



Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов

А. Г. Самойлов, В. С. Волков

На основании иностранных докладов, представленных на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958 г.), охарактеризованы конструкции тепловыделяющих элементов (ТВЭ) и приведены основные данные о них для ряда реакторов. Рассмотрены вопросы о выборе горючего и конструкционных материалов, а также технологии изготовления ТВЭ ядерных реакторов различных типов.

Конструкции тепловыделяющих элементов

Тепловыделяющие элементы выполняют в виде стержня, пластины или трубки (кольцевой ТВЭ).

Стержневые ТВЭ представляют собой сердечник из делящегося материала, заключенный в герметичную оболочку. В реакторах с большим удельным энерговыделением ТВЭ имеют небольшой диаметр (чтобы избежать чрезмерных температурных перепадов по радиусу) и обычно собираются по несколько штук в сборки. Дистанционирование осуществляется путем использования оболочек с прямыми или спиральными ребрами, навивания на ТВЭ по спирали проволочек, прикрепляемых к оболочке точечной сваркой, или приваривания через определенные интервалы дистанционирующих втулочек.

Так, ТВЭ реактора EBR-II (США) дистанционируются при помощи спиральных ребер из проволоки (1782)¹. Тепловыделяющие сборки канадского реактора NPD-2 запроектированы в виде пучка из 7 стержней, каждый из которых, за исключением центрального, обвит по спирали двумя проволочками из циркалоя-2 (с шагом 49,5 см в направлениях, различных для смежных стержней), служащими для дистанционирования и перемешивания теплоносителя (209). Дистанционирование в ТВЭ американского реактора EBR-I (третья загрузка) осуществляет-

ся посредством трех проволочек из циркалоя-2 диаметром 1,17 мм, приваренных вдоль каждого стержня под углом 120° относительно друг друга (1845). В тепловыделяющей сборке реактора атомной электростанции «Янки» (США) для дистанционирования используются втулочки высотой 19 мм, установленные между тепловыделяющими стержнями с интервалом 350 мм (1038).

Пластинчатые ТВЭ обычно собираются по несколько штук параллельно друг другу в сборки путем пайки или приварки к боковым нетепловыделяющим пластинам. Таким образом решается вопрос крепления и дистанционирования пластин ТВЭ. Подобные сборки используются как в энергетических, так и в экспериментальных и исследовательских реакторах.

Для зоны воспроизводства шиппинг-портского реактора PWR (вторая загрузка) разработаны пластинчатые ТВЭ. Размеры пластины 60×286×3,26 мм; в каждой содержится по 15 прямоугольных таблеток из UO_2 . Таблетки разделены перегородками толщиной 2 мм. Оболочка и перегородки выполнены из циркалоя-2 (2380).

Кольцевые ТВЭ выполняются в виде пучка трубок небольших диаметров или в виде концентрических труб сравнительно больших диаметров. Например, тепловыделяющая сборка бельгийского реактора BR-2 состоит из шести коаксиальных тепловыделяющих труб диаметром 33—76 мм (1679).

Во многих ТВЭ для обеспечения хорошего теплового контакта между тепловыделяю-

¹ В угловых скобках указаны номера докладов, представленных на Конференцию.

щим сердечником и оболочкой в процессе производства создается диффузионное сцепление. Для уменьшения зазора между сердечником и оболочкой применяются различные приемы обжаривания или этот зазор заполняется хорошим проводником тепла. Так, в ТВЭ реактора EBR-II зазор между горючим и оболочкой заполнен натрием (1782). В ТВЭ реактора «Энрико Ферми» (США) создается диффузионное сцепление между горючим и оболочкой путем совместной выпрессовки горючего с оболочкой (792, 2427).

В газовых реакторах для улучшения теплоотдачи от ТВЭ к охладителю широко используется оребрение оболочки. В таких реакторах для оболочек в большинстве случаев применяются сплавы на основе магния, имеющие хороший коэффициент теплопроводности, поэтому увеличение охлаждаемой поверхности за счет оребрения весьма эффективно. Но при слишком крутом и близком шаге оребрения коэффициент теплоотдачи снижается вследствие уменьшения скорости газа в узких щелях и увеличения его температуры. Между тем крутые спиральные и круглые ребра значительно улучшают теплоотдачу за счет перемешивания газа вследствие возникновения вихрей, когда поток газа проходит перпендикулярно к ним. Поэтому широко используется двойное оребрение ТВЭ, заключающееся в том, что спиральные ребра пересекаются более высокими прямыми ребрами, чем достигается хорошее перемешивание газа и увеличение поверхности теплоотдачи. С двойным оребрением выполняются ТВЭ английских атомных электростанций в Хантерстоне, Беркли, Бредуэлле (48, 74, 263, 264).

В ФРГ для высокотемпературного газового реактора разработан проект ТВЭ, представляющий собой шар из графита диаметром 5—6 см, внутренняя полость которого заполнена делящимся веществом в виде карбида урана или воспроизводящим веществом в виде карбида тория (1005).

С целью снижения стоимости атомной энергии проектируются ТВЭ с высокой степенью выгорания большим удельным энерговыделением и повышенными рабочими температурами. Среднее выгорание металлического горючего достигает 3500 Мет.дн/т, а керамического—до 10 000 Мет.дн/т.

Удельные тепловые потоки допускаются от $1 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^6$ ккал/м³·ч.

Основные данные о ТВЭ ряда ядерных реакторов представлены в таблице (см. стр. 267—276).

Ядерное горючее

Когда температура горючего не превышает ~ 400 — 500°C , в реакторах с газовым охлаждением используется металлический уран, подвергнутый специальной термообработке для увеличения стабильности в условиях облучения. При более высоких температурах, когда форма и объем обычного урана претерпевают значительные изменения вследствие радиационного повреждения и образования внутренних пор в результате выделения газообразных продуктов деления и низкого сопротивления ползучести (так называемого свеллинга) применяются сплавы урана, керамическое и керметовое горючее. Так, в проекте немецкого высокотемпературного реактора предлагается использовать в качестве горючего карбид урана, обладающий высокой температурой плавления и достаточно удовлетворительной теплопроводностью, которая может быть повышена путем смешивания карбида урана с графитом (1005, 1054). Для английского экспериментального высокотемпературного газового реактора AGR запроектированы ТВЭ в виде стержней из UO_2 в бериллиевой оболочке (312).

В реакторах с водяным, жидкометаллическим и органическим теплоносителями в качестве горючего широко применяется UO_2 вследствие ее отличной стабильности при облучении, высокой температуры плавления, хорошей коррозионной стойкости и совместимости со многими конструкционными материалами. Двуокись урана используется или в виде спрессованных и спеченных таблеток, или в виде порошка, диспергированного в матрице из неделящегося материала. Горючее в виде спеченных таблеток UO_2 предполагается применить в американских реакторах «Янки» и Дрезденском (1038, 2372), в реакторе с натриевым охлаждением и графитовым замедлителем SGR (608), а также в бельгийском кипящем реакторе на 125 Мет (1801). Пластинчатые ТВЭ с UO_2 , диспергированной в матрице из нержавеющей стали, используются в реакторе APPR

(США) (1925). Состав сердечника (в об. %): UO_2 —19,04, B_4C —0,5, нержавеющей стали—82,4. Пластины с UO_2 в матрице из нержавеющей стали используются также в реакторе с органическим замедлителем OMRE (США) (421). В исследовательском реакторе «Argonaut» (США) применяются пластины из U_3O_8 , диспергированной в матрице из алюминия (1019).

Для водяных и жидкометаллических реакторов также широко используются сплавы урана с молибденом, цирконием, алюминием, хромом, ниобием, никелем, повышающими стабильность урана при облучении, и сплавы сравнительно небольших количеств урана с различными элементами. Так, для реактора «Энрико Ферми» в качестве горючего выбран сплав урана с 10 вес. % молибдена (792), для третьей загрузки реактора EBR-I—сплав урана с 2 вес. % циркония (791, 1845), для реактора в Даунри (Англия)—сплав урана с 0,1 вес. % ($1/2$ ат. %) хрома (44). В реакторе EBWR (США) используется сплав урана с 5 вес. % циркония и 1,5 вес. % ниобия (1038). Для запальных ТВЭ реактора PWR выбран сплав 6,7 вес. % урана с циркалоем-2 (787); для реактора ALPR (США)—сплав 17,6 вес. % урана с алюминиево-никелевым сплавом (455).

Новым в разработке горючих материалов является использование урана, содержащего продукты деления, остающиеся после переработки облученного урана. Такой сплав (так называемый фишиум), обладающий высокой радиационной стабильностью, выбран для экспериментального реактора-размножителя EBR-II. Состав сплава фишиум (в вес. %): урана—95; циркония—0,2; молибдена—2,5; рутения—1,5; рубидия—0,3; палладия—0,5 (1782). Предпринимаются реальные меры для использования плутония и тория в качестве горючего материала.

В канадском реакторе NRX часть урановых ТВЭ была заменена ТВЭ из сплава плутоний—алюминий. Первоначально было изготовлено три ТВЭ—каждый из 11 блокчей (сплав плутоний—алюминий) диаметром 25,4 мм. Блокчей имели алюминиевую оболочку толщиной 4,55 мм и были соединены в виде стержня длиной 3000 мм, который в свою очередь заключался в алюминиевую трубку толщиной 2 мм. Содержание плутония в блокчей было различным и возрастало от 0,5 вес. %

в концевых блокчей, до 20 вес. % в центральном блокчей. Эти элементы успешно простояли в реакторе до выгорания 55—60 вес. % плутония или до 1,5 вес. % всех атомов горючего сплава. Затем были изготовлены 23 элемента подобной конструкции, но они имели лишь по три центральных блокчей из сплава плутоний—алюминий с 20 вес. % плутония. Концевые блокчей были изготовлены из урана. Эти элементы проработали в реакторе различное время, часть из них вышла из строя.

Подобные элементы были заменены элементами другой конструкции, представляющей собой 12 блокчей диаметром 34,5 мм из сплава плутоний—алюминий (3,7 вес. % плутония). Блокчей были заключены в трубу из алюминия с толщиной стенки 2 мм. Одиннадцать таких элементов уже простояли в реакторе от 4 до 15 месяцев, работать они будут до тех пор, пока не выгорит 60—70 вес. % плутония. Предполагают, что ежегодно в реактор будут добавлять ТВЭ из сплава плутоний—алюминий с общим содержанием плутония до 3 кг (191).

В США для изучения проблем ядерной физики, технологии плутониевого топлива и регенерации отработанных ТВЭ строится экспериментальный реактор PRTR с регенерацией плутония. Для него разработаны ТВЭ из сплава плутоний—алюминий (1,7 вес. % плутония) в виде стержней диаметром 12,7 мм и длиной 2,1 м, заключенных в оболочку из циркалоя-2. Обсуждается возможность применения в качестве горючего смеси UO_2 с PuO_2 , а также смеси PuO_2 или UO_2 — PuO_2 с разбавителем из Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , BeO и ThO (447, 1776).

В Ханфорде разрабатывается комплект тепловыделяющих сборок для реактора MTR. Каждая сборка состоит из 16 спаянных тепловыделяющих пластин. В качестве горючего используется сплав плутоний—алюминий (14 вес. % плутония) (1776).

Достоинства тория заключаются в том, что он имеет высокую температуру плавления (1700°C) и не имеет фазовых превращений до температуры 1400°C , недостаток—в необходимости добавления обогащенного делящегося вещества.

В американском реакторе BORAX используется горючее из смеси UO_2 — ThO_2 (2379). Для реактора SRE разработана тех-

нология изготовления ТВЭ из сплава уран—торий (7,6 вес. % урана) (785). Для американской атомной электростанции фирмы «Консолидейтед Эдисон» в качестве горючего избрана гомогенная смесь UO_2 — ThO_2 . Торий является воспроизводящим материалом, а ThO_2 выбрана благодаря хорошей радиационной стабильности, высокой коррозионной стойкости в горячей воде и совместимости с UO_2 и нержавеющей сталью оболочки (1885).

Новая топливно-замедляющая композиция разработана для американского исследовательского реактора TRIGA. Она представляет ураноциркониевый гидрид, содержащий до 8 вес. % урана, обогащенного до 20 вес. %. В этой смеси на каждый атом циркония приходится приблизительно один атом водорода. Смесь имеет плотность, примерно равную плотности металлического циркония (1017).

Конструкционные материалы

Для изготовления оболочек ТВЭ широко используются циркалой-2 и различные нержавеющие стали. Большое количество работающих реакторов с водяным охлаждением имеет ТВЭ с оболочкой из циркалой, во многих запроектированных реакторах для оболочек ТВЭ предполагается использовать циркалой-2 и нержавеющую сталь. В реакторах с газовым охлаждением для изготовления оболочек ТВЭ в большинстве случаев используются сплавы на основе магния. В США считается более экономичным использование для газовых реакторов обогащенного топлива. В этом случае можно использовать конструкционные материалы, которые хотя и обладают значительным поперечным сечением захвата нейтронов, все же допускают высокие температуры. Так, для газового реактора GCR-2 в качестве оболочки ТВЭ выбрана нержавеющая сталь (450).

Во многих проектах реакторов предусмотрено использовать новые конструкционные материалы. Так, для реактора в Даунри разработан ТВЭ кольцевого типа, имеющий с внешней стороны покрытие в виде трубки из ниобия, а с внутренней—трубки из ванадия. Он предназначен для работы при температурах 300—600° С. Изготовление оболочки из двух материалов с разной температурой плавления имеет целью обеспечить безопас-

ность реактора: в случае аварийного нарушения системы охлаждения и перегрева ТВЭ плавится внутренняя ванадиевая трубка. Расплавленное горючее вытекает из активной зоны по ниобиевой трубке, не смешиваясь с горючим других ТВЭ, чем предотвращается возможность создания критической массы (44).

Продолжаются поиски новых материалов для оболочек ТВЭ газовых реакторов, допускающих более высокие рабочие температуры. В Англии разработан проект высокотемпературного газового реактора с ТВЭ, имеющими оболочку из бериллия. Максимальная температура оболочки такого ТВЭ составляет 600° С (312). В Швеции также разработан проект ТВЭ с бериллиевой оболочкой, допускающего температуру на поверхности до 533° С (2419). Будут проведены работы по созданию ТВЭ с бериллиевой оболочкой для атомной электростанции в Хантерстоне (1523).

Для английского экспериментального газового высокотемпературного реактора мощностью 10 Мвт запроектированы ТВЭ, использующие графитовые оболочки. Температура оболочки из графита допускается до 800—900° С, средняя температура горючего—до 1000° С. Температура газа на выходе из реактора достигает 750° С, что позволяет использовать стандартную турбину.

Применение графита для оболочек ТВЭ заманчиво благодаря тому, что графит обладает высоким сопротивлением воздействию облучения, хорошей теплопроводностью и способностью выдерживать очень высокие температуры и большие термические градиенты. Недостатком такой оболочки является возможное диффундирование через нее газообразных продуктов деления (314).

Проект ТВЭ с графитовой оболочкой, предназначенного для высокотемпературного газового реактора, разработан также в ФРГ. Предполагается, что максимальная температура на поверхности такой оболочки достигнет 1100° С (1005, 1054).

В ряде докладов рассматривается вопрос о возможности использования для оболочек ТВЭ сплавов на основе алюминия. Алюминий имеет несколько достоинств: дешев, легкодоступен, хорошо обрабатывается и имеет низкое сечение захвата нейтронов. Однако

он имеет два существенных недостатка, ограничивающих его применение в реакторах: низкий предел прочности и большую ползучесть при повышенных температурах и малую коррозионную стойкость. Хотя алюминий использовался много лет в низкотемпературных водяных реакторах, вопрос о его применении в энергетических высокотемпературных реакторах серьезно обсуждается лишь теперь, когда разработан ряд сплавов на основе алюминия, имеющих высокое коррозионное сопротивление и повышенную прочность.

Для кипящего реактора ALPR разработаны ТВЭ с оболочкой из сплава алюминий—никель, допускающие на поверхности температуру до 230° С (4 5, 1430). Имеются указания, что в ряде реакторов, для оболочек ТВЭ которых запроектированы цирконий, последний, возможно, удастся заменить алюминиевыми сплавами.

Чтобы увеличить срок работы реактора, в ТВЭ некоторых аппаратов добавляют выгорающие присадки, которые вначале подавляют часть реактивности, а затем, по мере своего выгорания, увеличивают ее. В качестве выгорающих присадок чаще всего используется бор в чистом виде или в виде различных соединений. Он может вводиться либо в горючее, либо в оболочку, либо в какие-то специальные детали теплоуделяющей сборки. В сердечник теплоуделяющей пластины реактора APPR введено 0,14 вес. % карбида бора (1925). В каждый ТВЭ реактора для инженерных испытаний ETR-A (США) введено по 1,5 г естественного бора (414). В реакторе ALPR бор вводится не в сами ТВЭ, а в специальную ленту, прикрепленную точечной сваркой к боковой пластине теплоуделяющей сборки (455). Для реактора TRIGA (США) предполагается использовать в качестве выгорающей добавки самарий, включенный в виде окиси в алюминиевую шайбу, вставляемую внутрь ТВЭ (1017).

Технология изготовления теплоуделяющих элементов

Методы изготовления ТВЭ, описанные в докладах Второй Женевской конференции, в основном известны. Необходимо отметить ряд новых и наиболее интересных технологических приемов.

Французскими учеными представлены интересные материалы о вакуумной сварке различных металлов¹. Нагрев свариваемых металлов производится пучком быстрых электронов, способы создания и фокусировки которого хорошо известны. При сварке мелких деталей пучок может быть сжат так, что площадь его поперечного сечения достигнет лишь небольших долей квадратного миллиметра, что обеспечит точность, которую нельзя получить при дуговой сварке.

При сварке больших металлических деталей (площадь мишени 6—8 мм²) мощность достигает 50 квт. Сварка в вакууме исключает возможность окисления или других загрязнений. Достигнуты хорошие результаты при сварке таких металлов, как вольфрам, молибден, тантал, цирконий, бериллий, уран. Электронная сварка была применена при изготовлении ТВЭ для французского реактора EL-3, которые состоят из уранового стержня со спиральной канавкой, заключенного в алюминиевую оболочку, которая обжимается на нем гидростатически. Циркониевый бак для гомогенного реактора «Прозерпина» (Франция) был изготовлен также с применением вакуумной электронной сварки².

При изготовлении пластинчатых элементов зоны воспроизводства реактора PWR был использован метод эвтектико-диффузионной сварки деталей из циркалоя. На поверхности этих деталей наносится тонкий слой чистого металла, образующего с цирконием эвтектику. Детали нагреваются до температуры плавления слоя. Пленка расплавленного эвтектического сплава выдерживается при этой температуре до тех пор, пока эвтектика не продиффундирует в толщину металла и не исчезнет легкоплавкий эвтектический слой. В качестве связующих элементов можно использовать никель, медь и железо, для которых температуры плавления эвтектики с цирконием равны соответственно 961, 885 и 934° С и значительно ниже температуры плавления циркония.

¹ Vacuum welding by electron beam. Commissariat à l'énergie atomique, Département de métallurgie et de chimie appliqué. ONU, France, Exposition de Genève, September 1958.

² Vacuum welding by electron beam. Commissariat à l'énergie atomique, Département de métallurgie et de chimie appliqué. ONU, France, Exposition de Genève, September 1958.

(1750° С). Растворимость этих элементов в β -цирконии в твердом состоянии (1,9; 3,8 и 5,5 вес.%) обеспечивает достаточную диффузию в процессе сварки. Хотя никель и железо имеются в составе циркалоя и использование их не вносит в сплав другие элементы, применяла съемдь вследствие более низкой температурой плавления эвтектики. Толщина диффузионного слоя была 0,004—0,005 мм (2380).

Интересен метод получения диффузионной связи между сердечником и оболочкой, а также между различными деталями посредством обжигания газом при температуре связи. Используя этот метод, можно легко создать конструкции сложных форм, требующиеся иногда для реакторов, покрыть оболочкой хрупкие материалы и достигнуть точного контроля размеров изделия. Заключенные в вакуумированную оболочку соединяемые детали с очищенной поверхностью нагреваются в газе при давлении 700 атм до температуры получения диффузионного сцепления. Методом газового обжигания пресованная смесь из титана и бора была покрыта оболочкой из титана, а керметы из урановых сплавов с UO_2 —оболочкой из молибдена и ниобия. Были приготовлены ячеистые (в виде толстых пластин) ТВЭ из UO_2 с покрытием и перегородками из циркалоя.

Диффузионное сцепление получено при давлении 700 атм, температуре 843° С и выдерживании в течение 4 час. Подобным же образом приготовлены стержневые ТВЭ с сердечником из циркониевого сплава с 22 вес.% урана в циркониевой оболочке. Получено покрытие из циркония на уране, электрополированном и плакированном никелем. Наилучшая связь для электрополированного урана с цирконием достигнута при давлении 700 кг/см², выдерживании в течение 6 час и нагреве до 650° С, а для урана, плакированного никелем,— при давлении 700 кг/см², выдерживании в течение 6 час и температуре 650° С или выдерживании в течение 30 мин и температуре 732° С (788).

Представляет интерес метод изготовления ТВЭ путем непрерывного литья или зонной плавки. Элемент состоит из урановой втулки с внутренней трубкой из циркалоя-2, по которой проходит под давлением теплоноситель. Метод основан на том, что циркалой-2 обладает высокой температурой плавления, достаточно прочен при темпе-

ратуре плавления урана и образует очень хорошую металлическую связь с расплавленным ураном. Предварительно отлитые из урана цилиндры надеваются на трубу из циркалоя-2. Сборка помещается в подходящую форму, и, чтобы получить диффузионную связь между делящимся материалом и оболочкой, в вакууме проводится процесс быстрой зонной плавки с минимальной зоной расплавления. Нагрев осуществляется высокочастотным генератором. Возможно применение графитовых промежуточных колец, разделяющих урановые втулки. Кольца дают особые преимущества при работе со сплавами урана: препятствуют ликвации, а во время работы в реакторе воспринимают до некоторой степени распухание горючего. Эти кольца должны иметь отверстия, чтобы расплавленный уран заполнил всю форму.

Зонная плавка приводит к плотному, без дефектов соединению урана с циркалом-2. Взаимное проникание урана и циркалоя-2 создает почти непрерывный переход от зоны с большой концентрацией урана к зоне с большой концентрацией циркалоя-2. При правильном проведении процесса не создается хрупкого промежуточного слоя. Металлическое сцепление с такими свойствами получается, если начальное содержание углерода в уране невелико и не увеличивается в процессе плавки в графитовой форме. В противном случае может образоваться чрезвычайно хрупкий промежуточный слой, который в процессе работы реактора при распухании урана может нарушиться, что приведет к местному перегреву. Защита от карбонизации может быть осуществлена тонкостенной трубкой из циркалоя-2, помещенной между ураном и стенками графитовой формы (240).

Аргентинская делегация представила доклад о производстве ТВЭ для реактора RA-I (подобного реактору «Argonaut»). Изготовление ТВЭ производится путем совместного выдавливания сердечника с оболочкой. Смесь порошков U_3O_8 и алюминия заключается в алюминиевый стаканчик со слегка коническими стенками, закрывается алюминиевыми пробками и выдавливается через щелевую матрицу. Изготовлены пластины с сердечником из 45 вес.% U_3O_8 и 55 вес.% алюминия в алюминиевой оболочке длиной 610 мм, шириной 73 мм и толщиной 2,75 мм (1555).

Основные параметры ТВЭ

№ п/п	Местонахождение реактора, атомная электростанция, его название, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Взрывоопасность горючего; поток о поверхности; выгорание горючего	Охлаждающая среда; температура на входе—температура на выходе; давление
Стержневые ТВЭ						
1	Англия, атомная электростанция в Хантерстоуне (строится) (74, 1523; тепловой, гетерогенный, 435 Мвт	Стержень длиной 63 см с двойным оребрением (крепится в графитовой втулке)	Магний сплав — 454°С	Естественный уран; $\varnothing$ 28,2 мм; 569°С	2,16 Мет/м 3800 Мет·дн/м	CO ₂ ; — 204—391°С; 10,5 кг/см ²
2	Англия, атомная электростанция в Хинкли Пойнте (75); тепловой, гетерогенный, 368 Мвт	Стержень со спиральными ребрами	Магний сплав — 430°С	Естественный уран; термически обработан; $\varnothing$ 28,6 мм —	— —	CO ₂ ; — 179—373°С; 13 кг/см ²
3	Англия, атомная электростанция в Бредуэлле (строится) (263); тепловой, гетерогенный, 531 Мвт	Стержень длиной 91 см с двойным оребрением	Магний сплав — —	Естественный уран; $\varnothing$ 29,4 мм —	Максимальное 3,65 Мет/м 3000 Мет·дн/м	CO ₂ ; — 180—390°С; 10 кг/см ²
4	Англия, атомная электростанция в Беркли (строится) (264); тепловой, гетерогенный, 556 Мвт	Стержень длиной 63 см с двойным оребрением (крепится в графитовой втулке)	Магний сплав — 430°С	Естественный уран; — 550°С	— — 4500 Мет·дн/м	CO ₂ ; — 160—345°С; 8,8 кг/см ²
5	Франция (1134); проекты реакторов G-2, G-3 для производства plutonia и алектровэнергии, 200 Мвт	Стержень длиной 30 см с 16 продольными ребрами	Сплав магния с 0,8% циркония; 1,5 мм; 400°С	Естественный уран; $\varnothing$ 28 и 31 мм; 550°С	Среднее 1,82, максимальное 3,3 Мет/м — —	CO ₂ — 80—305°С (в центральных каналах), 150—354°С (в периферийных каналах) 15 кг/см ²
6	Бельгия (1673); RR-1—экспериментальный реактор, 4 Мвт	Стержень длиной 20,4 см; между оболочкой и горючим слой AISi для предотвращения диффузии	Алюминий — —	Уран; $\varnothing$ 25,4 мм; 250°С	— — —	Воздух — 6—80°С —

№ п/п	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыведение горючего; тепловой поток с поверхности; выгорание горючего	Охлаждающая среда; температура на входе-температура на выходе; давление
7	ФРГ (1830); проект FR-2—исследовательского реактора в Карлсруэ (строится), 12 Мет	Стержень длиной 261 см	Алюминий; 1 мм; 80°С	Уран, часть стержней из тория; $\varnothing$ 16 мм	Максимальный 0,775·10 ⁶ ккал/м ² ·с	D ₂ O; 36—45°С
8	США (792, 1850, 2427); энергетический реактор «Энрико Ферми» на быстрых нейтронах (строится), 300 Мет	Активная зона: стержень длиной 76 см собраны в сборки по 144 штуки, оболочка диффузионно сцеплена с горючим	Цирконий; 0,427 мм; 569°С	Сплав урана с 10 вес. % молибдена, обогащение 27 % U ²³⁵ ; $\varnothing$ 3,76 мм; 713°С	140 Мет/м; средний 1,88·10 ⁶ ккал/м ² ·с; максимальный 3,26·10 ⁶ ккал/м ² ·с; 10 800 Мет·Вт/м	Натрий; 9,8 м/сек; T _{max} =543°С
	Зона воспроизводства: стержень длиной 178 см; между ураном и оболочкой слой натрия толщиной 0,1 мм	Нержавеющая сталь; 0,225 мм	Обоженный уран с 2,75 вес. % молибдена; $\varnothing$ 10,5 мм	Боковой ТВЭ зоны воспроизводства 0,03·10 ⁶ ккал/м ² ·с, верхний и нижний ТВЭ зоны воспроизводства 0,088×10 ⁶ ккал/м ² ·с	4900 Мет·Вт/м	—
9	США (791); проект EBR-I—экспериментального реактора-размножителя на быстрых нейтронах, (третья загрузка)	Активная зона: стержень длиной 21,5 см собраны по 36 штук в касету; оболочка диффузионно сцеплена с горючим	Циркалой-2; 0,5 мм	Сплав высокообогащенного урана с 2 вес. % циркония; $\varnothing$ 9,25 мм	—	Натрий; —
	Зона воспроизводства: стержни собраны в касету по 36 штук	Циркалой-2; 0,5 мм	Сплав естественного урана с 2 вес. % циркония	—	—	—
10	США (1782); EBR-II—экспериментальный энергетический реактор-размножитель на быстрых нейтронах (строится), 62,5 Мет	Активная зона: стержень длиной 36 см; между оболочкой и горючим слой натрия толщиной 0,15 мм	Нержавеющая сталь; 0,228 мм	Сплав урана с продуктами деления, оставшимися после переработки облученного урана (в вес. %): U—85, Zr—0,2, Mo—2,5, Ru—1,5, Rb—0,3, Pd—0,5; $\varnothing$ 3,66 мм	314 Мет/м; максимальный 2,78×10 ⁶ ккал/м ² ·с, средний 1,84×10 ⁶ ккал/м ² ·с	Натрий; 7,95 м/сек; 371—482°С

Продолжение

№ п/п	Местонахождение реактора, интерактивный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение потока с поверхности; выгорание горючего	Охлаждение; скорость; температура на входе-температура на выходе; давление
		Зона воспроизводства: стержни длиной 140 см собраны в сборки по 19 штук; между оболочкой и горючим слой натрия толщиной 0,3 мм	Нержавеющая сталь; 0,455 мм	Обогащенный уран; $\varnothing$ 11 мм	— — —	— — —
11	Англия (312); проект АGR—экспериментального высокотемпературного газового реактора, 100 Мвт	Стержень —	Бериллий 600°С	УO ₂ ; обогащение 1,65% U ²³⁵	Среднее 6,83, максимальное 15,9 Мвт/м	CO ₂ ; 250—500, позднее 325—575°С; 19 кг/см ²
12	Англия (314); проект экспериментального высокотемпературного реактора, 10 Мвт	Шестигранные стержни длиной 185 см собраны в сборки по 7 штук	Графит; 7 мм; $t_{ср}=830^{\circ}\text{C}$	Колечки из смеси карбидов урана, тория и графита; наружный диаметр — 37 мм, внутренний — 23 мм; атомная концентрация горючего; Th: U = 7,4, графит: уран = 2860; 14,2 кг U ²³⁵	— — —	Гелий; 350—750°С; 10 кг/см ²
13	США; проект (450), [Nucl. Engng. July 1958] GCR-2—прототип газового энергетического реактора 687 Мвт	Стержни длиной 100 см, собраны в сборки по 7 штук	Нержавеющая сталь типа 304; 0,51 мм; $t_{max}=649^{\circ}\text{C}$	UO ₂ в виде колец; обогащение 2% $\varnothing$ 19 мм (наружн.), 8,1 мм (внутр.); 1200°С	Средний 0,152·10 ⁶ , максимальный 0,28×10 ⁶ ккал/м ² ·ч; 7350 Мвт·дн/м	Гелий; 238—538°С; 21 кг/см ²
14	Швеция (2419); 3 проекта реакторов для больших электростанций: 1-й реактор с трубами под давлением, замедлитель—D ₂ O, 525 Мвт	а) Стержни длиной 450 см, собраны в сборки по 19 штук, оболочка с оребрением б) стержни длиной 450 см собраны в сборки по 19 штук	Магний; 0,8 мм; 442°С Бериллий; 4,0 мм; 533°С	Сначала—естественный уран, впоследствии—естественная UO ₂ ; $\varnothing$ 10 мм; 525—550°С	Среднее 9,0 Мвт/м; средний 0,175·10 ⁶ , максимальный 0,36×10 ⁶ ккал/м ² ·ч; 3000—6000 Мвт·дн/м	CO ₂ ; 17,6 м/сек; 115—410°С; 102 кг/см ² CO ₂ ; 21 м/сек; 115—500°С; 102 кг/см ²

п/п №	Местонахождение реактора, пилотажный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТЭО, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение горючего; тепловой поток с поверхности; выгорание горючего	Охладитель; окислитель; температура на входе—температура на выходе; давление
	2-й реактор с баком под давлением, замедлитель—D ₂ O, 525 Мет	а) Пучок из 19 стержней длиной 223 см	Нержавеющая сталь (18% Cr, 8% Ni); 0,12 мм; 574°С	Спеченные таблетки из естественной UO ₂ ; Ø 12,6 мм	Среднее 10,3 Мет/т; средний 0,282·10 ⁶ , максимальный 0,745·10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; —	CO ₂ ; 39 м/сек; 208—500°С; 71 кг/см ²
		б) пучок из 19 стержней длиной 223 см; на оболочке каждого стержня 8 ребер высотой 4 мм	Магний; 0,8 мм; 422°С	Металлический уран; Ø 10 мм	Среднее 9,08 Мет/т; средний 0,129·10 ⁶ , максимальный 0,34×10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; ~3000 Мет·дн/т	CO ₂ ; 25 м/сек; 156—400°С; 71 кг/см ²
	3-й реактор в скале, замедлитель—графит, 1000 Мет	Пучок из 4 стержней длиной 640 см; оболочка каждого стержня имеет 12 спиральных ребер высотой 8,7 мм	Магний; 1,0 мм; 440°С	Металлический уран; Ø 14,6 мм; 550—580°С	Среднее 6,8 Мет/т; средний 0,107·10 ⁶ , максимальный 0,284·10 ⁶ ккал/м ³ ·ч —	CO ₂ ; 23 м/сек; 150—400°С; 60 кг/см ²
15	Швеция (135); проект R-3—энергетического реактора; тепловой, гетерогенный (строится) 1-й этап 65 Мет	Пучок из 19 стержней длиной 60 см	Циркало-2; 0,7 мм; 224°С	Таблетки из UO ₂ ; Ø 17 мм —	Среднее 3 Мет/т; максимальный 0,28×10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; 3200 Мет·дн/т	D ₂ O; 3,55 м/сек; 205—220°С; 36 кг/см ²
	2-й этап 125 Мет	То же	Циркало-2; 0,7 мм; 227°С	То же	Среднее 5,75 Мет/т; максимальный 0,54×10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; 4200 Мет·дн/т	D ₂ O; 5,5 м/сек; 205—220°С; 36 кг/см ²
16	Швеция (136); проект «Адам»—энергетического реактора; тепловой, гетерогенный, 75 Мет	Пучок из 19 стержней; оболочка имеют спиральные ребра для диверсионирования	Алюминий; 0,75 мм; 148°С	Таблетки из спеченной UO ₂ ; Ø 13,5 мм —	Среднее 4,7, максимальное 13,6 Мет/т; максимальный 0,39×10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; 2290 Мет·дн/т	D ₂ O — 80—140°С; 17 кг/см ²
	100 Мет	Пучок из 19 стержней —	Алюминий; 0,75 мм; 169°С	То же	Среднее 6,3, максимальное 18,1 Мет/т; максимальный 0,515×10 ⁶ ккал/м ³ ·ч; 2290 Мет·дн/т	D ₂ O — 80—160°С; 17 кг/см ²

Продолжение

№ п/п	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение горючего; поток с поверхности; выгорание горючего	Охладитель; скорость; температура на входе-температура на выходе; давление
17	Канада (208); проект тяжеловодного энергетического реактора, 794 Мет	Пучок из 31 стержня длиной 30,5 см	Циркалой-2; 0,5 мм; 282° С	UO ₂ ; 2200° С	Максимальное 39,7 Мет/т; максимальный 0,9 × 10 ⁶ ккал/м ² ·ч	D ₂ O; — 221—274° С
18	Канада (209); проект NPD-2—атомной электростанции; реактор с трубками под давлением	Стержни длиной 49,5 см, собранные в сборки по 7 штук; для дистанционирования вокруг каждого стержня обернута проволока	Циркалой-2; 0,635 мм	Таблетки из спеченной UO ₂ ; Ø 24,1 мм	— — —	D ₂ O; — 252—277° С; 70 кг/см ²
19	ССША, атомная электростанция в Шиппингпорте (2462, 2380); RWR—реактор с водой под давлением, работает с декабря 1957 г., 60 Мет (алектр.)	Зона воспроизводства: стержни длиной 260 мм, диаметром 10,45 мм, собранные в сборки по 113 штук. Запальные и пластинчатые элементы зоны воспроизводства (вторая загрузка) см. № 29	Циркалой-2; 0,57 мм	Таблетки из UO ₂ ; 9 мм	— — —	H ₂ O; — — —
20	ССША (1038); «Янки»— атомная электростанция (строится), 392 Мет	Стержни собраны в сборки по 305—306 штук	Нержавеющая сталь; 0,534 мм; 343° С	Таблетки из спеченной UO ₂ ; Ø 7,35 мм; 2600° С	— Средний 0,234 × 10 ⁶ , максимальный 1,2·10 ⁶ ккал/м ² ·ч; 7200 Мет·дн/т	H ₂ O; 4,25 м/сек; 260—318° С; 140 кг/см ²
21	Япония (1319); проект ядерного реактора для корабля 180 Мет	Стержни длиной 48,6 см собраны в сборки по 300 штук	Циркалой-2; 0,6 мм	Таблетки из UO ₂ , обогащенные 1,5 вес. % U ²³⁵ ; Ø 9 мм; 1490° С	Среднее 60 мт/см ² ; средний 0,357 × 10 ⁶ ккал/м ² ·ч; 9200 Мет·дн/т	H ₂ O; 4,8 м/сек; 259—281° С; 140 кг/см ²
22	ССША (1885); атомная электростанция фирмы «Консолидейтед Эдисон» (строится), 585 Мет	Стержни длиной 250 см собраны в сборки по 206 штук	Нержавеющая сталь; 0,508 мм	Таблетки из гомогенной смеси UO ₂ и ThO ₂ (19 200 кг ThO ₂ и 1080 кг полностью обогащенной UO ₂); Ø 7 мм	— 18 000 Мет·дн/т	H ₂ O; — 252—270° С

№ п/п	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭЛ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыведение горючего; тепловой поток с поверхности; выгорание горючего	Охладитель; скорость; температура на входе-температура на выходе; давление
23	Бельгия (1801); проект энергетического кипящего реактора с прямым циклом, 241,9 Мет (тепл.) 125 Мет (электр.)	Стержни собраны в сборки по 49 штук	Нержавеющая сталь	UO ₂ , обогащение 2,5%; $\varnothing$ 10 мм	25,5 кет/дм ³ 10 000 Мет·дм/т	H ₂ O — вода на входе 272, пар 285°С; 70 кг/см ²
24	США (2372); проект Дреаденской атомной электростанции (строится), реактор кипящий, 626 Мет	Стержни длиной собраны в сборки по 36 штук	Циркалой-2; 0,76 мм	Таблетки из UO ₂ , обогащение 1,5%; $\varnothing$ 12,5 мм; 2510°С	50 000 кет/м ³ ; средний 0,254·10 ⁴ ; максимальный 0,935·10 ⁴ ккал/м ³ ·ч; 10 000 Мет·дм/т	H ₂ O; принудительная циркуляция 2 м/сек 71,5 кг/см ² ; пар 44,5 об. %
25	Бельгия (416); BR-3—энергетический реактор (поставляется США, ввод в работу предполагается в декабре 1959 г.), 43 Мет	Стержни длиной 142 см и диаметром 8,7 мм собраны в сборки по 110—111 штук	Нержавеющая сталь; 0,53 мм	Таблетки из UO ₂ , высотой 15,2 мм, обогащение в наружной зоне 4,43%, во внутренней 3,29%; $\varnothing$ 7,6 мм	Средний 0,268×10 ⁴ , максимальный 1,25·10 ⁴ ккал/м ³ ·ч	H ₂ O — $t_{вх}=255^{\circ}\text{C}$, $t_{ср}=263^{\circ}\text{C}$; 140 кг/см ²
26	США (608, 785); проект SGR—атомной электростанции, реактор с графитовым замедлителем и натриевым охлаждающим, 254 Мет (тепл.) 75 Мет (электр.)	Стержни собраны в сборки по 19 штук	Нержавеющая сталь; 0,25 мм	UO ₂ , обогащение 3,5%; $\varnothing$ 12,7 мм; 2760°С	Максимальный 0,81·10 ⁴ ккал/м ³ ·ч; среднее 10 000, максимальное 16 000 Мет·дм/т	Натрий — 320—507°С
27	США (1017); проект TRIGA—реактора для исследований и производства изотопов, 0,01 Мет	Стержень длиной 36 см	Алюминий; 0,76 мм	Уран-циркониевый гидрид, содержание урана до 8%, обогащение 20%; $\sim \varnothing$ 36 мм	— — —	H ₂ O — естественная конвекция —

Продолжение

п/п №	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее: диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение горючего; тепловой поток с поверхности; выгорание горючего	Охлаждитель; скорость; температура на входе—температура на выходе; давление
Пластиначатые ТВЭ						
28	Канада (241); NRU—исследовательский реактор большой мощности, 200 Мвт	5 толстых пластин длиной 300 мм из урана, помещенных в круглой трубе	Алюминий, 102° С	Естественный уран; 4,5 и 4,34 мм; 193° С	— Максимальный 1,71·10 ⁶ ккал/м ² ·ч	D ₂ O; 10 м/сек; — 49—75° С
29	США атомная электростанция в Шиппингпорте (2380, 787, 2462); RWR—реактор с водой под давлением. Вторая загрузка зоны воспроизводства будет осуществлена в 1961 г. Мощность увеличится до 100 Мвт (электр.)	Зона воспроизводства: (вторая загрузка): пластины размерами 60,2×286×3,26 мм, содержащие по 15 таблеток из UO ₂ , разделенных перегородками шириной 2 мм	Циркалой-2; 0,63 мм	Прямоугольные таблетки из UO ₂ (размер 6,35×76×2,03 мм); 2,03 мм	— — —	H ₂ O — — —
30	Бразилия (2274); исследовательский реактор погруженного типа, 5 Мвт	Пакет из 19 пластин	Циркалой-2; 0,38 мм	Сплав обогащенного урана с циркалоем-2; содержание урана—6,7 вес. %	— — —	H ₂ O — — —
31	США (455); ALPR—прототип маломощного кипятища энергетического реактора (строится), 3 Мвт	Пакет из 19 пластин, размеры пластины 3,05×96×705 мм	Сплав алюминий—никель, 0,9 мм; 227° С	Сплав алюминий—никель—уран 17,6 вес. % урана; 1,25 мм 232° С	Среднее 17,5 кет/дм ³ ; средний 0,61×10 ⁶ ккал/м ² ·ч	H ₂ O; питательная вода—58° С; пар 216° С; 21 кг/см ²
32	США (414); ETR-A—реактор для испытаний	Пакет из 19 пластин	Алюминий, 138° С	Сплав полностью обогащенного урана с алюминием (1 вес. % урана), добавлен бор	— Максимальный 3,15·10 ⁶ ккал/м ² ·ч	H ₂ O; 10,7 м/сек — 13 кг/см ²

№ п/п	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его название, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение горючего с поверхности; выгорание горючего	Охладитель; скорость; температура на входе-температура на выходе; давление
33	Англия (313); исследовательский реактор «Мерлин» (строится), 5 Мвт	Пакет из 14 пластин; размеры пластины 1,47 × 73 × 635 мм; щель для воды 3,3 мм	— — —	Сплав уран-алюминий (20 вес. % урана, обогащенного до 83%); 0,48 мм	— — —	H ₂ O — 35—45° C
34	США (421); OMRE — экспериментальный реактор с органическим замедлителем и охладителем, 14,8 Мвт	Пакет из 16 пластин; размеры пластины 3,04 × 63,5 × 920 мм; щель для воды 3,4 мм	Нержавеющая сталь; 0,127 мм	Полностью обогащенная UO ₂ в матрице нержавеющей стали; 0,51 мм	Среднее 580, максимальное 1830 кет/кг; средний 0,2-10 ⁴ , максимальный 0,62 × 10 ⁶ ккал/м ³ ·ч	Смесь полифенилов — 260—274° C
35	Англия (1464); исследовательский реактор с легкой водой в качестве замедлителя (строится), 5 Мвт	Пакет из 14 пластин	Алюминий, 103° C	Сплав высокообогащенного урана с алюминием — —	— — —	H ₂ O — 53° C
36	Аргентина (1584, 1555); RA-1 — реактор тепловой, гетерогенный	Пакет из 17 пластин; размеры пластины 2,2 × 72 × 600 мм; щель для воды 6 мм	Алюминий; 0,27 мм	U ₃ O ₈ в алюминиевой матрице (45% U ₃ O ₈), обогащение 20%; 2,2 мм	— — —	H ₂ O — —
Кольцевые ТВЭ						
37	Бельгия (1679); BR-2 — реактор для испытаний, тепловой, гетерогенный (строится), 50 Мвт	Сборка из шести концентрических труб длиной 76,2 см, возрастающих по диаметру от 33 до 76,2 мм; щель для воды 2,97 мм	Алюминий; 0,38 мм	Сплав уран-алюминий (20—25 вес. % урана), обогащение 90%; 0,5 мм	Максимальный 3,28-10 ⁶ ккал/м ³ ·ч — —	H ₂ O — 40,6—47,2° C; 12,6 кг/см ²
38	США (610); проекты энергетических реакторов с тяжеловодным замедлителем и охладителем: 1-й — 435 Мвт	Трубка диаметром 36,4 × 52,4 мм	Циркалой-2 1,52 мм; 300° C	Сплав урана с 2 вес. % циркония; 6,4 мм; 526° C	Среднее 34,4 Мвт/м; максимальный 1,96 × 10 ⁶ ккал/м ² ·ч; 3250 Мвт·дн/м	D ₂ O; 5,4; 3,8 м/сек; 98—111° C —

Продолжение

№ п/п	Местонахождение реактора, тип реактора, его название, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки; толщина; температура на поверхности	Горючее; диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыведение горючего; тепловая нагрузка на поверхность; выгорание горючего	Охлаждающий; скорость; температура на входе; температура на выходе; давление
2-й — 439 Мет	То же	То же	Циркалоид-2; 1,52 мм; 312°С (местное по-верхностное кипение)	Сплав урана с 2 вес. % циркония; 6,4 мм; 550°С	Среднее 38,6 Мет/т; максимальный 2,3 × 10 ⁶ ккал/м ² .ч; 3200 Мет-дн/т	D ₂ O; 14,6; 6,4 м/сек; 95—112°С; 7 кг/см ²
3-й — 479 Мет	То же	То же	Циркалоид-2; 1,52 мм; 317°С (местное по-верхностное кипение)	Сплав урана с 2 вес. % циркония; 6,4 мм; 560°С	Среднее 36,0 Мет/т; максимальный 2,07 × 10 ⁶ ккал/м ² .ч; 4500 Мет-дн/т	D ₂ O; 5,18; 3,62 м/сек; 107—119°С; 7 кг/см ²
4-й — 433 Мет (реактор с трубками под давлением)	То же	То же	Циркалоид-2; 1,52 мм; 320°С	Сплав урана с 2 вес. % циркония; 6,4 мм; 594°С	Среднее 41,5 Мет/т; максимальный 2,4 × 10 ⁶ ккал/м ² .ч; 3500 Мет-дн/т	D ₂ O; 7,5; 4,7 м/сек; 108—123°С; 70 кг/см ²
39	США (447); проект PRTR—экспериментального реактора с регенерацией плутония (строится), тепловой, гетерогенный, с трубками под давлением, 70 Мет	ТВЭ—концентрические трубы; запальные ТВЭ—сборка из 19 стержней диаметром 12,7 мм, длиной—210 мм; возможна конструкция кольцевого типа	Циркалоид-2 — —	Смешанная UO ₂ ; запальные ТВЭ—сплав плутония с алюминием или силумином (1,7 вес. % плутония) — —	Максимальный 1,08·10 ⁶ ккал/м ² .ч —	D ₂ O — 249—277°С; 74 кг/см ²
40	США (423); «Майти Маус»—исследовательский реактор с высоким потоком нейтронов, 250 Мет	Трубка диаметром 8,02×9,55 мм, длиной 91,5 см; трубки собраны в 8 сборок по 455 штук	Магнелиевый сплав; 0,25 мм; 140°С	Высокообогащенный уран в матрице из магния; 0,5 мм —	Максимальный 2,06·10 ⁶ (внутри трубки), 1,64 × 10 ⁶ ккал/м ² .ч; (снаружи трубки) —	D ₂ O; 7,6 м/сек (внутри трубки), 5,8 м/сек (снаружи трубки); 43—66°С; 7 кг/см ²
41	Швейцария (246); проект—прототип тяжеловодного энергетического реактора (фирма «Зульцер»), 300 Мет	Сборка из 8 кольцевых элементов; внутренний диаметр—13 мм; по внутренней полости протекает вода под давлением	Циркалоид-2; 1,5 мм —	Естественный уран; небольшое количество элементов с ураном, обогащенным до 1% — —	— — —	D ₂ O — 190—220°С; 60 кг/см ²

п/п №	Местонахождение реактора, литературный источник; тип реактора, его назначение, тепловая мощность	Тип ТВЭ, его длина	Материал оболочки: толщина; температура на поверхности	Горючее: диаметр или толщина по горючему; максимальная температура	Энерговыделение горючего; тепловой поток с поверхности; выгорание горючего	Охлаждение: скорость; температура на входе-температура на выходе; давление
42	Швейцария (259); проект—прототип реактора с тяжеловодным замедлителем и органическим охладителем, 100 Мет	Трубка диаметром 10×38 мм	Магний; 1,0 мм	Естественный уран; 8 мм; 600°С	Максимальное 353 среднее 140 ат/см^2 максимальный $1,6 \times 10^4$, $0,48 \times 10^4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$	Диффузия; 10 м/сек (внутри трубки), 4,6 м/сек (снаружи трубки); 260—324°С; 20 кг/см ²
	Канада (210); проект энергетического реактора с тяжеловодным замедлителем и органическим охладителем, 150 Мет (электр.)	Две концентрические трубки и один (в центре) стержень длиной 2,05 мм; шель для охладителя 2,03 мм	Алюминий; 0,78 мм; 445°С	Спеченная UO_2	Максимальный $1,22 \cdot 10^4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$; 6000 Мет-дн/т	Смесь полифенилов; 8,6 м/сек; 302—427°С

Заклучение

Разработки ТВЭ ведутся весьма широко для реакторов всех типов, так как до настоящего времени еще не определен наиболее перспективный тип реактора.

Основная тенденция при разработке ТВЭ энергетических реакторов — повышение рабочих параметров. В связи с этим ведутся интенсивные поиски новых жароупорных и коррозионно-стойких при повышенных температурах конструкционных материалов. В области делящихся материалов ведутся поиски композиций горючего, обладающих повышенной радиационной устойчивостью и коррозионной стойкостью. Началось практическое использование плутония и тория.

Наблюдается также тенденция к созданию ТВЭ, допускающих не очень высокие рабочие параметры, но использующих для оболочек легкодоступные и дешевые материалы, например сплавов на основе алюминия.

В процессе производства ТВЭ разработан ряд новых технологических приемов, например вакуумная электронная сварка. В области конструкционного выполнения ТВЭ нет особо оригинальных решений. В основном повторяются уже известные конструкции, среди которых преобладают стержневые ТВЭ.

Поступила в Редакцию 25/XII 1958 г.