

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## 1.1. Основные термины и определения. Практическое значение ядерной физики

Ядерная физика – раздел физики, изучающий специфические формы материи и движения – атомные ядра и ядерные процессы, элементарные частицы и их взаимопревращения. Ядерная физика является научной основой ядерной энергетики и ядерной техники.

Различают ядерную физику низких, промежуточных и высоких энергий. К ядерной физике низких энергий относят проблемы строения ядра, изучение радиоактивного распада ядер, а также исследования ядерных реакций, вызываемых частицами с энергией до 200 МэВ. Энергии от 200 МэВ до 1 ГэВ называются промежуточными, а свыше 1 ГэВ – высокими.

Важной частью ядерной физики является нейтронная физика. Она занимается ядерными реакциями, происходящими под действием нейтронов. Поскольку нейтрон электрически нейтрален, электронное поле ядра-мишени не отталкивает его; поэтому даже медленные нейтроны могут беспрепятственно приблизиться к ядру на расстояния, при которых начинают проявляться ядерные силы. Нейтронная физика изучает также взаимодействие очень медленных нейтронов с веществом (энергия таких нейтронов порядка 0,01 эВ и меньше).

Ядерная физика делится на экспериментальную и теоретическую. Арсенал экспериментальных средств ядерной физики разнообразен и технически сложен. Его основу составляют ускорители заряженных частиц (от электронов до многозарядных ионов, а также мезонов и гиперонов), ядерные реакторы, служащие мощными источниками нейтронов, и детекторы ядерных излучений, регистрирующие продукты ядерных реакций. Для современного ядерного эксперимента характерны большие интенсивности потоков ускоренных заряженных частиц или нейтронов, позволяющие исследовать редкие ядерные процессы и явления, и одновременная регистрация нескольких частиц, испускаемых в одном акте ядерного столкновения.

Теоретическая ядерная физика «работает» с моделями атомного ядра и ядерных реакций; она опирается на фундаментальные физические теории, созданные в процессе исследования физики микромира. Для теоретической ядерной физики характерна необходимость использования аппаратов разнообразных разделов теоретической физики: классической электродинамики, теории сплошных сред, квантовой механики, статистической физики, квантовой теории поля. Здесь широко используются методы математической физики. Центральная проблема теоретической ядерной физики – квантовая задача о движении многих тел, сильно взаимодействующих друг с другом.

Развитие теоретических и экспериментальных ядерных исследований взаимозависимо и тематически связано. Стоящие перед ядерной физикой проблемы слишком сложны и лишь в немногих случаях могут быть решены чисто теоретическим или эмпирическим путём.

Прикладное значение ядерной физики в жизни современного общества огромно, её практические приложения разнообразны – от ядерного оружия и ядерной энергетики до диагностики и терапии в медицине. Ядерная физика является фундаментальной наукой, от прогресса которой можно ожидать выяснения глубоких свойств строения материи и открытия новых общих законов природы.

Ядерный реактор (ЯР) – устройство, в котором под действием свободных нейтронов осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер тяжелых элементов.

Энергетический ЯР – реактор, главным назначением которого является выработка энергии, используемой для получения электричества, для теплофикации, опреснения морской воды, в силовых установках на кораблях и т. п.

## 1.2. Основные этапы развития ядерной физики

V век до н. э. – греческие философы Левкипп и Демокрит считали, что все материальные предметы состоят из атомов (неделимых частиц).

40-е годы XVIII в. – русский ученый М. В. Ломоносов высказал утверждение об атомно-молекулярном строении вещества.

1798 г. – французский химик Лавуазье установил современное понятие элемента как вещества, содержащего один род материи.

1802-1803 гг. – английский химик Дж. Дальтон ввел современное понятие атома и количественно обосновал атомную теорию.

1869 г. – русский химик Д. И. Менделеев установил фундаментальный закон, на основании которого составил «Периодическую систему элементов».

1895 г. – немецкий физик В. Рентген открыл существование невидимого электромагнитного излучения некоторых атомов, впоследствии названного его именем.

1896 г. – французский физик А. Беккерель открыл явление радиоактивности урана.

1897 г. – французский физик Дж. Томсон установил существование электрона.

1905 г. – немецкий физик А. Эйнштейн создал теорию относительности и установил фундаментальный закон взаимосвязи массы и энергии.

1911 г. – английский физик Э. Резерфорд установил существование положительного ядра в центре атома.

1913 г. – датский физик Н. Бор выдвинул теорию строения атома, состоящего из ядра и электронной оболочки.

1913 г. – английский физик Ф. Содди открыл существование изотопов.

1931 г. – американский физик Э. Лоуренс построил ускоритель заряженных частиц – циклотрон.

1932 г. – английский физик Дж. Чедвик открыл нейтрон.

1933 г. – супруги Кюри (Ирен Кюри и Фредерик Жолио) открыли явление искусственной радиоактивности.

1939 г. – в результате экспериментов многих ученых (Э. Ферми, Жолио – Кюри, О. Ган, Ф. Штрассман и др.) открыто деление ядер урана.

1939 г. – советские ученые Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон произвели первый принципиальный расчет цепной ядерной реакции деления.

1939 г. – открыт первый заурановый элемент – нептуний. В последующие годы было получено еще 16 заурановых (трансурановых) элементов.

1942 г., 2 декабря – день рождения ядерного реактора. Под руководством итальянского физика Э. Ферми в Чикаго (США) пущен первый уран-графитовый ядерный реактор; впервые осуществлена самоподдерживающаяся управляемая цепная реакция деления ядер.

1944 г. – советский физик В. И. Векслер разработал мощный ускоритель заряженных частиц – фазотрон (синхроциклотрон).

1945 г., 16 июля – испытана первая атомная бомба в США.

1945 г., 6 и 9 августа – взорваны американцами атомные бомбы над японскими городами Хиросима и Нагасаки.

1946 г., 25 декабря – под руководством И. В. Курчатова пущен первый уран-графитовый ядерный реактор в СССР.

1949 г., 29 августа – испытана первая атомная бомба в СССР.

1952 г. – заложена и в 1954 г. спущена на воду первая атомная подводная лодка «Наутилус» (США) с однореакторной энергетической установкой.

1953 г. – в Советском Союзе успешно испытана водородная бомба.

1954 г., 27 июня – в СССР пущена первая в мире АЭС в г. Обнинске.

1956 г. – заложен, а в 1957 г., 5 декабря спущен на воду и в 1959 г., 3 декабря сдан в эксплуатацию атомный ледокол «Ленин» (СССР).

### 1.3. Состояние и перспективы развития ядерной энергетики

Основной причиной появления и развития атомной энергетики является огромный, по сравнению с органическим топливом, энергетический эквивалент цепной реакции деления. Для выработки энергии 1МВт\*сут. требуется всего лишь 1,2 г делящегося изотопа (урана-235). При сравнении энергетических эквивалентов органического и ядерного топлива обнаруживается, что несколько граммов делящегося изотопа урана- 235 примерно равны 1 т нефти (точнее, 4 г  $^{235}\text{U} = 1 \text{ т нефти}$ )!

Другая, не менее важная причина состоит в том, что имеющихся ресурсов органического топлива при нынешних тенденциях энергопотребления хватит, по различным прогнозам, на 50–200 лет, а ресурсов урана (как урана-235, так и урана-238 с учетом построения замкнутого топливного цикла) хватит примерно на 10 000 лет. Кроме запасов урана, на Земле имеются еще запасы тория, объем которых, по оценкам, сопоставим с запасами урана, а возможно, в несколько раз их превосходит.

Изначально ядерная энергетика (как, впрочем, и все высокие технологии) появилась как побочный продукт развития военно-промышленного комплекса, и ее развитие субсидировалось государством. Несмотря на то, что ядерный реактор впервые был создан еще в 1942 г., коммерческое использование энергии

ядра началось только в 1950-х годах. Тогда же появились и первые АЭС, но до 1970-х годов они не находили широкого применения.

В 1970—1980 гг. казалось, что ядерная энергетика – это энергетика будущего, безопасный и неисчерпаемый источник. Однако аварии (на станции Three Mile Island в США в 1979 г. и на Чернобыльской АЭС в 1986 г.) вызвали громкий протест широких слоев населения против ядерной энергетики. К тому же рост цен на энергоносители оказался не таким значительным, как предсказывали в 1970-х годах, поэтому явного экономического преимущества ядерной энергии по сравнению с традиционными видами топлива в те годы не наблюдалось. Кроме того, ужесточение требований к безопасности работы атомных станций (АС) привело к росту стоимости производимой энергии. В результате ядерная программа в некоторых странах начала сворачиваться и темп строительства ядерных объектов был замедлен. Если в 1970-е годы производство электроэнергии в мире атомными станциями росло со среднегодовым темпом 19%, то в 1980-е годы прирост замедлился до 10,5%, а в 1990-е упал до 2,3%. Тем не менее и сегодня ядерная энергетика является существенным фактором экономической жизни многих стран, а ее доля в общем объеме производства электроэнергии в мире составляет около 15%.

На сегодняшний день атомная энергетика получила широкое распространение в мире. В 2008 г. атомными электростанциями было выработано 2604 млрд. кВт•ч электроэнергии, в эксплуатации на АЭС находились 440 реакторных установок суммарной установленной мощностью более 360 ГВт. На рисунке 1.1 показана доля энергоносителей в мировом производстве электроэнергии.

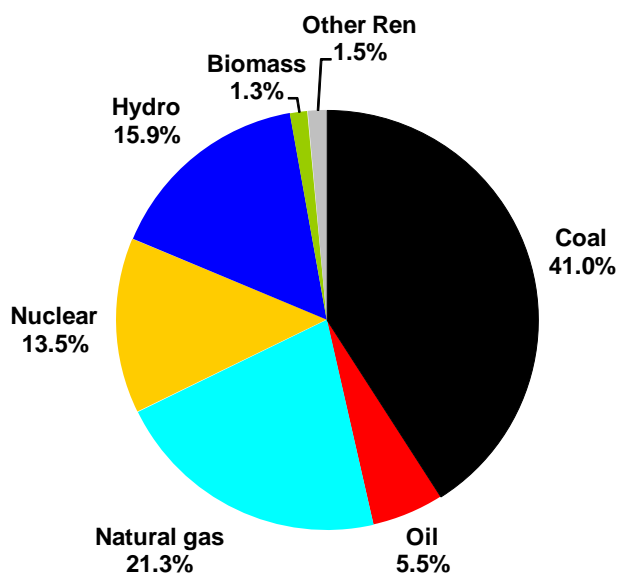


Рисунок 1.1

В некоторых странах ядерная энергетика приобрела доминирующее положение. По данным на 2010 г., в 14 странах мира более 30% электроэнергии вырабатывалось на АЭС. На рисунке 1.2 представлена информация по общему объему генерируемой электроэнергии и доле энергии, вырабатываемой на АЭС, от общего объема производства электроэнергии по странам.

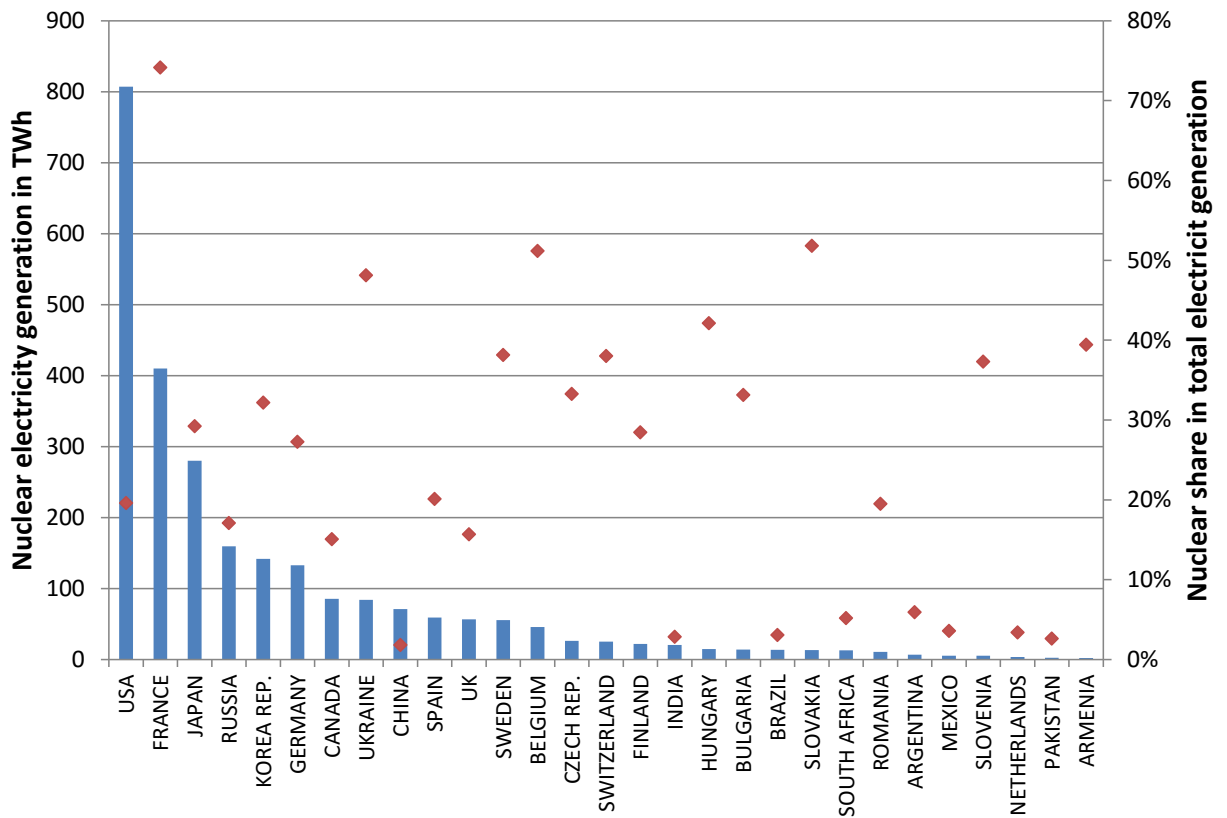


Рисунок 1.2

На рисунке 1.3 представлена информация о количестве работающих в разных странах энергетических реакторов.

### Число работающих реакторов

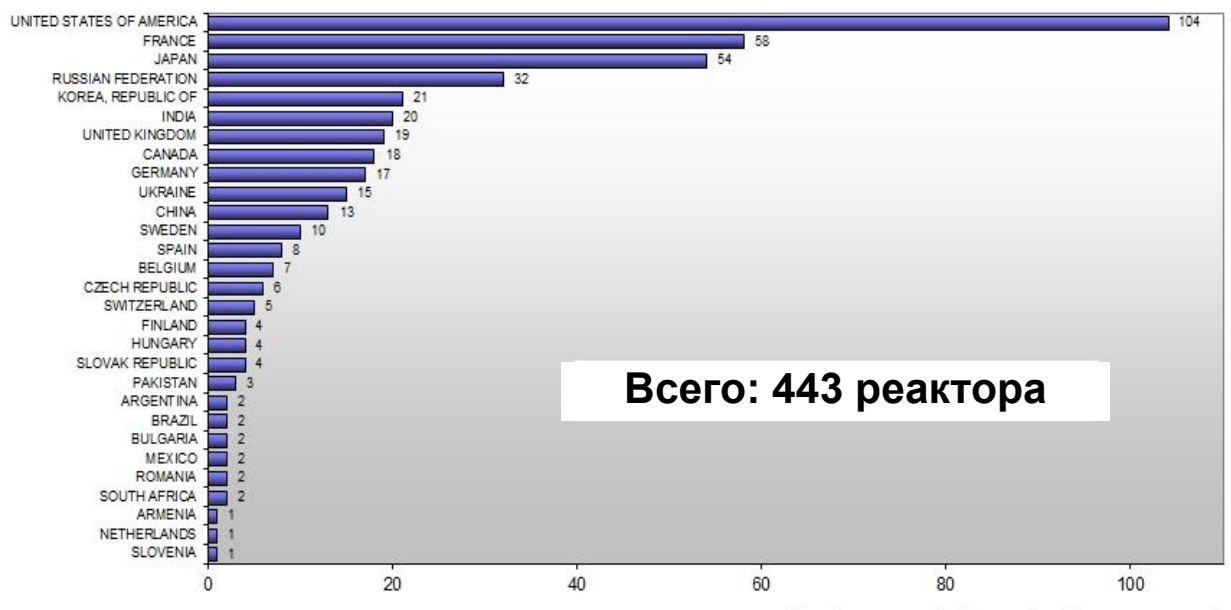
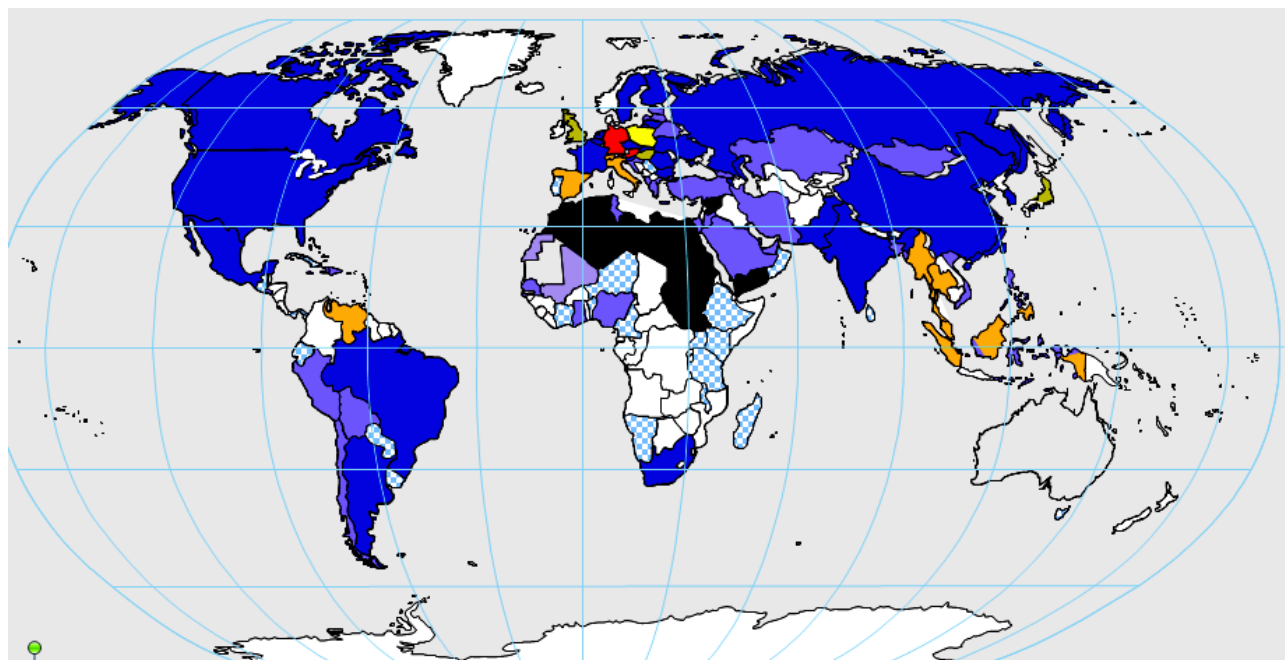


Рисунок 1.3

На рисунке 1.4 показана карта мира на которой содержится информация об отношении различных стран к использованию ядерной энергии.



- – используют АЭС; ■ – планируют строить АЭС;
- – проявляют интерес к использованию ядерной энергии;
- – отрицательно относятся к использованию ядерной энергии;
- – отложили принятие решения

Рисунок 1.4

Преимущество ядерной энергетики по сравнению с традиционными технологиями, используемыми для производства электричества, заключается прежде всего в низких операционных издержках АЭС и дешевизне ядерного топлива. При нынешней цене природного урана после его обработки и обогащения стоимость 1 кг ядерного топлива составляет примерно 2300 долларов США. Этого количества при средней глубине выгорания топлива 45 МВт·сут./кг достаточно для производства 360 тыс.·кВт·ч электроэнергии. Таким образом, топливная составляющая произведенной энергии составляет всего 0,64 цента за кВт·ч.

Однако тариф на электроэнергию определяется не только операционными, но и капитальными расходами. А ядерная энергетика имеет наибольшие капитальные затраты по сравнению с альтернативами. Необходимо также учитывать, что капитальные затраты ядерной энергетики включают не только стоимость строительства станции, но и расходы по утилизации отходов и демонтажу атомной станции после окончания ее эксплуатации. Но, несмотря на существенные капитальные издержки, ядерная энергетика доказала свою жизнеспособность даже в условиях конкурентного рынка электроэнергии.

Эффективность ядерной энергетики и ее перспективы подтверждает рисунок 1.5, на котором приведено количество строящихся в настоящее время реакторов в различных странах.

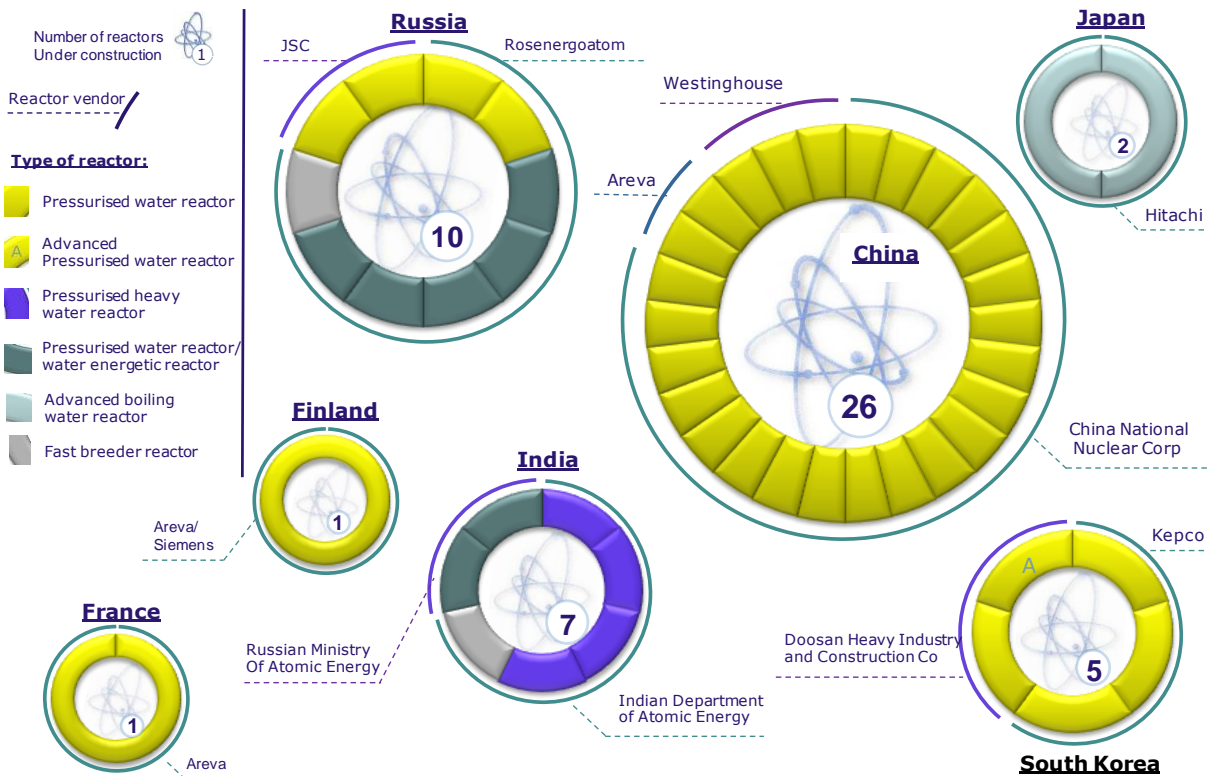


Рисунок 1.5