

Отработанные ядерное топливо после излучения из реактора обладает наведенной активностью в неск. млн. Ки на тонну, обусловленной содержанием 3—10% и более осколочных элементов, в осн. короткоживущих. При хранении в течение 2—4 месяцев его активность падает на два-три порядка, затем спад замедляется. Осн. масса долгоживущих радиоизотопов распадается до уровня естеств. фона за 300—400 лет, после чего может быть захоронена. Относительно небольшая доля радионуклидов ( $\sim 1\%$ ) — малые актиноиды и нек-рые осколки, напр.,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{150}\text{Gd}$  с периодами полураспада от десятков до сотен тыс. лет и более — длительно сохраняют высокую радиоактивность и не могут быть захоронены в геол. формации Земли. Такие радионуклиды подлежат извлечению при фракционировании отходов и превращению (трансмутации) в делящиеся или короткоживущие изотопы путём облучения в спец. ядерных реакторах. Использование реакторов на быстрых нейтронах позволяет достаточно полно «выжигать» все актиноиды, а также уничтожать актиноиды, накапливающиеся в реакторах на тепловых нейтронах, вследствие эфф. превращения их в делящиеся нуклиды.

Регенерируемый в замкнутом топливном цикле уран при многократном использовании накапливает в заметных кол-вах изотопы  $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  (балласт), снижающие ядерные характеристики топлива, и  $^{232}\text{U}$ , ухудшающий его радиац. свойства. Восстановление эксплуатац. характеристик регенерируемого урана возможно путём разделения изотопов с последующей трансмутацией балластных.

Лит.: Уолтер А., Рейнольдс А., Реакторы-размножители на быстрых нейтронах, пер. с англ., М., 1986; Физические величины. Справочник, под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, М., 1991; Разработка, производство и эксплуатация ТВЭЛов энергетических реакторов, под ред. Ф. Г. Решетникова, М., 1995. И. С. Головин.

**ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО** — см. в ст. *Ядерное горючее*.

**ЯДЕРНЫЕ МОДЕЛИ** — упрощённые подходы к описанию строения атомных ядер, позволяющие простым образом рассчитывать разл. ядерные характеристики. Как правило, Я. м. основаны на упрощениях, допускающих простое матем. описание. Положенная в основу модели картина всегда отражает лишь отд. черты ядер, а сама модель призвана описывать лишь определ. ядерные свойства. Отд. класс образуют т. н. микроскопич. модели, основанные на матем. приближениях, упрощающих решение ур-ний микроскопич. теории ядра. Особый интерес представляют *точно решаемые модели*, к-рые используются для исследования точности разл. приближённых методов.

Нач. период развития ядерной физики связан с формированием и развитием капельной и оболочечной моделей ядра. Эти Я. м. возникли почти одновременно в 30-х гг. 20 в. Они основаны на разл. представлениях и призваны описывать противоположные свойства ядер. В капельной модели ядро рассматривается как непрерывная среда, состоящая из нейтронной и протонной жидкостей и описываемая ур-ниями классич. гидродинамики (отсюда др. назв. — гидродинамич. модель). Плотно. ядерной жидкости почти постоянна внутри объёма капли и резко падает в поверхностном слое, толщина к-рого значительно меньше радиуса капли. Осн. параметры: равновесная плотность безграничной ядерной жидкости  $\rho_0$  ( $\approx 0,16$  частиц/Фм<sup>3</sup>), энергия связи на 1 нуклон  $\mu_0$  ( $\approx 16$  МэВ) и коэф. поверхностного натяжения  $\sigma$  ( $\approx 1$  МэВ/Фм<sup>2</sup>); иногда вводят  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для нейтронов и протонов в отдельности. Для учёта зависимости энергии связи ядра от величины нейтронного избытка ( $N-Z$ ;  $N$  и  $Z$  — соответственно числа нейтронов и протонов в ядре) вводят изовекторный коэф. сжимаемости ядерной материи  $\beta$  ( $\approx 30$  МэВ); для учёта конечной сжимаемости ядерного вещества — изоскалярный коэф. сжимаемости (модуль сжатия)  $K$  ( $\approx 200$  МэВ).

Капельная модель ядра описывает осн. макроскопич. свойства ядер: свойство насыщения, т. е. пропорциональность энергии связи тяжёлых ядер массовому числу  $A=N+Z$ ; зависимость радиуса ядра  $R$  от  $A$ :  $R=r_0 A^{1/3}$ , где  $r_0$  — практически постоянный коэф. ( $\approx 1,06$  Фм) за ис-

ключением самых лёгких ядер. Она приводит к *Вайцеккер-Я. формуле*, к-рая в среднем хорошо описывает энергии связи ядер. Капельная модель хорошо описывает деление ядер. В сочетании с т. н. оболочечной поправкой (см. ниже) она до сих пор служит осн. инструментом исследования этого процесса.

*Оболочечная модель ядра* основана на представлении о ядре как о системе нуклонов, независимо движущихся в ср. поле ядра, создаваемом силовым воздействием остальных нуклонов. Эта Я. м. возникла по аналогии с атомной моделью оболочек и первоначально была призвана объяснить обнаруженные экспериментально отклонения от ф-лы Вайцеккера и существование *магических ядер*, для к-рых  $N$  и  $Z$  соответствуют наиб. выраженным максимумам энергии связи. В отличие от капельной модели, к-рая практически сразу возникла в законченном виде, оболочечная модель претерпела длит. период поиска опт. формы потенциала ср. поля  $U(r)$ , обеспечивающего правильные значения магич. чисел. Решающий шаг был сделан в кон. 40-х гг. М. Гёпперт-Майер (М. Goepfert-Mayer) и Х. Йенсенем (Н. Jensen), выяснившими важную роль спин-орбитального слагаемого ( $U_{sl}$ ) ср. поля. Для центр. части ядра в совр. теории обычно используют потенциал Саксона — Вудса.

Помимо объяснения природы магич. чисел и правильного воспроизведения их значений оболочечная модель качественно описывает и др. характеристики нечётных ядер: спины осн. состояний, магн. моменты, вероятности  $\beta$ -переходов (см. *Бета-распад ядер*) и магн.  $\gamma$ -переходов (см. *Гамма-излучение*) и т. д. Важное место она занимает при описании свойств *деформированных ядер*, в к-рых ср. поле деформировано (гл. обр. квадрупольно).

В усовершенствованных вариантах оболочечной модели помимо ср. поля вводится т. н. остаточное взаимодействие между нуклонами, к-рое добавляет к основной, одночастичной компоненте волновой ф-ции ядра более сложные, многочастичные компоненты (конфигурации). Многочастичная оболочечная модель в лёгких ядрах ( $A \leq 40$ ) лучше описывает эксперим. данные. Однако с ростом числа частиц в ядре резко растут вычислит. сложности её применения, поэтому для более тяжёлых ядер используются разл. приближения — упрощения при выборе остаточного взаимодействия и ограничения пространства состояний. Напр., в т. н. приближении случайной фазы пространство состояний «ограничено простейшими возбуждёнными» состояниями типа частица — дырка. Др. пример — модель одного  $j$ -уровня с монополярным остаточным взаимодействием (модель Липкина). Большую роль в развитии ядерной физики сыграла модель квадруполь-квадрупольного взаимодействия. Известна многочастичная оболочечная модель с квадрупольным остаточным взаимодействием и ср. полем гармонич. осциллятора. Её гамилтониан обладает  $SU(3)$ -инвариантностью и допускает точное решение методами теории групп.

Важная часть остаточного взаимодействия — сильное притяжение в состоянии пары нуклонов с полным угл. моментом  $J=0$  и спином  $S=0$ , приводящее к *сверхтекучести атомных ядер*. Гипотеза ядерной сверхтекучести была высказана О. Бором (А. Bohr) и Дж. Валинином (J. G. Valatin) (1958) сразу после появления теории *сверхпроводимости*. Почти одновременно была разработана *сверхтекучая модель атомных ядер* и изучены её следствия: появление щели в спектре одночастичных возбуждённых ядер, уменьшение моментов инерции деформир. ядер по сравнению с их значением для «твёрдых» ядер и др.

Одна из самых старых Я. м., сохранивших своё значение, — *нуклонных ассоциаций модель* (кластерная модель). Эта модель возникла во 2-й пол. 30-х гг., когда были систематизированы данные об энергиях связи лёгких ядер и была обнаружена повыш. устойчивость т. н.  $\alpha$ -частичных ядер, имеющих равное и чётное число нейтронов и протонов. К их числу относятся  $^8\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  и т. д. Мн. возбуждённые состояния ядер с большой вероятностью распадаются с испусканием  $\alpha$ -частиц. Дж. А. Уилер (J. Wheeler) в 1937 предположил, что « $\alpha$ -частичное» ядро