типа.

Параллельно с отработкой элементов конструкции ГФЯР и подготовкой натурных испытаний разрабатывались другие ключевые системы двигательной энергетической установки: МГД-генератор,

электропривод насосов, магнитной стабилизации и др. После завершения основополагающих исследований и проведения всего комплекса испытаний предполагалось приступить непосредственно к созданию опытного образца штатной двигательной энергетической установки на основе ГФЯР.

Подготовка первого этапа натурных испытаний в реакторе ИГР малоразмерной модели газозамкну-

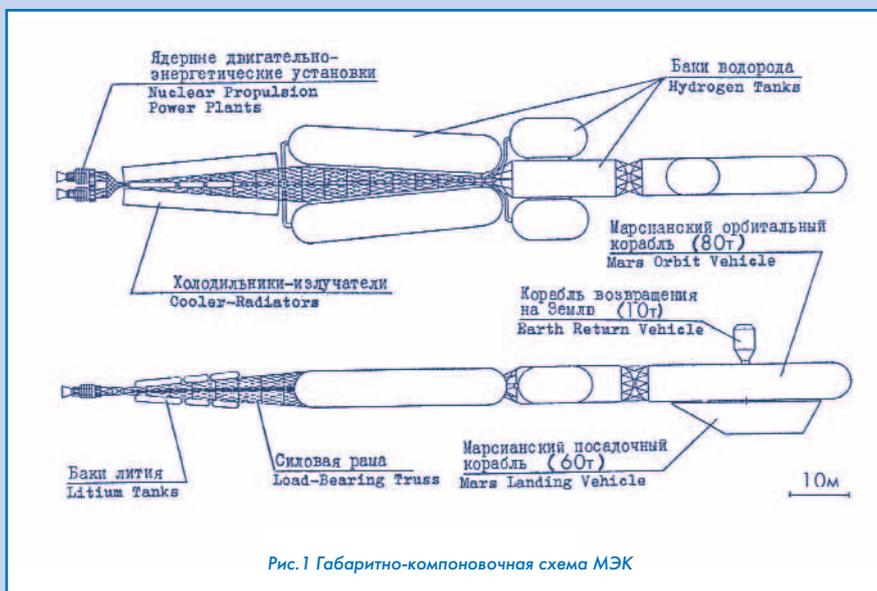


Рис. 1 Габаритно-компоновочная схема МЭК

ного твэла в течение всего периода разработки потребовала наибольших затрат времени и средств. Экспериментальную ампулу, содержащую модельный газофазный тепловыделяющий элемент и все необходимые системы, предполагалось разместить в вертикальном центральном канале реактора (рис. 2). В

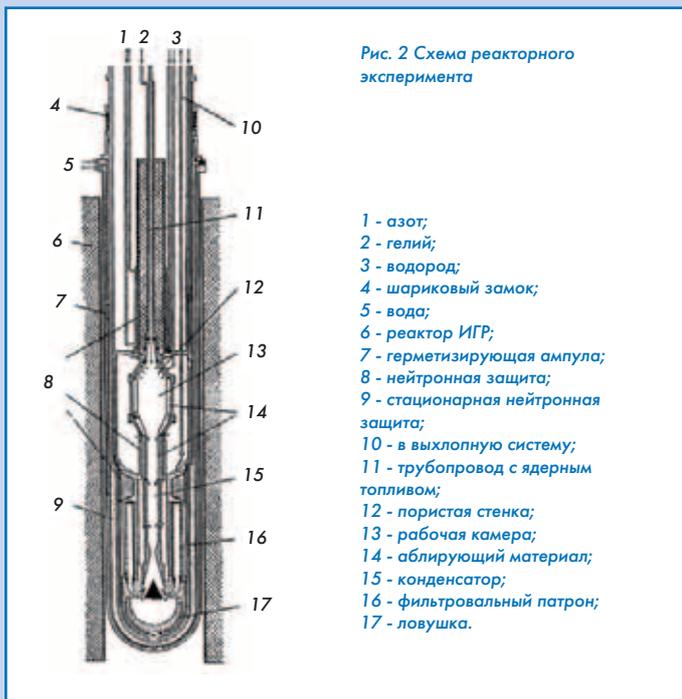


Рис. 2 Схема реакторного эксперимента

- 1 - азот;
- 2 - гелий;
- 3 - водород;
- 4 - шариковый замок;
- 5 - вода;
- 6 - реактор ИГР;
- 7 - герметизирующая ампула;
- 8 - нейтронная защита;
- 9 - стационарная нейтронная защита;
- 10 - в выхлопную систему;
- 11 - трубопровод с ядерным топливом;
- 12 - пористая стенка;
- 13 - рабочая камера;
- 14 - аблирующий материал;
- 15 - конденсатор;
- 16 - фильтровальный патрон;
- 17 - ловушка.

процессе эксперимента система вытеснительного типа должна была подавать ядерное топливо в рабочую камеру, месторасположение которой совпадало с центром активной зоны реактора ИГР. Топливо могло использоваться либо в виде пасты, содержащей мелкодисперсный урановый порошок и щелочные металлы, либо в виде расплава урана, разогреваемого непосредственно перед подачей в камеру. Тракт подачи ядерного горючего обладал эффективной компактной нейтронной защитой, исключавшей перегрев топлива и окружающих оболочек. Ос-

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОФАЗНОГО ТВЭЛА

Давление в рабочей камере, кгс/см ²	200
Расход урана, г/с	200
Расход водорода в рабочей камере, г/с	10
Скорость топлива на входе в камеру, м/с	1,7
Мощность, кВт	1000
Доля испаренного урана в выходном сечении, %	80
Температура урановой плазмы, К	$8 \cdot 10^3$
Поток тепловых нейтронов, нейтрон/см ² ·с	10^{15}

новные размеры внутренней полости рабочей камеры: диаметр 80 мм и длина 240 мм. Ураносодержащая струя, поступающая в камеру, под действием нейтронного потока высокой интенсивности разогревалась, испарялась и переходила в плазменное состояние. Излучение от этой плазмы нагревало рабочее тело. Внутренняя стенка входного конического участка рабочей камеры была выполнена из тугоплавкого сплава. Эту стенку изготавливали проницаемой, что позволяло вдувать водород и гелий вместе со струей ядерного топлива. Тем самым исключались образование рециркуляционной зоны на участке испарения топлива и турбулизация потока. Вдуваемый водород, в свою очередь, давал периферийный спутный поток, отделяющий стенки камеры от центральной струи урановой плазмы.

Цилиндрический участок рабочей камеры имел внутреннюю стенку из абляционного материала, что позволяло обеспечить внешней силовой металлоконструкции надежную защиту, в том числе, и в случае конденсации на поверхности абляционного материала металлического урана (путем удаления капель обратно в поток продуктами абляции).

На выходе из камеры высокотемпературный поток рабочего тела должен был поступать в конденсатор. Стенки конденсатора имели щелевые пояса, через которые подавался для разбавления газообразный водород. Кроме того, внутренняя поверхность конденсатора также покрывалась абляционным материалом, исключающим накопление конденсирующегося урана. Для снижения тепловыделения в уране на участке конденсации предусматривалась нейтронная защита по внешней поверхности конструкции конденсатора. Образовавшаяся газовая смесь с продуктами деления должна была подаваться через звуковое сопло на фильтр, расположенный в зоне нижнего торцевого отражателя реактора. Крупные частицы улавливались бы в инерционной ловушке, а мелкие — в пористых фильтровальных металлокерамических патронах. Использование звукового сопла стабилизировало бы давление в рабочей камере при изменении в процессе испытаний гидравлического сопротивления осадка на фильтровальных патронах. Газообразные продукты по трубопроводам удалялись в закрытую стендовую систему выхлопа. С целью снижения тепловыделения и нагрева фильтра предусматривалась его внешняя стационарная кольцевая и торцевая нейтронная защита.

Когда ядерное топливо заканчивалось и истекало время испытаний, наступал заключительный этап расхолаживания тепловыделяющего осадка в фильтре ампулы с помощью потока газа.

Для контроля и диагностики процессов в модельном газофазном твэле помимо стандартных устройств (расходомеров, датчиков давления и его пульсации, датчиков нейтронного потока и специально разработанных термопар) использовались специальные методы измерения и соответствующие системы, регистрирующие расход ядерного горючего, тепловые потоки на стенки рабочей камеры, электропроводность потока, а также фоторегистрация струи ядерного горючего. В связи с необходимостью обработки больших массивов измерительной информации потребовалась разработка соответствующих методов и алгоритмов.

Экспериментальная ампула (рис. 3, 4), изготовленная на опытном заводе, имела диаметр 185 мм и длину 6500 мм и включала следующие функциональные элементы: систему подачи ядерного горючего, рабочую камеру, конденсатор и фильтр. Все это вместе с коммуникациями, средствами измерений и элементами общей сборки размещалось внутри герметичного корпуса. Предполагалось, что необходимый для проведения испытаний запас ядерного горючего будет заправляться в тракт подачи ампулы непосредственно перед началом работ. После испытаний все твердые и жидкие продукты остаются в фильтре. Таким образом, радиационная безопасность на всех стадиях



Рис. 3 Экспериментальная ампула в сборе

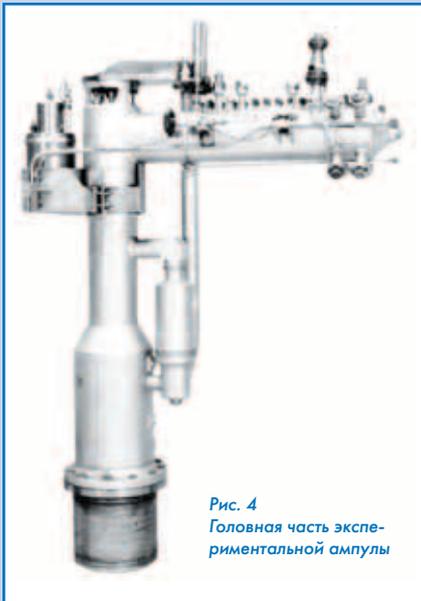


Рис. 4
Головная часть экспериментальной ампулы

ней части ампулы находились соединители, обеспечивавшие сопряжение со стендовыми коммуникациями.

Особое внимание было уделено мерам, направленным на обеспечение безопасности испытаний для исключения повреждения реактора ИГР и радиоактивного загрязнения стендовых помещений в случае возможных аварийных разрушений функциональных элементов экспериментальной ампулы.

Были полностью собраны и подготовлены к отправке на стендовую базу два испытательных комплекта с малоразмерными твэлами (рис. 5). На полигон были отправлены комплекты специального стендового оборудования и транспортно-технологической оснастки для работы с радиоактивными изделиями после завершения испытаний.

Помимо изготовленной экспериментальной ампулы был разработан эскизный проект новой модификации с моделью газофазного твэла застойного типа с магнитной стабилизацией процесса.

Итак, несмотря на многолетние усилия, натурные испытания высокотемпературных газофазных твэлов начать не удалось, финансирование работ было прекращено. Работы в

СССР и США по ГФЯР были начаты в романтическую пору на заре космической и ядерной эры в условиях соперничества сверхдержав. Быстрейшая реализация уникальных характеристик высокотемпературного ГФЯР казалась тогда вполне достижимой, хотя не было ясности, для каких конкретных задач все это необходимо. Анализируя итоги исследований, следует отметить, что Энергомаш смело взял на себя функции головного разработчика ЯРД и ЯКЭУ на основе ГФЯР при недостаточности сильной расчетно-теоретической и технологической подготовленности этого направления. Роль и ответственность научного руководства были нивелированы, а роль головного КБ, наоборот, сильно возвышена. Неоднократно ставился вопрос о консолидации научного и проектно-конструкторского коллективов под эгидой НИИ тепловых процессов, но так и не был решен. Следствием этого стала недостаточная целеустремленность и координация работ.

СССР и США по ГФЯР были начаты в романтическую пору на заре космической и ядерной эры в условиях соперничества сверхдержав. Быстрейшая реализация уникальных характеристик высокотемпературного ГФЯР казалась тогда вполне достижимой, хотя не было ясности, для каких конкретных задач все это необходимо. Анализируя итоги исследований, следует отметить, что Энергомаш смело взял на себя функции головного разработчика ЯРД и ЯКЭУ на основе ГФЯР при недостаточности сильной расчетно-теоретической и технологической подготовленности этого направления. Роль и ответственность научного руководства были нивелированы, а роль головного КБ, наоборот, сильно возвышена. Неоднократно ставился вопрос о консолидации научного и проектно-конструкторского коллективов под эгидой НИИ тепловых процессов, но так и не был решен. Следствием этого стала недостаточная целеустремленность и координация работ.

По опыту прошедших лет можно констатировать, что создание высокотемпературного ГФЯР и двигатель-энергетических установок на его основе требует очень крупных инвестиций и эффективно только в рамках международного сотрудничества. Использование такого рода сложных и дорогих систем будет востребовано и экономически оправдано лишь тогда, когда на повестку дня встанет вопрос об индустриализации космоса с интенсивными транспортными потоками научно-производственного персонала при большом наборе характеристических скоростей (например, многократные межорбитальные перемещения Земля — Луна, Земля — Марс и т.п.).

Хотелось бы высказать пожелание, чтобы, несмотря на существующие проблемы финансирования, работы по ГФЯР имели бы в России дальнейшее продолжение в качестве научного направления, способствующего сохранению и развитию научно-технических заделов. В частности, благодаря достигнутому в настоящее время уровню вычислительной техники и накопленным знаниям в отношении отдельных рабочих процессов в ГФЯР стали бы реальными и весьма актуальными разработка комплексной математической модели газофазного твэла вместе с выходным каналом и соплом, проведение численных исследований характеристик рабочих процессов и обоснование достижимости ожидаемых уникальных параметров газофазных ЯРД.



Рис. 5 Рабочая часть ампулы

DIGEST

GAS-CORE NUCLEAR ENGINES FOR SPACE FLIGHT VEHICLES

In 1963, "Energomash" Co. (the department headed by Dr. R.A. Glinik) launched the development of nuclear rocket engines and nuclear space rocket powerplants on the basis of a gas-core nuclear reactor. "Keldysh Research Center" was a supervisor of these studies (namely, V.M.levlev - corresponding member of USSR Science Academy). "Energomash" Co. developed a general configuration of a space research complex to Mars. Its power block was composed of 2 nuclear powerplants on the basis of a gas-solid reactor of a transformable structure weighing as much as 57.5 tons and having 2.14-GW power (as described earlier). With the supposed 150-ton payload, the design launching mass of the Mars space complex on the near-earth orbit would be about 540 tons. The launching mass of the Mars space complex powered by a nuclear rocket engine with a solid reactor would be 730-800 tons as compared with 1700-2500 tons when powered by a chemical rocket engine. The company made the conceptual designing of the closed-cycle nuclear space rocket powerplants weighing about 125 tons and having 150-MW power equipped with a reactor without magnetic stabilization and with a Faraday MHD generator provided with a superconductive energizing system. Its specific mass was 0,83 kg/kW.

The preparation to the 1st stage of the test program took much time and efforts. The tests were proposed to perform in a pulse graphite reactor of a scaled-down fuel element which was to be installed in a vertical central channel. A pressure feeding system was to supply nuclear fuel into a working chamber (DxH=80x240 mm). The internal wall was permeable to ensure hydrogen and helium injection together with nuclear fuel jets. A cylindrical section of the wall was produced from ablative materials. Outgoing high temperature flow of a propulsive mass was proposed to direct into a condenser. When test time period was over and all nuclear fuel was consumed, the tests should enter the final stage of cooling by gas flow.

The investigation results proved possibilities to attain considerable advantages of these engines on the basis of high-temperature gas nuclear reactor over other type engines, in particular in long-range space flights or shuttle flights of non-expandable rockets.