



ЛУЧ

РОСАТОМ

# История создания топлива ядерного ракетного двигателя (ЯРД)

Акционерное общество  
«Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ»  
(АО «НИИ НПО «ЛУЧ»)

**Бахин Андрей Николаевич**  
Начальник лаборатории

# 1. История создания ЯРД

A decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that originate from a single point on the right side of the image and fan out towards the top right corner, creating a sense of motion and depth against the solid blue background.

# История создания ЯРД

**Формула скорости движения космического корабля (ракеты):**

$$v = u \cdot \ln(1 + M_t / M_k), \text{ где}$$

$v$  – скорость космического корабля;

$u$  – скорость истечения рабочего тела;

$M_t$  – масса топлива;

$M_k$  – масса космического корабля.

Данная формула с очевидностью свидетельствует, что приобретаемая ракетой скорость в первую очередь определяется скоростью истечения рабочего тела, равной удельной тяге (удельному импульсу) ракетного двигателя, т.е. отношению тяги к расходу рабочего тела.

**Скорость истечения:**

$u = R/G$ , где  $R$  – тяга, а  $G$  – расход рабочего тела, и с другой стороны:

$u^2/2 = 1/\mu \cdot (T_{in} - T_{out})$ , где  $\mu$  – молекулярный вес рабочего тела;

$T_{in}$  и  $T_{out}$  – температура рабочего тела на входе в реактивное сопло и на выходе из него соответственно. Следовательно, скорость истечения пропорциональна квадратному корню из отношения разности температур рабочего тела на входе в сопло и выходе из него к молекулярной массе. В ЯРД используется рабочее тело минимальной молекулярной массы – водород, разогреваемый до высокой температуры, что обеспечивает примерно вдвое большую скорость истечения (удельную тягу или удельный импульс) по сравнению с лучшими химическими ракетными двигателями.

## Преимущества гетерогенной активной зоны перед гомогенной:

- процесс нагрева рабочего тела в реакторе довольно полно может быть воспроизведен в единичной ячейке активной зоны, самое большое - в ячейке ее симметрии. Тем самым, несоизмеримо по сравнению с гомогенным реактором упрощается и удешевляется технологическая и экспериментальная отработка основного элемента активной зоны - тепловыделяющей сборки;
- существенно расширяется ряд материалов, допускаемых к использованию в конструкциях;
- уменьшается доля конструкций, работающих при высоких температурах;
- испытания одной или нескольких тепловыделяющихборок могут быть проведены в составе высоко надежных исследовательских реакторов, что несравненно безопаснее, чем испытания полноразмерного вновь созданного реактора;
- существенно расширяются возможности использования высокоэффективных замедляющих материалов с обеспечением соответствующего температурного режима работы замедлителя;
- упрощается решение проблемы физического (например, за счет изменения концентрации топлива) и гидравлического профилирования активной зоны.

# История создания ЯРД [1,6]

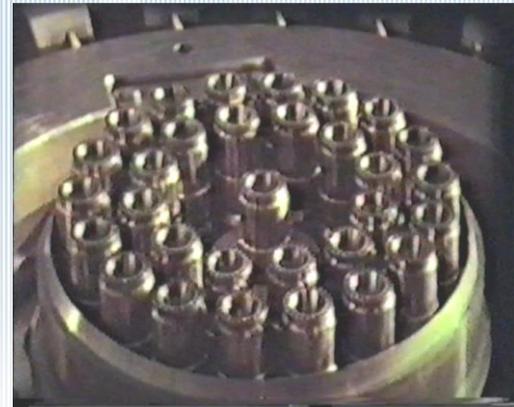
В мае 1958 года И.В. Курчатов и министр среднего машиностроения Е.П. Славский обратились в правительство с предложениями о создании реактора ИГР для изучения физических процессов в атомных реакторах при очень больших скоростях наращивания мощности. Большая плотность нейтронов в таком аппарате позволило проводить важные физические исследования, в том числе эксперименты с тепловыделяющими элементами для ракет с атомными двигателями. В 1960 году проведен физический пуск, и реактор введен в эксплуатацию. Первые же эксперименты в импульсном графитовом реакторе **ИГР** по нагреву водорода выявили чрезвычайную сложность и многоплановость начатой работы, отсутствие какой-либо достоверной информации о поведении материалов и конструкций при необходимых предельно высоких температурах, к тому же в интенсивных радиационных полях.



Реакторный зал

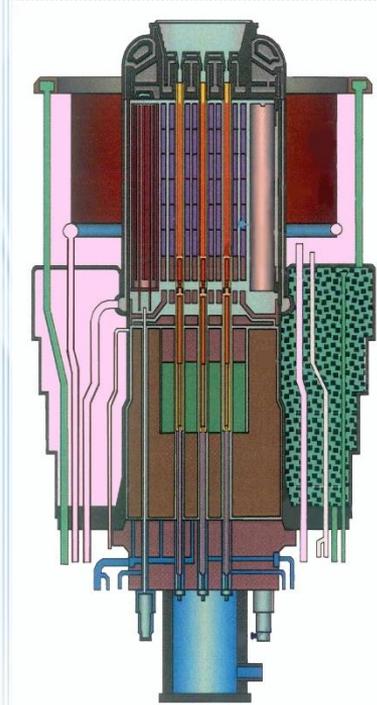
# История создания ЯРД [2,6]

В 1964 году комиссия под председательством А.П. Александрова с участием представителей Академии Наук СССР, заинтересованных министерств и ведомств, научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро, признала перспективность использования ЯРД в освоении космического пространства и рекомендовала развитие работ по созданию таких двигателей. Обоснованием рекомендаций послужили, во-первых, разработки по заданиям С.П. Королева эскизных проектов ЯРД с различными тягами; во-вторых, положительные результаты испытаний тепловыделяющих элементов в реакторе ИГР. В дальнейшем была осуществлена отработка узлов ядерного реактора ЯРД: ТВС, отражателя, замедлителя, органов регулирования в специально созданном для этих целей исследовательском реакторе **ИВГ.1**, обеспечивающим условия, соответствующие условиям их эксплуатации в реакторе ЯРД.



# История создания ЯРД [3,6]

Одновременно проблемы создания ЯРД решались на базе также специально созданного гетерогенного реактора минимальных размеров **ИРГИТ** (РД-0410, индекс ГРАУ 11Б91, ИР-100 – последнее расшифровывалось как исследовательский реактор мощностью 100 МВ и соответственно тягой около 3,6 тн) с целью упрощения отработки двигателя на заданную надежность. Для этой же системы были проведены ресурсные испытания систем подачи водорода в реактор.



# История создания ЯРД [3]

Общий подход к разработкам отечественных реакторов ЯРД основывался на предложенной и экспериментально обоснованной концепции допущения прогнозируемой деградации элементов активной зоны при условии сохранения её работоспособности в течение заданного времени. Итогом отечественных исследований ЯРД явились:

- разработка технологии производства и проведение ресурсных испытаний тепловыделяющих сборок, моделей и макетов замедлителя, отражателя, противорадиационной защиты, поглощающих стержней,
- проведение радиационных исследований конструкционных материалов,
- создание комплексной экспериментальной базы по отработке основных узлов реактора ЯРД на стендовом комплексе Байкал с реактором ИВГ.1,
- комплекс работ, обеспечивших создание и испытания реактора ИРГИТ.

## 2. Керамическая активная зона

A decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that originate from a point on the right side of the image and fan out towards the top right corner, creating a sense of motion and depth against the solid blue background.

# Выбор материалов активной зоны [2,3]

Получение максимально возможной скорости истечения рабочего тела (водорода) требует максимально достижимого его нагрева в реакторе ЯРД. При рабочих температурах теплоносителя кандидатными материалами основы тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) ТВС твердофазного реактора являются:

- тугоплавкие металлы,
- композиции на основе графитов,
- карбидные и нитридные соединения.

Основами топливных композиций рассматривались такие **тугоплавкие металлы** как вольфрам, молибден и рений. Их основные достоинства – термopрочность при отсутствии хрупкости и стойкость к ударным нагрузкам. **К сожалению, при высоких температурах наблюдалось интенсивная рекристаллизация и охрупчивание.** Поэтому область применения тугоплавких металлов была ограничена использованием их в виде защитных покрытий.

**Графитовые материалы** также не стали основой для наиболее высокотемпературных элементов активной зоны несмотря на более высокую термopрочность и термостабильность, чем у тугоплавких металлов, карбидов и нитридов, а также несмотря на применение графитовых топливных композиций в программе ЯРД. Проведённые внереакторные и реакторные исследования показали, что всем без исключения графитовым элементам, присуща термохимическая нестабильность в среде водорода. **При высоких температурах незащищенный от контакта с водородом графит начинает интенсивно размываться. При этом процесс имеет химико-эрозионный характер, незащищенный графит при интенсивном течении газа подвержен разрушению.**

# Концепция допущения деградации элементов активной зоны [5]

Хрупкость и низкая термopрочность карбидной и гидридной керамик являются главной проблемой при создании керамической активной зоны реакторов ЯРД. Для ее разрешения были разработаны специальные методы конструирования, базовые конструкции керамических термонапряженных элементов и специфические методы их экспериментальной отработки. Основная концепция керамических конструкций, разработанных и испытанных в советской программе создания реакторов ЯРД, утверждает: в процессе эксплуатации керамической активной зоны допускается прогнозируемая частичная деградация состояния ее элементов, в том числе хрупкое разрушение, при условии, что узел конструкции сохраняет работоспособность.

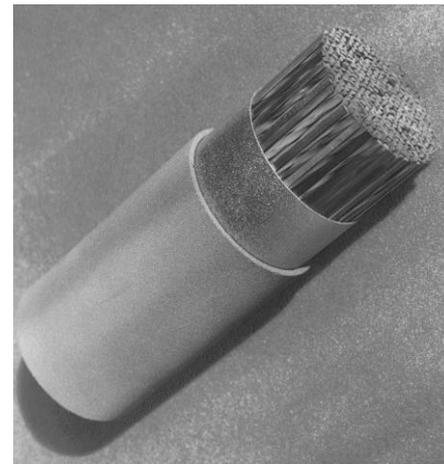


Рисунок 1 – Фрагмент а.з.

Во всех нагревных секциях твэлы однотипны по геометрии, но разнородны по составу материала. При относительно умеренных температурах оптимален двойной твердый раствор карбидов U и Zr с высоким содержанием урана. Для активной зоны максимальных температур используется тройной карбид U, Zr и Nb, в зоне максимальных плотностей тепловыделения предпочтительны карбидные "чугуны" - карбида со свободной фазой углерода.

Наборность активного блока из стержневых твэлов малого размера позволяет осуществить достаточно детальное распределение урана по объему активной зоны с целью оптимизации эпюры температур: интервалы постоянной концентрации урана в твэлах в поперечном сечении могут не превышать миллиметров, в осевом направлении - десятков миллиметров.



Рисунок 1 – Схема нагревательной секции

# 3. Исследования физики реакторов ЯРД с экспериментальным обоснованием на критических сборках



# Результаты испытаний на импульсном реакторе ИГР [6,7]

Реактор ИГР является импульсным исследовательским ядерным реактором на тепловых нейтронах с гомогенной уран-графитовой активной зоной, работает в режиме программируемых импульсов мощности и, по принципу гашения импульса, является самогасящимся.

Среди импульсных реакторов большой интегральной мощности реактор ИГР обладает самым высоким флюенсом тепловых нейтронов ( $3,7 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и интегральной дозой гамма-излучения за пуск ( $4,78 \times 10^7$  рад) в значительной по объему экспериментальной полости в центре реактора диаметром 280 мм и высотой 3825 мм.

Первым и одним из важнейших направлений исследований на реакторе ИГР была отработка твэлов и ТВС твёрдофазного реактора ядерного ракетного двигателя и отработка режимов запуска наземных прототипов ЯРД.

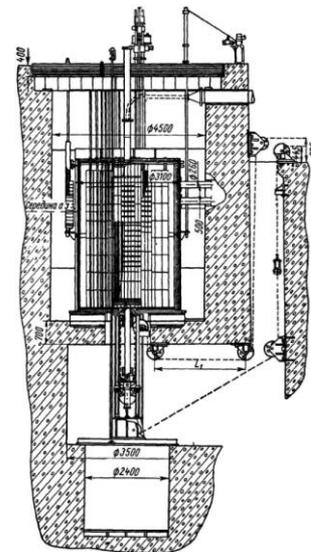


Рисунок 1 – Схема реактора ИГР

# Результаты испытаний на импульсном реакторе ИГР [8]

Большая часть проведенных исследований и испытаний на реакторе ИГР была связана с:

- термостойкостью ядерного топлива по программе создания ядерного ракетного двигателя;
- радиационной стойкостью электронной аппаратуры и элементов автоматики космических и воздушных летательных аппаратов;
- отработкой режимов запуска наземных прототипов ЯРД;
- определением выхода и осаждения продуктов деления в экспериментальных устройствах;
- определением пределов работоспособности твэлов и ТВС с топливом разного компонентного состава и назначения - космического, транспортного, энергетического и исследовательского.

## Технические характеристики

Максимальная плотность потока нейтронов	$7 \times 10^{16}$ н/см <sup>2</sup> с
Максимальный флюенс тепловых нейтронов	$3,7 \times 10^{16}$ н/см <sup>2</sup>
Полуширина импульса минимальная	0,12 с

РЕЖИМЫ РАБОТЫ РЕАКТОРА

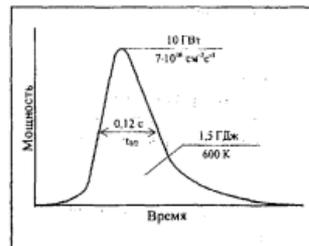


Рис. 1. Нерегулируемый режим (самогасящаяся вспышка)

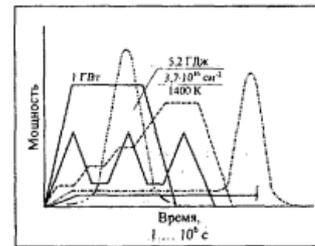


Рис. 2. Регулируемый режим

# Результаты испытаний на импульсном реакторе ИГР [8]



Первые реакторные испытания по программе создания ЯРД были проведены с тремя ТВС, собранными из твэлов канального типа, которые представляли собой шестигранную графитовую призму размером "под ключ" 7,2 мм и длиной 100 мм. Твэл имел 19 осевых каналов диаметром 1,15 мм, покрытых карбидом ниобия. Топливом являлся дикарбид урана с обогащением 90 %, диспергированный в графите. В результате испытаний были получены первые экспериментальные данные о температуре водорода на выходе ТВС (2740 К), эффективности твэла как двигательного элемента (550 кг-с/кг) и его расходонапряженности (149 кг/с\*м<sup>2</sup>). Далее был период, когда «испытывали» твэлы различной конструкции, материального состава и технологии изготовления - блочные призматические, стержневые 4-х лопастные, витые 2-х лопастные с разным шагом 30...60 мм и длиной 100, 200 мм. графитокарбидные. карбидные на основе твердых растворов UC+ZrC, UC+ZrC+NbC и карбидографита и др. Наконец, к 1970 году наиболее проработанными твэлами стали стержневые твэлы на основе твердого раствора карбидов, которые в последующем, в 1976 году, позволили достичь предельное энерговыделение в топливе 25,5 МВт/л, температуру водорода на выходе ТВС 3070 К и расходонапряженность 455 кг/см<sup>2</sup>. Это были предельные рабочие значения параметров, при которых сохранялась работоспособность топлива в кратковременных, до 4 с, и многократных, до 12 раз, термических нагружениях на реакторе ИГР.

# Реактор ИВГ.1 - наземный прототип реактора ЯРД [2]



Рисунок 1 -Типовая диаграмма пусков

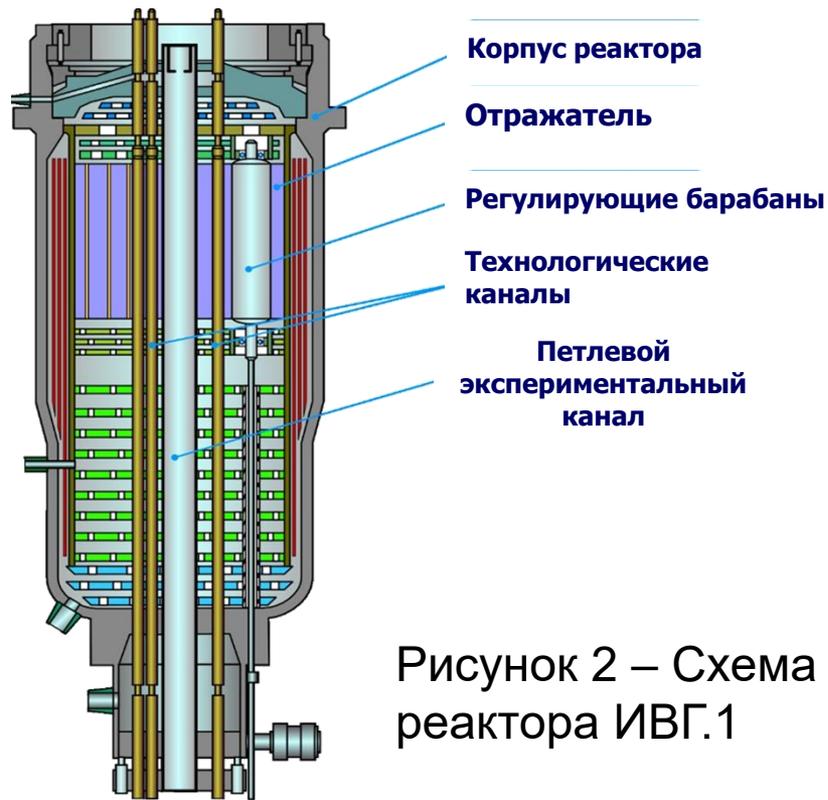


Рисунок 2 – Схема реактора ИВГ.1

# Реактор ИВГ.1 - наземный прототип реактора ЯРД [2]

**Конструкция ИВГ.1 позволяла испытывать одновременно несколько типов ТВС и модулей АЗ прототипов ЯРД.**



Рисунок 1 – Изображение ТВС

# Реактор ИВГ.1 - наземный прототип реактора ЯРД [2]

Энергопуск состоял из трех последовательно проведенных этапов: контрольного физического пуска (после повторной установки в реактор штатных каналов), «холодного» пуска с кратковременной подачей в каналы водорода и, наконец, «горячего» пуска с выбросом водорода в атмосферу, состоявшегося 5-7 марта 1975 г.. Как и было предварительно решено, «горячий» пуск не ставил своей задачей выход сразу на рекордные параметры, особенно при загрузке первых опытных технологических каналов.

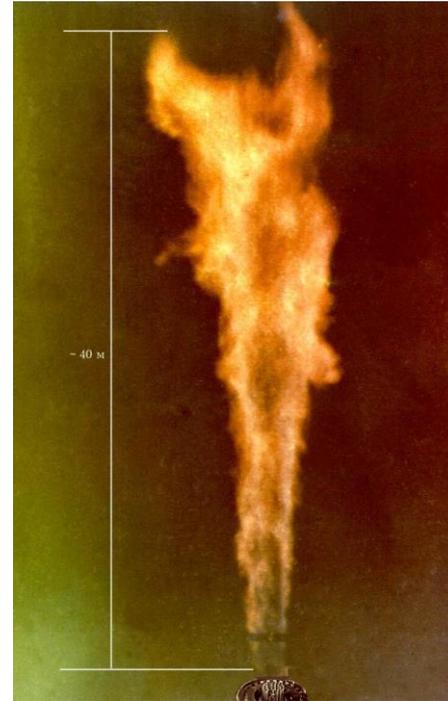


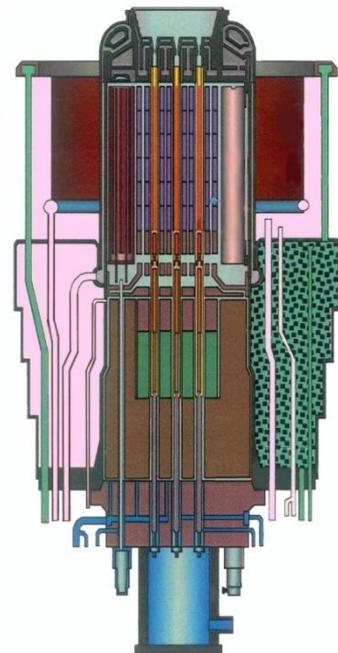
Рисунок 1 – Водородный факел

# Опыт создания и отработки ЯРД на базе реактора ИРГИТ [6]

ИРГИТ представлял собой реактор на тепловых нейтронах, в котором замедлителем являлся гидрид циркония, а отражателем служил бериллий. Ядерным топливом для него служила композиция на основе карбидов урана и вольфрама с обогащением по урану-235 около 80 %. В активную зону реактора входило 37 тепловыделяющих сборок (ТВС). Основу ТВС составляли нагревательные секции из стержневых спиралевидных пластинчатых твэлов с поперечным сечением 2 мм. Такая конструкция обеспечивала самодистанционирование твэлов и позволяла реализовать профилирование урана по объему активной зоны.

Основными конструкционными материалами активной зоны, силовых элементов, сопла стали керамические композиции – карбидные и карбонитридные соединения урана, ниобия и циркония, что позволило гарантировать работоспособность всех высокотемпературных элементов ЯРД.

Отличие стендового варианта от будущего реального двигателя заключалось в том, что отражатель и замедлитель охлаждались отдельным потоком водорода. Кроме того, он был оборудован дополнительной радиационной и аварийной защитой, а сопло было укорочено.



# Опыт создания и отработки ЯРД на базе реактора ИРГИТ [6]

Физический пуск реактора проходил в две стадии: сначала на стенде ФЭИ, а затем на стендовом комплексе «Байкал». 27 марта 1978 года состоялось первое горячее испытание реактора, его энергетический пуск, поэтому проводился он на минимальных параметрах при мощности 25 МВт и температуре водорода 1500 °С. Время работы реактора составило 70 сек. В июле-августе было проведено два пуска, во время которых мощность реактора была увеличена до сначала до 33 МВт, а затем до 42 МВт при температуре водорода 2360 °С, после чего он был разобран для анализа его состояния.

В ходе огневых испытаний проводилось исследование теплофизических и гидравлических характеристик элементов конструкции реактора (определение температурных полей и распределения давлений водорода в замедлителе, отражателе, ТВС; изучение процессов запуска, останова, расхолаживания, определение состояния ТВС, других узлов и систем реактора после испытаний). Также изучались нейтронно-физические характеристики реактора (запас реактивности, температурные, мощностные и плотностные эффекты реактивности, динамические характеристики реактора и исполнительных органов системы управления).



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

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

В течение последнего десятилетия резко сузился кадровый состав специалистов ракетной и атомной отраслей, обеспечивших в 1970-1980 гг. лидерство нашей страны в области космической ядерной энергетики.

Тем не менее, сегодня еще имеются объективные предпосылки для ренессанса космической ядерной энергетики. Российские ученые сумели не только сохранить бесценный задел по космической ядерной энергетике, но и освоить новые прорывные технологии. Разработаны проекты космических ядерных энергоустановок для решения следующих конкретных задач: круглосуточное всепогодное радиолокационное наблюдение земной поверхности с геосинхронной орбиты в реальном масштабе времени;

- \* глобальные системы космической связи;
- \* системы информационного подавления;
- \* глобальный мониторинг окружающей среды;
- \* промышленное производство в космосе особо чистых материалов;
- \* пилотируемые экспедиции с участием человека на Луну и Марс.

Следует отметить, что полученные в ходе разработки и создания ЯРД уникальные технологии могут быть внедрены в другие отрасли науки и техники. Таким образом, ядерная космическая энергетика может послужить своеобразным локомотивом для поднятия всей российской науки, техники и промышленности на качественно новый уровень технологического перевооружения.

# Спасибо за внимание!

**Бахин Андрей Николаевич**  
Начальник лаборатории

Тел.: +7 (495) 502-79-51  
факс +7 (495) 543-33-63  
E-mail: [npo@sialuch.ru](mailto:npo@sialuch.ru)  
[www.sialuch.com](http://www.sialuch.com)

**15.09.2023**

# Опыт создания и отработки ЯРД на базе реактора ИРГИТ [6]



Была принята следующая схема отработки агрегатов и систем, предшествующая полномасштабным испытаниям ЯРД, включая основные этапы:

- автономную отработку агрегатов систем подачи, управления и регулирования на модельных и натуральных жидкостях и газах;
- комплексные исследования систем подачи, управления и регулирования при натуральных параметрах рабочего тела;
- исследование нейтронно-физических характеристик реактора на физической модели;
- газодинамические исследования блоков реактора и реактора в целом;
- автономные огневые испытания реактора на газообразном водороде;
- совместные исследования на жидком водороде блоков реактора и системы подачи при натуральных массовом расходе, давлении и температуре. Приведенная схема отработки дает возможность до начала натуральных испытаний ЯРД в сборе оптимизировать его состав и исследовать целый ряд характеристик и процессов ЯРД в целом;
- работоспособность при проектных параметрах, взаимное влияние агрегатов, вопросы запуска на начальном этапе, регулирования на режиме, глубокого дросселирования и другие.

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

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

1. <http://iae.kz/reaktor-igr/>
2. Презентация Дьяков Е.К., Тухватулина Ш.Т. «ИВГ-1 – ИНСТРУМЕНТ СОЗДАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА 21 ВЕКА»
3. <https://topwar.ru/23117-kosmicheskie-yadernye-energeticheskie-ustanovki.html>
4. Ю.Г. Демянко, Г.В. Конюхов, А.С. Коротеев, Е.П. Кузьмин, А.А. Павельев. Ядерные ракетные двигатели // ООО «Норма-Информ». 2001. 416 с.
5. <https://studfile.net/preview/7801351/page:3/>
6. <http://www.biblioatom.ru/evolution/istoriya-osnovnyh-sistem/istoriya-reactorov/igr-ivg-irgit/>
7. <https://www.nnc.kz/ru/facilities/igr.html>
8. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/002/30002836.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/002/30002836.pdf)
9. Ю.Г. Драгунов. Космическая ядерная энергетика. Вестник Российской академии наук, 2021, т. 91, №6, с. 520-527.