

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Перечень сокращений и обозначений | 5 |
| Введение | 8 |
| Раздел 1 | |
| Физические основы ядерной энергетики | 17 |
| 1.1. Общие сведения | 17 |
| 1.2. Ядерные силы | 19 |
| 1.3. Радиоактивность | 21 |
| 1.3.1. Виды радиоактивных превращений | 22 |
| 1.3.2. Закон радиоактивного распада | 23 |
| 1.4. Ядерные реакции. | |
| Основные типы ядерных реакций | 25 |
| 1.4.1. Реакция деления | 27 |
| 1.4.2. Энергия деления | 31 |
| 1.4.3. Нейтронные эффективные сечения | 32 |
| 1.5. Коэффициент размножения | 36 |
| 1.6. Замедление и диффузия нейтронов в активной зоне | 38 |
| 1.6.1. Характеристики замедляющих свойств веществ | 40 |
| 1.7. Параметры нейтронного поля. Уравнение критического реактора | 44 |
| 1.8. Особенности гетерогенного ЯР | 49 |
| Раздел 2 | |
| Конструкции энергетических реакторов и технологические схемы ЯЭУ | 51 |
| 2.1. Классификация ЯР | 51 |
| 2.2. Активная зона | 60 |
| 2.2.1. Ядерное топливо | 61 |
| 2.2.2. Замедлитель | 69 |
| 2.2.3. Теплоноситель | 71 |
| 2.2.4. Поглощающие материалы и органы управления и защиты | 72 |
| 2.3. Основные технологические схемы ЯЭУ | 77 |
| 2.4. Использование ЯЭУ для целей теплофикации | 84 |
| Раздел 3 | |
| Отвод теплоты в реакторе | 89 |

Раздел 4**Кинетика реактора**

и влияние температуры на его свойства 103

4.1. Кинетика размножения нейтронов 103

4.1.1. Кинетика ЯР

без учета запаздывающих нейтронов 103

4.1.2. Кинетика ЯР

с учетом запаздывающих нейтронов 107

4.1.3. Кинетика реактора и ядерная безопасность 112

4.2. Температурные эффекты реактивности 117

Раздел 5**Активная зона в процессе эксплуатации**

и управление реактором 128

5.1. Выгорание ядерного топлива 129

5.2. Воспроизводство ядерного топлива 134

5.3. Шлакование ядерного топлива 138

5.4. Отравление ЯР 142

5.4.1. Понятие об отравлении реактора ксеноном 142

5.4.2. Стационарное отравление Xe 143

5.4.3. Нестационарное отравление

реактора ксеноном.

Йодная яма 146

5.5. Управление ЯР 149

Раздел 6**Основы безопасности ЯЭУ** 161

6.1. Проблемы безопасности ЯЭУ 161

6.2. Ядерная безопасность 164

6.3. Радиационная безопасность.

Основные принципы и нормы

радиационной безопасности 168

6.4. Системы безопасности и защиты ЯЭУ 180

Заключение 184

Алфавитно-предметный указатель 185

Библиографический список 190

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

аем — атомная единица массы
аз — активная зона
АЗ — аварийная защита
АР — автоматическое регулирование
АЭС — атомная электростанция
АЭУ — атомная энергетическая установка
БЗ — биологическая защита
ВВР — водо-водяной реактор
ЕЦ — естественная циркуляция
ИЯ — йодная яма
китн — коэффициент использования тепловых нейтронов
МВП — медленно выгорающие поглотители
ПП — прометиевый провал
ППУ — паропроизводящая установка
с — секунды
СУЗ — система управления и защиты
ТВС — тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент
ТКР — температурный коэффициент реактивности
ТЭР — температурный эффект реактивности
ЦНПК — циркуляционный насос первого контура
ЭРИ — эффективный резонансный интеграл
ЭЯ — элементарная ячейка
ЯдР — ядерная реакция
ЯР — ядерный реактор
ЯЭУ — ядерная энергетическая установка
 A — массовое число
 B_m^2 — материальный параметр
 B_g^2 — геометрический параметр
С — концентрация вещества (число ядер или молекул в единице объема)
 E_k — кинетическая энергия частицы
 E_{kp} — критическая энергия

- $E_{\text{св}}$ — энергия связи
 G — массовый расход
 H — высота аз
 h — удельная энталпия
 I — плотность тока нейтронов
 J_0 — функция Бесселя 0-порядка 1 рода
 K_{∞} — коэффициент размножения в бесконечной среде
 $K_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент размножения
 $K_{\text{з}}$ — коэффициент замедления
 K_h — коэффициент неравномерности по высоте
 K_r — коэффициент неравномерности по радиусу
 K_v — коэффициент неравномерности по объему
 L — длина диффузии
 l — среднее время жизни поколения нейтронов
 M — длина миграции
 N — число нейтронов в ядре
 N_p — мощность реактора
 π — плотность нейтронного поля
 P — давление
 Δp — гидравлическое сопротивление
 $P_{\text{з}}$ — вероятность избежать утечки при замедлении
 $P_{\text{д}}$ — вероятность избежать утечки при диффузии
 R — коэффициент воспроизведения
 S — скорость образования нейтронов
 T, T_1 — период реактора
 T_2 — период удвоения мощности
 $T_{1/2}$ — период полураспада
 $T_{\text{к}}$ — кампания реактора
 Q_k — энергозапас реактора
 Q_p — энерговыработка реактора
 $q(E)$ — плотность замедления
 q_1, q_F, q_v — удельные тепловые нагрузки (линейная, поверхностная, объемная соответственно)
 x — обогащение ядерного топлива
 z — степень выгорания
 α — коэффициент теплоотдачи
 α_r — температурный коэффициент реактивности
 β — суммарная доля выхода запаздывающих нейтронов

$\beta_{\text{оф}}$ — эффективная доля выхода запаздывающих нейтронов

δ — эффективная добавка

ϵ — коэффициент размножения на быстрых нейтронах

η — число быстрых вторичных нейтронов, образующихся при захвате топливной композицией одного теплового нейтрона

θ — коэффициент использования тепловых нейтронов

λ — постоянная радиоактивного распада

λ_i — средний пробег нейтрона в i -й реакции

v — среднее число нейтронов, возникающих в результате реакции деления

ξ — средний логарифмический декремент энергии нейтрона

ρ — реактивность, плотность вещества

Σ_i — макроскопическое эффективное сечение i -й ядерной реакции

σ_i — микроскопическое эффективное сечение i -й ядерной реакции

τ — возраст нейтрона

Φ — плотность потока нейтронов (нейтронный поток)

φ — вероятность избежания резонансного захвата

ω_i — доля выхода i -го изотопа при делении ^{235}U .

ВВЕДЕНИЕ

Трудно переоценить роль энергетики в жизни общества. И с каждым годом потребности человечества в энергии увеличиваются. Это связано как с ростом численности населения, развитием производства и технологий, так и с увеличением энергопотребления в быту. Традиционные свет и тепло дополняются другими потребностями жизнедеятельности людей. Во многих семьях есть или появляются холодильники, стиральные и посудомоечные машины, хлебопечки, мультиварки, музыкальные центры, домашние кинотеатры и многое, многое другое.

Преобразование энергии, заложенной природой в иско-
паемые энергоносители в наиболее удобную для передачи,
распределения и преобразования электрическую энергию,
происходит на тепловых и атомных электрических станциях.
Преимущества атомной энергетики перед тепловой очевидны,
так как ядерный реактор является одним из самых мощных
современных источников энергии, а ядерное топливо облада-
ет колоссальной удельной энергоемкостью, в миллионы раз
превышающей энергоемкость органического топлива. При
этом применение ядерной энергии непрерывно расширяется:
это — производство электроэнергии, низко потенциального
тепла для городского теплоснабжения и высокопотенциаль-
ного тепла для металлургической, химической и водородной
промышленности, ядерные энергетические установки для
транспорта и космической техники.

Наибольшее распространение атомная энергия получила в
стационарной и транспортной энергетике. Первое направле-
ние — это атомные электростанции. Пуск первой в мире атом-
ной электростанции был осуществлен 27 июня 1954 г. в городе
Обнинске. С этой даты начался отсчет истории ядерной энерге-
тики, одной из ярких страниц всемирного технического про-
гресса, раскрывшего тайны и грандиозные возможности ново-
го вида энергии. За прошедшее пятидесятилетие ядерная энер-
гетика завоевала прочные позиции в топливно-энергетическом
комплексе многих стран мира. На ядерную энергетику в на-

стоящее время приходится около 12,3% всемирного производства электроэнергии. В 32 странах строится или эксплуатируется 435 энергоблоков АЭС [19]. Большая часть работающих АЭС находится в Западной Европе и Северной Америке, но большинство новых станций сооружается в Азии. При нынешнем уровне энергопотребления мир исчерпает доказанные запасы нефти и газа в течение ближайших 50–80 лет, а угля — в ближайшие 100–120 лет. В связи с тем, что энергопотребление с каждым годом растет, то и доля производства электроэнергии, приходящаяся на ядерную энергетику, будет возрастать с каждым годом.

Являясь оптимальным источником энергии для человечества, ядерная энергетика выдвинула и ряд серьезных проблем, связанных с ее спецификой. Это, в первую очередь, проблема предотвращения ядерных и радиационных аварий и катастроф, нераспространение ядерных технологий в сферу создания ядерного оружия, а также проблема обращения с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом.

Интересна и поучительна история зарождения и развития ядерных технологий.

Впервые ядерные превращения, а именно, явление радиоактивности наблюдал и открыл случайно в 1896 г. французский исследователь Анри Беккерель. Он заметил, что соли урана испускали невидимые лучи, обладавшие способностью проникать через защитную черную бумагу и засвечивать фотопластинку. Термин «радиоактивность» был впервые использован Пьером и Марией Кюри, открывших, что урановая руда содержит еще два изотопа, полоний и радий, радиоактивность которых была намного выше, чем у урана. Началась эра изучения воздействия различных видов излучения на ядра различных элементов. Так, в 1934 г. Ирен Кюри (дочь Марии Кюри) вместе с мужем Фредериком Жолио бомбардировали тонкую алюминиевую пластинку альфа-лучами из полониевого источника и получили фосфор-30, первый искусственный радиоактивный элемент. А несколькими годами ранее, в 1932 г., английский ученый

Дж. Чедвик открыл новую элементарную частицу — нейтрон, сыгравшую ключевую роль в ядерных технологиях.

Открытие Чедвиком нейтрона послужило мощным толчком в изучении взаимодействия нейтрона с ядрами веществ.

В отчете австрийского химика Отто Гана, написанном 21 декабря 1938 г., указывалось, что ему удалось установить появление бария в облученном нейтронами уране, которого в нем до облучения заведомо не было. Существо явления было очень быстро объяснено в статье Лизы Мейтнер, которая была ассистенткой Гана и другого немецкого ученого Штрасмана, под знаменательным заголовком «Деление урана с помощью нейтронов — новый тип ядерной реакции». Поэтому 1938 г. считается годом открытия деления урана.

Эти сенсационные сообщения вызвали отклики во всем мире, и весь 1939 г. был насыщен интенсивными теоретическими и экспериментальными исследованиями в области ядерных превращений. В лаборатории И. В. Курчатова Физико-технического института (ФТИ) в Ленинграде Г. Н. Флёрнов наблюдал спонтанное деление урана. Деление ядер урана открыло перспективы для создания источников энергии небывалой мощности, при этом военный аспект применения таких источников был слишком очевиден, что придавало этим исследованиям в преддверии глобального военного столкновения крупнейших мировых держав явно ажиотажный характер.

Вопросу о возможности осуществления цепной реакции деления были посвящены работы ленинградских ученых Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона. Они рассчитали, что цепная реакция на тепловых нейтронах может быть реализована или путем обогащения природного урана изотопом $^{235}_{92}\text{U}$, или применением слабо захватывающих нейтроны замедлителей, таких как тяжелая вода, графит, бериллий. Указывалась также возможность цепной реакции на быстрых нейтронах. Исключительно важным было открытие Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном особой роли запаздывающих нейтронов, которые обеспечивают повышенную инерционность системы и делают технически осуществимым управление цепной реакцией. Тем самым была теоре-

тически обоснована возможность создания ядерного реактора, т. е. аппарата, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления.

Самоподдерживающаяся управляемая цепная реакция деления была впервые осуществлена 2 декабря 1942 г. Интернациональная группа физиков Чикагского университета, возглавляемая Э. Ферми, пустила первый в мире ядерный реактор, названный СР-1. Это был гетерогенный реактор, так называемая сборка нулевой мощности без специальной системы отвода тепла. Он состоял из графитовых блоков, между которыми были расположены шары из природного урана и его двуокиси. Мощность реактора в момент выхода на критичность составляла всего 0,5 Вт и лишь 12 декабря была доведена до 200 Вт.

После создания первого атомного реактора США избрали в первую очередь военный путь использования атомной энергии. Были созданы реакторы, в которых шло интенсивное накопление плутония. Атомную бомбу США испытали в 1945 г. и в том же году применили ее в войне с Японией.

В 1948 г. в США был запущен первый реактор на быстрых нейтронах «Клементина», открывший новую важную страницу в развитии ядерной энергетики.

В Советском Союзе теоретические и экспериментальные исследования по созданию реакторов проводились группой физиков и инженеров под руководством И. В. Курчатова. Первый советский реактор Ф-1 (физический первый урановый котел) был выведен в критическое состояние 25 декабря 1946 г. На этом реакторе и по настоящее время проводятся исследовательские работы в РНЦ «Курчатовский институт». Реактор Ф-1 был набран из графитовых блоков и имел форму шара диаметром 7,5 м. В центральной части шара диаметром 6 м по отверстиям в графитовых блоках размещены урановые стержни. Результаты исследований на реакторе Ф-1 стали основой проектов более сложных по конструкции промышленных реакторов, предназначенных для производства плутония. 23 сентября 1949 г. в Советском Союзе тоже была испытана атомная бомба, что лишило США монополии на ядерное оружие.

В 1950 г. в нашей стране были развернуты работы по мирному использованию атомной энергии, начинается проектирование и строительство атомной электростанции (АЭС). 27 июня 1954 г. в городе Обнинске вступила в строй первая в мире АЭС проектной мощностью 5 МВт (реактор был на тепловых нейтронах, а замедлителем служил графит). Ее эксплуатация убедительно доказала техническую возможность и перспективность превращения ядерной энергии в электрическую в промышленных масштабах. Человечество получило возможность использования нового, чрезвычайно мощного источника энергии и резкого сокращения потребления традиционных органических топлив для выработки электроэнергии. В апреле 2002 г. АЭС остановлена и реактор заглушен, таким образом первая в мире АЭС проработала 48 лет.

Развитие ядерных технологий предопределило основные их направления использования человечеством:

- ядерное и термоядерное оружие;
- **ядерная энергетика;**
- научные исследования;
- ядерные технологии в медицине;
- модификация материалов;
- производство и использование радиоизотопов;
- применение в промышленности.

Наибольшее значение для человечества в обеспечении энергией является ядерная энергетика. Основными направлениями развития ядерной энергетики являются:

A. Стационарная энергетика.

1. Канальные реакторы с графитовым замедлителем:

Билибинская АСТ — 1958 г.; Белоярская АЭС — 1964 г.; Ленинградская АЭС — 1973 г. и др. с реакторами большой мощности канальными (РБМК).

2. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР):

Нововоронежская АЭС — 1964 г., Кольская АЭС, Балаковская АЭС, Калининская АЭС и др.

3. Реакторы на быстрых нейтронах (БН):

Г. Шевченко (БН-350) — 1973 г., Белоярская АЭС (БН-600).

Б. Транспортная ядерная энергетика.

1. Атомные подводные лодки:

- 1954 г. — АПЛ «Наутилус», США (установка с водоводяными реакторами (ВВР));
- 1957 г. — «Си Вулф», США (установка с ЯР на жидкотемпературном теплоносителе (ЖМТ));
- 1958 г. — АПЛ проекта 627 К-3, СССР (установка с ВВР);
- 1963 г. — АПЛ проекта 645 К-27, СССР (установка с ЯР на ЖМТ).

2. Атомные суда гражданского назначения:

- 1959 г. — Атомный ледокол «Ленин», СССР;
- 1962 г. — Сухогрузное судно с ЯЭУ «Саванна», США;
- 1968 г. — Судно с ЯЭУ «Отто Ган», ФРГ.

3. Космические ЯЭУ.

4. Малогабаритные транспортные ЯЭУ:

- для железнодорожного транспорта;
- для автомобильного транспорта;
- для авиации.

Современное состояние стационарной ядерной энергетики

В настоящее время атомные электростанции имеются или строятся в 32 странах мира.

Таблица 1
Действующие и сооружаемые ядерные энергетические реакторы
в мире (на декабрь 2011 г.) [19] (некоторые)

| Страна | Действующие реакторы | | Сооружаемые реакторы | | Производство электроэнергии на АЭС в 2003 г. | | Общий опыт |
|----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|--|-------------------|------------|
| | Кол-во блоков всего | МВт (эл.) | Кол-во блоков всего | МВт (эл.) | ТВтч | % от общего пр-ва | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Бельгия | 7 | 5760 | | | 44,61 | 55,46 | 195 |
| Германия | 18 | 20643 | | | 157,44 | 28,10 | 657 |
| Индия | 14 | 2550 | 8 | 3622 | 16,37 | 3,30 | 230 |
| Иран | | | 2 | 2111 | | | 0 |
| Испания | 9 | 7584 | | | 59,36 | 23,64 | 223 |
| Канада | 17 | 12113 | | | 70,29 | 12,53 | 495 |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------|-----|--------|----|-------|---------|-------|-------|
| Китай | 9 | 6587 | 2 | 2000 | 41,59 | 2,18 | 43 |
| Республика Корея | 19 | 15850 | 1 | 960 | 123,28 | 40,01 | 230 |
| Литва | 2 | 2370 | | | 14,30 | 79,89 | 37 |
| Российская Федерация | 30 | 20793 | 3 | 2825 | 138,39 | 16,54 | 776 |
| Соединенные Штаты Америки | 104 | 98298 | | | 763,74 | 19,86 | 2923 |
| Соединенное Королевство | 27 | 12052 | | | 85,31 | 23,70 | 1343 |
| Украина | 13 | 11207 | 4 | 3800 | 76,70 | 45,93 | 286 |
| Финляндия | 4 | 2656 | 2 | 2000 | 21,82 | 27,32 | 101 |
| Франция | 59 | 63363 | | | 420,70 | 77,68 | 1375 |
| Швеция | 11 | 9451 | | | 65,50 | 49,62 | 316 |
| Южная Африка | 2 | 1800 | | | 12,66 | 6,05 | 39 |
| Япония | 54 | 45464 | 2 | 2371 | 230,80 | 25,01 | 1150 |
| Всего | 442 | 363819 | 27 | 22676 | 2524,74 | 16,5 | 11364 |

Таким образом, странами с наиболее развитой стационарной ядерной энергетикой являются США (действует 104 энергоблока), Франция (действует 58 энергоблоков, 77,7% электроэнергии в стране производится на АЭС), Япония (действует 54 энергоблока). Вместе с тем следует отметить, что после Чернобыльской аварии и аварии на АЭС Фукусима (Япония) наметился определенный спад в производстве ядерного электричества. Хочется надеяться, что этот спад будет достаточно кратковременным. Об этом же говорит и большой интерес к ядерной энергетике в странах Востока. Так, в настоящее время Китай строит 26 энергоблока, Индия — 7 и Южная Корея — 5.

В России

Развитие ядерной энергетики в СССР, а в настоящее время в России базируется на двух основных типах ядерных

реакторов: канальных с графитовым замедлителем в одноконтурных установках и водо-водяных корпусных реакторов в двухконтурных установках (ВВЭР).

Канальные реакторы использованы на Первой АЭС, Билибинской АСТ, Сибирской АЭС (1958), Белоярской АЭС (1964), на мощных АЭС нового поколения (реакторы большой мощности канальные — РБМК), начиная с первого блока Ленинградской АЭС (1973), а также на Курской, Чернобыльской, Смоленской и Игналинской АЭС. Мощность энергетических блоков с канальными реакторами увеличилась с 5 МВт на Первой АЭС до 1000 МВт на Ленинградской, Курской, Чернобыльской, Смоленской АЭС и до 1500 МВт на Игналинской АЭС.

Проектная мощность АЭС, в зависимости от мощности и числа входящих в нее блоков, достигает 4–6 тыс. МВт.

Реакторы типа ВВЭР используются на АЭС в нашей стране с 1964 г. (1-й блок Нововоронежской АЭС). В настоящее время они успешно эксплуатируются на Кольской, Балаковской, Калининской и Ростовской АЭС. Максимальная электрическая мощность одного блока составляет 1000 МВт.

В Советском Союзе в 1973 г. был пущен первый в мире крупный энергетический реактор на быстрых нейтронах БН-350 электрической мощностью блока 150 МВт, а затем БН-600 электрической мощностью блока 600 МВт (Белоярская АЭС). Установки выполнены по трехконтурной схеме, в качестве теплоносителя применен жидкий натрий.

В настоящее время на территории России работают 10 АЭС: Балаковская, Белоярская, Билибинская, Калининская, Кольская, Курская, Ленинградская, Нововоронежская, Ростовская и Смоленская АЭС. Кроме того, отечественные энергоблоки с ВВЭР-440 были поставлены на АЭС в Венгрию, Югославию, Монголию, Болгарию, Финляндию и другие страны, где и успешно эксплуатируются по настоящее время. Активно ведется работа по проектированию и сооружению энергоблоков с реакторами типа ВВЭР в таких странах, как Китай, Индия, Иран.

Учебное пособие «Ядерные энергетические установки» составлено в соответствии с программой учебной дисципли-

ны «Ядерные энергетические установки» применительно к специальности «Тепловые электрические станции». За основу взят курс лекций по данной дисциплине, длительное время читаемый автором в университете.

При написании учебного пособия использован многолетний опыт, накопленный кафедрой теплотехники и теплоэнергетики. Назначение учебного пособия, а также объем учебной программы определили содержание пособия. Отдельные положения и зависимости теории и эксплуатации ЯР даются без строгих математических выводов. Однако, при этом раскрывается физический смысл того или иного явления. Предметом изучения данного курса является **Ядерная энергетическая установка (ЯЭУ)**.

Ядерная энергетическая установка — совокупность устройств для получения тепловой, электрической или механической энергии в ходе управляемой ядерной реакции, осуществляющейся в ядерном реакторе.

В состав ядерной энергетической установки входят: один или несколько ядерных реакторов; парогенераторы, паровые турбины, электрические генераторы; а также трубопроводы, насосы и другое вспомогательное оборудование. Сердцем ЯЭУ является ядерный реактор (ЯР), в котором происходят сложные нейтронно-физические, гидродинамические и тепловые процессы. Остальное оборудование ЯЭУ (парогенераторы, паровые турбины, насосы, конденсаторы и другое оборудование) достаточно подробно изучается в других дисциплинах учебного плана. Поэтому основное внимание в данном учебном пособии уделено конструкции, принципу действия и эксплуатации ядерного реактора.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru