

*К 50-летию пилотируемой космонавтики —  
вехе в истории ракетно-космической техники*

**из истории физики**

**Проблемы выбора и использования материалов  
для реактора ядерно-ракетного двигателя**

А.Г. Ланин, И.И. Федик

*Рассмотрены история создания реактора ядерного ракетного двигателя и проблема выбора материалов в среде водорода при температуре до 3100 К и энерговыделении 30 МВт л<sup>-1</sup>.*

PACS numbers: 01.65.+g, 07.87.+v, 81.05.Je

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103f.0319

**Содержание**

1. Введение (319).
2. Конструкция тепловыделяющей сборки (ТВС) ядерно-ракетного двигателя (321).
3. Методы модельных испытаний материалов (324).
4. Материалы активной зоны (325).
  - 4.1. Термодинамические и структурные характеристики материалов.
  - 4.2. Прочность материалов при различных способах нагружения.
  - 4.3. Температурные зависимости прочности и ползучести.
  - 4.4. Влияние структурных параметров на термопрочность.
  - 4.5. Критерии разрушения термонаагруженных тел.
  - 4.6. Возможные способы повышения прочностных характеристик керамики.
5. Радиационная стойкость элементов ТВС (330).
6. Коррозия материалов в рабочей среде (331).
7. Реакторные испытания ТВС (331).
8. Перспективы реакторов ядерно-ракетного двигателя (333).

Список литературы (334).

**1. Введение**

Во второй половине 50-х годов XX в. высокие темпы развития и достигнутый научно-технический уровень страны в области атомной энергетики заложили объективные предпосылки для создания принципиально новых видов стационарных и транспортируемых ядерных энергетических реакторов и установок, в том числе для космических целей, таких как ядерные ракетные двигатели (ЯРД) и малогабаритные преобразователи ядерной энергии в электрическую [1, 2].

Начало создания ЯРД в СССР можно отнести к 1955 г. — ко времени встречи И.В. Курчатова, С.П. Королева и

А.Г. Ланин, И.И. Федик. Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение "Луч", ул. Железнодорожная 24, 142100 Подольск, Московская обл., Российская Федерация  
Тел. (495) 798-03-18, (4967) 69-92-58. E-mail: lanin05@mail.ru

Статья поступила 7 июля 2010 г.,  
после доработки 14 января 2011 г.

М.В. Келдыша, обсуждавших возможности создания ракеты с атомным двигателем в целях усиления обороноспособности страны, учитывая развёрнутые в США работы по разработке ЯРД (программа "Ровер"). В 1956 и 1958 гг. в СССР были подписаны два постановления правительства по проведению работ по разработке ядерных ракетных двигателей [2]. На этом этапе были начаты предварительные конструкторские работы по созданию стеновой базы для испытаний ЯРД и материаловедческие исследования. Изучение условий теплообмена и гидродинамики проводилось в НИИ-1 (ныне Научно-исследовательский институт тепловых процессов (НИИТП)), исследование нейтронной физики и управления реактором — в Обнинском Физико-энергетическом институте (ФЭИ) и в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ). Технология тугоплавких материалов и тепловыделяющих элементов (твэлов) разрабатывалась в НИИ-9 (ныне Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара (ВНИИНМ)). Ограниченные исследования по проблемам выбора материалов для ЯРД на основе карбидов переходных металлов и графита в газовых средах начиная с 1960-х годов проводились также во Всесоюзном институте авиационных материалов (ВИАМ), Государственном институте прикладной химии (ГИПХ), Институте высоких температур (ИВТ), "НИИграфите" и на кафедре керамики Ленинградского технологического института.

В 1957 г. в НИИТП был выдвинут принцип поэлементной отработки узлов реактора ЯРД на электротермических и плазмотронных стендах, что позволяло уменьшить объём реакторных испытаний. Были рассмотрены различные схемы ЯРД. Простейшая схема — ЯРД с реактором с твердофазной активной зоной (получившая название схемы "А") — способна создать удельную тягу 800–900 с (лучшие жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) — 450 с). ЯРД с газофазным реактором (схема "В") мог дать удельную тягу до 2000 с, но проблемы, которые следовало решить при его создании, — удержание урановой плазмы с температурой в несколько десятков тысяч градусов и защита от неё стенок тепловыделяющей сборки (ТВС) — были значительно

более тяжёлыми, чем при создании ЯРД схемы "А". К разработке ЯРД схемы "А" и решено было приступить (работы по схеме "В" продолжались всё время как научно-исследовательские).

Через два года уже активно работали две кооперации по созданию первых ЯРД. Разработка наземного реактора-стенда ИВГ-1 (исследовательский высокотемпературный газоохлаждаемый) — прототипа лётного варианта ЯРД — проводилась в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники (НИКИЭТ) с директором Н.А. Доллежалем и в ИАЭ под руководством Н.Н. Пономарева-Степного. Вторую кооперацию по созданию наземного варианта двигателя ИР-100 возглавляли научный руководитель НИИТП В.М. Иевлев, главный конструктор двигателя Конструкторского бюро химавтоматики (КБХА) в г. Воронеже А.Д. Конопатов и научный руководитель реактора ФЭИ в г. Обнинске В.Я. Пупко. Первые твэлы на карбидной основе были предложены и изготовлены в НИИ-9. Расширение исследований по ЯРД потребовало изготовления большого количества твэлов для экспериментальных ТВС. В августе 1962 г. Министерство среднего машиностроения СССР приняло постановление о создании в г. Подольске (Московская область) Научно-исследовательского института тепловыделяющих элементов (НИИТВЭЛ, в настоящее время Федеральное государственное унитарное предприятие (ФГУП) Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение (НИИ НПО) "Луч") с опытным заводом, обладающим стартовыми технологическими возможностями для ускоренной комплексной разработки и производства новых видов ядерного топлива и твэлов [3]. Этому постановлению предшествовало принципиально важное решение от 30.12.1959 г. о нецелесообразности дальнейшей разработки боевых ядерных баллистических ракет (в связи с прогрессом работ по двигателям на химическом топливе) и о необходимости продолжения разработок ЯРД с целью их применения в составе космических ракет-носителей [2].

Основная задача, встававшая перед разработчиками ЯРД, — как уберечь от разрушения из-за температурных напряжений керамическую активную зону и, прежде всего, твэлы. Как известно, температурные напряжения пропорциональны произведению плотности энерговыделения, модуля упругости материала, коэффициента линейного расширения и квадрата характерного поперечного размера элемента конструкции. Энерговыделение нельзя сильно уменьшать, так как это приводит к увеличению веса реактора с защитой и сводит преимущества ЯРД к минимуму. Весьма эффективно уменьшение характерного размера твэла, но оно ограничено тем, что элементы очень малых размеров будут сильно разрушаться вибрационными нагрузками, которые велики в ракетных двигателях. То есть характерный поперечный размер твэлов, равный 2–3 мм, является предельным. Альтернативой карбидному варианту является твэл ЯРД из графита. Этот материал обладает уникальной термопрочностью, поскольку имеет значительно меньший (почти в 100 раз), чем у карбидов, модуль упругости. Правда, графит (ничего не даётся даром) имеет существенный недостаток: он довольно хорошо взаимодействует с водородом.

Советские исследователи, в отличие от американских, в разработке активной зоны ЯРД пошли по пути

создания твэлов не из графита, хотя и термопрочного, но нестойкого в водородной среде материала, а из хрупких, но более стойких в среде водорода карбидов [2]. В то время как во многих других научных областях советским учёным приходилось "догонять" зарубежные исследования, в разработке ЯРД не проводилось слепого копирования "заморских" образцов, а опыт предшественников анализировался критически. Советские исследователи сочли (и как показал результат — справедливо), что защитить твэл от взаимодействия с водородом сложнее, чем обеспечить его приемлемую термопрочность. Хотя твэлы на основе графита разрабатывались и в СССР, но они являлись запасным вариантом.

В НИИТВЭЛ под руководством директора М.В. Якутова в 1962–1969 гг. были созданы материаловедческий, технологический, расчётно-теоретический и испытательные отделы, перед которыми встали следующие обширные задачи [3]:

- обоснование и выбор топливных и конструкционных материалов ЯРД;
- разработка технологических основ изготовления изделий из этих материалов;
- конструирование и расчётно-экспериментальное обоснование работоспособности элементов активной зоны;
- разработка проектной документации и создание полупромышленного производства.

Решение поставленных задач было успешно реализовано благодаря использованию принципа системного и комплексного подхода к их решению. Детальные расчётно-теоретические оценки условий работы изделий, необходимые материаловедческие исследования свойств материалов, проработки вариантов технологий затем материализовались при совместной с опытным заводом работе в виде технологических цепочек. В свою очередь, экспериментальные и опытные образцы изделий подвергались соответствующим тепловым, гидравлическим, ресурсным испытаниям в реакторе ИВГ Объединённой экспедиции, находящейся в составе института на правах филиала на территории ядерного полигона в Семипалатинской области (Семипалатинск-21, позднее — г. Курчатов, Республика Казахстан).

По существу, предлагаемая статья посвящена изложению истории материаловедческих разработок и практики создания элементов активной зоны реактора ЯРД, проводившихся в НИИТВЭЛ (ФГУП НИИ НПО "Луч") в период 1962–1991 гг. Тот факт, что результаты исследований по ЯРД рассеяны по многочисленным публикациям в периодических журналах или в специальных сборниках, доступ к которым затруднён, стал побудительной причиной написания этой статьи, в которой обобщены сведения о характеристиках материалов и работоспособности элементов активной зоны ЯРД. Ясно, что круг рассматриваемых в статье вопросов ограничен. Не затрагиваются, например, вопросы конструктивной разработки ядерного двигателя, его радиационной, тепловой защиты, нейтронно-физических и гидродинамических характеристик реактора, которые частично представлены в книге *Ядерные ракетные двигатели* [2], изданной в 2001 г.

Вследствие высокой хрупкости используемых в конструкции материалов на основе фаз внедрения (карбидов, гидридов) особое внимание уделяется обоснованию стойкости элементов активной зоны в условиях действия

высоких тепловых и нейтронных потоков, напряжений, агрессивных газовых сред и ультравысоких температур. Такое многообразие эксплуатационных параметров потребовало разработки в НИИ НПО "Луч" ряда новых предреакторных физико-механических методов испытания материалов и исследования закономерностей изменения диффузионно-контролируемых процессов (ползучести, коррозии, радиации) в топливных и конструкционных материалах на основе фаз внедрения.

Начиная с 1976 г. испытания разрабатываемых ТВС ЯРД проводились в реакторе ИВГ-1, который позволял проводить отработку элементов активной зоны реактора. Позднее был создан стенд для испытания "двигательного" варианта реактора ИР-100, который через несколько лет, после его испытаний на разной мощности, был переоборудован в материаловедческий исследовательский реактор малой мощности, успешно работающий до сих пор.

Совокупность всех результатов исследований за многие годы, полученных в НИИ НПО "Луч", позволила построить научную систему знаний о природе тугоплавких соединений, механизмах деформирования и разрушения, особенностях их поведения в конструкционных и топливных изделиях при варьировании параметров эксплуатации реакторов. Многие разработки НИИ НПО "Луч" получили международное признание на международных конференциях, симпозиумах, выставках. Выросла плеяда учёных, защитивших более 30 докторских и 200 кандидатских диссертаций, подготовивших к изданию несколько десятков монографий и несколько сотен научных статей о высокотемпературных материалах и областях их применения. Ряд сотрудников стали лауреатами Государственных премий СССР и премий Правительства, получили звания "Заслуженный деятель науки и техники", "Заслуженный технолог" и "Заслуженный изобретатель".

## 2. Конструкция тепловыделяющей сборки (ТВС) ядерно-ракетного двигателя

Идея ядерно-ракетного двигателя проста: использовать для нагревания газа, создающего тягу при истечении через сверхзвуковое сопло, ядерный реактор вместо камеры сгорания. Эффективность ракетного двигателя определяется скоростью истечения газа из сопла, которая обратно пропорциональна корню квадратному из молекулярного веса газа. Наименьший вес (2 а.е.м.) у водорода. Скорость истечения водорода, нагретого до температуры 3000 К, выше (более чем в два раза), чем у лучших химических топлив жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). В этом и заключается преимущество ЯРД, который может нагреть чистый водород (у ЖРД средний

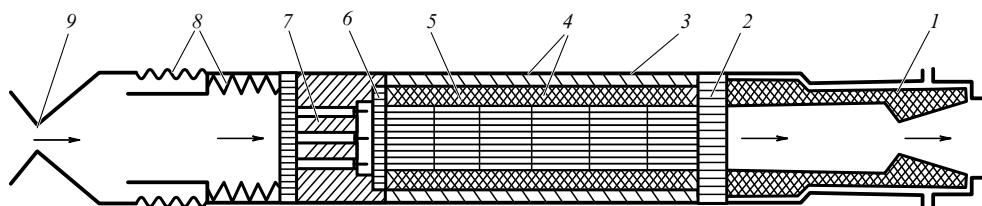
молекулярный вес продуктов сгорания всегда больше 10 а.е.м.). Вместо скорости истечения для оценки эффективности двигателя часто применяют характеристику удельная тяга — отношение количества движения, получаемого ракетным двигателем, к массовому расходу рабочего тела. (При другом толковании удельная тяга равна отношению тяги к весовому расходу топлива, тогда она измеряется в секундах.) Согласно результатам расчётов, межорбитальный аппарат, снабжённый ЯРД с удельной тягой в диапазоне 850–4400 с, сможет доставлять с околоземной орбиты на геостационарную орбиту груз массой в три раза большей, чем аппарат с ЖРД.

Помимо отмеченных больших преимуществ, ЯРД обладает и существенными недостатками. Перечислим основные: во-первых, реактор ЯРД значительно тяжелее камеры сгорания ЖРД, во-вторых, реактор является мощным источником радиации, что ещё более утяжеляет двигатель из-за необходимости создания биологической защиты, а также значительно усложняет его эксплуатацию. Требование стойкости в среде водорода при высоких температурах и нейтронно-физические ограничения сильно сужают круг материалов, которые могут использоваться для изготовления твэлов и высокотемпературных элементов конструкции ТВС. Поскольку ЯРД — это реактор летательного аппарата, то он должен быть достаточно лёгким. Отсюда вытекает необходимость в очень высокой энергоплотности данного реактора, на несколько порядков превосходящей энергоплотность наземных энергетических реакторов [2, 4].

В процессе конструирования был сформулирован ряд важных принципов по использованию в ТВС хрупко-разрушающихся карбидных материалов. ТВС должна компоноваться из функционально автономных узлов и оставаться работоспособной, даже если её отдельные узлы повреждаются. Каждый узел оформляется в технологически самостоятельный агрегат, не требующий при его установке в сборку сложных монтажных операций соединения его со смежными узлами.

Подобное функционально-технологическое агрегатирование ТВС существенно сокращало объём экспериментальных исследований, способствовало ущёлению, унификации контроля качества изготовления узла, лучшей прогнозируемости его работоспособности, обеспечению максимальной устойчивости по отношению именно к этой нагрузке. Базовая конструкция тепловыделяющей сборки первого поколения гетерогенного реактора ЯРД представлена на схеме рис. 1. В корпусе ТВС размещается упорядоченный набор керамических деталей, не скреплённых между собой.

Стендовый реактор ИВГ-1, спроектированный для отработки конструкций ТВС при параметрах работы ЯРД [4], представляет собой гетерогенный газоохлаж-



**Рис. 1.** Принципиальная схема ТВС: 1 — сопловый блок, 2 — опорная решётка, 3 — корпус двухслойный из бериллия и стали, 4 — теплоизоляционный пакет, 5 — нагревные блоки, 6 — входная решётка, 7 — торцевой отражатель, 8 — узел компенсации теплового расширения, 9 — дроссель [4].

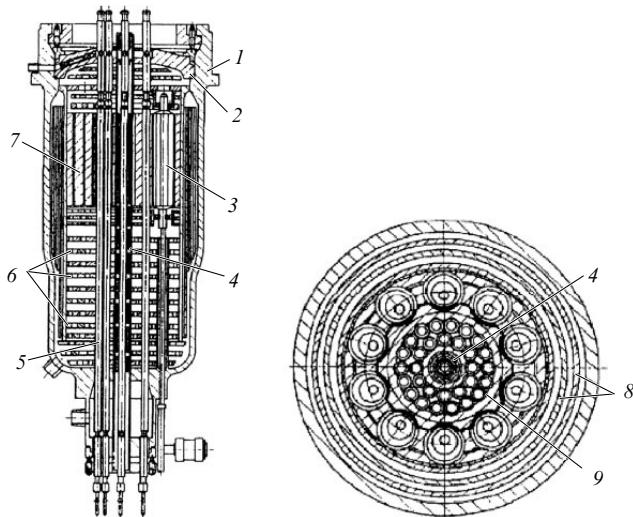


Рис. 2. Продольный и поперечный разрезы реактора ИВГ-1 [3].

даемый реактор с водяным замедлителем и бериллиевым отражателем (рис. 2). Его конструкция состоит из стационарной и сменной частей. Стационарная часть включает в себя корпус реактора 1 с крышкой 2, отражатель 7, барабаны регулирования мощности 3, блоки биологической защиты 6, экраны 8. Сменная часть активной зоны содержит центральную сборку 9 с комплектом из тридцати технологических каналов (ТК) 5 и центральным каналом 4. Исследуемые ТВС могут располагаться как в составе группы ТК, так и в центральном канале, где, благодаря окружающему канал бериллиевому вытеснителю, может быть обеспечен увеличенный примерно в два раза, по сравнению со средним по сечению, поток тепловых нейтронов, что позволяет испытывать ТВС, установленную в центральном канале, при форсированных (вплоть до разрушающих) нагрузках. Использование в стендовом прототипе ЯРД воды вместо гидридно-циркониевого замедлителя (близкой к гидриду циркония по ядерно-физическим свойствам) расширяет экспериментальные возможности реактора, позволяя производить замену исследуемых блоков без конструктивных доработок, и повышает надёжность эксплуатации реактора.

Твэлы расположены в нагревном блоке ТВС диаметром 29,7 мм и длиной 600 мм (рис. 3). Нагревная секция (НС) разделена на 6 нагревных частей, в каждой из которых расположен 151 стержневой витой твэл и 12 полуцилиндрических заполнителей. Твэлы и заполнители плотно упакованы по треугольной решётке. В сечении твэл представляет собой пластинку, узкая сторона которой выполнена по описанной окружности. Пластина закручена вдоль оси. Относительный диаметр твэла 2,2 мм, толщина лопасти 1,24 мм, шаг закрутки 30 мм.

Удельное тепловыделение и температура в твэле по длине ТВС распределяются неоднородно, с максимумом в центральной части ТВС на третьей нагревной секции, а перепад давления водородной среды монотонно снижается к выходу из сопла (рис. 4).

Нагревные секции (НС) предназначены для подогрева рабочего тела до заданной температуры. Первые четыре НС, считая от входа рабочего тела в ТВС, комплектуются из твэлов, выполненных из двойного раствора карбидографитов, последние две НС — из твэлов,

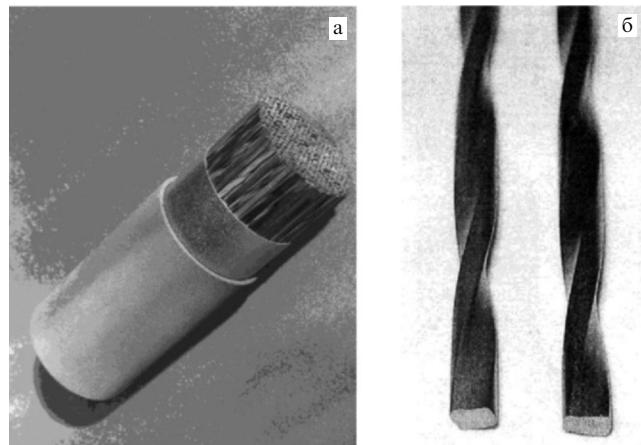


Рис. 3. Фотографии нагревного блока (а) и стержневых витых двухлопастных твэлов диаметром 2,2 мм (б) [3].

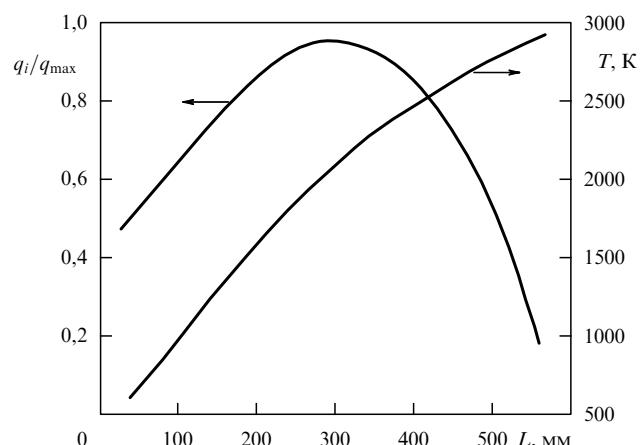


Рис. 4. Изменение тепловыделения  $q_i/q_{\max}$  и температуры  $T$  по длине  $L$  ТВС [4, 5].

выполненных из тройного раствора ( $ZrC + NbC + UC$ ). Каждая секция собрана из различающихся содержанием урана твэлов трёх типов, расположенных по трём зонам. Профилирование загрузкой урана выполнено с целью выравнивания температурного поля по сечениям НС [5].

На начальном этапе разработки ТВС рассматривались различные виды твэлов, в том числе шаровые. Шариковые системы твэлов обладают высоким гидравлическим сопротивлением протоку охлаждающего газа, поэтому предпочтение было отдано конструкции стержневых твэлов. На завершающем этапе проводился выбор формы сечения твэлов стержневого вида. Для закрученного твэла с двухлопастной или четырёхлопастной геометрией расчёт напряжений проводился численным методом, ввиду более неоднородного напряжённого состояния, чем в обычном круглом цилиндре. Причём растягивающие напряжения на контуре охлаждённого с поверхности закрученного твэла при прочих равных условиях оказываются на 29,6 % ниже, чем в круглом стержне с тем же диаметром. Напряжения от осевых сил, возникающие за счёт перепада давлений по тракту ТВС, почти на два порядка ниже температурных напряжений в твэлах.

Теплоизоляционный пакет (ТИП) защищает корпус от воздействия температуры рабочего тела. Его конструктивная особенность заключается в многослойном,

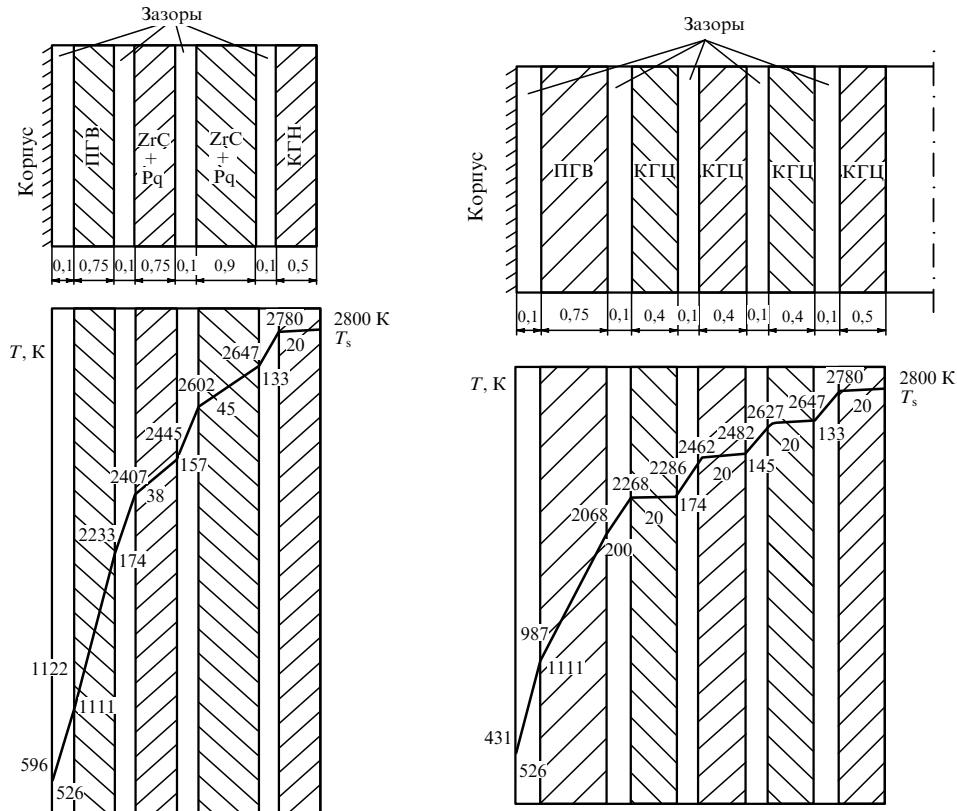


Рис. 5. Температурное поле в водородной среде в четырёхслойном пакете с двумя обоями из слоёнки ZrC + Pq (а) и пятислойном ТИП на основе трёх обояй из ZrC + C (б) при тепловом потоке через пакет  $2 \times 10^6 \text{ Вт м}^{-2}$  [6]. (ПГВ — марка пирографита, КГЦ — карбидографит на основе ниобия, КГЦ — карбидографит на основе циркония.)

секционированном пакетном исполнении, что сводит к минимуму возможность появления сквозных (до корпуса) трещин и позволяет варьировать в широком диапазоне материальный состав ТИП как по длине, так и по толщине. Наружные обоямы ТИП, выполненные из пиролитического графита, обеспечивают, помимо теплоизоляции, "мягкий" контакт с корпусом, что облегчает сборку конструкции и сводит к минимуму абразивное воздействие теплоизоляции на корпус. Внутренние обоямы представляют собой тонкостенные карбидографитовые цилиндры. В низкотемпературной области они выполнены из карбида циркония, в высокотемпературной — на основе карбида ниobia. Эти обоямы служат силовым каркасом ТВС, препятствующим попаданию осколков элементов теплоизоляции в тракт нагревных секций. Гильзы обеспечивают сборку НС, их установку в теплоизоляционный пакет и снижают эрозионное и химическое воздействие потока рабочего тела на теплоизоляцию. Между пирографитовыми обоямами и гильзами расположены обоямы из низкоплотного пирографита и из пористых карбидов циркония и ниobia. Обоямы из низкоплотного пирографита расположены на низкотемпературном участке ( $T = 1500\text{--}2000 \text{ K}$ ). При более высоких температурах в первом варианте конструкции размещались обоямы из так называемой слоёнки, представляющей собой карбидные слои в графитовой матрице. Во втором варианте они были заменены обоямами из пористых карбидов циркония и ниobia.

При плотности теплового потока в тракте охлаждения до  $q_s \approx (2 + 2,5) \text{ МВт м}^{-2}$  и максимальной температуре на поверхности внутренней гильзы пакета 3000 K

теплоизоляция должна обеспечить на металлическом корпусе канала температуру не выше 760 K, а это означает, что эффективная теплопроводность пакета не должна превышать  $3 \text{ Вт мK}^{-1}$  при  $T = 1500 \text{ K}$ .

Распределение температур по толщине теплоизоляционного пакета определяется четырьмя механизмами переноса тепла в зазорах: молекулярным, конвекцией, излучением и контактным сопротивлением. Теплоперенос зависит от состава и давления газа в зазорах, величины зазоров, температуры стенки и эксцентриситета зазора между стенками [6]. Наибольшее влияние на теплоперенос, как это видно из расчётных оценок двух вариантов конструкций ТИП (рис. 5), оказывает зазор между стенками обойм.

Опорно-сопловой блок (ОСБ) является опорой НС и частично ТИП. Через него все осевые усилия от потерь давления газа по горячему тракту ТВС передаются на корпус. Кроме этого, ОСБ обеспечивает выброс рабочего тела с заданными параметрами. С целью минимизации последствий возможных растресканий ОСБ секционирован. Он состоит из опорной решётки (ОР), опорного гнезда (ОГ) и соплового блока. ОР выполнены в виде "спечённого" блока четырёхлопастных стержней из твёрдых растворов карбидов ZrC, NbC эквимолярного состава. Для увеличения опорной площади и обеспечения цилиндрической поверхности к боковым поверхностям блока стержней присоединены сегментные обкладки. ОГ представляет собой набор трёх последовательно расположенных втулок, изготовленных из карбидографита с защитным покрытием из карбида. Сопло выполнено из набора конусных карбидографитовых вкладышей.

Входной блок предназначен для создания равномерного поля скоростей газа на входе в НС, торцевого экранирования нейтронного потока, компенсации терморасширений НС, ТИП и ОСБ, трассировки импульсных трубок и термопар, с помощью которых осуществляется регистрация параметров рабочего тела. В состав входного блока входят: пружины компенсации температурных расширений; пирографитовая обойма; бериллиевый стакан, выполняющий функции торцевого отражателя; газоввод и входная решётка, состоящая из высокопроницаемой решётки и четырёх рядов сеток.

Силовые элементы конструкции ТВС, работающие при высоком перепаде давления, изготавляются из совместимых с водородом материалов, имеющих высокую удельную прочность и радиационную стойкость и низкую склонность к водородному охрупчиванию, в том числе, паяно-сварных узлов. Металлический корпус ТВС реактора ИВГ-1 на участке активной зоны изготавлялся из алюминиевого сплава АМГ-6, а на остальных участках — из стали типа 18-10. Корпус ТВС реактора ИР-100, который в лётном варианте должен нагружаться внешним давлением порядка 10 МПа, является двухслойным. Внутренний слой — бериллиевые втулки — обеспечивал устойчивость корпуса, а внешний — тонкий чехол из стали — герметизацию ТВС.

Из числа разработанных и предложенных схем конструкции замедлителя на основе гидрида циркония наиболее простой является конструкция, представляющая собой вертикальный набор из тринадцати перфорированных дисков из гидрида циркония, плотно прилегающих друг к другу, с диаметром, равным диаметру активной зоны реактора, толщиной 50 мм каждый. В диске предусмотрено 37 отверстий диаметром 41 мм под ТВС и 372 отверстия диаметром 3 мм для протока охлаждающего водорода, обеспечивающих необходимое температурное поле в дисках. При такой схеме относительно просто решается задача профилирования системы охлаждения замедлителя с энерговыделением до 1 МВт см<sup>-3</sup>.

К основополагающим параметрам ЯРД относятся температура, нейтронный поток, а также средний уровень давления и пульсация давления рабочего тела в различных местах ТВС. Система измерения в наземном прототипе ИВГ [7] обеспечивает надёжный контроль рабочего процесса в ТВС и позволяет организовать автономную аварийную защиту стенда по параметрам ТВС в процессе испытаний. В каждой ТВС предусмотрены по два замера температуры газа в конце третьей НС и по одному замеру давления газа на входе в ТВС и в конце третьей НС; по два замера температуры и давления газа после ОР; два замера температуры корпуса в середине НС. Температура рабочего тела в одном сечении НС ТВС контролируется двумя-пятью зонными термоэлектрическими преобразователями (ТЭП). Зонные ТЭП на основе сплава вольфрам–рений позволяют судить о неравномерности температуры в радиальном сечении.

### 3. Методы модельных испытаний материалов

Модельные испытания комплектующих узлов ТВС явились, наряду с расчётным обоснованием, основным средством экспериментального обоснования конструкции на стадии разработки технического проекта. Они

проводились на модельных образцах комплектующих узлов в лабораторных установках. Отличительная черта исследований заключалась в раздельном влиянии различных условий воздействия. Комплексное воздействие оценивалось по принципу суперпозиции при поэтапном чередовании отдельных видов испытаний. Это допустимо при блочном исполнении конструкции ТВС и вызвано сложностью моделирования натурных условий эксплуатации. Результаты испытаний на высокотемпературных стендах позволили оптимизировать конструкторские и технологические решения, положенные в основу разработки ТВС.

В начальный период разработки ЯРД для расчётов оценок работоспособности конструкционных узлов активной зоны ЯРД не хватало достаточно полных сведений о физико-механических свойствах материалов, особенно при высоких температурах. Правильность конструкторских и технологических решений необходимо было оперативно проверять с помощью лабораторных исследований и предреакторных испытаний. Для решения поставленных задач в НИИТВЭЛ был создан и освоен комплекс исследовательского оборудования, в ряде случаев уникального.

При разработке методов испытаний тугоплавких керамических материалов в широком температурном интервале, от 20 до 3000 К, возник ряд трудностей, связанных со специфическими особенностями, присущими этим материалам.

1. Высокая твёрдость и хрупкость карбидов, нитридов и других тугоплавких соединений, затрудняющие их обработку, исключают возможность использования образцов сложной формы и больших размеров, вследствие технологических ограничений их приготовления.

2. Лёгкая окисляемость материалов при нагреве на воздухе вызывает необходимость проведения испытаний в вакууме или инертной среде, а также предотвращения возможного взаимодействия образцов с материалами нагревателя.

Ввиду этих причин, стандартные установки для испытания металлов не могли быть использованы и пришлось разработать или усовершенствовать комплекс высокотемпературных установок, отвечающих этим особенностям.

Были разработаны специальные установки для измерения прочности и пластичности керамических материалов при изгибе, сжатии, растяжении и ползучести, длительной прочности при высоких температурах, вплоть до 3000 К, в среде инертного газа или вакуума. Измерение теплофизических характеристик в разных температурных диапазонах проводилось различными методами и на различных установках. Для сравнительных оценок комплекса свойств, температуропроводности  $a$ , теплопроводности  $\lambda$ , теплёмкости  $C$  и электросопротивления  $\rho$  в температурном диапазоне от 300 до 1000 К использовались экспрессные нестационарные методы, как правило, с погрешностью  $\pm 10\%$ . Для измерения теплопроводности карбидных материалов при высоких температурах (до 2800 К) с погрешностями  $\pm 15\%$  использовали аксиальный метод с пропусканием тока через стержневой образец или твэл. Одновременно с теплопроводностью легко определялось электросопротивление.

Для оценки несущей способности термонагруженных конструкций использовались методы с параметрами

наиболее приближенными к условиям работы изделий. Моделирование условий термонаружения твэла проводилось охлаждением нагретого твэла в воде, а гильз теплоизоляционного пакета — нагревом в расплавленном олове. Оценка термопрочности материалов при температурах, превышающих  $0,3 - 0,5 T_m$  (где  $T_m$  — температура плавления), при которых возможно появление микро- и макропластичности, проводилась электронными, плазменными и индукционными способами нагрева, сложными в аппаратурном отношении. Эти методы позволяли варьировать и контролировать уровень и характер распределения температурных полей, а также скорость и цикличность их изменения, что давало возможность количественно оценивать термопрочность материалов в условиях, приближенных к условиям работы изделий в реакторе при высоких температурах.

Исследование взаимодействия узлов ТВС с водородом при рабочих температурах и оценка изменения состава, структуры, физико-химических и механических свойств проводились на электротермических установках, в которых можно было создавать необходимые температуры, вплоть до температур плавления материалов, непосредственно на твэлах из  $ZrC - UC + C$ ,  $UC - ZrC - NbC$ . Потоки водорода или водородо-метановой смеси, пропускаемые через рабочие камеры, позволяли обеспечить скорость газа у поверхности образца приблизительно от 0,1 до  $40 \text{ м с}^{-1}$  при давлениях до 10 МПа. Отработка конструкции по оптимизации гидравлического сопротивления тракта ТВС проводилась на гидравлических стендах.

Весьма значительное место в исследованиях материалов отводилось металлографическому и рентгеноструктурному анализу. Определение периодов решётки, идентификация фазовых составляющих в карбидных композициях проводились обычными методами на рентгеновских установках УРС-50ИМ, ДРОН-3. Для оценки химического и фазового состава материалов использовались как известные инструментальные методы химического, физико-химического, эмиссионно-спектрального, атомно-абсорбционного и рентгеноспектрального анализа, так и вновь разработанные методики порометрии, радиометрии, масс-спектрометрии, а также нейтронно-активационного анализа.

#### 4. Материалы активной зоны

К началу работ, в 1960-х годах, сведения о свойствах и технологиях изготовления материалов активной зоны ЯРД (на основе карбидов циркония, ниобия, урана и гидрида циркония) отсутствовали или являлись противоречивыми. Было известно, что, в отличие от моносоединений урана с низкой температурой плавления (2500 К), топливо на основе твёрдых растворов карбидов  $UC - ZrC$ ,  $UC - NbC$ , с составом, близким к стехиометрическому, может обеспечить нагрев водорода до температуры 3000 К.

Поэтому важнейшим технолого-материаловедческим направлением стало исследование твёрдых растворов монокарбида урана с изоморфными, особо тугоплавкими монокарбидами циркония, ниobia, тантала, обеспечивающими высокие температуры плавления и совместимость твэлов с теплоносителями. Была выявлена также перспективность развития карбонитридного топлива  $UC - ZrC - ZrN$ . Технология изготовления этих

тугоплавких соединений основывалась на приёмах порошковой металлургии. Спроектированные и созданные в институте печи для спекания, консолидации порошковых заготовок и нанесения покрытий на изделия при высоких температурах (до 2500–2700 К), уникальные для того времени, позволили изготовить как необходимые образцы для исследования свойств, так и впоследствии компоненты активной зоны ЯРД.

Термодинамические исследования твёрдых растворов тугоплавких соединений с монокарбида урана начались в НИИ НПО "Луч" в то время, когда какие-либо сведения о термодинамических свойствах в области гомогенности для высоких температур в литературе отсутствовали. Были известны лишь основополагающие подходы к оценке термодинамических свойств. Разработанная в институте статистико-термодинамическая теория трёхкомпонентных фаз внедрения и установленные закономерности протекания диффузионно-контролируемых процессов [8], таких как спекание, азотирование, карбидизация и окисление, способствовали оптимизации используемых технологий. Первые сведения о радиационной стойкости твэлов (целостности, расщеплении и прочности) при температурах от 1000 до 3100 К и интенсивностях потока нейтронов до  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , подтвердили целесообразность выбора топливных материалов на основе твёрдых карбидных растворов.

Впервые в машиностроении при разработке высоко-надёжной конструкции было принято беспрецедентное решение использовать хрупко-разрушающиеся материалы, что потребовало изменить принципы конструирования и установившиеся взгляды на прочность и термопрочность. Был введён новый критерий оценки несущей способности термонаруженных изделий, получивший признание у научной мировой общественности [9]. Данные о физико-химических свойствах многих тугоплавких соединений и их композиций (некоторые из них в виде изделий были получены впервые) в значительной мере раскрыли возможности этих материалов и повлияли как на определение условий их эксплуатации, так и на оценку их перспективности.

#### 4.1. Термодинамические и структурные характеристики материалов

Основой конструкционных и топливных материалов активной зоны являются тугоплавкие карбиды циркония, ниобия, их твёрдые растворы с ураном, карбидные композиции с углеродными добавками [2–4], а также гидриды циркония для узла замедлителя (табл. 1). Эти материалы относятся к классу так называемых фаз внедрения [8].

Материалы ЯРД должны обладать, наряду с высокими температурами плавления, низкими скоростями испарения и взаимодействия с водородом. Изменения состава материалов за счёт испарения или взаимодействия с водородом не должны выводить состав из области гомогенности в течение заданного ресурса времени работы. В отличие от моносоединений урана, топливо на основе твёрдых растворов карбидов  $UC - ZrC$ ,  $UC - NbC$ , с составом, близким к стехиометрическому, обеспечивает нагрев водорода до температуры 3000 К. Температуры плавления топливных композиций на основе  $ZrC$ ,  $NbC$ ,  $ZrN$  с повышением содержания  $UC$  снижаются. Исследования топливных

**Таблица 1.** Усреднённые физические характеристики материалов активной зоны в температурном интервале 300–700 К [10]

| Формула соединения        | Тип структуры* | Плотность, г см <sup>-3</sup> | Температура плавления $T_m$ , К | Коэффициент линейного расширения, $10^{-6}$ град <sup>-1</sup> | Теплопроводность, Вт мК <sup>-1</sup> | Модуль упругости, ГПа | Твёрдость по Виккерсу, ГПа |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Топливные материалы       |                |                               |                                 |  |                                       |                       |                            |
| UC                        | K              | 12,9                          | 2500                            | 10,4   | 19                                    | 220                   | 9,0                        |
| UN                        | K              | 14,4                          | 3074                            | 9,3  | 18                                    | 265                   | 8                          |
| ZrC + 5 % UC              | K              | 6,9                           | 3380                            | 11,8   | 30                                    | 380                   | 25                         |
| ZrC + 5 % UC + C          | K              | 6,6                           | 3250                            | 11   | 32                                    | 350                   | 20                         |
| ZrC + UC + NbC            | K              | 7,6                           | 3520                            | 11   | 22                                    | 320                   | 28                         |
| Конструкционные материалы |                |                               |                                 |  |                                       |                       |                            |
| ZrC                       | K              | 6,73                          | 3690                            | 8,6  | 30                                    | 390                   | 27                         |
| ZrC + 5 % C               | K              | 6,5                           | 3180                            | 5,5  | 52                                    | 230                   | 18                         |
| NbC                       | K              | 7,8                           | 3870                            | 7,7  | 20–30                                 | 500                   | 20                         |
| ZrC + 50 % NbC            | K              | 7,3                           | 3620                            | 5,9  | 25                                    | 470                   | 28                         |
| ZrH <sub>1,9</sub> ε-фаза | T              | 5,6                           | ≈ 2470 **                       | 7,0  | 30                                    | 69                    | 0,16                       |
| Пирографит                | Г              | 1,7                           | 4000 ***                        | 8,5  | 70                                    | 48                    | 0,1                        |

\* K — кубическая структура, T — тетрагональная, Г — гексагональная.

\*\* Значение при давлении водорода 100 МПа.

\*\*\* Температура сублимации.

композиций и технологических возможностей выявили перспективность развития карбонитридного топлива UC–ZrC–ZrN для ядерно-энергетических двигательных установок (ЯЭДУ) и ЯРД [3,4]. Использование монокарбида урана в качестве ядерного топлива затруднено из-за его недостаточно высокой температуры плавления и сильной реакционной способности по отношению ко многим материалам и рабочим средам.

Неметаллические атомы растворённого элемента располагаются в междуузлиях кристаллической решётки соединений с характерным смешанным ионно-ковалентным типом межатомной связи. Эти особенности межатомного взаимодействия обусловливают высокую термодинамическую стабильность и жаростойкость, а низкая дислокационная подвижность приводит к высокой твёрдости и хрупкости соединений. Температура плавления, упругие свойства и коэффициенты термического расширения являются структурно нечувствительными характеристиками и, по существу, зависят от энергии сцепления — энергии, необходимой для разделения кристаллической решётки на отдельные ионы. А механические и теплофизические свойства существенным образом определяются структурными характеристиками и стехиометрией материала [8, 10].

#### 4.2. Прочность материалов при различных способах нагружения

При конструировании элементов ЯРД из карбидных материалов и оценке их работоспособности весьма важно учитывать закономерность изменения прочности и разрушения при вариации напряжённого состояния тела. Прочность в хрупком состоянии при переходе от растяжения к изгибу или сжатию повышается в соотношении 1:2:(8–10), что определяется особенностями кинетики распространения трещин [10].

При растяжении по достижении критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{lc}$  трещина лавинно распространяется, вплоть до полного раз渲ала тела. При сжатии трещина, также зародившаяся при  $K_{lc}$ , способна равновесно распространяться по криволинейной траектории, ориентированной по на-

правлению оси сжатия, только при непрерывном повышении нагрузки. Переход в закритическую стадию разрушения тела становится возможным при взаимодействии равновесно подросших трещин при напряжениях, более чем в 10 раз превышающих напряжение старта трещины. Для разрушения сжатого тела необходим общий запас энергии, во много раз превышающий уровень запасённой упругой энергии тела, разрушающегося в равномерном поле растяжения [11].

Вследствие большой структурной дефектности топливных и конструкционных материалов ЯРД, приготовляемых преимущественно методами порошковой металлургии, уровень прочности является недетерминированным и рассеивается в пределах 15–25 % от среднего значения. Различие способов нагружения, изменяя уровень прочности, практически не влияет на коэффициент вариации. Расчётные оценки изменения прочности монофазных и гетерофазных карбидных материалов при переходе от растяжения к кручению и изгибу, выполненные по модели Вейбулла, удовлетворительно совпадают с данными эксперимента. При определении надёжности работы механически нагруженных конструкций ЯРД это обстоятельство обязательно учитывается.

#### 4.3. Температурные зависимости прочности и ползучести

Поскольку рабочая температура материалов на различных участках ТВС ЯРД в переходных и стационарных режимах изменяется в широких пределах, от 300 до 3000 К, необходимо знать изменения механических и физических свойств. Для конструкционных и топливных материалов типа фаз внедрения первостепенное значение имеет задача предотвращения хрупкого разрушения. Это обусловлено высокой хрупкостью материалов данного класса в широком диапазоне температур, видов и скоростей нагружения при относительно низком уровне прочности при растяжении (по сравнению, например, с металлическими материалами). Для тугоплавких карбидных соединений с высоким уровнем сопротивления движению дислокаций характерна немонотонная зависимость прочности [10, 11]. Сначала прочность с увеличе-

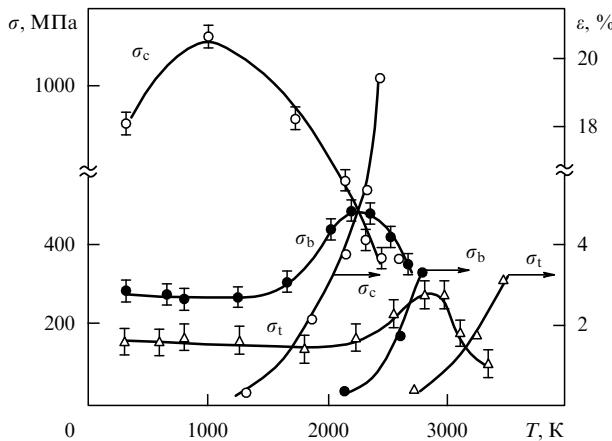


Рис. 6. Температурная зависимость прочности ZrC и относительной деформации  $\varepsilon$  при нагружении растяжением  $\sigma_t$ , изгибом  $\sigma_b$ , сжатием  $\sigma_c$  при скорости деформирования  $v = 5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  [10].

нием температуры практически не изменяется и лишь с развитием микропластичности прочность возрастает, достигая максимума (рис. 6) при температуре хрупко-пластического (brittle-ductile) перехода  $T_{\text{b-d}}$ , вследствие термоактивируемой релаксации локальных пиковых напряжений вблизи концентраторов — структурных дефектов, имеющихся в материале. У сложных твёрдых растворов ZrC + UC, ZrC + NbC + UC  $T_{\text{b-d}}$  выше, чем у монофазного ZrC.

При дальнейшем повышении температуры,  $T > T_{\text{b-d}}$ , вызывающем развитие микропластичности у керамики, так же как и у металлов, происходит монотонное снижение прочности. Наличие неметаллических ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C$ ,  $Si$ ) или металлических примесей (Fe, Co, Ni), вследствие образования фаз и легкоплавких эвтектик, может изменить транскристаллический характер разрушения на интеркристаллитный, а также изменить вид кривых температурной зависимости прочности. Температура хрупко-пластического перехода керамики, в отличие от  $T_{\text{b-d}}$  металлов, заметно сильнее (на несколько сотен градусов) изменяется при вариации вида напряжённого состояния и скорости деформирования. Увеличение скорости деформирования ZrC при растяжении от  $10^{-3}$  до  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$  повышает  $T_{\text{b-d}}$  от  $0,6 T_m$  до  $0,8 T_m$ . При ударных нагрузлениях со скоростями, превышающими скорости релаксации микро- и макронапряжений прочность остаётся практически на уровне её значений при комнатной температуре. Подобное наблюдается также для оксидных материалов и малопластичных металлов Si, Ge с сильно выраженным ковалентными связями.

При длительном нагружении прочность, по сравнению с таковой при кратковременном нагружении, уменьшается. Время до момента разрушения  $\tau$  и скорость установившейся ползучести  $\dot{\varepsilon}'$  связаны с приложенным напряжением  $\sigma$  и температурой следующими зависимостями [12]:

$$\tau = B\sigma^m \exp \frac{U}{RT},$$

$$\dot{\varepsilon}' = A\sigma^n \exp \left( -\frac{Q}{RT} \right),$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $m$  — постоянные,  $Q$  и  $U$  — энергии активации процессов ползучести и длительного разрушения. Для

карбидных материалов, испытываемых в температурном интервале 2500–3000 К, энергии активации  $Q$  и  $U$  и показатели степени напряжений практически совпадают. Зависимость длительной прочности от температуры при заданной временной базе хорошо описывается уравнением Ито – Шишокина [12]

$$\sigma_t = C \exp(-\alpha T),$$

где  $C$  и  $\alpha$  — постоянные.

#### 4.4. Влияние структурных параметров на термопрочность

Существенное влияние на свойства материалов оказывают структурные параметры (поры, металлические и газовые примеси), количество которых в сильной степени определяется выбранными технологическими параметрами изготовления. Твэлы, опорные решётки, гильзы ТВС изготавливались на основе плотных карбидных и карбидографитовых материалов, а обоймы теплоизоляционного пакета (ТИП) — из высокопористых карбидографитовых композиций и пирографита. Наличие пор в материале, естественно ослабляя живое сечение тела, ведёт к спаду прочности, описываемому, например, эмпирическим соотношением вида

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-BP),$$

где  $\sigma_0$  — прочность беспористого тела,  $B$  — коэффициент, зависящий от размера и конфигурации пор [10]. Микроструктурные дефекты: поры, границы зёрен и микротрещины, расположенные между зёрнами или фазовыми составляющими, влияют на трещиностойкость материалов, приготовляемых методами порошковой металлургии. Для карбидных монофазных материалов  $K_{lc}$  не превышает 3 МПа  $\text{м}^{1/2}$ . Изменение  $K_{lc}$  с температурой, как правило, немонотонно: сначала при повышении температуры  $K_{lc}$  уменьшается или остаётся неизменным и лишь с развитием пластичности начинает возрастать. Сложное влияние на эффективную поверхность оказывает окружающая среда.

Термопрочность, важнейшая характеристика для работоспособности конструктивных элементов ТВС, определяется комплексом физико-механических характеристик [9, 11], обозначаемых как

$$R = \frac{\sigma_t(1-\mu)}{\alpha_t E}, \quad R' = \lambda R,$$

где  $\sigma_t$  — прочность,  $E$  — модуль Юнга,  $\alpha_t$  — коэффициент линейного расширения,  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Чем выше теплопроводность материала  $\lambda$ , тем больший тепловой поток способно выдержать тело без разрушения. Следует отметить, что для выбора материалов, используемых в конструкциях в качестве теплоизоляторов, оценка по критериям на основе  $R'$ , лишена смысла. В этом случае необходимо применить критерий, использующий  $R$ , так как при равных теплопроводностях двух материалов лучшим окажется тот, который способен выдержать больший температурный перепад.

Важным этапом поисков более термопрочных материалов для ТВС явились технологические разработки

**Таблица 2.** Термопрочность  $R$  изделий из различных карбидных материалов в упруго-хрупком состоянии\* ( $T = 600 - 1200$  К) [11]

| Изделие  | Материал                                    | $\alpha \times 10^6$ , град $^{-1}$ | $E \times 10^{-3}$ , МПа | $\sigma_b$ , МПа | $\lambda$ , Вт м $^{-1}$ град | $R$ , град | $W$ , % |
|--|---|-------------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------|------------|---------|
| Обоймы,<br>$D_{out} = 52$ мм,<br>толщина стенки<br>$\delta = 2,2$ мм | Карбоволокнит<br>ZrC, пористость $p = 75\%$ | 5,1                                 | 17                       | 8                | 0,5                           | 95,0       | 24,0    |
|  | Пористый<br>ZrC, $p = 75\%$                 | 6,3                                 | 16                       | 11               | 3,0                           | 68,0       | 21,0    |
|  | Пористый<br>ZrC + NbC, $p = 65\%$           | 5,5                                 | 30                       | 22               | 3,0                           | 72,0       | 15,0    |
| Гильзы,<br>$D_{out} = 48$ мм,<br>$\delta = 0,75$ мм                  | ZrC, $p = 5\%$                              | 5,1                                 | 350                      | 250              | 20,0                          | 50,0       | 22,0    |
|  | NbC, $p = 12\%$                             | 4,8                                 | 310                      | 260              | 35,0                          | 43,0       | 14,0    |
|  | ZrC + NbC, $p = 10\%$                       | 4,9                                 | 350                      | 330              | 25,0                          | 56,0       | 19,0    |
|  | "Слоёнка" ZrC                               | 5,0 **                              | 3,0 **                   | 6,0              | 1,0 **                        | > 400,0    |         |

\* Данные по другим свойствам относятся к температуре  $T = 600$  К.

\*\* Для анизотропной "слоёнки"  $E$  и  $\alpha$  измерены в направлении, параллельном плоскости осаждения, а  $\lambda$  измерена в направлении, перпендикулярном этой плоскости.

композитов на основе карбидной матрицы с введёнными низкомодульными углеродными включениями. Введение сажи в карбиды ZrC и NbC повышает термопрочность  $\Delta T_{av}$  до двух раз за счёт опережающего уменьшения модуля упругости  $E$  по сравнению с уменьшением прочности  $\sigma$ , и вследствие этого — снижения предельной деформации тела  $\sigma/E$  [10, 11].

Значительные усилия были затрачены на разработку различных вариантов технологии изготовления теплоизоляционных материалов и обоснования выбора оптимальной комплектации ТИП. Увеличение пористости от 5 до 70 % в образцах из карбида циркония снижает теплопроводность на порядок. Причём, в зависимости от структуры, а именно фактора строения каркаса, замкнутости или разомкнутости пор, уровень электросопротивления и теплопроводности при равной плотности композиции может быть существенно различным. Так, например, пористые карбидно-волокнистые материалы, полученные термодиффузионным насыщением карбонизованного войлока цирконием (КВЦ), при равной плотности оказываются менее теплопроводными и прочными, чем порокарбиды, полученные смешением порошков карбида циркония и наполнителя — бромистого калия — с последующим спеканием в вакууме для удаления наполнителя. Образование особой структуры гетерофазной композиции ("слоёнки") из чередующихся слоёв карбидографитов ZrC + Pq, осаждённых из газовой фазы с пористостью 30 %, позволяет получить более прочный материал, по теплоизоляционным свойствам не уступающий высокопористым карбидам.

Всё разнообразие свойств для изделий ТВС из плотных и высокопористых материалов иллюстрируется табл. 2.

Коэффициенты вариации прочности высокопористых карбидов и карбоволокнитов, несмотря на значительную пористость этих теплозащитных материалов (до 75 %), сравнимы с аналогичными значениями для плотных карбидов, хотя средние значения прочности, вследствие ослабления сечения тела порами, снижены почти на порядок. Лишь для карбидов с включениями графита коэффициент вариации ( $W$ ) возрастает по сравнению с таковым для однофазных карбидов почти вдвое, до 45–50 %. Такое увеличение  $W$ , очевидно, можно связать с возросшей степенью дефектности композиций, вслед-

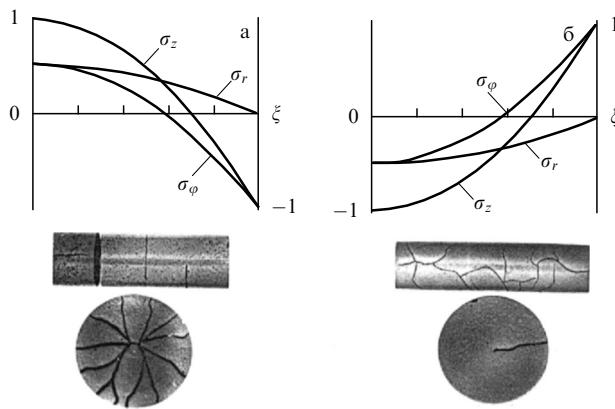
ствие образования в карбидной матрице вокруг графитовых включений концентрических трещин. Установленная возможность повышения термопрочности за счёт введения в карбидную матрицу углеродных включений реализована в твэлах ЯРД на основе твёрдых растворов ZrC + UC и ZrC + NbC + UC.

#### 4.5. Критерии разрушения термонагруженных тел

Температурные напряжения, неизбежно возникающие при эксплуатации ЯРД, являются одним из главных факторов, способных привести к разрушению керамических узлов ТВС [13]. В ряде случаев они определяют конструктивные особенности и выходные параметры разрабатываемой установки, а также возможность применения того или иного материала. Поэтому при оценке прочности необходимо выявление уровня этих напряжений и степени их опасности для отдельных элементов и всей конструкции в целом.

Обычно при расчёте прочности используют допускаемые нормальные или касательные напряжения, безопасные для прочности изделия, или предельное число циклов нагружения. Для вновь создаваемого класса машин или аппаратов необходимо выявлять особенности разрушения материала, из которого выполнены их несущие элементы, и устанавливать определённые критерии прочности и её предельные значения. Для оценки прочности металлического корпуса ТВС используются известные в реакторостроении отраслевые методики расчёта прочности, радиальной и продольной устойчивости цилиндрических оболочек. Для оценки несущей способности керамических твэлов со сложной формой поперечного сечения или деталей опорно-соплового блока (ОСБ) использованы разработанные в НИИТВЭЛ критерии прочности для тел, работающих в неоднородном поле термических напряжений.

Результаты исследований, начатых в институте ещё в 1973 г. [11], показали, что использование способов теплового воздействия в различных сочетаниях и варьирование формы и размеров тела изменяют термопрочность и характер разрушения тела. На основе представлений силовой механики разрушения был введен новый, учитывающий форму распределения напряжений, критерияльный параметр  $N$  [9, 11], определяющий условия полного или частичного разрушения тел при изменении



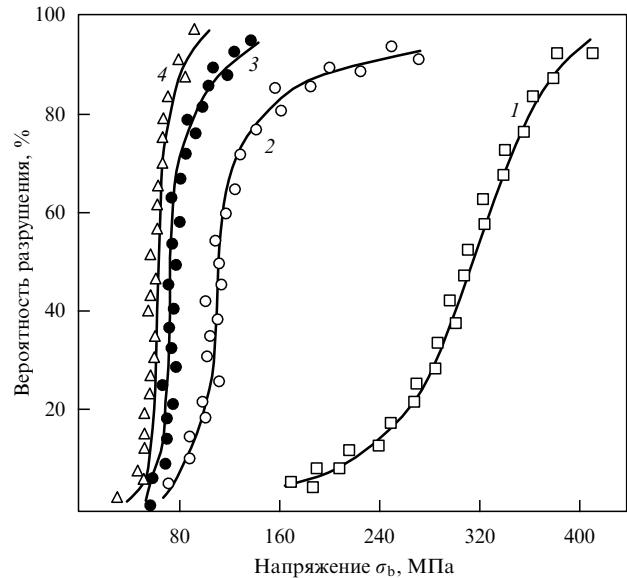
**Рис. 7.** Изменение характера разрушения образцов из ZrC от полной фрагментации при нагреве поверхности тела (а) до частичного разрушения за счёт поверхностных трещин при охлаждении (б), вследствие изменения напряжённого состояния тела [11]. (Три компоненты напряжений для цилиндрического образца и отсутствие осевой составляющей  $\sigma_z$  в тонком диске.)

этого напряжённого состояния. Значения параметра  $N$  для разных видов термоагружения рассчитывались численными методами.

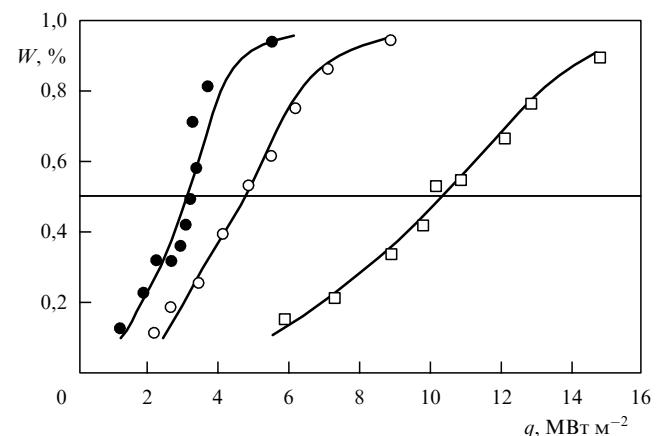
При нагреве боковой поверхности тела из упруго-хрупкого материала трещина, появившаяся в центральной растягивающей зоне, при достижении критической интенсивности напряжений  $K_{1c}$  и значения  $N \geq N_{cr}$  приводит к полной фрагментации тела (рис. 7а). В то время как при охлаждении боковой поверхности нагретого тела (при условиях, подобных условиям работы твэла в соответствии со схемой, приведённой на рис. 7б) при значениях параметра неоднородности  $N < N_{cr}$  неравновесное распространение трещины, начавшееся в зоне растяжения при значении  $K_{1c}$ , сменяется её равновесным возрастанием. Полная фрагментация тела становится возможной при напряжениях (после их существенного перераспределения), в 8–10 раз превышающих напряжение старта трещины [11]. Проникновение трещины внутрь тела в этом случае в среднем составляет  $0,55R$ , что согласуется с расчётными оценками.

Испытания методом нестационарного охлаждения в воде нагретых твэлов разных составов показали [10] частичную повреждаемость твэлов за счёт появления поверхностных трещин при напряжениях, только на 15–20% превышающих напряжение прочности на растяжение  $\sigma_t$ , соответствующей тепловому потоку  $q_s \approx 2,5 \text{ МВт м}^{-2}$ . Несущая способность твэла, оцениваемая по спаду прочности, при появлении поверхностных трещин уменьшается почти в три раза и при повторных циклических нагружениях остаётся практически неизменной. Следует указать, что с увеличением  $q_s$  число трещин на единицу поверхности возрастает, а глубина их проникновения в тело и, следовательно, прочность на изгиб не изменяются (рис. 8).

Испытание другим методом — пропусканием через твэлы электрического тока с обдувом поверхности газовым потоком — при более высоких температурах поверхности (1500–1900 К), чем при охлаждении в воде, подтверждает наступление повреждения твэлов из ZrC + UC при  $q_s = 2,5–3,0 \text{ МВт м}^{-2}$  (рис. 9). Введение в карбидную матрицу углеродных включений повышает уровень начала повреждаемости почти в два раза, до



**Рис. 8.** Повреждаемость после нестационарного охлаждения в холодной воде нагретых твэлов ( $Zr_{0,97}U_{0,03}C_{0,96}$ ) до  $T = 570$  К, оцениваемая по спаду прочности на изгиб от исходного состояния (1), после первого нагружения (2), после 10 (3) и 50 циклов (4) [11].



**Рис. 9.** Вероятность повреждения  $W$  (%) поверхностными трещинами твэлов составов ZrC + UC (●) и ZrC + UC + C (○) и их полной фрагментации (□) при изменении уровня удельного теплового потока  $q$  при температурах  $\approx 1500$  К [4].

$q_s \approx 5 \text{ МВт м}^{-2}$ . Полная фрагментация твэлов из ZrC + UC, ZrC + NbC + UC происходит при средних значениях  $q_s = 10–12 \text{ МВт м}^{-2}$ .

#### 4.6. Возможные способы повышения прочностных характеристик керамики

Выбор технологии и параметров изготовления материалов для повышения свойств керамики, обладающей ограниченной пластичностью в широком температурном интервале, должен производиться с учётом эксплуатационных параметров её работы. Для материалов первых секций ТВС, работающих в диапазоне температур хрупкого разрушения, необходимо стремиться повысить, наряду с прочностью, вязкость разрушения, что должно связываться, в первую очередь, с уменьшением дефектности материалов и созданием такого структурного состояния, которое увеличивает затраты энергии на

разрушение. В этой области температур для повышения термопрочности используются, в основном, следующие приёмы: устранение структурных дефектов путём оптимизации режимов уплотнения и спекания [14], залививание дефектов и термомеханическое программируемое упрочнение, модификация напряжённого состояния поверхности (например, закалкой) или посредством введения углеродных включений [11].

В температурной области, где становится возможной макропластическая деформация, для оптимизации кратковременных и длительных механических термопрочностных характеристик можно использовать почти все методы, пригодные для металлических материалов. При этом в области температур, где процесс деформации контролируется движением дислокаций, применяются методы, позволяющие уменьшить дислокационную подвижность путём субструктурного упрочнения, твёрдо-растворного легирования, приводящего к образованию более прочной химической связи в соединениях, и легирования с формированием вторых фаз. В условиях нагружения, где доминирующим механизмом деформации является зерногранничное проскальзывание при высокотемпературной ползучести, эффективным методом повышения прочности становится рекристаллизация, позволяющая существенным образом уменьшить протяжённость границ за счёт увеличения размера зерна. Используя методы упрочнения, необходимо учитывать, что структурные изменения, направленные на улучшение механических характеристик при высоких температурах, не должны ухудшать механические свойства при температурах  $T < T_{\text{б-д}}$ .

Оптимальный выбор параметров традиционного изотермического спекания образцов ZrC в различных средах (водороде, аргоне и вакууме) позволяет достичь высокой плотности (не ниже 95 %) и прочности на изгиб на уровне 550 МПа при температурах спекания 2500–2700 К [14]. Дальнейшее повышение температуры спекания, до 2900–3100 К, не приводит к возрастанию плотности и прочности, что связывается с влиянием газов в закрытых порах.

## 5. Радиационная стойкость элементов ТВС

Важнейшей характеристикой радиационной стойкости тепловыделяющих элементов является их размерная стабильность. Распухание в реакторе твэлов из композиций на основе твёрдых растворов карбидов урана, циркония, ниобия изменяется в зависимости от изменения плотности деления и температуры облучения немонотонным образом [15]. Увеличение дозы облучения топливных композиций UC + ZrC + NbC, UC + ZrC до  $2 \times 10^{19}$  делений на  $1 \text{ см}^3$  при температуре облучения  $T = 1100$  К ведёт к распуханию до 5 % и возрастанию электросопротивления до 80 % за счёт скоплений радиационных дефектов (в основном вакансационного характера).

Повышение температуры облучения тех же топливных композиций от 500 до 2100 К при постоянной плотности деления  $2 \times 10^{20}$  делений на  $1 \text{ см}^3$  увеличивает распухание до 6 %, но уменьшает значения периода решётки и электросопротивления до их исходных, в отсутствие облучения, значений.

Различная концентрация радиационных дефектов по радиусу твэла (большая на поверхности и меньшая в

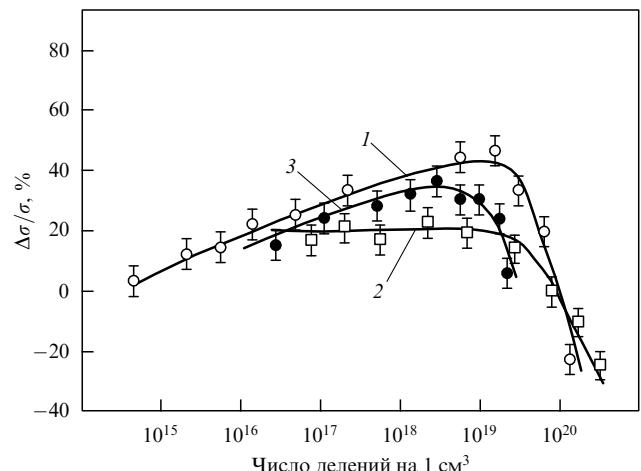


Рис. 10. Зависимость изменения прочности твэлов от плотности делений при температурах 800–1000 К: 1 — UC–ZrC–NbC, 2 — UC–ZrC, 3 — UC–ZrC + 5 % C [15].

более нагретом центре) вследствие аннигиляции точечных дефектов приводит к параболическому характеру изменения периода решётки. Появление за счёт этого сжимающих напряжений в поверхностных слоях [16] ведёт к повышению прочности и термопрочности. Твэлы UC–ZrC, UC–ZrC–NbC, облучённые потоком  $J = 10^{14}–10^{15}$  нейтронов на  $1 \text{ см}^2$  за 1 с при выгорании  $B = 10^{16}–10^{18}$  делений на  $1 \text{ см}^3$  и  $T < 0,4T_m$  повышают прочность на 30–50 %, а термопрочность на 70–80 %. При этом величина приращения прочности с повышением плотности делений  $> 10^{19}$  делений на  $1 \text{ см}^3$  уменьшается (рис. 10) в результате образования вакансационных и газовых пор, а также некоторой аморфизации материала.

Изохронные отжиги облучённых твэлов при  $T = 1500$  К устраниют неоднородность распухания и остаточные напряжения, возвращая прочность на исходный уровень, существовавший до облучения. Тогда как те же дозы облучения у конструкционных карбидов вызывают лишь слабые изменения модуля упругости и прочности при заметном возрастании периода решётки и электросопротивления.

Для многих исследованных марок графитов (за исключением изотропного графита МПГ-6 на основе непрокалённого кокса) при высоких температурах облучения, 1400–1700 К, в исследуемом интервале потоков нейтронов (до  $2,75 \times 10^{25} \text{ м}^{-2}$ ) наблюдается усадка образцов как в параллельном, так и в перпендикулярном относительно оси формования направлениях вырезки. Уменьшение температуры облучения до 1200–1500 К приводит к снижению скорости усадки и анизотропии изменения геометрических размеров. В то же время уровень относительного изменения удельного электросопротивления для всех графитов уменьшается, а уровень относительного изменения модуля упругости повышается. Такое поведение графитовых материалов может объясняться значительным повреждением микроскопической структуры, появлением пор и трещин, что является признаком "вторичного распухания".

Радиационные изменения в материале замедлителя — гидриде циркония — при работе ЯРД в двигательном режиме (1000 с) крайне незначительны. При работе в энергетическом режиме после облучения в реакторе

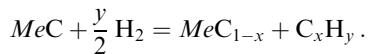
интегральным потоком нейтронов порядка  $10^{21} \text{ см}^{-2}$  возможно распухание гидрида до 1,5 %. Температурная зависимость распухания гидрида циркония немонотонна. Минимум распухания наблюдается при  $T = 550$  К и максимум — при  $T = 800$  К. После 3000 ч облучения потоком быстрых нейтронов величиной  $3 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 855$  К электросопротивление изменяется на 7 %. Теплопроводность  $\text{ZrH}_{1.8}$  после облучения потоком быстрых нейтронов  $3.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 320$  К уменьшается от 31 до 18 Вт  $\text{мK}^{-1}$ .

В целом, результаты радиационных исследований позволяют высказать оптимистический прогноз сохранения работоспособности материалов ТВС ЯРД в двигательном и энергетическом режимах.

## 6. Коррозия материалов в рабочей среде

Важным фактором, определяющим условия эксплуатации ТВС, является коррозионная стойкость материалов в газовой среде водорода с добавками метана [17].

Взаимодействие карбидов с водородом при высоких температурах сопровождается структурными изменениями, образованием углеводородов и уменьшением стехиометрии карбида по реакции



Характер взаимодействия систем  $\text{UC}-\text{ZrC}$ ,  $\text{UC}-\text{NbC}$ ,  $\text{UC}-\text{ZrC}-\text{NbC}$  с водородом подобен. Различаются лишь степени обезуглероживания поверхности, величины градиентов концентрации углерода по сечению образца и температуры начала рекристаллизации. Это указывает на единый для всех исследованных систем механизм взаимодействия материалов с водородом. На поверхности образцов идёт реакция углерода с водородом с образованием  $\text{CH}_4$  или  $\text{C}_2\text{H}_2$  и испарение металлических атомов, а в объёме образца — диффузия углерода от центра к поверхности и рекристаллизация. Расчёт взаимодействия для рассматриваемой схемы процесса сводится к решению нестационарных диффузионных задач с граничными условиями, моделирующими маскообмен с рабочим телом при наличии гетерогенных химических реакций. Общие скорости уноса для двойного и тройного твёрдого раствора  $\text{ZrC}-\text{UC}$  и  $\text{ZrC}-\text{NbC}-\text{UC}$  в водородо-метановых средах с 0,656 объёмных %  $\text{CH}_4$  при  $T = 3150$  К примерно одинаковы —  $0,94 \times 10^{-6} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Высокие температуры эксперимента приводят к изменению не только химического состава материала, но и плотности карбидов и к увеличению размеров зерна. Появление градиента концентрации углерода по сечению образца при температурах до 2500 К за 1000 с приводит к образованию сжимающих напряжений до 500 МПа и к повышению прочности вследствие изменения параметра решётки.

Взаимодействие карбидов с водородом при температуре 3100 К за 1000 с обуславливает не только неоднородную концентрацию углерода, но и изменение структуры, уменьшение плотности и спад прочности до 50 % (рис. 11). Результаты модельных испытаний хорошо согласуются с данными испытания ТВС в реакторе ИВГ-1.

Кроме химического воздействия при обтекании элемента потоком высокоскоростного рабочего тела возможно также силовое эрозионное воздействие потока на

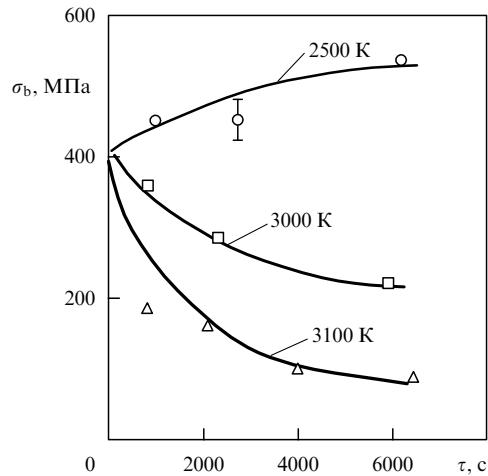


Рис. 11. Изменение прочности на изгиб образцов из карбида циркония после выдержки в водороде при различных температурах [17].

поверхность, в результате которого отдельные, наиболее слабо связанные, частицы карбидов уносятся потоком.

На основе зависимостей скоростей уноса углеродной составляющей из карбидов предложен ещё один способ защиты, заключающийся в добавлении к водороду такого количества углеводородов, при котором средняя концентрация их в потоке становится равной их равновесной концентрации над поверхностью. Тогда унос углерода будет равен нулю. Однако равновесный состав водорода не может быть достигнут по всей длине ТВС, а только в отдельных его точках. В других местах будут происходить либо унос, либо осаждение углерода на омыываемую поверхность. Поэтому способ защитных добавок целесообразно рассматривать как дополнительный к основному способу защиты с помощью покрытий.

Что касается коррозионной стойкости гильз из низкоплотного пирографита (ПГН) (плотность  $1,35 - 1,6 \text{ г см}^{-3}$ ) в составе ТИП, то их вес в протоке водорода при  $T = 1570$  К за 6000 с уменьшается примерно на 3–8 %, а прочность снижается на 30 %. Потеря массы гильз из пирографита марки ПГВ с ярко выраженной анизотропией свойств (плотность от 1,2 до  $2,25 \text{ г см}^{-3}$ ) в водороде при  $T = 2300$  К за 4000 с, доходит до 45 %. Взаимодействие незащищённого покрытием пиролитического графита с водородом, например, при  $T = 2100$  К, вследствие малой пористости является в два раза менее интенсивным, чем для обычных прессованных марок графитов. Поэтому для теплоизоляции ТВС оптимальным является использование пиролитического графита.

## 7. Реакторные испытания ТВС

Интегральная оценка работоспособности различных модификаций ТВС ЯРД при совместном воздействии всех отдельно рассмотренных факторов: радиации, химического и термомеханического воздействия — проводилась на натурных изделиях в реакторе ИВГ-1 [15].

ТВС располагается в активной зоне этого реактора (см. рис. 2) в составе группы из 30 технологических каналов ТК [4] и в центральном канале КЭТ (канал экспериментальный технологический) или КЭП (канал экспериментальный прямоточный), в котором, благодаря окружающему канал бериллиевому вытеснителю,

обеспечивается увеличенный примерно в два раза, по сравнению со средним по сечению, поток тепловых нейтронов. Это позволяет испытывать твэлы при форсированных нагрузках. Тракты нагрева и охлаждения обеспечиваются независимым прямоточным течением газа. Для поддержания постоянства расхода рабочего тела при увеличении гидравлического сопротивления тракта предусматривается применение кольцевых расходомерных сопел.

Определение длительности безотказной работы ТВС и степени её "живучести" при возникновении дефектов в узлах проведено в испытаниях 34 КЭТ, двух шестиканальных модулей (КЭП) с фрагментами замедлителя, огневого днища и торцевого отражателя. Торцевой отражатель выполнен из отдельных бериллиевых блоков с продольными отверстиями для прохода охладителя. Всего в 1975–1988 гг. было проведено 12 пусков ИВГ-1 с суммарной наработкой до 4000 с при максимальной температуре водорода в отдельных пусках до 3100 К и удельным тепловыделением в твэлах до 30 МВт л<sup>-1</sup> [4].

Результаты испытаний в реакторе подтвердили образование поверхностных трещин и снижение несущей способности при тех же тепловых нагрузках  $q_s = 2,5$ –3,0 МВт м<sup>-2</sup>, как и при внеакторных испытаниях. Однако появились и существенные различия, заключающиеся в полной фрагментации твэлов, особенно на входных (низкотемпературных) секциях ТВС при тепловых нагрузках  $q_s = 6$ –8 МВт м<sup>-2</sup>, более низких по сравнению с таковыми в модельных электротермических испытаниях. Разрушенные твэлы в первых двух входных НС после шести пусков представляли собой малые фрагменты стержней, остающиеся на своих местах. Такой характер разрушения обусловлен бандажными напряжениями. Для ограничения процесса возникновения дефектности вследствие бандажных напряжений была предложена методика подбора соответствующих посадок секций в канале. Тем не менее бандажные напряжения возникают в переходных процессах запуска и остановки реактора в результате различного радиального термического расширения материалов НС и ТИП. Лабораторными экспериментами показано, что для долома термически нагруженных твэлов достаточно приложить растягивающие напряжения, составляющие всего 10 % от уровня максимальных термических напряжений [10]. В остальных четырёх высокотемпературных секциях твэлы, как правило, остаются целыми, благодаря появлению микропластичности при температуре, превышающей 1800 К.

В результате разрушения твэлов и загромождения проходного сечения выпадающими обломками гидравлическое сопротивление НС увеличивается [15]. Причём с увеличением количества пусков реактора количество поломок твэлов возрастает, и после шести пусков на двигательных режимах количество сломанных твэлов в первых двух нагревных секциях превысило 80 %. Для устранения поломок твэлов в первых двух НС в дальнейшем предлагалось принять меры для дополнительного упрочнения твэлов (до двух раз) термическими и радиационными способами [15].

При повышенных температурах твэлы в НС претерпевают пластическую деформацию. Под действием силовых нагрузок, возникающих при протекании газа, и осевых сил действия пружины, поджимающей НС, становится возможной закрутка твэлов нагревной сек-

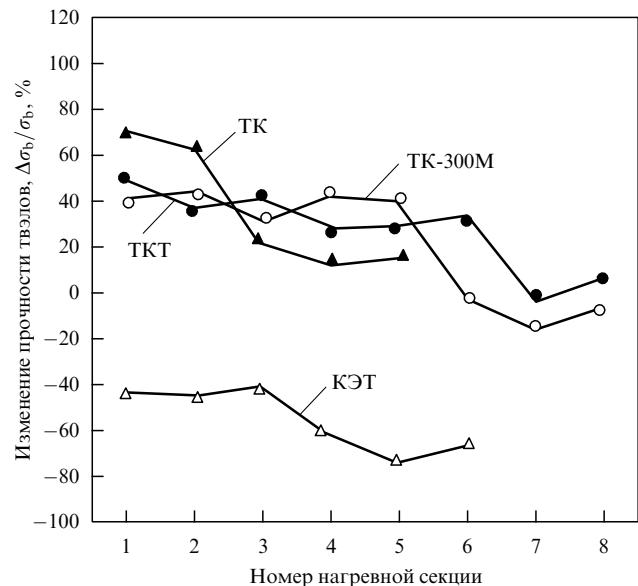


Рис. 12. Характер изменения прочности карбидных и карбидографитовых твэлов с содержанием урана от 6 до 18 массовых % по длине ТВС канала КЭТ трёх различных модификаций проточных каналов: ТК, ТКТ и ТК-300М, после испытаний на двигательном режиме ЯРД [15].

ции вокруг своей оси и потеря устойчивости столба НС. Величина угла закрутки, измеренная по относительному смещению торцов одной секции, иногда превышает 100°, что существенно изменяет характер течения газа. Пластическая деформация пятой НС, собранной из твэлов состава UC–ZrC–NbC с более высокой температурой плавления оказывается меньшей, чем твэлов четвёртой НС из карбидографитовых материалов UC–ZrC + C.

При испытаниях твэлов в рядовых технологических каналах (ТК) на режимах, заметно сниженных по сравнению с таковыми в канале КЭТ, твэлы полностью сохраняют функциональную работоспособность. Возникает относительно небольшое число поломок при малом увеличении гидравлического сопротивления трактов охлаждения ТВС. Упрочнение твэлов достигает 40–100 % в низкотемпературных НС, а их незначительное разупрочнение происходит в высокотемпературных НС (рис. 12).

Ресурсные испытания в ТК показали достаточно высокую работоспособность твэлов, во многом благодаря обнаруженному эффекту упрочнения топливных карбидов под действием облучения. Эффект упрочнения устойчиво возникает в твэлах по достижении выгорания порядка  $3 \times 10^{16}$  делений на 1 см<sup>3</sup>. При увеличении длительности испытаний упрочнение у твэлов снижается, но при выгорании  $\approx 1,5 \times 10^{19}$  делений на 1 см<sup>3</sup>, достигнутом к концу ресурсных испытаний, оно ещё сохраняется на уровне 20 %.

Повышенная повреждаемость твэлов каналов КЭТ, вызывающая увеличение коэффициента гидравлического сопротивления в трактах тепловыделяющих сборок, приводит к перегреву и возможному прогару элементов теплоизоляции и внутренних корпусов каналов. Первоначальной негативной ситуации является недостаточная термопрочность карбидографитовых твэлов, эксплуатирующихся в условиях значительных термических напряжений  $\sigma_T$  (перепад  $\Delta T$ , например, в первой НС составляет

$\approx 300$  К). Исследование дефектности ТИП каналов КЭТ, прошедших реакторные испытания, показывает ухудшение их состояния с повышением времени наработки. Интенсивность взаимодействия увеличивается с возрастанием температуры рабочего тела, т.е. в направлении движения газа. Унос материала из пирографитовых обойм, расположенных в области четвёртой нагревной секции, доходит до 25–50 % от исходной массы. Возникающие повреждения в ТИП оказываются различными при одинаковых временах наработки, что обусловлено большими разбросами исходных свойств теплоизоляции. Эти обстоятельства будут учтены в дальнейших разработках ЯРД путём выбора оптимальных составов материалов и конструкции ТИП. Проведённые предреакторные термомеханические приёмы обработки конструкционных и топливных композиций показали возможность улучшения прочностных и термопрочностных характеристик материалов ТВС [10].

В ряде случаев после реакторных испытаний наблюдалось разрушение опорных решёток (ОР) в результате отделения обкладок с прилегающими рядами стержней. Хотя несущая способность ОР при этом сохранялась, факт разрушения свидетельствовал о неконтролируемом снижении надёжности работы ТВС. Для уменьшения возникающих напряжений в ОР, а следовательно разрушающих перепадов, предложено заменить массивные обкладки ОР тонкостенной разрезной обоймой с полуцилиндрическими заполнителями. Модельные испытания подтвердили повышение термопрочности предлагаемой конструкции в три раза при той же характеристике сопротивления срезу, что и у решёток с обкладками.

Работоспособность замедлителя из гидрида циркония подтверждена неизменностью его химического состава после длительных выдержек при повышенных температурах.

Главным итогом советской программы ЯРД явилась технологическая и экспериментальная доказанность возможности создания керамической активной зоны реактора ЯРД для нагрева водорода при максимальных значениях параметров, достигнутых в реакторных испытаниях различных ТВС:

- температура нагрева водорода ( $H_2$ ) до 3100 К;
- удельная мощность в твэлах до 35 МВт л<sup>-1</sup>;
- длительность испытаний 4000 с;
- число включений реактора 12;
- максимальные скорости нагрева/охлаждения твэла до 400/1000 К с<sup>-1</sup>.

Эти результаты значительно превосходят результаты, полученные в США на графитовых активных зонах ЯРД. Факт создания реактора-двигателя породил ряд новых проектов и идей.

Тем не менее в начале 1990-х годов в связи с прекращением финансирования дальнейшие разработки ЯРД были приостановлены. Начатые почти полвека назад разработки были обусловлены важными в то время политическими задачами и приоритетами в ведении холодной войны между СССР и США.

## 8. Перспективы реакторов ядерно-ракетного двигателя

Реакторы ЯРД различной мощности и ядерные энергетические двигательные установки (ЯДЭУ) на основе апробированных технологий почти безальтернативны

при освоении дальнего космоса беспилотными зондами и пилотируемыми межпланетными установками [18]. Проблема приостановки разработок ЯРД была временной, поскольку человечество не могло позволить себе огромные затраты на масштабные космические исследования. Вероятнее всего, программа ЯРД в дальнейшем должна приобрести характер международного сотрудничества, подобно программам создания международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР, ITER), мощных ускорителей и т.п. Программа будет иметь глобальный характер с учётом правовых, экологических и прочих аспектов. Поскольку программа связана с использованием делящихся материалов самых высоких оружейных кондиций, она должна будет находиться под международным контролем. Реакторы ЯРД различного назначения будут основываться на различной геометрии твэлов с составами топливных композиций, способными обеспечить надлежащую работоспособность. Для обеспечения выполнения задач космического полёта реактор ЯРД должен обладать высокой надёжностью с вероятностью безотказной работы не менее 0,99.

Ещё в начале 1980-х годов начали интенсивно прорабатываться различные варианты многорежимной установки [4], способной вырабатывать, помимо реактивной тяги, электроэнергию для обеспечения жизнедеятельности космического летательного аппарата. Реактор ЯДЭУ должен был работать не только в основном — двигательном — режиме, но и в двух энергетических режимах: малой мощности в течение значительного времени (несколько лет) и большой мощности в течение примерно половины назначенного временного ресурса двигательного режима. Режим большой мощности не создаёт никаких особых трудностей испытаний, поскольку по всем параметрам он значительно меньше нагружает реактор, чем основной режим ИВГ-1. В режиме малой мощности теплоноситель омывает ТВС только снаружи её корпуса, а тепло от твэлов передаётся на корпус излучением через теплоизоляцию. Этот режим существенно отличается от основного, когда осуществляется значительное выгорание топлива (не ниже 3–5 % от начального) и возможность изменения химического состава за счёт неконгруэнтного испарения материалов. Поэтому работоспособность деталей ТВС и твэлов в этих условиях требует дополнительных исследований.

Ясно, что перспективы развития и практического создания активных зон ядерных космических энергоустановок будут, прежде всего, связаны с совершенствованием конструкции и технологии нагревных секций из топливных композиций с плотностью тепловыделения 40 МВт л<sup>-1</sup> при повышенной температуре ( $> 3200$  К) в двигательном режиме и обеспечением удержания продуктов деления в твэлах в течение нескольких лет при температурах 2000 К в среде глубокого вакуума или в водородсодержащих рабочих телах при давлениях 0,1–0,2 атм.

В 2009 г. Комиссия при Президенте России по вопросам модернизации и технологическому развитию экономики РФ рекомендовала возвратиться к проблеме создания космического корабля с ядерным ракетным двигателем. В 2010 г. правительство РФ выделило начальные средства на разработку эскизного проекта ядерной энергоустановки мегаваттного класса с возможным началом создания модуля в 2018 г.

## Список литературы

1. Пономарев-Степной Н Н "История развития ЯРД в СССР", в сб. Третья отраслевая конф. "Ядерная энергетика в космосе", Подольск, 1993, с. 3
2. Демянко Ю Г и др. Ядерные ракетные двигатели (М.: Норма-Информ, 2001)
3. Федик И И (Ред.) НИИ НПО "ЛУЧ". Дела и люди (Подольск: НИИ НПО "ЛУЧ", 2004)
4. Дараган И Д и др. "Тепловыделяющие сборки активных зон космических ядерных энерговодительных установок", в кн. Машиностроение. Энциклопедия Т. IV-25 Машиностроение ядерной техники Кн. 2 (Под ред. Е О Адамова) (М.: Машиностроение, 2003)
5. Дегтярева Л С, Паршин Н Я, Попов Е Б "Исследование геометрических и гидравлических характеристик в нагревных секциях ТВС ЯРД", в сб. Сборник трудов (М.: Цниатоминформ, 2003) с. 17
6. Королев Л А и др. Исследование эффективности работы теплозащитных материалов и пакетов на их основе применительно к реактору ЯРД (Подольск: НИИ НПО "ЛУЧ", 1978)
7. Денискин В П, Наливаев В И, Олейников П П "Вопросы метрологического обеспечения стендовой обработки ЯРД", в сб. Пятая международ. конф. "Ядерная энергетика в космосе", Подольск, 1999, с. 131
8. Андриевский Р А, Уманский Я С Фазы внедрения (М.: Наука, 1977)
9. Lanin A, Fedik I Thermal Stress Resistance of Materials (Berlin: Springer, 2008)
10. Ланин А Г Прочность и термопрочность конструкционной керамики (М.: МИФИ, 1998)
11. Ланин А Г, Федик И И Термопрочность материалов (Подольск: НИИ НПО "ЛУЧ", 2005)
12. Зубарев П В Жаропрочность фаз внедрения (М.: Металлургия, 1985)
13. Федик И И, Колесов В С, Михайлов В Н Температурные поля и термонапряжения в ядерных реакторах (М.: Энергоатомиздат, 1985) с. 279
14. Бульчев В П, Андриевский Р А, Нежевенко Л Б "Спекание карбида циркония" Порошковая металлургия (4) 38 (1977)
15. Дерявко И И и др. "Реакторная отработка стержневых карбидных тзвэлов ЯРД и ЯДЭУ", в сб. Пятая международ. конф. "Ядерная энергетика в космосе", Подольск, 1999, с. 539
16. Дерявко И И и др. "Рентгенографическое исследование остаточных макронапряжений в безоболочных стержневых карбидных тзвэлах" Вестн. Национального ядерного центра Республики Казахстан. Ядерная физика и радиационное материаловедение (4(8)) (2001)
17. Кривко-Краско С В и др. Расчетно-теоретическое обоснование работоспособности ТВС реакторов ЯРД (Подольск: НИИ НПО "Луч", 1993)
18. Михайлов В Н и др. "Перспективы использования ядерной энергии в космосе в будущем веке", в сб. Международ. конф. "Ядерная энергетика в космосе — 2005", Москва—Подольск, 2005 (М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2005) с. 11

## Selecting and using materials for a nuclear rocket engine reactor

A.G. Lanin, I.I. Fedik

"Luch" Research and Production Association,  
ul. Zheleznodorozhnaya 24, 142100 Podol'sk, Moscow region, Russian Federation  
Tel. (7-495) 798-03 18, (7-4967) 69-92 58  
E-mail: lanin05@mail.ru

This paper provides a historical account of how the nuclear rocket engine reactor was created and discusses the problem of selecting materials for a gas environment at a temperature of up to 3100 K and energy release of 30 MW per liter.

PACS numbers: 01.65.+g, 07.87.+v, 81.05.Je

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103f.0319

Bibliography — 18 references

Received 7 July 2010, revised 14 January 2011

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **181** (3) 319–334 (2011)

Physics – Uspekhi **54** (3) (2011)