

В.И.ВЛАДИМИРОВ

ПРАКТИЧЕСКИЕ
ЗАДАЧИ
ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Издание четвертое,
переработанное и дополненное

МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1986

ББК 31.46 В 57 УДК
621.039.566:658,382.3

Рецензент д-р физ.-мат. наук А. А. Лукьянов

Владимиров В. И.

В 57 Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 304 с.: ил.

Рассмотрены эксплуатационные вопросы физики ядерных реакторов (ЯР), обеспечения ядерной безопасности ЯР и работоспособности активной зоны, а также методики нейтронно-физических измерений характеристик ЯР при физическом пуске и в процессе эксплуатации. Приведены методики и даны примеры решения практических задач, а также задач для самостоятельного решения с ответами и контрольные вопросы для проверки усвоения материала. (Первое издание вышло в 1972 г., второе — в 1976 г., третье — в 1981 г.)

Для инженерно-технического эксплуатационного персонала АЭС. Может быть использована для повышения квалификации старших инженеров управления реакторов и начальников смен АЭС.

В 23040000000-459
051(01)-86 2 6 - 8 6

ББК 31.46

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Владимир Иванович Владимиров

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Редактор издательства Г. В. Чернышева
Художественный редактор А. Т. Кирьянов
Технический редактор А. С. Давыдова
Корректор И. А. Володьева

ИБ № 952

Сдано в набор 09.10.85 Подписано в печать 07.04.86 Т-09942 Формат 60х90^{1/16} Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная Печать высокая Усл. печ. л. 19,0 Усл. кр.-отт. 19,0 Уч. -изд. л. 21,21 Тираж 3500 экз. Заказ 750 Цена 1 р. 40 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

© Энергоиздат, 1981

© Энергоатомиздат, 1986, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время уже не вызывает сомнений тот факт, что «именно ядерная энергетика как по ресурсно-экономическим, так и по экологическим соображениям может наиболее надежно обеспечить возрастающее энергопотребление общества на перспективный период» (А. П. Александров)*. Полное решение топливной проблемы возможно только при условии замены органического топлива ядерным во всех областях потребления энергии и прежде всего для получения электроэнергии и теплоснабжения, где сейчас используется половина полного расхода топлива. Ядерная энергия уже находит применение на атомных судах, ледоколах, внедряется в некоторые энергоемкие технологические процессы (металлургия и др.). Планы на 12-ю пятилетку предусматривают пророст производства электроэнергии в европейской части СССР в основном от новых АЭС, а круглогодичную навигацию по Северному морскому пути за счет использования атомных ледоколов. Во всех случаях крупномасштабного использования ядерной энергии основным элементом установок является ядерный реактор (ЯР), специфические особенности которого существенно отличаются от всех известных источников энергии. Более чем 30-летний опыт эксплуатации ЯЭУ показал высокую надежность ЯР. Но даже самая надежная техника и совершенная автоматика не гарантируют безопасность ЯР, если им управляют недостаточно грамотные специалисты-операторы, плохо представляющие весь сложный комплекс физико-теплотехнических процессов, сопровождающих работу ЯР и всей ЯЭУ в целом. При безусловной значимости практической отработки действий оператора, в большей или меньшей степени основанных на рефlekсах, очень важно, а при возникновении неисправностей и в аварийных ситуациях совершенно необходимо, понимание и аналитическая способность оператора анализировать нейтронно-физические и теплотехнические процессы в ЯР, их направленность, возможные варианты последствий и меры, предотвращающие развитие их в нежелательных направлениях.

Целевое назначение настоящей книги — рассмотрение вопросов физики ЯР в инженерно-эксплуатационном аспекте в виде решения практических задач, таких как: определение запаса реактивности ($\rho_{\text{зан}}$) и энергозапаса ЯР в различное время кампании; выбор возможного маневра (изменения мощности) при известном $\rho_{\text{зан}}$;

В кн.: Ядерная энергетика, человек, и окружающая среда/Н. С. Бабаев, В. Ф. Демин, Л. А. Ильин и др. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 9.

определение времени допустимой и вынужденной стоянок ЯР* обусловленных отравлением его после остановки; расчет критического положения органов регулирования перед выводом ЯР на мощность; выбор методики пуска ЯР; расчет остаточных тепловыделений и выбор режима расхолаживания ЯР после остановки; оценка поведения ЯР в различных аварийных ситуациях. Задачи, рассмотренные в данной книге, составлены на основании опыта эксплуатации ВВР на тепловых нейтронах, но большинство их характерно для всех типов ЯР. В качестве исходных взяты усредненные характеристики транспортного ЯР. Условно этот реактор назван ТР (приложение 30). Для каждого конкретного ЯР характеристики, естественно, отличаются, но в большинстве случаев это отличие не качественное, а количественное. Если же задача составлена для ЯР со своеобразными характеристиками, то это оговорено в ее условии.

Книга содержит пять глав. Главы состоят из параграфов, в каждом из которых кратко изложена физическая сущность рассматриваемого вопроса, доведенная до конкретных расчетных соотношений, графиков, таблиц, необходимых для решения задачи этого типа, даны методики решения на конкретных примерах, контрольные вопросы и задачи для самостоятельного решения с ответами.

В главе первой кратко рассмотрены вопросы ядерной и нейтронной физики, лежащие в основе получения ядерной энергии, а также параметры ЯР как источника энергии и ионизирующего излучения, связанного с его работой.

Глава вторая посвящена эффектам выгорания, шлакования, отравления и другим, влияющим на режим работы ЯР, на его энергозапас и маневренные качества.

В главе третьей рассмотрены вопросы регулирования мощности, пуска, остановки

и расхолаживания ЯР.

В главе четвертой проанализированы некоторые задачи по обеспечению безопасной работы ЯР с точки зрения требований ядерной и радиационной безопасности, а также теплотехнической надежности (ТТН) активной зоны.

В главе пятой даны основные методики нейтронно-физических измерений, которые проводят при физическом пуске ЯР и в процессе эксплуатации. Дело в том, что многие физические характеристики, например $\rho_{\text{зап}}$, температурный эффект, отравление Хе, эффективность органов регулирования и др., в течение кампании изменяются на величину, которая превышает безопасные пределы, обеспечивающие надежную, безаварийную работу ЯР. Поэтому необходимо периодически проводить физические и теплотехнические измерения и проверки, чтобы своевременно вносить корректуру в эксплуатационные инструкции. Операторы ЯЭУ принимают непосредственное участие в этих измерениях.

Во многих задачах рассмотрены переменные режимы, что характерно для судовых ЯР, а также для ЯР АЭС, включенных в общую энергосистему и работающих в соответствии с графиком пиковой нагрузки. Последнее обстоятельство со временем приобретает все большее значение. Дело в том, что в странах с развитой энергетикой наблюдается существенная и постоянно усиливающаяся неравномерность суточных и годовых графиков электрической нагрузки. Отношение максимальной летней к максимальной зимней нагрузке в некоторых странах достигает 0,6, а отношение ночного минимума к дневному максимуму доходит до 0,4. В настоящее время некоторые АЭС уже используются в покрытии переменной части графика нагрузок. Это предьявляет соответствующие требования к маневренности ЯР, т. е. к его способности воспринимать нагрузку в любое время после остановки и допускать большой интервал изменения мощности. При ограниченном $\rho_{\text{зап}}$ нельзя эксплуатировать ЯР в таком режиме без умения оценивать характер изменения $\rho_{\text{зап}}$ при изменении мощности ЯР. Переходные режимы имеют место также при возникновении неисправностей, требующих снижения мощности или временной остановки ЯР.

В книге при решении задач, как правило, используется Международная система единиц (СИ), чаще в более привычных дольных единицах (см. приложение 29). Результаты расчетов даются также в тех единицах, которые пока сохраняются на шкалах измерительных приборов, установленных на пультах ЯЭУ, в таблицах термодинамических свойств воды и водяного пара и в других справочных таблицах, графиках, номограммах, используемых эксплуатационным персоналом. Соотношения между единицами различных систем приведены в приложениях 1—7.

Предваряющее каждый параграф краткое изложение физической сущности вопроса и соответствующие соотношения, графики и таблицы имеют иногда приближенный характер, но их точность вполне достаточна для решения эксплуатационных задач, оценки характера протекания физико-теплотехнических процессов, сопровождающих работу ЯР в различных режимах, и принятия решения по обеспечению ядерной безопасности и работоспособности активной зоны.

Обозначения в книге по возможности приведены в соответствии с обозначениями в современной литературе по ядерной энергетике для вузов.

В приложении дан справочный материал в объеме, необходимом для решения задач.

Книга предназначена для инженерно-технического персонала, занимающегося эксплуатацией ЯЭУ, а также для тех, кто готовится к этой работе. Она может быть полезна всем, кого интересуют вопросы ядерной энергетики.

Автор глубоко благодарен товарищам по совместной работе, в обсуждении с которыми выработывались методы решения многих эксплуатационных задач, и всем, кто высказал свои замечания после выхода в свет предыдущих изданий книги.

Все критические замечания и пожелания по содержанию и структуре книги, выбору задач и методам их решения будут приняты автором с благодарностью.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АЗ — аварийная защита (система, орган)
АР — автоматический регулятор (система, орган)
АЭС — атомная электростанция
ВВР — водо-водяной реактор
ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор
ВКВ — верхний концевой выключатель
ВП — выгорающий поглотитель
ГЦН — главный циркуляционный насос первого контура (иногда ЦНПК)
ИК — ионизационная камера
КИВ — коэффициент использования времени
КИМ — коэффициент использования мощности (иногда КУМ)
КО — компенсатор объема
КР — компенсатор реактивности
КС — компенсирующий стержень
МКУ — минимально контролируемый уровень мощности
НКВ — нижний концевой выключатель
НФИ — нейтронно-физические измерения
ПА — пусковая аппаратура
ПГ — парогенератор
ПДД — предельно допустимая доза облучения
ПДП — предельно допустимое поступление радиоактивного вещества в организм человека
ПДУ — предельно допустимый уровень облучения
ПОР — потенциально-опасная работа (иногда ЯОР)
РБ — радиационная безопасность
РБМК — реактор большой мощности кипящий (канальный)
РК — регулировочная кассета
СУЗ — система управления и защиты реактора
ТВС — тепловыделяющая сборка
твэл — тепловыделяющий элемент
ТК — технологический канал, топливная кассета
ТКР — температурный коэффициент реактивности
ТР — ядерный реактор с конкретными характеристиками, используемыми при решении задач в данной книге
ТТИ — теплотехнические измерения
ТТН — теплотехническая надежность
ТТП — теплотехнические проверки
ТЭР — температурный эффект реактивности
ЦНПК — циркуляционный насос первого контура (иногда ГЦН)
ЦР — цепная ядерная реакция
ЯБР — ядерная безопасность реактора
ЯОР — ядерно-опасные работы (иногда ПОР)
ЯР — ядерный реактор
ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 1.1. АТОМ. АТОМНОЕ ЯДРО. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Атом — это мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства. Атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронной оболочки с вращающимися по орбитам вокруг ядра электронами. Ядро состоит из A нуклонов: Z положительно заряженных частиц — протонов (p) и $(A - Z)$ нейтральных частиц — нейтронов (n). A (число нуклонов в ядре) называют *массовым числом*, а Z (число протонов) — *зарядовым числом*, определяющим порядковый номер элемента в Периодической таблице элементов Д. И. Менделеева. Атом с конкретными A и Z называют *нуклидом*, а совокупность нуклидов с одинаковым Z — *химическим элементом*. Ядро нуклида X обозначают так: A_ZX . Нуклиды с одинаковым Z , но различным A (т. е. различным числом нейтронов) называют *изотопами* данного элемента. Например, водород имеет изотопы ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ (${}^2_1\text{D}$), ${}^3_1\text{H}$ (${}^3_1\text{T}$), уран — ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ и т. п. Нуклиды, имеющие одинаковое A , но различное Z и $(A - Z)$, называют *изобарами* (${}^{135}_{53}\text{I}$, ${}^{135}_{54}\text{Xe}$, . . .). Число Z полностью определяет химический элемент, а числа Z и $A - Z$ — нуклид. Известно около 2000 нуклидов, включая полученные искусственно. В последнее время синтезирован изотоп 107-го химического элемента. Самым тяжелым естественным химическим элементом является уран ($Z = 92$). Условно нуклиды по их атомной массе делят на легкие ($A < 20$), средние ($20 < A < 100$) и тяжелые ($A > 100$).

В ядерной физике массу частиц принято выражать в *атомных единицах массы* (*а. е. м.*); 1 а. е. м. определена как $1/12$ часть массы нуклида ${}^{12}_6\text{C}$ и равна $1,6605 \cdot 10^{-24}$ г. Массы нуклонов очень близки к 1 а. е. м., поэтому массовое число A с точностью до целого числа определяет массу M атома (атомную массу) в атомных единицах массы (см. приложение 11). Разность массы нуклида, выраженной в а. е. м., и массового числа называют *избытком массы* $\delta M = M - A$. Для нуклида ${}^{12}_6\text{C}$ $\delta M = 0$, для всех других нуклидов $\delta M \neq 0$. Масса ядра меньше массы нуклида на величину масс электронов в электронной оболочке данного атома. В нейтральном атоме количество электронов в оболочке равно заряду ядра Z . Если количество электронов меньше или больше Z , атом превращается в *ион* — частицу, несущую соответственно положительный или отрицательный заряд. Процесс превращения нейтральных атомов в

ионы называется *ионизацией*. Ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов равны, называется *плазмой*.

Протон — это положительно заряженная элементарная частица, в свободном состоянии стабильная. Заряд его равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (единичный заряд), масса покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-23}$ г. Протон — это ядро атома водорода ${}^1\text{H}$. *Нейтрон* — нейтральная элементарная частица, в свободном состоянии неустойчива и превращается в протон путем β -распада с периодом полураспада 11,7 мин. Масса покоя нейтрона $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-23}$ г, что примерно на $2,5 m_e$ больше массы протона. В стабильном ядре нейтрон не распадается.

Электрон — стабильная отрицательно заряженная элементарная частица с массой $m_e = 9,109 \cdot 10^{-24}$ г и единичным зарядом.

Размер атома определяется радиусом наиболее удаленной от ядра электронной орбиты ($\sim 10^{-13}$ см). Приблизненно

$$R_a \approx 5 \cdot 10^{-3} (M_a \gamma)^{1/3} \text{ см},$$

где M_a — масса атома, г; γ — плотность вещества, г/см³.

Радиус атомного ядра зависит от массового числа A :

$$R_{\text{я}} \approx 1,4 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \text{ см}. \quad (1.1.1)$$

Взаимодействие составных частей атома и ядра происходит в различных полях, характеризующихся *электромагнитными* (взаимодействие зарядов), *гравитационными* (притяжение масс) и *ядерными* (притяжение нуклонов) силами. Притяжение разноименно и отталкивание одноименно заряженных частиц подчиняется закону Кулона:

$$F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{Z_1 e Z_2 e}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{\epsilon} \frac{Z_1 e Z_2 e}{r^2} \text{ Н}. \quad (1.1.2)$$

где Z_i — количество единичных взаимодействующих зарядов $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, находящихся друг от друга на расстоянии r (м) в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ (в вакууме $\epsilon = 1$); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) — электрическая постоянная; $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9$ Н·м²/Кл² — постоянный коэффициент в системе СИ.

По этому закону электроны оболочки атома притягиваются к ядру, а протоны внутри ядра отталкиваются друг от друга. Квантом взаимодействия является *фотон* — нейтральная частица излучения с нулевой массой покоя. Фотон ядерного происхождения называют *γ -квантом*. Энергия излучения всегда равна энергии целого числа квантов, а энергия отдельного кванта (фотона) зависит от частоты ν (с⁻¹). Фотон всегда движется со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с:

$$E = h\nu \text{ Дж}; \quad \lambda = c/\nu \text{ м}, \quad (1.1.3)$$

где λ — длина волны излучения, м; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — *постоянная Планка* (квант действия, универсальная постоянная, определяющая связь между корпускулярными и волновыми свойствами микрочастиц).

Гравитационные силы притяжения нуклонов определяются законом Ньютона:

$$F_H = f \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ Н}, \quad (1.1.4)$$

где m_1, m_2 — массы взаимодействующих нуклонов, кг; r — расстояние между ними, м; $f = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ — гравитационная постоянная. Гравитационными силами в ядре можно пренебречь (см. задачу 1.1.2.).

Ядерные силы притяжения нуклонов (*сильное взаимодействие*) обладают свойствами: *близкодействия* (короткодействия) — радиус действия $\sim 10^{-13}$ см; *зарядовой независимости* (равнодействия); *насыщения* (взаимодействие только в пределах соседних нуклонов, окружающих данный нуклон); эти силы — *самые мощные* из всех известных в природе (на два порядка больше электромагнитных сил). Квантами взаимодействия нуклонов в поле ядерных сил (в *мезонном поле*) являются *мезоны* — нестабильные элементарные частицы. Суммарная энергия взаимодействия нуклонов в ядре определяется ядерными силами притяжения всех нуклонов и электростатическими силами отталкивания протонов и называется *энергией связи ядра*. Она равна работе, которую необходимо совершить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, или, иначе говоря, равна энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов. Например, $E_{\text{св}}({}_1^2\text{H}) = 2,2 \text{ МэВ}$; $E_{\text{св}}({}_2^4\text{He}) = 28,2 \text{ МэВ}$; $E_{\text{св}}({}_{92}^{235}\text{U}) = 1780 \text{ МэВ}$.

Для определения изменения энергии ядра необходимо воспользоваться законом Эйнштейна, согласно которому каждой массе m (кг) соответствует определенная энергия E (Дж), каждому изменению массы Δm соответствует определенное изменение энергии ΔE и наоборот:

$$E = mc^2; \quad \Delta E = \Delta mc^2, \quad (1.1.5)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

В ядерной физике удобно энергию и массу измерять в электрон-вольтах (эВ). $1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ — энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов в 1 В. Если массу выражать в а. е. м., то

$$E = 931 m \text{ МэВ}. \quad (1.1.6)$$

Следовательно, 1 а. е. м. соответствует энергетический эквивалент 931 МэВ, или $1,492436 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$.

Энергии связи ядра $E_{\text{св}}$ соответствует *дефект массы* ядра Δm , который равен разности между суммой масс покоя нуклонов, составляющих ядро, и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \quad (1.1.7)$$

где $m_p, m_n, m_{\text{я}}$ — массы протона, нейтрона и ядра соответственно, а. е. м. В этом случае

$$E_{\text{св}} = 931 \Delta m \text{ МэВ}.$$

Энергия связи может быть выражена через массы нейтральных атомов — исходного M и атомов водорода M_H :

$$E_{св} = 931 [ZM_H + (A - Z)m_n - M] \text{ МэВ.}$$

Эта формула более удобна, так как в справочных таблицах обычно даются массы атомов, а не ядер. Массы электронов атомов, которые входят в формулу, автоматически исключаются, так как они берутся до и после реакции с разными знаками.

Отношение полной энергии связи ядра к массовому числу дает среднее значение энергии связи на один нуклон и называется *удельной энергией связи*:

$$\mathcal{E} = E_{св}/A = \frac{931}{A} [ZM_H + (A - Z)m_n - M] \text{ МэВ.} \quad (1.1.8)$$

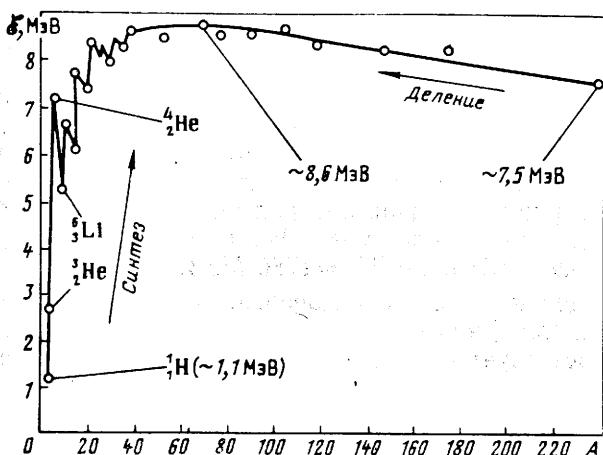


Рис. 1.1.1. Зависимость \mathcal{E} от массового числа нуклида

Чем больше \mathcal{E} , тем устойчивее ядро. На рис. 1.1.1 приведена зависимость \mathcal{E} от массового числа нуклидов. Наличие максимума кривой говорит о возможности двух способов высвобождения ядерной энергии: при синтезе легких ядер в более тяжелые и при делении самых тяжелых на два ядра средней массы. В обоих случаях образующиеся новые ядра имеют большую удельную энергию связи, чем исходные. Следовательно, в таких реакциях будет высвобождаться энергия (см. задачи 1.1.9 и 1.1.11).

Нейтрон, поглощенный ядром, увеличивает энергию ядра на энергию связи присоединенной частицы

$$E_n = 931 [(M_{Z, A + m_n}) - M_{Z, A+1}] \text{ МэВ,} \quad (1.1.9)$$

где m_n , $M_{Z, A}$, $M_{Z, A+1}$ — массы нейтрона и нуклида до и после поглощения нейтрона, а. е. м.

При делении тяжелого ядра нейтроном на два осколка происходит изменение массы на величину

$$\Delta m_f = m_{\text{я}} + m_n - (m_1 + m_2 + \nu_f m_n), \quad (1.1.10)$$

где $m_{\text{я}}$, m_n , m_1 , m_2 — массы исходного ядра, нейтрона и ядер-осколков соответственно, а. е. м.; ν_f — количество свободных нейтронов, образовавшихся при делении. Соответственно энергия деления равна

$$E_f = 931 \Delta m_f. \quad (1.1.11)$$

Задачи с решениями

1.1.1. Оценить плотность ядерного вещества, концентрацию нуклонов в ядре и среднее расстояние между центрами соседних нуклонов.

Решение. Плотность ядерного вещества равна $\gamma_{\text{я}} = m_{\text{я}}/V_{\text{я}}$, где $m_{\text{я}}$ — масса ядра, г; $V_{\text{я}}$ — объем ядра, см^3 . Учитывая, что $m_n \approx m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-24}$ г, а $Z + N = A$, получаем, используя (1.1.1),

$$m_{\text{я}} = m_n(A - Z) + m_p Z \approx 1,67 \cdot 10^{-24} A \text{ г};$$

$$V_{\text{я}} \approx (4/3) \pi R_{\text{я}}^3 = (4/3) \pi (1,4 \cdot 10^{-13})^3 A \approx 10^{-28} A \text{ см}^3.$$

Таким образом,

$$\gamma_{\text{я}} \approx 1,67 \cdot 10^{-24} A / 10^{-28} A \approx 10^{14} \text{ г/см}^3 = 100 \text{ млн. т/см}^3.$$

Концентрация нуклонов в ядре постоянна:

$$N_{\text{я}} = A/V_{\text{я}} \approx A/(10^{-28} A) = 10^{38} \text{ нуклон/см}^3.$$

Среднее расстояние d между центрами двух нуклонов в ядре равно диаметру нуклона. Так как $V_{\text{нукл}} \approx V_{\text{я}}/A$, то, учитывая (1.1.1), находим $\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \pi R_{\text{я}}^3/A$; $d = 2R_0 \approx 2,8 \cdot 10^{-13}$ см.

1.1.2. Чему равна энергия взаимодействия: а) двух протонов, находящихся на расстоянии $r = 10^{-10}$ см; б) двух нейтронов на таком же расстоянии друг от друга?

Решение. а) Протоны, отталкиваясь, согласно закону Кулона (1.1.2) разлетаются с кинетической энергией

$$E_{\text{К}} = F_{\text{К}} r = 9 \cdot 10^9 (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / 10^{-12} = 23 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} \approx 1,44 \text{ кэВ}.$$

б) Нейтроны в данном случае находятся на расстоянии, большем радиуса действия ядерных сил, и поэтому не взаимодействуют. Притяжением нуклонов в поле гравитационных сил (1.1.4) можно пренебречь:

$$E_{\text{Н}} = F_{\text{Н}} r = 6,67 \cdot 10^{-11} (1,67 \cdot 10^{-27})^2 / 10^{-12} \approx 10^{-52} \text{ Дж} \ll E_{\text{К}} \approx$$

$$\approx 10^{-16} \text{ Дж};$$

$$F_{\text{К}}/F_{\text{Н}} \approx 10^{-16} / 10^{-52} = 10^{36}!$$

1.1.3. Ядро ^{235}U разделилось на осколки — ядра $^{95}_{38}\text{Sr}$ и $^{139}_{54}\text{Xe}$. Оценить, с какой кинетической энергией разлетаются осколки в момент, когда они находятся на расстоянии, равном сумме их радиусов.

Решение. Кинетическая энергия, с которой отталкиваются одновременно заряженные частицы (1.1.2) на расстоянии $R_{\text{я}} \approx R_{\text{Sr}} + R_{\text{Xe}} \approx 14 \cdot 10^{-13}$ см (1.1.1),

$$E_{\text{к}} = 9 \cdot 10^9 \cdot 38 \cdot 54 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / (14 \cdot 10^{-15}) \text{ Дж} \approx 211 \text{ МэВ.}$$

1.1.4. Какая энергия соответствует 1 г вещества?

Решение. Используя (1.1.5) и соотношения единиц из приложений 3 и 4, получаем $E = mc^2 = 9 \cdot 10^{13}$ Дж = $25 \cdot 10^3$ МВт·ч = $21,5 \cdot 10^9$ ккал = $56,2 \cdot 10^{25}$ МэВ.

1.1.5. Какую массу уносит электромагнитное излучение нити накала электролампы мощностью 100 Вт за 1000 ч работы?

Решение. Используя (1.1.5) и данные приложения 3, находим $\Delta m = E/c^2 = 100 \cdot 1000 \cdot 3,6 \cdot 10^3 / 9 \cdot 10^{16} = 4 \cdot 10^{-6}$ г = $2,4 \cdot 10^{18}$ а. е. м.

1.1.6. Чему равна полная и удельная энергия связи изотопа кислорода $^{16}_8\text{O}$?

Решение. Согласно (1.1.8) и данным приложения 11, для $^{16}_8\text{O}$ получаем

$$E_{\text{св}} = 931(8 \cdot 1,00782 + 8 \cdot 1,00866 - 15,99491) \approx 127,5 \text{ МэВ}; \quad \mathcal{E} = E_{\text{св}}/16 = 7,97 \text{ МэВ.}$$

1.1.7. Отличается ли средняя удельная энергия связи нуклонов в ядре ^9_4Be от энергии связи при удалении одного нейтрона из этого ядра?

Решение. Средняя удельная энергия связи (1.1.8)

$$\mathcal{E} = \frac{931}{9} [(4 \cdot 1,00782 + 5 \cdot 1,00866) - 9,01218] \approx 6,4 \text{ МэВ.}$$

Энергия связи при удалении одного нейтрона (1.1.9)

$$E_{\text{св}, n} = 931(1,00866 + 8,00531 - 9,01218) \approx 1,67 \text{ МэВ.}$$

Малая энергия связи при выбивании одного нейтрона позволяет использовать реакцию (γ, n) на Be для получения нейтронов, бомбардируя ядра ^9_4Be γ -квантами с энергией не меньше 1,7 МэВ (§ 3.2). Такими же свойствами обладает ядро дейтерия.

1.1.8. Сколько энергии высвобождается при синтезе ядра гелия ^4_2He из свободных нуклонов и ядер дейтерия? Чему равна удельная энергия связи нуклонов ядра гелия?

Решение. Удельная энергия связи при образовании ядра He из свободных нуклонов (1.1.8)

$$\mathcal{E} = \frac{931}{4} (2 \cdot 1,00782 + 2 \cdot 1,00866 - 4,00260) \approx 7 \text{ МэВ.}$$

При синтезе ядра He из двух ядер дейтерия на каждый нуклон выделится

$$\mathcal{E} = \frac{931}{4} (2,01410 + 2,01410 - 4,00260) \approx 6 \text{ МэВ.}$$

Удельную и полную энергию связи можно оценить непосредственно по кривой рис. 1.1.1. Например, при синтезе ${}^4_2\text{He}$ из ядер ${}^1_1\text{H}$: $\mathcal{E}({}^1_1\text{H}) \approx 1,1$ МэВ; $\mathcal{E}({}^4_2\text{He}) \approx 7,2$ МэВ, следовательно, $E_{\text{св}}({}^4_2\text{He}) \approx A_{\text{He}}[\mathcal{E}({}^4_2\text{He}) - \mathcal{E}({}^1_1\text{H})] \approx 4(7,2 - 1,1) = 24,4$ МэВ и на каждый нуклон выделится $24,4/4 \approx 6$ МэВ.

1.1.9. Ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$, поглотив нейтрон, разделилось на два осколка и три нейтрона. Сколько энергии выделится при делении, если осколками оказались иттрий ${}^{89}_{39}\text{Y}$ и неодим ${}^{144}_{60}\text{Nd}$?

Решение. В соответствии с (1.1.11), (1.1.10) и данными приложения 11

$$E_f = 931 [(235,04393 + 1,00866) - (88,90543 + 143,90990 + 3 \cdot 1,00866)] \approx 197 \text{ МэВ.}$$

Этот результат близок к полученному в задаче 1.1.3. Оценка непосредственно по кривой рис. 1.1.1 дает

$$E_f = A_{\text{Y}}[\mathcal{E}(\text{Y}) - \mathcal{E}(\text{U})] + A_{\text{Nd}}[\mathcal{E}(\text{Nd}) - \mathcal{E}(\text{U})] = 89(8,6 - 7,5) + 144(8,3 - 7,5) \approx 213 \text{ МэВ.}$$

1.1.10. Какая часть полной энергии, эквивалентной массе покоя ядра, выделяется при делении ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$?

Решение. При делении ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ выделяется $E_f \approx 200$ МэВ (см. задачу 1.1.9). Энергия покоя ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ согласно (1.1.6) $E_U \approx 931 \cdot 235 \approx 2,2 \cdot 10^5$ МэВ. Следовательно, при делении выделяется всего лишь $E_f/E_U \approx 200/(220 \cdot 10^3) \approx 10^{-3} = 0,1\%$ полной энергии, т. е. в 10^3 раз меньше, чем при аннигиляции такой же массы вещества.

1.1.11. Во сколько раз больше энергии выделится при синтезе 1 кг гелия по сравнению с энергией деления 1 кг урана?

Решение. Из решений задач 1.1.8 и 1.1.9 видно, что при синтезе гелия на каждый нуклон выделяется $27:4 \approx 6,8$ МэВ энергии, а при делении урана $197:236 = 0,8$ МэВ. Следовательно, при синтезе и делении одинакового количества (по массе) гелия и урана в первом случае энергии выделится в $6,8:0,8 \approx 8,5$ раза больше.

В действительности в настоящее время гелий синтезируют не из свободных нуклонов, а из изотопов водорода (дейтерия, трития), при этом на каждый нуклон выделяется от 3,5 до 6 МэВ. При делении урана с учетом выхода различных осколков выделяется ~ 200 МэВ на ядро, т. е. 0,85 МэВ на нуклон. Таким образом, в реакциях синтеза гелия может выделиться в 4—7 раз больше энергии, чем при делении такого же количества (по массе) изотопов урана.

Контрольные вопросы и задачи

1. Оценить массы (в а. е. м. и г) и размеры (объем и радиус) молекул H_2O и UO_2 ($\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 10,2$ г/см³).

2. Оценить, во сколько раз объем ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ больше объема ядра ${}^1_1\text{H}$.
3. С какой примерно скоростью разлетаются в момент деления осколки ${}^{238}\text{U}$ при симметричном делении?
4. Сколько энергии выделится при синтезе D и T (${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + \Delta m$) общей массой 1 кг? Как распределяется энергия между n и He?
5. Какой дефект массы соответствует энерговыработке ЯР при работе на $N = 100$ МВт в течение года?
6. Чему равна энергия, выделяющаяся при использовании 1 г вещества путем: а) сжигания органического топлива, б) деления тяжелых ядер, в) синтеза легких ядер, г) аннигиляции вещества?
7. Сколько нужно разделить ${}^{235}\text{U}$, чтобы получить энергию, соответствующую 1 г вещества?
8. Почему в реакциях деления тяжелых ядер на единицу массы выделяется меньше энергии, чем при синтезе легких ядер?
9. Какой процент массы вещества, участвующего в реакциях синтеза и деления, излучается в виде нейтронов?

§ 1.2. РАДИОАКТИВНОСТЬ

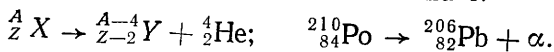
Ядро как система взаимодействующих нуклонов может находиться в различных энергетических состояниях. Состояние, при котором ядро устойчиво, называется *основным*. Ядра, имеющие избыток энергии по сравнению с основным состоянием, находятся в *возбужденном* состоянии. Причиной возбуждения могут стать естественные внутриядерные процессы взаимодействия нуклонов или энергия, полученная извне при различных ядерных реакциях (см. § 1.3). В возбужденном состоянии ядро находится конечное время, пока избыток энергии не будет унесен из ядра. Природные неустойчивые ядра, так же как и искусственно возбужденные, переходят в устойчивое состояние путем радиоактивного распада. Распад происходит только при условии, что разница масс исходного ядра $m_{\text{я}}$ и суммы масс частиц после распада m_i и соответствующая ей энергия положительны (см. задачу 1.2.1):

$$\Delta E = 931 \left(m_{\text{я}} - \sum_i m_i \right) > 0. \quad (1.2.1)$$

При $\Delta E < 0$ реакция возможна только под внешним воздействием.

Радиоактивный распад — это самопроизвольное, случайное, с определенной вероятностью превращение энергетически неустойчивого ядра в другое ядро (или ядра) с новым зарядом, массой или энергетическим состоянием. Наиболее характерны следующие виды распада.

Альфа-распад. Из тяжелого ядра ($Z \geq 84$, $A \geq 208$) вылетает α -частица (ядро гелия ${}^4_2\text{He}$); атомный номер нового ядра уменьшается на две единицы, а массовое число — на 4:

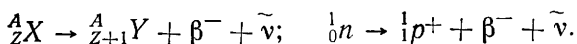


Практически вся энергия распада уносится α -частицей в виде кинетической энергии. Вследствие большой массы и двойного за-

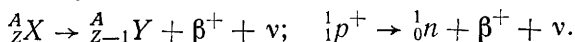
ряда α -частицы имеют небольшую длину свободного пробега. Слой воздуха толщиной в несколько сантиметров или лист бумаги останавливает большинство α -частиц. Максимальный пробег α -частиц в воздухе при изменении E_α от 1 до 10 МэВ меняется от 0,52 до 10,5 см, а при $E_\alpha=5$ МэВ составляет 3,52 см; в биологической ткани соответственно меняется от 0,0072 до 0,12 мм и при $E_\alpha=5$ МэВ равен 0,044 мм.

Бета-распад. Различают *электронный* (β^-) и *позитронный* (β^+) распады. (Электрон ядерного происхождения называют β -частицей.)

β^- -Распад происходит с испусканием ядром электрона (β^- -частицы) и антинейтрино ($\bar{\nu}$) вследствие превращения внутри ядра нейтрона в протон. Число Z нового ядра увеличивается на единицу, A не изменяется:



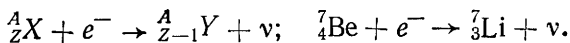
β^+ -Распад сопровождается испусканием ядром позитрона (β^+ -частицы, античастицы электрона) и нейтрино (ν) вследствие превращения внутри ядра протона в нейтрон. Число Z нового ядра уменьшается на единицу, A не изменяется:



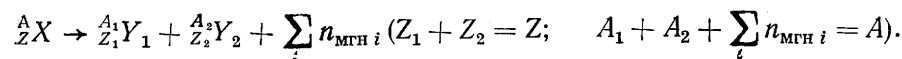
Как правило, позитронный распад происходит после возбуждения ядра в результате внешнего воздействия. Ядра природных нуклидов имеют $\Delta E_\beta < 0$. Продукты β^\pm -распадов являются изобарами.

Максимальный пробег β -частиц с $E_\beta=1-10$ МэВ в воздухе меняется в интервале 292—3350 см, а в биологической ткани — от 0,335 до 4,3 см. При $E_\beta=5$ МэВ пробег в воздухе равен 17 м, а в биологической ткани — 2,11 см.

К бета-распаду относится также *электронный захват* (K -захват), когда ядро захватывает электрон, расположенный на наиболее близкой орбите электронной оболочки атома. Один из протонов ядра поглощает электрон, превращаясь в нейтрон и испуская нейтрино. Число Z нового ядра уменьшается на единицу, A не изменяется:

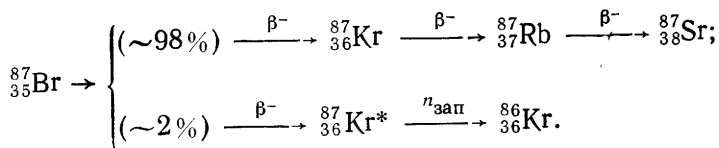


Самопроизвольное (спонтанное) деление тяжелых ядер. Ядро делится на два ядра-осколка с большим избытком нейтронов в них. Часть этих нейтронов (1—2 из каждого осколка) вылетает мгновенно (мгновенные нейтроны $n_{\text{МГН}}$):



Одновременно часть энергии возбуждения излучается в виде γ -квантов (мгновенное γ -излучение). Но и после этого осколки остаются в возбужденном состоянии с избытком нейтронов, которые путем β -распада превращаются в протоны ($n \rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$) до

тех пор, пока ядро не станет стабильным. Некоторые осколки деления (примерно 50 нуклидов) после первого β^- -распада находятся еще в сильно возбужденном состоянии и вместо нескольких последующих β^- -распадов испускают нейтрон, запаздывающий по отношению к моменту деления ядра (см. § 3.3):



Так как время жизни ядра-излучателя $n_{\text{зап}} ({}_{36}^{87}\text{Kr}^*)$ в возбужденном состоянии крайне мало ($\sim 10^{-14}$ с), то период полураспада его равен периоду β^- -распада ядра-предшественника (${}_{35}^{87}\text{Br}$). Эти нейтроны в зависимости от времени запаздывания принято делить на шесть групп (см. приложение 12).

В некоторых случаях ядро может оставаться в возбужденном состоянии сравнительно долго. Переход его в основное состояние происходит путем испускания кванта γ -излучения. Этот вид радиоактивного распада называют *изомерным переходом*, а ядра до и после распада — *изомерами*.

При радиоактивном распаде вновь образовавшееся ядро чаще всего тоже радиоактивно, поэтому образуется цепочка радиоактивных нуклидов — *радиоактивное семейство*, находящееся в динамическом равновесии и заканчивающееся стабильным нуклидом. У трех семейств исходным ядром является природный нуклид (${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb}$; ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow {}_{82}^{207}\text{Pb}$; ${}_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow {}_{82}^{208}\text{Pb}$). Четвертое равновесное семейство начинается с искусственного нуклида нептуния (${}_{93}^{237}\text{Np} \rightarrow \dots \rightarrow {}_{83}^{209}\text{Bi}$). Всего в настоящее время известно 1514 нуклидов, из них 280 стабильных, 67 естественно и 1167 искусственно радиоактивных. Химических элементов открыто 107, из которых 81 имеют стабильные нуклиды. 15 химических элементов (от 93-го до 107-го) получены искусственно.

Альфа-, бета-частицы и γ -кванты называют *радиоактивным излучением*, а способность ядер к излучению — *радиоактивностью*. Поскольку излучение при взаимодействии с атомами среды приводит к образованию электрических зарядов разных знаков (электронов и ионов), его называют *ионизирующим излучением*.

Радиоактивный распад происходит по экспоненциальному закону:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau} = N_0 e^{-(0,693/T)t} = N_0 2^{-t/T}, \quad (1.2.2)$$

где N_0 , $N(t)$ — начальное и текущее (в момент времени t) количество радиоактивного нуклида; λ — *постоянная распада*, представляющая собой вероятность распада ядра в единицу времени, с^{-1} ; $\tau = 1/\lambda$ — *среднее время жизни* радиоактивного нуклида — время, в течение которого число ядер уменьшается в $e = 2,7$ раза, с;

$T = 0,693 \tau$ — *период полураспада* — время, в течение которого распадается в среднем половина исходного количества радиоактивного вещества.

На рис. 1.2.1 закон радиоактивного распада представлен графически в полулогарифмическом масштабе, удобном для определения количества радиоактивного нуклида в любой момент времени при известном периоде полураспада T и начальной концентрации ядер N_0 или массе нуклида m_0 .

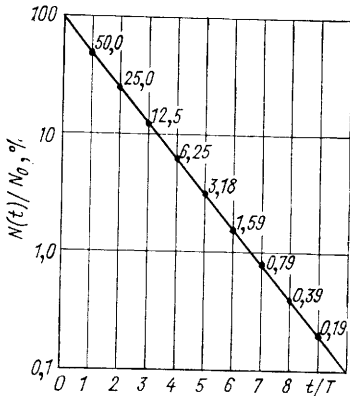


Рис. 1.2.1. Закон радиоактивного распада

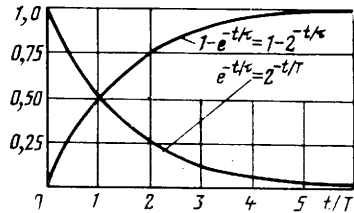


Рис. 1.2.2. Экспоненты распада и накопления радиоактивного нуклида

На рис. 1.2.2 представлены экспоненты распада радиоактивного нуклида ($e^{-t/\tau} = 2^{-t/T}$) и накопления стабильного продукта распада ($1 - e^{-t/\tau} = 1 - 2^{-t/T}$). Вторая экспонента определяет также скорость накопления радиоактивного нуклида, имеющего период полураспада T и рождающегося с постоянной скоростью, что часто имеет место для некоторых нуклидов при работе ЯР на стационарной мощности.

Как видно из рис. 1.2.1 и 1.2.2, при распаде и накоплении радиоактивного вещества через 4—5 периодов полураспада его концентрация всего на 6—3 % отличается от предельного значения, равного нулю при распаде и равновесному значению при накоплении. Это упрощает решение некоторых эксплуатационных задач (§ 2.5 и 2.7).

Если радиоактивный нуклид рождается вследствие распада материнского продукта, имеющего постоянную распада λ_1 (c^{-1}), и в свою очередь сам распадается с постоянной распада λ_2 (c^{-1}), то его концентрация в любой момент времени t (с)

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (1.2.3)$$

Если же в начальный момент уже было какое-то количество дочернего нуклида, то

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}, \quad (1.2.4)$$

где N_{01} и N_{02} — концентрации материнского и дочернего нуклидов при $t=0$, ядер/см³. Последняя зависимость характерна для накопления ¹³⁵Xe из распадающегося ¹³⁵I после остановки ЯР (§ 2.5).

Скорость превращений радионуклида в источнике (образце, материале), т. е. число распадов dN за малый интервал времени dt , отнесенное к этому интервалу, вызывают *активностью* \mathcal{A} , расп/с:

$$\mathcal{A} = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{N}{\tau} = \frac{0,693}{T} N. \quad (1.2.5)$$

Активность прямо пропорциональна постоянной распада λ (с⁻¹) и числу радиоактивных атомов N , имеющих в источнике в данный момент времени. Уменьшается активность во времени по экспоненциальному закону:

$$\mathcal{A}(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t} = \mathcal{A}_0 2^{-t/T} = \mathcal{A}_0 e^{-t/\tau}. \quad (1.2.6)$$

Единицу измерения активности в СИ — *распад в секунду* — называют *беккерель* (Бк). Для применения рекомендуются кратные единицы (см. приложение 29): ЭБк, ПБк, ГБк, МБк и др. Вне-системной единицей активности (см. задачу 1.2.3) является *кюри* (Ки): 1 Ки = 3,700 × 10¹⁰ расп/с = 37 ГБк.

Масса m (г) и активность \mathcal{A} (Бк) данного радионуклида, имеющего массовое число A и период полураспада T (с), без учета массы неактивных компонентов образца связаны соотношениями

$$m = 2,40 \cdot 10^{-24} AT \mathcal{A}; \quad \mathcal{A} = 4,17 \cdot 10^{23} m/AT. \quad (1.2.7)$$

Отношение активности \mathcal{A} (Бк) образца (материала) к массе m (г), объему V (см³, л), площади S (см²) поверхности (для поверхностных источников) или длине L (см) (для линейных источников) образца называют *удельной, объемной, поверхностной* или *линейной* активностью соответственно:

$$\mathcal{A}_m = \mathcal{A}/m; \quad \mathcal{A}_V = \mathcal{A}/V; \quad \mathcal{A}_S = \mathcal{A}/S; \quad \mathcal{A}_L = \mathcal{A}/L. \quad (1.2.8)$$

Задачи с решениями

1.2.1. Возможен ли α -распад полония ²¹⁰₈₄Po и железа ⁵⁶₂₆Fe?
Решение: α -распад должен идти по схеме



Согласно (1.2.1)

$$\Delta E_{\text{Po}} = 931 [209,982866 - (205,974446 + 4,002603)] \approx +5,4 \text{ МэВ} > 0;$$

$$\Delta E_{\text{Fe}} = 931 [55,934932 - (51,940514 + 4,002603)] \approx -7,6 \text{ МэВ} < 0.$$

Таким образом, α -распад ²¹⁰Po происходит самопроизвольно; α -распад ⁵⁶Fe без затраты энергии невозможен.

1.2.2. Сколько ²¹⁰₈₄Po ($T_{\text{Po-210}} = 138,4$ сут) распадется и останется через 10 сут от 4 мг исходного количества?

Решение. Согласно (1.2.2)

$$N(10 \text{ сут}) = 4 \cdot 2^{-10/138,4} = 4 \cdot 0,95 = 3,8 \text{ мг.}$$

Следовательно, распадается 0,2 мг.

1.2.3. Какова активность: а) 1 г $^{226}_{88}\text{Ra}$ и б) 1 г $^{238}_{92}\text{U}$ ($T_{\text{Ra-226}} = 1620$ лет; $T_{\text{U-238}} = 4,5 \cdot 10^9$ лет).

Решение. Согласно (1.2.5) и (1.3.2):

$$\text{а) } \mathcal{A}_{\text{Ra}} = \lambda N = \frac{0,693}{T_{\text{Ra}}} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{A} = 3,6 \cdot 10^{10} \text{ Бк} \approx 1 \text{ Ки.}$$

Примечание. Менее точное (определенное ранее) значение периода полураспада $^{226}_{88}\text{Ra}$ $T_{\text{Ra}} = 1590$ лет дает $\mathcal{A}_{\text{Ra}} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, которое было принято в качестве единицы измерения активности — *кюри*;

$$\text{б) } \mathcal{A}_{\text{U}} = 12,4 \cdot 10^3 \text{ Бк} = 0,335 \text{ мкКи} = 3 \cdot 10^{-7} \mathcal{A}_{\text{Ra}}.$$

1.2.4. Активность образца $^{24}_{11}\text{Na}$ равна 0,5 Ки. На сколько уменьшится число распадов в минуту через 3 ч? ($T_{\text{Na}} = 15,06$ ч.)

Решение. С учетом соотношений (1.2.6) уменьшение активности составляет

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{A}(t) &= \mathcal{A}_0 - \mathcal{A}(t) = \mathcal{A}_0(1 - 2^{-t/T}) = \\ &= 0,062 \text{ Ки} = 23 \cdot 10^8 \text{ Бк} \approx 14 \cdot 10^{10} \text{ расп/мин.} \end{aligned}$$

1.2.5. Измерение активности \mathcal{A} радиоактивного нуклида через каждые 2 ч дало следующие результаты: 21,5; 12,5; 7,0; 3,9; 2,2; 1,3 Ки. Оценить период полураспада данного нуклида.

Решение. Исходя из (1.2.6), получаем

$$N_1/N_2 = \mathcal{A}_1/\mathcal{A}_2 = 2^{\Delta t/T}, \text{ откуда } T = 0,693 \Delta t / \ln(\mathcal{A}_1/\mathcal{A}_2),$$

где Δt — интервал времени между измерениями активности; $\mathcal{A}_1/\mathcal{A}_2$ — отношение активности каждого измерения к последующему. В данном случае $\Delta t = 2$ ч;

$$\frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_2} = \frac{21,5}{12,5} = 1,72; \quad \frac{12,5}{7,0} = 1,78; 1,79; 1,77; 1,69.$$

Среднее значение $\mathcal{A}_1/\mathcal{A}_2 = 1,75$. Следовательно,

$$T = 0,693 \cdot 2 / \ln 1,75 \approx 2,5 \text{ ч.}$$

1.2.6. Определить активность $^{60}_{27}\text{Co}$ ($T_{\text{Co}} = 5,25$ года) через 5 лет, если в данный момент она равна 100 мКи = $3,7 \cdot 10^9$ Бк.

Решение. Согласно (1.2.6) $\mathcal{A} = 3,7 \cdot 10^9 e^{-0,693 \cdot 5/5,25} \approx 1,9 \times 10^9 \text{ Бк} \approx 52 \text{ мКи.}$

1.2.7. Определить массу и удельную активность α -активных нуклидов: 1) $^{210}_{84}\text{Po}$ ($T_{\text{Po}} = 138,4$ сут) и 2) $^{238}_{92}\text{U}$ ($T_{\text{U}} = 4,468 \cdot 10^9$ лет), имеющих активность 1 Ки и 1 Бк.

Решение. Согласно (1.2.7) получаем:

$$1) \text{ для Po } m(1 \text{ Ки}) = 2,40 \cdot 10^{-24} \cdot 210 \cdot 138,4 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} =$$

$= 223 \cdot 10^{-6}$ г; m (1 Бк) $= 6 \cdot 10^{-15}$ г; $A_m = 3,7 \cdot 10^{10} / (223 \cdot 10^{-6}) \approx 1,66 \times 10^{14}$ Бк/г $= 4,5 \cdot 10^3$ Ки/г;

2) для U m (1 Ки) $= 2,98$ т; m (1 Бк) $= 0,08$ мг; $A_m = 12,4 \times 10^3$ Бк/г $= 3,35 \cdot 10^{-7}$ Ки/г.

1.2.8. Объемная активность аэрозолей в помещении высотой $h = 3$ м составляет $A_V = 10^{-9}$ Ки/л. Определить A_S после полного осаждения аэрозолей на пол площадью S (m^2).

Решение:

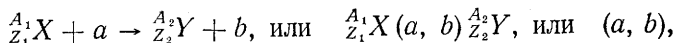
$$\begin{aligned} A_S \text{ (Ки/м}^2\text{)} &= A \text{ (Ки)/} S \text{ (м}^2\text{)} = A_V \text{ (Ки/л)} V \text{ (л)/} S \text{ (м}^2\text{)} = \\ &= A_V \text{ (Ки/л)} V \text{ (м}^3\text{)} \cdot 10^3 \text{ (л/м}^3\text{)/} S \text{ (м}^2\text{)} = 10^3 A_V S h / S = 10^3 A_V h = \\ &= 10^3 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \text{ Ки/м}^2 = 11,1 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^2 = 11,1 \text{ Бк/см}^2. \end{aligned}$$

Контрольные задачи

1. Определить активность 1 т природного урана и массу ^{210}Po , имеющего такую же активность.
2. В каком объеме нужно разбавить 5 мг ^{24}Na , чтобы объемная активность раствора не превышала $8 \cdot 10^{-9}$ Ки/л?
3. Сколько спонтанных делений и α -распадов происходит за 1 ч в 1 г ^{238}U ?

§ 1.3. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с частицами, в том числе γ -квантами или друг с другом:



где X и Y — начальное и конечное ядра; a и b — вступающая в реакцию и образующаяся частицы (ядра). Для ЯР главную роль играют реакции ядер с нейтронами и γ -квантами.

Вероятность той или иной ядерной реакции зависит от типа ядер и энергии (скорости) нейтронов, γ -квантов и ядер в момент взаимодействия. Мерой вероятности взаимодействия нейтрона с ядром любого нуклида является *микроскопическое сечение* σ , которое физически можно представить как долю площади поперечного сечения ядра, попав в которую, налетающий нейтрон вызывает ту или иную ядерную реакцию: $\sigma = \sigma_a + \sigma_s$ — полное микроскопическое сечение взаимодействия, см^2 , где $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$ — сечение поглощения (σ_f — сечение деления; σ_γ — сечение радиационного захвата); σ_s — сечение рассеяния.

Единицей измерения σ в СИ является квадратный метр (сантиметр). В справочных таблицах используется внесистемная единица *барн* (б): $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2 = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Произведение числа ядер (атомов) в единице объема N_n (ядер/ см^3) на σ (см^2) называют *макроскопическим сечением* и обозначают Σ (см^{-1}):

$$\Sigma = \sigma N_n.$$

Физически Σ — это мера вероятности взаимодействия частицы с ядрами вещества в 1 см^3 при пробеге расстояния в 1 см .

В осуществлении и управлении цепной реакцией и обеспечении безопасной эксплуатации ЯР наиболее важными ядерными реакциями являются: деление тяжелых ядер, рассеяние нейтронов, поглощение нейтронов и γ -квантов, выбивание из ядра нейтронов и заряженных частиц (реакция замещения) и др.

Деление ядер (n, f). Некоторые тяжелые ядра ($A > 90$), будучи неустойчивыми, могут делиться при облучении их нейтронами. Минимальная энергия, которую необходимо внести в ядро, чтобы получить данную ядерную реакцию, называют *пороговой энергией* $E_{\text{пор}}$ (иногда — *энергией активации*). Вносимая нейтроном (или другой частицей) в ядро энергия называется *энергией возбуждения* $E_{\text{возб}}$. Она равна сумме кинетической энергии частицы $E_{\text{кин}}$ и энергии ее связи $E_{\text{св}}$ в образовавшемся ядре. Чтобы произошло деление ядра, необходимо выполнение условия $E_{\text{возб}} = E_{\text{кин}} + E_{\text{св}} > E_{\text{пор}}$. Например, нуклиды ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и некоторые другие имеют $E_{\text{пор}} \approx E_{\text{св}}$, поэтому они делятся тепловыми нейтронами. Нуклиды ^{232}Th , ^{238}U и некоторые другие имеют $E_{\text{пор}} \gg E_{\text{св}}$, поэтому они могут делиться только нейтронами, имеющими $E_{\text{кин}} > 1 \text{ МэВ}$. Поглотив нейтрон, тяжелое ядро при $E_{\text{возб}} > E_{\text{пор}}$ спустя $\sim 10^{-14} \text{ с}$ делится на два осколка, которые в течение $\sim 10^{-17} \text{ с}$ разлетаются в противоположных направлениях с ускорением под действием кулоновских сил отталкивания. Пройдя расстояние $\sim 10^{-8} \text{ см}$ (до находящегося рядом атома), они приобретут суммарную кинетическую энергию $\sim 165 \text{ МэВ}$ (см. табл. 1.5.1). С этого момента, будучи многозарядными ионами (электроны потеряны при делении), осколки тормозятся, отдавая энергию окружающим атомам и молекулам. Находясь в сильно возбужденном состоянии ($E_{\text{возб}} \approx 20 \text{ МэВ}$), осколки деления сразу же (мгновенно) отдают часть этой энергии вылетающим нейтронам и γ -квантам (1—2 нейтрона и 2—3 γ -кванта на каждый осколок). Имея все еще большой избыток нейтронов, но недостаточную для их вылета $E_{\text{возб}}$, осколки претерпевают несколько (в среднем три) β -распадов с превращением нейтрона в протон и излучением антинейтрино. После β -распада, как правило, излучаются еще γ -кванты и очень редко испускается нейтрон (запаздывающий).

Итак, при делении тяжелого ядра образуются (рис. 1.3.1) осколки деления A_1, A_2 , мгновенные нейтроны и γ -излучение, продукты радиоактивного распада осколков (которые вместе с осколками называют *продуктами деления*), β - и γ -излучение осколков и продуктов их распада, антинейтрино, запаздывающие нейтроны.

Осколки деления имеют массовые числа от 72 до 161 (рис. 1.2.3). Наиболее вероятна ($\sim 6,5 \%$) пара осколков с $A_1 \approx 90$ и $A_2 \approx 140$ и соответственно $Z_1 \approx 38$ и $Z_2 \approx 54$. Кинетическая энергия пары осколков изменяется в интервале от 120 до 180 МэВ при средней энергии $\sim 165 \text{ МэВ}$. Пробег осколков, на протяжении которого они передают свою энергию окружающей среде, равен в воздухе $\sim 2 \text{ см}$, в алюминии $\sim 10^{-2} \text{ мм}$, в уране $\sim 10^{-3} \text{ мм}$.

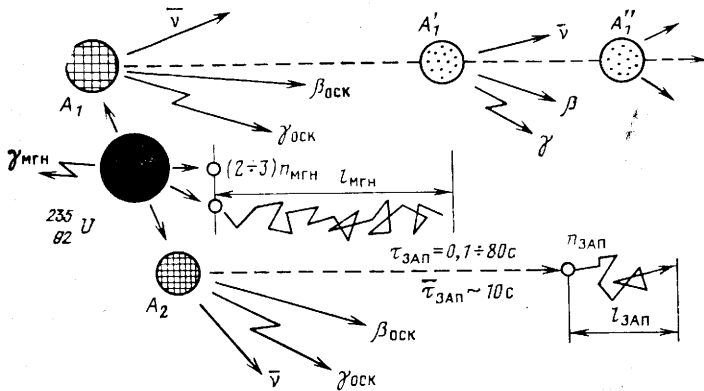


Рис. 1.3.1. Схема деления ядра урана (плутония)

Мгновенные нейтроны рождаются с различной энергией (см. приложение 13). Их среднее число ν_f зависит от энергии нейтронов, вызывающих деление ядра:

$$\nu_f(E_n) = \nu_0 + bE_n.$$

Для $^{235}_{92}\text{U}$ константы b и ν_0 соответственно равны 0,136 1/МэВ и 2,426; для $^{239}_{94}\text{Pu}$ — 0,111 1/МэВ и 2,892. Средняя энергия нейтронов деления равна ~ 2 МэВ, наиболее вероятная $\sim 0,7$ МэВ. Число нейтронов деления ν_f и их средняя энергия \bar{E}_n связаны следующей зависимостью:

$$\bar{E}_n = 0,78 + 621(\nu_f + 1)^{1/2} \text{ МэВ.}$$

Количество мгновенных γ -квантов на одно деление чаще всего принимают в среднем равным пяти при средней энергии 2,5 МэВ (см. приложение 14). В ЯР образуется также γ -излучение от вторичных эффектов после деления ядра (см. приложение 15).

Рассеяние нейтронов (n, n') — это ядерная реакция, в результате которой нейтрон при столкновении с ядром теряет часть энергии (замедляется) и изменяет направление движения (рассеивается, отражается). Если потерянная нейтроном энергия изменяет только кинетическую энергию ядра, рассеяние называют

упругим ($^{12}_6\text{C} + n \rightarrow ^{12}_6\text{C} + n'$). Если же ядро возбуждается с последующим переходом в устойчивое состояние путем излучения γ -кванта, рассеяние называют *неупругим* ($^{56}_{26}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}_{26}\text{Fe} + ^{56}_{26}\text{Fe} + \gamma$).

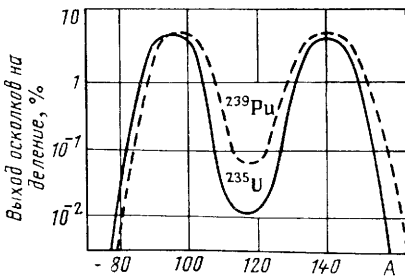


Рис. 1.3.2. Выход осколков деления

$+n'+\gamma$). Реакции рассеяния имеют место в замедлителе, топливе, конструкционных материалах, отражателе и биологической защите. В замедлителе и частично в отражателе происходит в основном упругое рассеяние нейтронов — замедление и отражение. В топливе и на других тяжелых ядрах — неупругое рассеяние: замедление и отражение быстрых нейтронов.

Радиационный захват (n, γ) — реакция, приводящая к поглощению нейтрона и превращению ядра в новый нуклид с последующим излучением γ -кванта (радиацией). Используется в регулирующих стержнях ($^{113}_{48}\text{Cd} + n \rightarrow ^{114}_{48}\text{Cd} + \gamma$) для управления ЯР как реакция выгорания некоторых ВП, для получения новых нуклидов (в том числе делящихся), в биологической защите. Однако реакция (n, γ) приводит к потере нейтронов и части делящихся нуклидов ($^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{236}_{92}\text{U} + \gamma$) и является источником вторичного γ -излучения.

Фотонейтронная (фотоядерная) реакция (γ, n) — реакция выбивания нейтрона из ядер дейтерия и бериллия фотоном (γ -квантом): $^1_2\text{D} + \gamma \rightarrow ^1_0\text{n} + ^1_1\text{p}$, $^9_4\text{Be} + \gamma \rightarrow ^8_4\text{Be} + n$. Играет важную роль при повторных пусках ЯР, имеющего в активной зоне воду или бериллий (см. § 3.2).

Реакции замещения (n, α), (n, p), (α, n) — это ядерные реакции, сопровождающиеся поглощением одной частицы и рождением новой. Для ЯР очень важное значение имеет реакция $^{10}_5\text{B} (n, \alpha) ^7_3\text{Li}$. Она используется в ИК для регистрации нейтронов благодаря высокой ионизирующей способности α -частиц. Сильный поглотитель $^{10}_5\text{B}$, используемый как ВП, вследствие реакции (n, α) превращается в слабый поглотитель нейтронов (выгорает). Наконец, эта реакция является основной в борных регулирующих стержнях. Реакция $^{16}_8\text{O} (n, p) ^{16}_7\text{N}$ приводит к активации воды в активной зоне и воздуха около ЯР вследствие образования радиоактивного нуклида $^{16}_7\text{N}$ (см. приложения 16 и 17). Реакция (α, n) на бериллии используется в искусственных источниках нейтронов, применяемых при пусках ЯР (см. приложение 20). Для ЯР, имеющего в активной зоне бериллий, важную роль играет реакция удвоения нейтронов ($n, 2n$), увеличивающая $\rho_{\text{зак}}$, а также нейтронный поток в подкритическом ЯР.

Число ядерных реакций, происходящих в 1 см^3 за 1 с , называют *скоростью*, или *выходом*, данного типа реакции ω_i ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$). Выход ядерной реакции в конкретной среде при данной скорости (энергии) взаимодействующих частиц и ядер прямо пропорционален количеству частиц и ядер в единице объема, скорости частиц (в общем случае с учетом скорости ядер) и микроскопическому сечению рассматриваемой реакции. Например, для нейтронов

$$\omega_i = n\nu\sigma_i N_{\pi} = \Phi\Sigma_i = \Phi/\lambda_i \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.3.1)$$

где n — плотность нейтронов, см^{-3} ; ν — скорость нейтронов относительно ядер, $\text{см}/\text{с}$; $\Phi = n\nu$ — плотность потока нейтронов,

нейтр/(см²·с); σ_i, Σ_i — микро- и макроскопические сечения i -й реакции, см² и см⁻¹; $N_{\text{я}}$ — концентрация ядер, см⁻³; λ_i — длина пробега частицы в i -й реакции, см.

Концентрация ядер вещества с массовым числом A и плотностью γ (г/см³)

$$N_{\text{я}} = \frac{N_A}{A} \frac{\text{ядер}}{\text{г}} = \gamma \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{A} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}, \quad (1.3.2)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ ядер/(г·атом) — число Авогадро.

Для характеристики поведения нейтронов в процессе рассеяния и поглощения используются следующие понятия.

Длина свободного пробега нейтрона, равная среднему расстоянию, которое проходит нейтрон между двумя актами взаимодействия i -го типа, обратно пропорциональна макроскопическому сечению:

$$\lambda_i = \Sigma_i^{-1} \text{ см } (i = s, a). \quad (1.3.3)$$

Длина рассеяния λ_s (см) — среднее расстояние, которое проходит нейтрон между двумя актами рассеяния.

Длина поглощения λ_a (см) — средний полный путь, который проходит нейтрон от точки рождения до точки поглощения.

Длина переноса $\lambda_{\text{тр}}$ (см) (транспортная длина рассеяния) — среднее расстояние, проходимое нейтроном в первоначальном направлении до поворота на угол $\Theta \geq 90^\circ$:

$$\lambda_{\text{тр}} = \Sigma_{\text{тр}}^{-1} = \lambda_s / (1 - \overline{\cos \Theta}) = 1 / \Sigma_s (1 - \overline{\cos \Theta}) \text{ см}, \quad (1.3.4)$$

где $\overline{\cos \Theta}$ — средний косинус угла рассеяния (для ядер с массовым числом $A > 2$ $\overline{\cos \Theta} \approx 3/2 A$).

Задачи с решениями

1.3.1. Определить количество делений и поглощений без деления за 1 с в размножающей среде с ²³⁵U, где плотность тепловых нейтронов равна 10⁶ нейтр/см³, а концентрация топлива $N_{\text{U-235}} = 5 \times 10^{18}$ ядер/см³.

Решение. Согласно (1.3.1) и приложению 8 при $v = 2,2 \times 10^5$ см/с:

а) количество делений равно $\nu v \sigma_f N_{\text{я}} = 10^6 \cdot 2,2 \cdot 10^5 \cdot 582 \cdot 10^{-24} \cdot 5 \times 10^{18} = 6,4 \cdot 10^8$ дел/(см³·с);

б) количество поглощений без деления ²³⁵U при $\sigma_{\text{в}} = 101 \times 10^{-24}$ см² равно $1,1 \cdot 10^8$ погл/(см³·с).

1.3.2. В активную зону ЯР загружены ²³⁵U и замедлитель нейтронов ⁹Be в гомогенной смеси; отношение ядер $N_{\text{U-235}}/N_{\text{Be-9}} = 0,4$ %. Определить отношение масс топлива и замедлителя.

Решение. Для веществ, находящихся в гомогенной смеси, можно написать (1.3.2)

$$N_{\text{я}} \left(\frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \right) = \frac{m(\text{г})}{V(\text{см}^3)} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{A} \left(\frac{\text{ядер}}{\text{г}} \right).$$

Следовательно,

$$\frac{m_{U-235}}{m_{Be-9}} = \frac{N_{U-235}}{N_{Be-9}} \frac{A_{U-235}}{A_{Be-9}} = 0,004 \frac{235}{9} = 0,104 = 10,4\%.$$

1.3.3. Вычислить длины рассеяния λ_s , поглощения λ_a , переноса λ_{tr} для графита ${}^{12}_6C$, имеющего $A=12$; $\gamma=1,6$ г/см³; $\sigma_s=4,8 \cdot 10^{-24}$ см², $\sigma_a=4,5 \cdot 10^{-7}$ см².

Решение. Согласно (1.3.3) — (1.3.6) $\lambda_i = \Sigma_i^{-1} = (\sigma_i N_C)^{-1}$, где $N_C = 1,6 \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{12} = 8,03 \cdot 10^{22}$ см⁻³; $\lambda_s = 1/\Sigma_s = 1/0,385 = 2,59$ см; $\lambda_a = 1/(3,61 \cdot 10^{-4}) = 2770$ см; $\lambda_{tr} = \lambda_s / (1 - \overline{\cos \Theta}) = \lambda_s / (1 - 2/3A) = 2,74$ см.

Контрольные вопросы и задачи

1. В качестве топлива в ЯР используется 9 т UO₂, а в качестве замедлителя 5 т H₂O. Определить ядерную и массовую концентрации делящегося изотопа ²³⁵U по отношению к воде, если обогащение урана равно 2 %.

2. Вычислить λ_s , λ_a , λ_{tr} и L для ${}^{12}_6C$, H₂O и 4_2He (необходимые константы — см. [8]).

3. Какие ядерные реакции наиболее характерны в различных компонентах ЯР: топливе, замедлителе, отражателе, органах регулирования, биологической защите, конструкционных материалах?

§ 1.4. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ. РЕАКТИВНОСТЬ

Цепная ядерная реакция (ЦР) — это реакция деления ядер урана и плутония нейтронами, рождающимися при делении. Необходимое условие самоподдерживающейся ЦР — рождение в каждом очередном акте деления не менее одного нейтрона. Достаточность этого условия зависит от исхода конкуренции четырех процессов, имеющих место в размножающей среде (среде, содержащей нуклиды ядерного топлива): 1) деления ядер топлива, 2) радиационного захвата в топливе, 3) захвата нейтронов конструкционными материалами активной зоны и неделяющимися компонентами топлива, 4) вылетом нейтронов (утечкой) за пределы размножающей среды. ЦР возможна только в том случае, если хотя бы один из родившихся при делении ядра нейтронов снова произведет деление. Количественная характеристика возможности осуществления ЦР — *эффективный коэффициент размножения* $K_{эф}$, представляет собой отношение числа нейтронов n_2 (или делений ядер) в данном поколении к числу нейтронов n_1 (или делений ядер) в предыдущем, непосредственно предшествующем поколении:

$$K_{эф} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\bar{n} \pm \Delta n}{n_1} = 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta K_{эф}.$$

Значение и знак изменения количества нейтронов (делений) в очередном поколении $\pm \Delta n = n_2 - n_1$ характеризуют скорость и на-

правленность цепной реакции. Физически $\delta K_{эф}$ — это доля изменения количества нейтронов (делений) в новом поколении по отношению к нейтронам (делениям) предыдущего поколения.

При $K_{эф} > 1$ $\delta K_{эф} = K_{эф} - 1$ называют *надкритичностью* ЯР ($\delta K_{эф} > 0$).

При $K_{эф} < 1$ $\delta K_{эф} = K_{эф} - 1 < 0$ и его называют *подкритичностью*: $\delta K_{под} = |\delta K_{эф}|$. Максимально возможная надкритичность, если бы все поглотители были извлечены из активной зоны, называется *запасом надкритичности*: $\Delta K_{эф} = K_{эф}^{полн} - 1$.

Чаще состояние ЯР характеризуют *реактивностью* — относительным отклонением $K_{эф}$ от единицы:

$$\rho = \frac{K_{эф} - 1}{K_{эф}} = \pm \frac{\delta K_{эф}}{K_{эф}} = \pm \frac{\Delta \rho}{n_2}, \quad (1.4.1)$$

что физически представляет собой долю изменения количества нейтронов (делений) в новом поколении по отношению ко всем нейтронам (делениям) этого поколения.

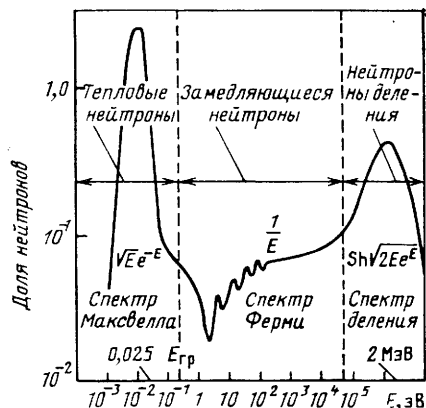
Следует различать понятия «реактивность» и «запас реактивности». *Реактивность* — это степень отклонения реактора от критического состояния. Поскольку в этом случае $K_{эф}$ близок к единице, то $\rho \approx \delta K_{эф}$. *Запас реактивности* $\rho_{зап}$ — это максимально возможная реактивность при полностью извлеченных из активной зоны поглотителях: $\rho_{зап} = \Delta K_{эф} / K_{эф}^{полн}$. В этом случае, как правило (за исключением конца кампании), $K_{эф}$ существенно больше единицы и поэтому $\delta K_{эф} > \rho_{зап}$.

Реактивность характеризует реакцию активной зоны на изменение ее размножающих свойств в результате воздействия различных материальных и геометрических факторов (температуры, концентрации поглотителей нейтронов и т. п.).

Минимальное количество топлива определенной конфигурации и состава, в котором $K_{эф} = 1$ ($\rho = 0$), называют *критической массой*, а соответствующие размеры размножающей среды — *критическими размерами* (объем, радиус и т. п.). Минимальные критические размеры и массу имеет шар. Для ^{235}U такой шар без отражателя имеет массу ~ 48 кг и радиус $\sim 8,5$ см; для ^{239}Pu ~ 17 кг и ~ 6 см; для ^{238}U ~ 16 кг и ~ 6 см соответственно. Используя отражатель, критическую массу можно уменьшить в 2–3 раза. Минимальная критическая масса ЯР на тепловых нейтронах составляет сотни граммов ^{235}U , а ЯР на быстрых нейтронах — десятки килограммов. Например, в реальном ЯР на тепловых нейтронах с объемом активной зоны ~ 2 м³ $m_{крит} = 10 \div 50$ кг ^{235}U , а БН-350 при таком же объеме активной зоны имеет $m_{крит} = 1200$ кг ^{235}U .

При делении ядер U и Pu рождаются нейтроны в широком диапазоне энергий. Распределение нейтронов по скоростям (энергиям) называют *спектром нейтронов*. *Спектр нейтронов деления* (рис. 1.4.1) — жесткий, в нем преобладают нейтроны высоких энергий (быстрые нейтроны): максимальное число нейтронов имеет энергию $\sim 0,7$ МэВ, наибольшая энергия достигает 18 МэВ,

Рис. 1.4.1. Спектр нейтронов (произвольные ед.) в большом ВВР



средняя ~ 2 МэВ. В дальнейшем спектр нейтронов изменяется в зависимости от состава размножающейся среды. При наличии замедлителя спектр нейтронов смягчается, переходя в спектр Ферми (замедляющиеся нейтроны). При энергиях ~ 1 эВ и ниже спектр Ферми переходит в спектр тепловых нейтронов, приближенно описываемый уравнением

Максвелла (спектр Максвелла). Процесс установления спектра тепловых нейтронов под влиянием теплового движения атомов среды, а также химических связей атомов и молекул и кристаллических эффектов называют *термализацией* нейтронов.

Переход от замедления нейтронов к термализации характеризуется *граничной энергией* $E_{гр}$ (энергией *шивки* спектров). Для ВВР $E_{гр} \approx 7 \cdot 10^{-4} \cdot (273 + T)$ эВ, где T — температура среды, $^{\circ}\text{C}$. При $T = 20^{\circ}\text{C}$ энергия $E_{гр} \approx 0,2$ эВ. Чем меньше замедлителя и больше поглотителя в размножающей среде, тем жестче спектр — нейтроны поглощаются в процессе замедления, не достигая теплового равновесия.

Установившийся спектр тепловых нейтронов (спектр Максвелла), находящихся в тепловом равновесии со средой, представляет собой поле свободных нейтронов. Их поведение описывается уравнениями газовой кинетики. Температура *нейтронного газа* ($T_{н.г}$) совпадает с температурой среды T . В поглощающей среде $T_{н.г} > T$ ввиду поглощения нейтронов в процессе замедления. В первом приближении в однородной среде

$$T_{н.г} \approx T (1 + 1,4 \sum_a(T) / \xi \sum_s) K,$$

где $\sum_a(T)$ — макроскопическое сечение поглощения среды при температуре $T(K)$; $\xi \sum_s$ — замедляющая способность среды для быстрых нейтронов, которая может быть взята при $E \approx 1$ эВ, так как при $E \geq 1$ эВ для большинства элементов $\sigma_s = \text{const}$.

Процесс уменьшения кинетической энергии нейтронов в ходе их движения в среде называется *замедлением*.

Движение нейтронов в среде, когда их энергия в среднем остается постоянной, называется *диффузией*. Энергия нейтронов во время диффузии, соответствующая наиболее вероятной скорости максвелловского распределения, определяется температурой среды:

$$E = kT \text{ Дж} = \frac{m_n v_B^2}{2} \text{ Дж} = 8,6 \cdot 10^{-5} T \text{ эВ},$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К $= 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К — постоянная Больцмана; m_n — масса нейтрона, кг; v_n — наиболее вероятная скорость, м/с; $T = t^\circ\text{C} + 273$ — абсолютная температура.

Наиболее вероятная энергия тепловых нейтронов

$$E_n = 1/2 kT \text{ Дж.}$$

Средняя кинетическая энергия нейтронов, имеющих среднюю скорость \bar{v} (м/с),

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2} m_n \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} \frac{h^2}{m\lambda^2} \text{ Дж,} \quad (1.4.2)$$

где $\lambda = h/m\bar{v}$ — длина волны де Бройля, приписываемая частицам в квантовой механике; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Длина волны нейтрона, имеющего кинетическую энергию E (эВ) в интервале энергий 0—100 МэВ,

$$\lambda = 8,9 \cdot 10^{-10} \pi / \sqrt{E} \text{ см.}$$

В зависимости от энергии различают нейтроны: 1) *сверхбыстрые* ($E > 2$ МэВ), 2) *быстрые* ($0,2 \text{ МэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$), 3) *промежуточные* ($0,5 \text{ кэВ} < E < 0,2 \text{ МэВ}$), 4) *надтепловые* ($0,1 \text{ эВ} < E < 0,5 \text{ кэВ}$), 5) *тепловые* ($E < 0,1 \text{ эВ}$), находящиеся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами окружающей среды, 6) *холодные* ($E < 5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$).

Границы перехода от одной группы к другой принципиального значения не имеют. Встречается, например, такое условное разделение: медленные нейтроны ($E < 1 \text{ эВ}$), промежуточные ($1 \text{ эВ} < E < 0,1 \text{ МэВ}$), быстрые ($E > 0,1 \text{ МэВ}$).

ЯР, в которых преобладают нейтроны одной из трех групп (быстрые, промежуточные, тепловые), соответственно называют *реакторами на быстрых, промежуточных, тепловых нейтронах*.

Замедляясь и диффундируя, нейтрон взаимодействует с ядрами размножающей среды и перемещается от места рождения (рис. 1.4.2).

Возраст нейтрона τ (м²) — мера среднего расстояния по прямой $r_{\text{зам}}$, на которое смещается нейтрон от точки рождения с энергией E_0 до точки, где он замедлится до энергии E . Для среды с точечным источником

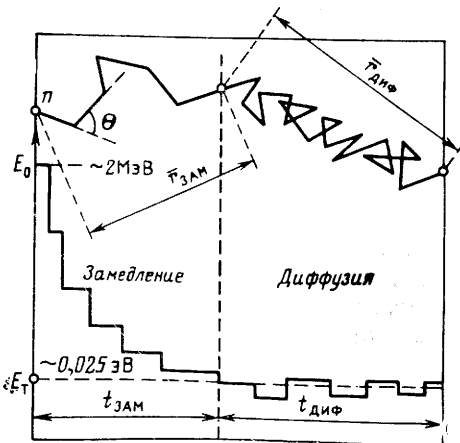


Рис. 1.4.2. Схема замедления и диффузии нейтронов

$$\tau = \frac{1}{6} \bar{r}_{\text{зам}}^2 = \ln \frac{E_0}{E} / 3\xi \sum_s^2 (1 - \overline{\cos \Theta}).$$

Средний логарифмический декремент энергии ξ нейтрона при столкновении его с ядром характеризует потерю энергии нейтроном, имевшим до столкновения энергию E_1 , а после столкновения E_2 :

$$\xi = \overline{\ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right)} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}; \quad \xi_{(A>12)} \approx \frac{2}{A+2/3}.$$

Среднее число столкновений, необходимых для замедления нейтрона деления с энергией E_1 до энергии E_2 в замедлителе с логарифмическим декрементом ξ ,

$$z = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{A}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{18A} \right) \ln \frac{E_1}{E_2}; \quad z_{(A>12)} \approx \frac{A}{2} \ln \frac{E_1}{E_2}.$$

Для замедления от средней энергии деления $E_0=2$ МэВ до тепловой энергии $E_T=0,025$ эВ количество столкновений

$$z = 18,2/\xi.$$

Длина диффузии нейтрона L (м) — мера среднего расстояния по прямой ($r_{\text{диф}}$), на которое смещается нейтрон от точки, где он стал тепловым, до точки поглощения. Для среды с точечным источником

$$L^2 = (1/6) \bar{r}_{\text{диф}}^2 = 1/3 \sum_a \sum_s (1 - \overline{\cos \Theta}).$$

Длина миграции нейтрона M (м²) — мера среднего расстояния по прямой, на которое смещается нейтрон от точки рождения до точки поглощения:

$$M^2 = \tau + L^2.$$

Коэффициент замедления нейтронов характеризует способность вещества замедлять нейтроны и сохранять их (не поглощать):

$$K_{\text{зам}} = \xi \sum_s / \sum_a = \xi \lambda_a / \lambda_s,$$

где $\xi \sum_s$ — замедляющая способность замедлителя, м⁻¹.

Время замедления нейтрона $t_{\text{зам}}$ (с) от энергии деления E_0 (скорость v_0) до тепловой энергии E_T (скорость v_T) и время диффузии $t_{\text{диф}}$ (с) теплового нейтрона до поглощения соответственно равны:

$$t_{\text{зам}} = (2/\xi \sum_s) (1/v_T - 1/v_0) \approx 2/\xi \sum_s v_T;$$

$$t_{\text{диф}} = \lambda_a / v = 1/v \sum_a.$$

В ЯР на тепловых нейтронах время жизни нейтрона от рождения до поглощения практически определяется временем диффузии:

$$\frac{t_{\text{диф}}}{t_{\text{зам}}} \approx \frac{1}{2} \xi \frac{\sum_s}{\sum_a} = \frac{1}{2} \xi K_{\text{зам}} \gg 1, \quad t_{\text{диф}} \gg t_{\text{зам}}.$$

С использованием введенных выше характеристик пространственного поведения нейтронов в размножающей среде $K_{эф}$ для критического ЯР на тепловых нейтронах записывается так:

$$K_{эф} = K_{\infty} \rho_{зам} \rho_{диф} = K_{\infty} e^{-B_2 \tau} / (1 + B^2 L^2) = 1. \quad (1.4.3)$$

Последнее уравнение называется критическим.

$K_{эф}$ определяется энергией нейтронов, осуществляющих деление ядер топлива, составом и свойствами компонентов, размерами и формой размножающей среды. В зависимости от характеристик размножающей среды его можно в каждом конкретном случае упростить:

а) $B^2 = (K_{\infty} - 1) / M^2$, если $L^2 \gg \tau$;

б) $B^2 = \ln K_{\infty} / M^2$, если $L^2 \ll \tau$.

В этих формулах K_{∞} — коэффициент размножения нейтронов без учета утечки, т. е. для бесконечной среды (1.4.4); $\rho_{зам} = \exp(-B^2 \tau)$ — вероятность нейтрону избежать утечки в процессе замедления; $\rho_{диф} = (1 + B^2 L^2)^{-1}$ — вероятность нейтрону избежать утечки в процессе диффузии; B — геометрический параметр, который для цилиндрической активной зоны радиусом R (м) и высотой H (м) определяется из соотношения

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2\delta_{эф}} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta_{эф}} \right)^2 \text{ м}^{-2},$$

а для сферической активной зоны радиусом R (м) из соотношения

$$B = \pi / (R + \delta_{эф}) \text{ м}^{-1},$$

где $\delta_{эф}$ — эффективная добавка — уменьшение линейных размеров активной зоны за счет отражателя нейтронов, м.

Коэффициент размножения нейтронов ЯР на тепловых нейтронах для бесконечной среды, т. е. без учета утечки нейтронов,

$$K_{\infty} = \nu_{эф} \mu \varphi \Theta, \quad (1.4.4)$$

где $\nu_{эф}$ — эффективный выход нейтронов на один захваченный нейтрон в топливе; μ — коэффициент размножения на быстрых нейтронах; φ — вероятность избежать резонансного захвата нейтрона ^{238}U ; Θ — коэффициент использования тепловых нейтронов.

Количественными характеристиками распределения нейтронов в размножающейся среде являются следующие величины.

Плотность нейтронов n (нейтр/см³) — отношение числа нейтронов dn' (нейтр) в элементарной сфере объемом dV (см³) к этому объему:

$$n = dn' / dV.$$

Поток нейтронов I_n (нейтр/с) — отношение числа нейтронов dn' (нейтр), падающих на данную поверхность за интервал времени dt (с), к этому интервалу:

$$I_n = dn' / dt.$$

Плотность потока нейтронов Φ [нейтр/(см²·с)] — отношение потока нейтронов dI_n (нейтр/с), проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS (см²):

$$\Phi = dI_n/dS.$$

Физически Φ можно представить как полный путь, который проходят все нейтроны со скоростью v (см/с) в единице объема за единицу времени [(нейтр/см³)/с⁻¹·см]:

$$\Phi = nv \quad (1.4.5)$$

[ВВЭР имеют $\Phi \approx 10^{13} \div 10^{14}$ нейтр/(см²·с), а в быстрых энергетических ЯР $\Phi \approx 10^{15} \div 10^{16}$ нейтр/(см²·с)].

Флюенс нейтронов F (нейтр/см²) — отношение числа нейтронов dn' (нейтр), проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS (см²), т. е. суммарное количество нейтронов, прошедших через единицу площади поверхности за время t (с):

$$F = dn'/dS \text{ нейтр/см}^2 = \Phi t.$$

Ток нейтронов \mathbf{Q} (нейтр/с) — вектор, количественно равный разности числа нейтронов, пересекающих единичную площадку в противоположных направлениях за единицу времени.

Плотность тока нейтронов \mathbf{j} [нейтр/(см²·с)] — вектор, количественно равный разности противоположно направленных плотностей потоков нейтронов.

Задачи с решениями

1.4.1. Чем отличается поведение ЯР в двух случаях: а) при $\delta K_{эф} = +0,002$; б) при $\rho = +0,002$.

Решение. В обоих случаях ЯР надкритичен, ЦР нарастает, но, исходя из физического смысла $\delta K_{эф}$ и ρ следует, что при $\rho = +0,002$ ЦР развивается быстрее, чем при $\delta K_{эф} = 0,002$. Из формулы (1.4.1) следует тот же вывод: при $\delta K_{эф} = 0,002$ $\rho_1 = 0,002/1,002 < 0,002 = \rho$.

1.4.2. Цилиндрический ЯР с бериллиевым отражателем имеет активную зону следующих размеров: высота 2 м, радиус 1 м. Оценить выигрыш за счет бериллиевого отражателя в объеме активной зоны.

Решение. Исходя из значения эффективной добавки, которая примерно равна длине миграции нейтрона в материале отражателя (для ⁹Ве $M \approx 25$ см), определяем объем активной зоны без отражателя и с отражателем:

$$V_{\text{без отр}} = \pi (R + \delta_{эф})^2 (H + 2\delta_{эф}) = 12,3 \text{ м}^3; \quad V_{\text{с отр}} = \pi R^2 H = 6,3 \text{ м}^3.$$

Тогда

$$\Delta V = V_{\text{без отр}} - V_{\text{с отр}} = 6 \text{ м}^3,$$

что составляет $\sim 100\%$ объема активной зоны при наличии отражателя.

1.4.3. ЯР работает на мощности 5 МВт. Потеря нейтронов в результате поглощения без деления составляет 45 %. Сколько нейтронов вылетает за пределы активной зоны?

Решение. Из каждых $\sim 2,5$ нейтрона, рождающихся при делении ядра, один расходуется на поддержание ЦР; $0,45 \cdot 2,5 = 1,1$ поглощается без деления и $2,5 - (1,0 + 1,1) = 0,4$ нейтрона, т. е. 16 %, вылетает из активной зоны.

При работе ЯР на мощности 5 МВт происходит $3,1 \cdot 10^{13} \cdot 5 \cdot 10^3 \approx 1,6 \cdot 10^{17}$ дел/с, так как 1 кВт соответствует $3,1 \cdot 10^{13}$ дел/с (см. задачу 1.5.1). Следовательно, из активной зоны вылетает $1,6 \cdot 10^{17} \times 0,4 = 6,4 \cdot 10^{16}$ нейтр/с.

1.4.4. Плотность нейтронов с энергией $E_1 = 0,025$ эВ равна $n_1 = 10^5$ нейтр/см³, а с энергией $E_2 = 1$ кэВ $n_2 = 10^3$ нейтр/см³. Плотность потока каких нейтронов больше?

Решение. Согласно (1.4.5) и (1.4.2)

$$\Phi_1/\Phi_2 = (n_1/n_2) \sqrt{E_1/E_2} = 0,5; \quad \Phi_1 = 0,5\Phi_2.$$

Таким образом, несмотря на то что плотность тепловых нейтронов в 100 раз больше плотности нейтронов с энергией 1 кэВ, плотность потока тепловых нейтронов в 2 раза меньше.

Контрольные вопросы и задачи

1. На сколько процентов увеличивается количество делений в каждом очередном поколении при $\rho = +0,003$?

2. Определить $\delta K_{эф}$ и ρ для трех значений $K_{эф}$: 1,250; 1,020; 1,001. В каком из этих случаев можно считать, что $\delta K_{эф} \approx \rho$?

3. Определить λ , ν и $t^\circ\text{C}$ нейтронов, имеющих энергию 0,025; 0,1; 1 эВ; 1 кэВ и 2 МэВ.

4. Определить τ нейтронов в ЯР с графитовым замедлителем при $E_n = 10$ эВ.

5. Сколько в среднем потребуется столкновений для уменьшения E_n от 2 МэВ до 200 эВ и до 0,025 эВ при замедлении нейтронов в Ве, С, Н₂O и U?

6. Оценить L нейтронов в активной зоне с водяным замедлителем, если концентрация ²³⁵U по отношению к воде равна 10^{-3} .

7. Определить, какая в среднем энергия передается ядру ¹²C при упругом столкновении нейтрона с $E_n = 1$ МэВ?

8. Сравнить оптимальные критические размеры активной зоны цилиндрического ЯР ($R_{опт} = 0,54$; $H_{опт} = 2,945/V$) с отражателем ($\delta_{эф} = 7$ см) и без отражателя. Размножающая среда имеет характеристики: $\tau = 40$ см², $L^2 = 2$ см², $K_\infty = 1,4$.

9. Определить K_∞ критического ЯР на тепловых нейтронах, вероятность утечки нейтронов из которого равна 5 %.

10. В какой из трех одинаковых по объему активных зон, имеющих сферическую, цилиндрическую и кубическую форму, утечка нейтронов будет наименьшей? Почему? Какая форма самая распространенная? Почему?

11. В двух ЯР — на тепловых и на быстрых нейтронах — плотность нейтронов одинакова. Отличаются ли в них плотности и флюенсы нейтронов?

§ 1.5. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

Ядерный (атомный) реактор (ЯР) — устройство для осуществления управляемой ЦР деления. Основной частью ЯР, где про-

исходит формирование спектра нейтронов, деление ядер топлива и преобразование ядерной энергии в тепловую для последующего использования, является *активная зона*. Она состоит из *ядерного топлива, замедлителя* нейтронов (в тепловых и промежуточных ЯР) и конструкционных материалов. Для отвода тепла от активной зоны и передачи его рабочему телу служит *теплоноситель* (охладитель). Управление ЦР осуществляется органами регулирования. Для уменьшения утечки нейтронов активную зону окружают *отражателем* — неделящимся материалом, хорошо рассеивающим и слабо поглощающим нейтроны. Все эти составные части находятся в корпусе ЯР, закрытого *крышкой*, на которой смонтированы исполнительные механизмы *органов регулирования*. Есть много типов и разновидностей ЯР, отличающихся *назначением* (энергетические, транспортные, размножители, исследовательские и т. п.), *спектром нейтронов* (быстрые, промежуточные, тепловые), структурой активной зоны (гомогенные, гетерогенные), видом теплоносителя и замедлителя (водо-водяные, водо-графитовые, тяжеловодные) и т. д.

При работе ЯР нагрев активной зоны обусловлен передачей кинетической энергии осколков деления окружающим атомам и молекулам среды, замедлением (торможением) и радиационным захватом нейтронов во всех компонентах активной зоны, поглощением мгновенного γ -излучения, а также β и γ -излучения осколков деления и продуктов их распада. О количественном вкладе каждой составляющей можно судить по распределению энергии, высвобождающейся при делении ядра (табл. 1.5.1).

Т а б л и ц а 1.5.1

Составляющая энергии	Энергия	
	МэВ	%
Кинетическая энергия осколков деления: легкого ядра	98	48 } 81
тяжелого ядра	67	
Энергия мгновенного γ -излучения	7	3,5 } 6
Кинетическая энергия нейтронов деления	5	
Энергия β -излучения осколков и продуктов их распада	9	4,5 } 8
Энергия γ -излучения осколков и продуктов их распада	7	
Энергия антинейтрино	10	5
Полная энергия деления	203	100

Кинетическая энергия осколков и β -частиц превращается в тепловую в непосредственной близости от точки деления. Вся энергия антинейтрино и часть энергии нейтронов и γ -квантов уносится ими за пределы активной зоны ЯР. Частично это компенсируется энергией, выделяющейся при радиационном захвате нейтронов

(~ 7 МэВ). При расчетах считают, таким образом, что на один акт деления ядра ^{235}U выделяется энергия $E_f \approx 200$ МэВ (см. задачу 1.5.1).

С точностью, которая достижима в настоящее время при калориметрическом измерении средней энергии деления одного ядра урана, получена энергия $E_f \approx 175$ МэВ. Ядерная энергия в миллионы раз больше энергии химических реакций (при реакции горения $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 4$ эВ).

Мощность ЯР пропорциональна количеству делений ядер топлива в активной зоне в единицу времени. Исходя из общей зависимости, определяющей скорость (выход) ядерных реакций в единице объема среды с концентрацией ядер $N_{\text{я}}$ (ядер/см³) при плотности потока нейтронов Φ [нейтр/(см²·с)], среднюю мощность ЯР с моноэнергетическим спектром нейтронов можно определить по формуле

$$\bar{N} = \bar{\Phi} \Sigma_f E_f V \frac{\text{МэВ}}{\text{с}} = \frac{\bar{\Phi} \Sigma_f E_f V}{6,25 \cdot 10^{15}} \text{ кВт} = \frac{\bar{\Phi} \Sigma_f V}{C} \text{ кВт}, \quad (1.5.1)$$

где $\bar{\Phi}$ — средняя плотность потока нейтронов в активной зоне, нейтр/(см²·с); Σ_f — макроскопическое сечение деления топлива, см⁻¹; V — объем активной зоны, исходя из которого определяется концентрация топлива, см³; E_f — энергия деления одного ядра, которая превращается в тепловую, МэВ; C — количество делений в секунду, соответствующее мощности 1 кВт, дел/(с·кВт) (см. задачу 1.5.1).

Важными характеристиками активной зоны ЯР являются:

удельная топливная мощность, т. е. мощность, приходящаяся на единицу массы урана (энергонапряженность ядерного топлива),

$$\bar{P}_m = \frac{\bar{N}}{m_{\text{U}}} = \frac{\bar{\Phi} \Sigma_f V}{C m_{\text{U}}} = \frac{\bar{\Phi} \Sigma_f V x}{C m_{\text{U} \cdot 235}} \text{ кВт/кг}, \quad (1.5.2)$$

где m_{U} — масса загруженного в активную зону урана, кг; x — обогащение урана изотопом ^{235}U ($m_{\text{U} \cdot 235} = x m_{\text{U}}$);

удельная объемная мощность, т. е. мощность, приходящаяся на единицу объема активной зоны,

$$\bar{P} = \frac{\bar{N}}{V} = \bar{\Phi} \Sigma_f E_f \text{ МэВ}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}) = \frac{\bar{\Phi} \Sigma_f}{C} \text{ кВт/см}^3.$$

Максимальная плотность тепловыделения в современных ВВЭР достигает 200—300 МВт/м³ при средней плотности 50—100 МВт/м³, а в энергетических быстрых ЯР она в 4—5 раз выше. Мощность на единицу массы топлива зависит от его обогащения и типа ЯР.

Удельная мощность и энерговыделение при равномерном распределении всех компонентов по активной зоне и постоянном спектре нейтронов пропорциональны плотности потока нейтронов, который распределяется по активной зоне следующим образом:

а) по высоте цилиндрической активной зоны без отражателя

$$\Phi(z) = \Phi_{0z} \cos(\pi z/H);$$

б) по радиусу цилиндрической активной зоны

$$\Phi(r) = \Phi_{0r} J_0(2,405r/R),$$

где H , R — высота и радиус активной зоны; J_0 — функция Бесселя нулевого порядка; Φ_{0z} , Φ_{0r} — максимальные значения плотности потока по высоте и радиусу активной зоны.

Степень отклонения энерговыделения в различных точках активной зоны от среднего значения характеризуется *коэффициентами неравномерности* по радиусу $k(r)$, высоте $k(z)$ и объему $k(V) = k(r)k(z)$ активной зоны. Максимальный коэффициент неравномерности по объему определяет допустимую мощность ЯР:

$$k_V = k_r k_z = \frac{\Phi_{0r}}{\bar{\Phi}(r)} \frac{\Phi_{0z}}{\bar{\Phi}(z)} = \frac{P_{\text{макс}}}{\bar{P}}, \quad (1.5.3)$$

где $P_{\text{макс}}$, \bar{P} — максимально допустимая и средняя удельная мощность в активной зоне, кВт/м³; k_r , k_z — максимальные коэффициенты неравномерности по радиусу и высоте активной зоны. Если максимумы энерговыделения по радиусу и по высоте не совпадают, то может оказаться, что $k_V \neq k_r k_z$.

Примечание. Иногда пользуются обратной величиной ($\mu_V = 1/k_V$), которую называют *коэффициентом усреднения энерговыделения* (плотности нейтронов).

Мощность ЯР при данном допустимом значении максимальной удельной мощности $P_{\text{макс}}$ тем больше, чем ближе k_V к единице, т. е. чем ближе энерговыделение в каждой точке активной зоны к максимально допустимому.

В активной зоне существуют локальные неоднородности по радиусу твэла, ТК, ТВС, в зонах с различной концентрацией ВП и т. п. Для учета этих эффектов вводятся соответствующие коэффициенты неравномерности, показывающие, во сколько раз максимальное энерговыделение в опасной точке (области) превышает среднее по активной зоне. Например, для ВВЭР и РБМК

$$k_V = k_E k_z k_{\text{ТВС}} k_{\text{мех}} k_{\text{мощ}} k_{\text{погл}}, \quad (1.5.4)$$

где k_E учитывает кассеты с различным обогащением или различной глубиной выгорания топлива; $k_{\text{ТВС}}$ — неравномерность энерговыделения по ТВС; $k_{\text{мех}}$ — неравномерность теплового потока из-за технологических допусков на изготовление твэлов, неточности расчетных методик, перераспределения расходов и т. д.; $k_{\text{мощ}}$ — отклонение мощности, давления, температур, расхода; $k_{\text{погл}}$ — неравномерность, обусловленная наличием подвижных КР в активной зоне (существенно зависит от типа и положения КР).

Выравнивание энерговыделения, стремление приблизить средние мощности и тепловые нагрузки к максимальным — основа современного подхода к созданию мощных ЯР. Уменьшение k_V позволяет

поднять мощность ЯР в том же объеме, существенно увеличить глубину выгорания топлива, т. е. снизить топливную составляющую себестоимости энергии. Используются следующие способы выравнивания энерговыделения.

1. Применение эффективного отражателя нейтронов. Например, в цилиндрической активной зоне без отражателя $k_V \approx 2,32 \cdot 1,57 = 3,64$, а с бериллиевым отражателем $k_V \approx 2,16$. Отражательные свойства вещества характеризуют коэффициентом отражения (альбедо), равным отношению отраженного потока нейтронов к падающему.

Коэффициенты неравномерности по радиусу и высоте цилиндрической активной зоны с отражателем нейтронов примерно равны [6]:

$$k_r = 2,32 \left(1 + \frac{2\delta_{эф}}{R + \delta_{эф}} \right)^{-1}; \quad k_z = 1,57 \left(1 + \frac{2\delta_{эф}}{H + 2\delta_{эф}} \right)^{-1},$$

где $\delta_{эф}$ — эффективная добавка, зависящая от типа отражателя, формы ЯР и примерно равная длине миграции в материале отражателя; R, H — радиус и высота активной зоны.

2. Профилирование топлива по активной зоне: изменение концентрации (обогащения) делящегося нуклида по радиусу активной зоны обратно пропорционально распределению плотности нейтронов. Например, в активной зоне ЯР атомного судна «Отто Хан» обогащение от центра к периферии было принято 2,77; 3,2; 3,89; 4,87 %. В ВВЭР-440 имеются твэлы трех обогащений.

3. Профилирование твердого ВП: расположение его по радиусу и высоте активной зоны в прямой зависимости от распределения плотности нейтронов.

Простейший случай использования ВП — создание радиальных зон с наибольшей концентрацией ВП в центральной зоне и без ВП в периферийной. Повышенное поглощение нейтронов в центре эквивалентно их убыли вследствие утечки на периферии, что уменьшает k_r , однако потеря нейтронов — отрицательный фактор. Профилирование по высоте достигается уменьшением длины стержней с ВП и созданием областей в верхней и нижней частях активной зоны без ВП. Использование ВП уменьшает k_V еще и косвенно, так как $\rho_{зап}$, приходящийся на долю подвижных поглотителей, уменьшается, КР вводятся на меньшую глубину или имеют меньше физический вес и $k_{полг}$ (1.5.4) уменьшается.

Совместное применение профилирования топлива и ВП позволяет получить в малогабаритных энергонапряженных ЯР $k_V \approx 1,5 \div 2,0$.

4. Выбор подвижных поглотителей КР в таком количестве и такой эффективности, чтобы при работе на мощности их расположение вызывало минимальное искажение энерговыделения. На рис. 1.5.1 и 1.5.2 представлены кривые распределения плотности тепловых нейтронов для одного из ЯР на тепловых нейтронах в зависимости от положения органов регулирования. Особенно

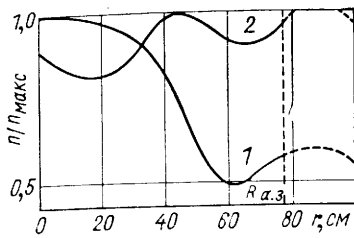
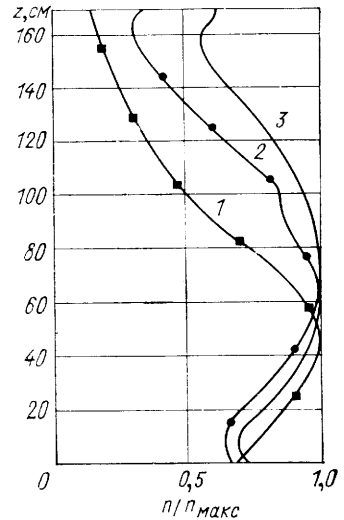


Рис. 1.5.1. Распределение плотности нейтронов по радиусу активной зоны при поднятой (1) и опущенной (2) центральной группе КС

Рис. 1.5.2. Распределение плотности нейтронов по высоте активной зоны при различном положении КС в начале (1), середине (2) и конце (3) кампании



опасно непредусмотренное рассогласование в положении отдельных стержней.

5. Замена части подвижных КР жидким ВП. Например, для ВВЭР использование борного регулирования (раствор борной кислоты в теплоносителе первого контура) снижает k_r до 1,2—1,4 вместо 1,5—2,1 для ЯР с механическими органами СУЗ.

Во время работы ВВЭР на мощности все кассеты СУЗ, за исключением одной регулировочной (РК), введены, находятся вне активной зоны и, следовательно, не вносят искажения в распределение энерговыделения.

При эксплуатации распределение энерговыделения, а следовательно, и коэффициенты неравномерности изменяются вследствие неравномерного выгорания топлива и ВП, накопления поглотителей нейтронов — осколков деления и продуктов их распада.

Средняя мощность ЯР при данной максимальной удельной мощности $P_{\text{макс}}$ (кВт/м^3) обратно пропорциональна k_V :

$$\bar{N} = \frac{1}{k_V} P_{\text{макс}} V; \quad \bar{N}_2 = \bar{N}_1 \frac{k_{V_1}}{k_{V_2}}, \quad (1.5.5)$$

где \bar{N} , \bar{N}_1 , \bar{N}_2 — средние мощности ЯР; k_V , k_{V_1} , k_{V_2} — максимальные объемные коэффициенты неравномерности, соответствующие мощностям \bar{N} , \bar{N}_1 , \bar{N}_2 . Поэтому важно, чтобы используемые методы выравнивания энерговыделения обеспечивали малые значения k_r , k_z , k_V в начале кампании и несущественные их изменения в процессе эксплуатации.

При увеличении неравномерности энерговыделения выше расчетного значения допустимая мощность ЯР должна быть уменьшена на столько, на сколько увеличился k_V .

В энергетических ЯР больших размеров очень важным фактором, ухудшающим распределение энерговыделения и способным привести к пережогу твэлов, являются *ксеноновые колебания (волны)*: периодическое распределение мощности по объему активной зоны, вызываемое обратной связью между мощностью и концентрацией Xe (§ 2.4), причем чем больше размеры активной зоны и чем равномернее распределение энерговыделения, тем больше вероятность их возникновения. Для подавления ксеноновых колебаний необходимо иметь внутриреакторную систему контроля за распределением энерговыделения и укороченные управляющие стержни-поглотители, используемые для подавления колебаний. Стабилизирующее действие на ксеноновые колебания оказывает отрицательной мощности коэффициент реактивности (см. § 2.8).

Для постоянного автоматического контроля за распределением энерговыделения по активной зоне РБМК-1000 оснащена специальной системой, с помощью которой оперативно определяются k_r и k_z , а также коэффициент запаса до критической мощности (см. § 4.3) по каждому ТК. Обычно $k_r = 1,20 \div 1,35$ и $k_z = 1,25 \div 1,40$.

Улучшить условия работы ЯР при наличии неравномерности энерговыделения по радиусу активной зоны позволяет профилирование расхода теплоносителя. Благодаря организации расхода через каждый ТК пропорционально энерговыделению в нем (обычно в группе ТК) средняя температура на выходе из активной зоны близка к температуре на выходе из максимальных напряженных ТК. По замерам этих температур при известных расходах можно оценить k_r .

Например, оператор на ВВЭР-440 один раз в смену при работе на стационарном режиме и после каждого переходного режима определяет расчетным путем k_r :

$$k_r = 0,95 \Delta t_{\text{макс}} / \Delta \bar{t}, \quad (1.5.6)$$

где $\Delta t_{\text{макс}}$ — максимальный перепад температур по ТК; $\Delta \bar{t}$ — средний перепад в ЯР; 0,95 — коэффициент, учитывающий перетечки теплоносителя мимо ТК, которые при фактическом k_r увеличивают $\Delta t_{\text{макс}}$.

Задачи с решениями

1.5.1. Какая скорость деления ^{235}U соответствует мощности 1 кВт?

Решение. В среднем на один акт деления ядра ^{235}U (см. табл. 1.5.1) приходится 200 МэВ тепловой энергии. Учитывая соотношения из приложений 3—5, получаем, что одному делению соответствует энергия $E_f = 200 / (6,25 \cdot 10^{15}) = 3,2 \cdot 10^{-14}$ кВт·с, откуда $1 \text{ кВт} = 3,1 \cdot 10^{13}$ дел/с.

В зависимости от состава и размеров активной зоны, типа отражателя и других причин некоторая часть энергии деления (несколько процентов) уносится нейтронами и γ -квантами за пределы активной зоны, т. е. не используется полезно в ЯЭУ.

Это можно учесть, уменьшив при расчете тепловой мощности значение E_f . Тогда соответственно получим:

а) для $E_f = 195$ МэВ $1 \text{ кВт} = 3,2 \cdot 10^{13}$ дел/с;

б) для $E_f = 190$ МэВ $1 \text{ кВт} = 3,3 \cdot 10^{13}$ дел/с;

в) для $E_f = 185$ МэВ $1 \text{ кВт} = 3,4 \cdot 10^{13}$ дел/с.

Таким образом, если принять энергию $E_f = 200$ МэВ за 100 %, то в каждом из рассмотренных случаев на нагрев активной зоны используется 97,5; 95 и 92,5 % энергии деления.

1.5.2. Сколько нужно разделить и «сжечь» (разделить с учетом радиационного захвата) ^{235}U , чтобы получить энергию 1 МВт·сут в ЯР на тепловых нейтронах? Какому количеству условного топлива (7000 ккал/т у. т.) соответствует энергия деления 1 г ^{235}U ?

Решение. Согласно (1.3.2) в 1 г ^{235}U содержится $N_{\text{U-235}} = 6,02 \cdot 10^{23} / 235 = 2,56 \cdot 10^{21}$ ядер, при делении которых выделяется энергия (см. приложение 5) $E = N_{\text{U-235}} E_f = 2,56 \cdot 10^{21} \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} = 8,2 \cdot 10^{10}$ Вт·с = $19,6 \cdot 10^6$ ккал = 0,949 МВт·сут.

Чтобы получить энергию 1 МВт·сут, необходимо разделить $1/0,949 = 1,05$ г ^{235}U или $1 \text{ МВт} \cdot \text{сут} = 24 \cdot 3,6 \cdot 10^3$ (кВт/с) $\cdot 6,25 \times 10^{15}$ [МэВ/(кВт·с)] = $54 \cdot 10^{19}$ МэВ = $54 \cdot 10^{19}$ (МэВ)/200 (МэВ/дел) = $2,7 \cdot 10^{18}$ дел. Так как масса одного ядра ^{235}U равна $235/(6,02 \times 10^{23}) = 39,0 \cdot 10^{-23}$ г, то масса всех разделившихся ядер равна $2,7 \cdot 10^{18} \cdot 39,0 \cdot 10^{-23} = 1,05$ г.

Если считать, что $E_f = 195$ МэВ (см. задачу 1.5.1), то для получения энергии 1 МВт·сут требуется 1,08 г ^{235}U . Так как $1 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \approx 86,4 \cdot 10^6$ кДж (см. приложение 3), то в СИ получим: при полном делении 1 кг ^{235}U выделяется $82 \cdot 10^9$ кДж тепловой энергии (если $E_f = 195$ МэВ, то $80 \cdot 10^9$ кДж), а с учетом радиационного захвата — $70 \cdot 10^9$ кДж (если $E_f = 195$ МэВ, то 68 кДж).

В зависимости от спектра нейтронов ЯР доля поглощений нейтронов, не приводящих к делению (радиационный захват), будет различной (см. приложение 9). Например, для ЯР на тепловых нейтронах $\sigma_v/\sigma_f = 0,17$ (см. § 2.1). Следовательно, чтобы получить энергию 1 МВт·сут, необходимо разделить 1,05 г ^{235}U ($E_f = 200$ МэВ, см. задачу 1.5.1) и при этом еще 1,05 г $\sigma_v/\sigma_f = 0,18$ г ^{235}U превратится в ^{236}U . Таким образом, всего выгорит при получении энергии 1 МВт·сут 1,23 г ^{235}U .

Для другого спектра нейтронов это соотношение может несколько отличаться (см. задачу 2.1.4).

Делению 1 г ^{235}U соответствует сгорание $19,6 \cdot 10^6 / 7000 = 2,8$ т у. т.

1.5.3. Во сколько раз теплотворная способность ^{235}U больше теплотворной способности: 1) условного топлива ($Q_{\text{усл}} = 7000$ ккал/кг); 2) дизельного топлива ($Q_{\text{диз}} = 10\,000$ ккал/кг)?

Решение. При делении 1 кг ^{235}U выделится тепла $Q_{\text{U-235}} = 949$ МВт·сут (см. задачу 1.5.2), или, так как $1 \text{ МВт} = 860 \times 10^3$ ккал/ч (см. приложение 3), $Q_{\text{U-235}} = 949 \cdot 860 \cdot 10^3 \cdot 24 = 19,6 \times 10^9$ ккал.

Учитывая, что часть ядер $\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_a} 100\% \approx 15\%\right)$ претерпевает радиационный захват (см. § 2.1), фактически при выгорании 1 кг ^{235}U выделится тепла $Q^*_{\text{U-235}} = 19,6 \cdot 10^9 (\sigma_f/\sigma_a)_{\text{U-235}} = 19,6 \cdot 10^9 \times 0,85 = 16,7 \cdot 10^9$ ккал.

Таким образом, теплотворная способность ^{235}U больше теплотворной способности: 1) условного топлива — в 2,4 млн. раз; 2) дизельного топлива — в 1,7 млн. раз (ср. задачу 1.5.5).

1.5.4. Во сколько раз теплотворная способность природного урана с глубиной выгорания 3,5 кг/т и обогащенного до 6% ^{235}U с глубиной выгорания 7 кг/т больше теплотворной способности дизельного топлива?

Решение. Так как теплотворная способность ^{235}U равна $16,7 \cdot 10^9$ ккал/кг (см. задачу 1.5.3), а на 1 кг природного урана согласно условию задачи выгорает $3,5 \cdot 10^{-3}$ кг, то теплотворная способность природного урана с глубиной выгорания 3,5 кг/т равна $16,7 \cdot 10^9 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \approx 58 \cdot 10^6$ ккал/кг, что больше теплотворной способности дизельного топлива ($Q_{\text{диз}} = 10^4$ ккал/кг) в $5,8 \cdot 10^3$ раз.

Аналогично, решая задачу для обогащенного до 6% ^{235}U урана с глубиной выгорания 7 кг/т, получим $Q_{\text{U}}/Q_{\text{диз}} = 11,7 \cdot 10^3$.

1.5.5. Во сколько раз теплотворная способность природного урана при глубине выгорания 15% по ^{235}U больше теплотворной способности дизельного топлива?

Решение. На 1 кг природного урана приходится 7 г ^{235}U , из которых выгорит $7 \cdot 0,15 = 1,05$ г, а разделится $1,05 \sigma_f/\sigma_a = 1,05 \times 582/683 = 0,89$ г, которые и дадут энергию (см. задачу 1.5.2) $Q = 0,89 \cdot 19,6 \cdot 10^6 = 17,4 \cdot 10^6$ ккал/кг.

Следовательно, теплотворная способность урана в данном случае (при глубине выгорания 15%; ср. задачу 1.5.3.) больше теплотворной способности дизельного топлива в $1,7 \cdot 10^3$ раз.

1.5.6. Определить $\bar{\Phi}$ [нейтр/(см²·с)] в гомогенном ЯР с грузкой топлива 100 кг ^{235}U при работе на мощности 200 МВт.

Решение. Из соотношения (1.5.1) для $E_f = 200$ МэВ (см. задачу 1.5.1) получим

$$\bar{\Phi} = \frac{CN}{\Sigma_f V} = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \bar{N}}{\Sigma_f V} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Для гомогенной активной зоны при $\sigma_f = 582 \cdot 10^{-24}$ см², используя (1.3.2), можно записать

$$\Sigma_f V = \sigma_f N_{\text{U-235}} V = \sigma_f \frac{m_{\text{U-235}}}{V} \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{235} V = 1,5 m_{\text{U-235}},$$

где $m_{\text{U-235}}$ — масса ^{235}U , г. Следовательно,

$$\bar{\Phi} = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \bar{N}}{1,5 m_{\text{U-235}}} = \frac{2 \cdot 10^{13} \bar{N}}{m_{\text{U-235}}} = 4 \cdot 10^{13} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

1.5.7. ЯР на тепловых нейтронах имеет загрузку 5 т урана с обогащением по ^{235}U $x = 2\%$. Определить $\bar{\Phi}$ [нейтр/(см²·с)] при работе на мощности 50 МВт.

Решение. Из соотношения (1.5.2), учитывая, что $C=3,1 \times 10^{13}$ дел/(с·кВт), а $\Sigma_f V=1,5 m_{U-235}$ (см. задачу 1.5.6), получаем

$$\bar{\Phi} = 2,1 \cdot 10^{10} \frac{\bar{P}_m}{x} = \frac{2,1 \cdot 10^{10} \cdot 50 \cdot 10^3}{0,02 \cdot 5 \cdot 10^3} = 10^{13} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

1.5.8. При $k_r=1,3$ и $k_z=1,5$ максимально допустимая мощность ЯР равна 100 МВт. Какую мощность можно получить в данном ЯР, если k_V стал равным 2,3?

Решение. Согласно (1.5.5) находим $\bar{N}=100 \cdot 1,3 \cdot 1,5/2,3 = 85$ МВт.

1.5.9. Определить k_V для ВВЭР-1000, имеющего в начале кампании $k_r, k_E=1,35$; $k_z=1,47$; $k_{ТВС}=1,16$; $k_{\text{мех}}=1,15$; $k_{\text{мощ}}=1,08$; $k_{\text{погл}}=1,01$, и для РБМК с $k_r=1,12$; $k_E=1,20$; $k_z=1,50$; $k_{ТВС}=1,10$; $k_{\text{погл}}=1,15$.

Решение. Согласно (1.5.4) $k_V^{\text{ВВЭР}} = 1,35 \cdot 1,47 \cdot 1,16 \cdot 1,15 \times 1,08 \cdot 1,01 \approx 2,9$. Как показывает опыт, к концу кампании $k_V \approx 2,2$. $k_V^{\text{РБМК}} = 1,12 \cdot 1,20 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 1,50 = 2,55$ (без учета $k_{\text{мех}}$ и $k_{\text{мощ}}$). В процессе работы РБМК k_V существенно изменяется вследствие изменения количества стержней СУЗ в активной зоне и различных режимов частичной перегрузки.

1.5.10. Оператор ВВЭР-440 с целью теплофизического контроля активной зоны измерил температуру теплоносителя на выходе некоторых ТВС ($t_{\text{вых}}^{\text{макс}} = 306^\circ\text{C}$), среднюю температуру на входе в ЯР ($t_{\text{вх}} = 267^\circ\text{C}$), средний перепад по активной зоне ($\Delta t = 30^\circ\text{C}$). Чему равен k_r ?

Решение. Согласно (1.5.6) $k_r = 0,95 \frac{306 - 267}{30} = 1,235$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Как распределяется энергия деления ядра между продуктами деления и какая ее часть сразу же превращается в тепловую?
2. Соответствует ли распределение энерговыделения распределению Φ в начале и в конце кампании?
3. Почему Φ от центра к периферии активной зоны уменьшается, а в отдаленном твэле и ТК увеличивается?
4. Как с помощью ВП улучшить распределение энерговыделения в активной зоне?
5. Как влияет изменение распределения Φ на точность измерения мощности ЯР по току ИК?
6. Какое количество дизельного топлива по энергии горения соответствует энергии деления 1 г ^{235}U и 1 г природного урана?
7. Сколько ядер ^{235}U в секунду превращается в ^{236}U в ЯР на тепловых нейтронах на 1 кВт мощности?
8. Оценить, сколько нужно загрузить ^{235}U в активную зону ЯР на тепловых нейтронах, чтобы получить $N=150$ МВт при $\bar{\Phi}=10^{12}$ нейтр/(см²·с).
9. Определить мощность ЯР на тепловых нейтронах при $\bar{\Phi}=5 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с), если загрузка ^{235}U равна 30 кг.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ РАБОТУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Работа ЯР сопровождается многими физическими процессами, влияющими на его энергетические возможности и маневренные качества. Главные из них — выгорание и воспроизводство топлива, шлакование, стационарное и нестационарное отравление ^{135}Xe и ^{149}Sm . На работу ЯР существенное влияние оказывает температура различных компонентов активной зоны и ее изменение.

§ 2.1. ВЫГОРАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Ядерное топливо — материал, содержащий делящиеся и, как правило, воспроизводящие (сырьевые) нуклиды и обеспечивающий протекание ЦР в ЯР. В природе сохранился один делящийся нуклид, $^{235}_{92}\text{U}$ — изотоп урана. Искусственно получают в количестве, достаточном для осуществления ЦР, нуклид $^{239}_{94}\text{Pu}$ — изотоп плутония. В незначительных количествах в ЯР образуются делящиеся изотопы плутония $^{241}_{94}\text{Pu}$, $^{243}_{94}\text{Pu}$, а в специальных установках — изотопы калифорния Cf и др. Природный уран состоит из делящегося нуклида ^{235}U ($\sim 0,7\%$) и ядерного сырья $^{238}_{92}\text{U}$ ($\sim 99,3\%$). Массовое (атомарное) содержание изотопа ^{235}U в уране, выраженное в процентах, называют *обогащением*:

$$x = (m_{\text{U-235}}/m_{\text{U}}) \cdot 100\% \approx (N_{\text{U-235}}/N_{\text{U}}) \cdot 100\%, \quad (2.1.1)$$

где $m_{\text{U-235}}$, m_{U} и $N_{\text{U-235}}$, N_{U} — масса и концентрация ^{235}U и природного урана соответственно. Поступающий на обогатительный завод природный уран с $x_0 = 0,711\%$ превращается в *обогащенный* с повышенным содержанием ^{235}U ($1\% \leq x \leq 90\%$) и *отвальный* уран с пониженным содержанием ^{235}U ($x_{\text{отв}} \approx 0,2 \div 0,3\%$). Соотношение между массами природного урана m_{U} и обогащенного $m_{\text{U}}^{\text{об}}$ имеет вид

$$m_{\text{U}} = m_{\text{U}}^{\text{об}} \frac{x - x_{\text{отв}}}{x_0 - x_{\text{отв}}}, \quad (2.1.2)$$

Минимальное обогащение топлива в быстром ЯР с ^{235}U составляет $\approx 15\%$, а с ^{239}Pu и ^{233}U $\sim 10\%$.

Выгорание ядерного топлива — это процесс превращения ядер делящегося нуклида в ядра других, неделящихся нуклидов вследствие деления и радиационного захвата нейтронов.

Количество разделившегося ^{235}U за время t (сут) работы на мощности N (МВт), т. е. при энерговыработке $Q_{\text{Р}} = Nt$ (МВт·сут),

$$m_{\text{дел}} = 1,05Nt = 1,05Q_{\text{Р}} \text{ г}, \quad (2.1.3)$$

где 1,05 — масса урана (г), который необходимо разделить, чтобы получить энергию 1 МВт·сут (см. задачу 1.5.2); для ^{239}Pu — 1,07 г/(МВт·сут).

Количество образовавшегося ^{236}U вследствие радиационного захвата нейтронов в ^{235}U при работе ЯР на мощности N (МВт) в течение времени t (сут)

$$m_{\gamma} = (\sigma_{\gamma}/\sigma_f) m_{\text{дел}} = 1,05\alpha Q_{\text{РГ}},$$

где $\alpha = \sigma_{\gamma}/\sigma_f$ — параметр, зависящий от энергии нейтронов, взаимодействующих с топливом (см. приложение 9).

Количество выгоревшего (т. е. разделившегося и претерпевшего радиационный захват ^{235}U при работе ЯР на мощности N (МВт) в течение времени t (сут) при энерговыработке $Q_{\text{Р}}$ (МВт·сут)

$$m_{\text{выг}} = m_{\text{дел}} + m_{\gamma} = 1,05(1 + \alpha)Nt \text{ г.} \quad (2.1.4)$$

В ЯР на тепловых нейтронах для ^{235}U $\alpha = 0,17$ и

$$m_{\text{выг}} = 1,23Nt \text{ г.} \quad (2.1.5)$$

Если выражать мощность в мегаваттах, а время работы в часах, то для ^{235}U получим

$$m_{\text{выг}} = 51 \cdot 10^{-3}Nt \text{ г} = 0,051Q_{\text{Р}} \text{ г,} \quad (2.1.6)$$

где 0,051 — удельный расход топлива, г/(МВт·ч); $Q_{\text{Р}}$ — энерговыработка, МВт·ч.

Скорость выгорания прямо пропорциональна мощности ЯР. Например, для ^{235}U

$$dm_{\text{выг}}/dt = 0,051N \text{ г/ч.} \quad (2.1.7)$$

Если в качестве топлива используется природный или обогащенный уран, то при работе ЯР на мощности кроме основного изотопа ^{235}U частично делится также ^{238}U , что учитывается коэффициентом размножения на быстрых нейтронах μ .

Кроме того, часть энергии деления ядра уносится за пределы активной зоны вместе с нейтронами и γ -излучением (см. § 1.5). Если учесть эту потерю коэффициентом $\eta_{a,z}$ и деление ^{238}U коэффициентом μ , то в общем случае количество выгоревшего ^{235}U при работе ЯР на мощности N (МВт) в течение времени t (сут)

$$m_{\text{выгU-235}} = \frac{1,05(1 + \alpha)}{\mu\eta_{a,z}} Nt \text{ г.} \quad (2.1.8)$$

Для ^{239}Pu (см. приложение 9 и задачу 2.1.2)

$$m_{\text{выг Pu}} = 0,063N \text{ (МВт)} t \text{ (ч)} = 1,52N \text{ (МВт)} t \text{ (сут)} \text{ г.} \quad (2.1.9)$$

Один из важнейших показателей экономичности ЯР (ЯЭУ и АЭС в целом) — глубина выгорания топлива. Чаще всего среднюю глубину выгорания \bar{V} определяют как количество энергии, полученной с единицы массы топлива, загруженного в ЯР, за время

его пребывания в активной зоне. Это есть *удельное энерговыделение*.

Если ЯР с загрузкой $m_{\text{топ}}$ (кг) выработал N (МВт) · t (сут) = $= Q_K$ (МВт · сут) энергии, то глубина выгорания

$$\bar{B} = Q_K / m_{\text{топ}} = Nt / m_{\text{топ}} \text{ МВт} \cdot \text{сут} / \text{кг}. \quad (2.1.10)$$

Иногда $m_{\text{топ}}$ выражают в тоннах, а \bar{B} — в мегаватт-сутках на тонну (МВт · сут/т). В этом случае можно записать

$$\bar{B} = P_m \text{ (МВт/т; кВт/кг)} t \text{ (сут)} \text{ МВт} \cdot \text{сут} / \text{т},$$

где P_m — энергонапряженность ядерного топлива (1.5.2).

Для металлического урана \bar{B} составляет 3—3,5 МВт · сут/кг, а для его соединений может быть значительно больше. В современных ВВЭР с обогащением 3—5 % при кампании 2—3 года с использованием частичных перегрузок \bar{B} достигает значения 30—40 МВт · сут/кг, а в максимально напряженных твэлах и больше. ВВЭР-440 при кампании топлива 2—3 года с частичной перегрузкой 1 раз в год имеет $\bar{B} = 28$ МВт · сут/кг. В быстрых и высокотемпературных ЯР $\bar{B} \approx 100 \div 150$ МВт · сут/кг. В экспериментальном БР (Франция) достигнуто выгорание 210 МВт · сут/кг (ГВт · сут/т). Максимальная глубина выгорания в отдельных твэлах всегда больше \bar{B} на величину, пропорциональную коэффициентам неравномерности (см. § 1.5). Предельная глубина выгорания определяется технологической стойкостью твэлов в зависимости от обогащения топлива, типа теплоносителя, материала оболочки и конструкции твэла.

В ЯР на мощности N (МВт) со строго установленным временем между очередными частичными перегрузками $\tau_{\text{ЯР}}$ (кампания ЯР, эф. ч) за время пребывания топлива (твэлов) в активной зоне $\tau_{\text{топ}} = n \tau_{\text{ЯР}}$ (кампания топлива, эф. ч), т. е. после n перегрузок,

$$\bar{B} = \frac{Nn}{24m_U} \tau_{\text{ЯР}} \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}}. \quad (2.1.11)$$

Для ВВЭР-1000 основным вариантом принят режим работы с $n = 3$, $\tau_{\text{ЯР}} = 7000$ ч, начальным обогащением $x = 3,5 \div 4,5$ %, при этом $\bar{B} \approx 30 \div 40$ МВт · сут/кг U. В тепловых ВВЭР при трех частичных перегрузках в выгружаемом топливе можно добиться глубины выгорания, практически равной начальному обогащению: при $x \approx 3$ % (30 кг $^{235}\text{U}/\text{тU}$) $\bar{B} \approx 30$ МВт · сут/кг U (30 кг $^{235}\text{U}/\text{тU}$), при $x \approx 40$ % $\bar{B} \approx 40$ МВт · сут/кг U и т. д.

Глубину выгорания можно также выражать отношением масс выгоревшего делящегося нуклида, например ^{235}U ($m_{\text{выг}}$, кг), и загруженного топлива ($m_{\text{топ}}$, т):

$$\bar{B}_1 = m_{\text{выг}} / m_{\text{топ}} \text{ кг/т}. \quad (2.1.12)$$

Так как энергии в 1 МВт · сут соответствует $1,23 \cdot 10^{-3}$ кг выгоревшего ^{235}U [см. (2.1.5)], то с учетом (2.1.10)

$$\bar{B}_1 = \frac{m_{\text{выг}} (\text{кг})}{m_{\text{U}} (\text{т})} = \frac{1,23 \cdot 10^{-3} N t}{10^{-3} m_{\text{U}} (\text{кг})} 1,23 \bar{B} \frac{\text{кг}}{\text{т}} ; \quad (2.1.13)$$

$$\bar{B} = \bar{B}_1 \text{ МВт} \cdot \text{сут/т}, \text{ или } \bar{B} = 0,81 \bar{B}_1 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}.$$

Если $m_{\text{выг}}$ и m_{U} брать в одинаковых единицах, то глубину выгорания можно выражать в процентах:

$$\bar{B}_2 = (m_{\text{выг}}/m_{\text{U}}) \cdot 100 \% = 0,1 \bar{B}_1 \%. \quad (2.1.14)$$

Следовательно, $\bar{B}_1 (\text{кг/т}) = 10 B_2 (\%)$ (см. задачу 2.1.11).

Можно относить выгоревший делящийся нуклид ($m_{\text{выг}}$) к загруженному делящемуся нуклиду ($m_{\text{U-235}}; m_{\text{Pu-239}}$):

$$\bar{B}_3 = (m_{\text{выг}}/m_{\text{U-235, Pu-239}}) \cdot 100 \% ; \quad (2.1.15)$$

или уменьшение ядерной концентрации делящегося нуклида за кампанию T к ее первоначальному значению: $\bar{B}_3 = 100 [N_{\text{U-235}}^0 - N_{\text{U-235}}(T)]/N_{\text{U-235}}^0 \%$. Это удобно для высокообогащенного топлива, используемого в ЯР с одной перегрузкой. В транспортных судовых ЯР, а также в небольших теплофикационных или исследовательских ЯР за кампанию выгорает 30—40 % начальной загрузки делящегося нуклида.

Глубину выгорания можно также оценивать по количеству накопившихся осколков деления (см. § 2.3).

Полный расход урана за год для ЯР на тепловых нейтронах электрической мощностью N_3 (МВт), с КПД установки $\eta = N_3/N$ (N — тепловая мощность, МВт), при глубине выгорания \bar{B}_1 (кг/т) и времени работы τ (ч/год) определяется на основании соотношений (2.1.12) и (2.1.6):

$$m_{\text{U}} = m_{\text{выг}} + m_{\text{ост}} = m_{\text{выг}}/\bar{B}_1 = 51 \cdot 10^{-6} N_3 \tau / \eta \bar{B}_1 \text{ т/год}. \quad (2.1.16)$$

Полный расход учитывает все топливо, которое загружается в активную зону для обеспечения заданной кампании: и выгоревшее ($m_{\text{выг}}$), и оставшееся ($m_{\text{ост}}$) к концу кампании, но выгружаемое из активной зоны при перегрузке. Если глубину выгорания выражать в мегаватт-сутках на тонну, то

$$m_{\text{U}} = 41 \cdot 10^{-3} N_3 \tau / \eta \bar{B} \text{ т/год}. \quad (2.1.17)$$

Полный расход Pu можно оценивать аналогичным образом, используя (2.1.9).

Экономичность топливного цикла на АЭС при однократном использовании топлива в ЯР характеризует *удельный расход ядерного топлива*

$$q_{\text{U}} = \frac{1}{24 \bar{B} \eta} \frac{x - x_{\text{отв}}}{x_0 - x_{\text{отв}}} \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (2.1.18)$$

Для транспортных, например судовых, ЯР важной характеристикой экономичности является *расход ядерного топлива на*

единицу пройденного пути при работе на мощности N (МВт) в течение времени t (ч):

$$q_m = \frac{m_{\text{выг}}}{s} = \frac{5,1 \cdot 10^{-2} N t}{v t} = 5,1 \cdot 10^{-2} \frac{N}{v} \frac{\text{г}}{\text{км}} = \frac{51 N}{v} \frac{\text{мг}}{\text{км}}, \quad (2.1.19)$$

где $s = vt$ — пройденное расстояние, км; v — скорость, км/ч.

Примечание. Числовые коэффициенты в формулах этого параграфа получены при $E_f = 200$ МэВ/дел (см. задачу 1.5.2).

Уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ вследствие выгорания пропорционально количеству разделившихся ядер, т. е. энерговыработке ЯР.

Задачи с решениями

2.1.1. Сколько необходимо добыть природного урана (m_U), чтобы получить 1 т обогащенного (m_U^{06}) с $x = 1\%$, 2% , 5% , 90% при $x_{\text{отв}} = 0,25\%$?

Решение. Согласно (2.1.2) для $x = 1\%$ $m_U = 1 \cdot \frac{1 - 0,25}{0,71 - 0,25} = 1,63$ т; для $x = 2\%$ — 3,8 т; для $x = 5\%$ — 10,3 т, для $x = 90\%$ — 195 т.

2.1.2. Сколько выгорает ^{235}U и ^{239}Pu при получении 1 МВт·сут энергии в ЯР на тепловых нейтронах?

Решение. Если принять, что при делении одного ядра ^{235}U и ^{239}Pu выделяется энергия (см. § 1.1) $E_f = 200$ МэВ $= 3,7 \times 10^{-22}$ МВт·сут (см. приложение 5), то для получения 1 МВт·сут энергии необходимо разделить $2,7 \cdot 10^{21}$ ядер, а сжечь в $(1 + \alpha)$ раз больше, т. е. $2,7 \cdot 10^{21} (1 + \alpha)$ ядер, или $2,7 \cdot 10^{21} (1 + \alpha) A / (6,02 \times 10^{23})$ грамм делящегося нуклида. Подставляя значения массового числа A и α (см. приложение 9), получаем соответственно 1,23 г ^{235}U и 1,52 г ^{239}Pu [см. задачу 1.5.2, формулы (2.1.5), (2.1.9)]. В ^{235}U радиационные потери $\sigma_\gamma / (\sigma_f + \sigma_\gamma)$ составляют 15% , а в ^{239}Pu — 30% (см. приложение 8).

2.1.3. Какое количество ^{235}U разделится и превратится в ^{236}U за 1 год работы ЯР на тепловых нейтронах на мощности 150 МВт?

Решение. Согласно (2.1.3) за 1 год (365 сут) работы на $N = 150$ МВт разделится $m_{\text{дел}} = 1,05 \cdot 150 \cdot 365 = 57,5$ кг ^{235}U . Количество выгоревшего U (2.1.4) $m_{\text{выг}} = 1,05 (1 + 0,17) \cdot 150 \cdot 365 = 67,2$ кг, из которых $(67,2 - 57,5) = 9,7$ кг в результате радиационного захвата нейтронов превратится в ^{236}U .

2.1.4. Оценить удельное энерговыделение (приходящееся на 1 г выгоревшего ^{235}U) в ЯР на: а) тепловых нейтронах ($E_n \approx 0,025$ эВ); б) промежуточных (100 эВ); в) промежуточных (10 кэВ); г) быстрых (900 кэВ).

Решение. Из приложения 9 берем значения α для соответствующих энергий и, исходя из соотношения (2.1.4), определяем энергию, соответствующую выгоранию 1 г ^{235}U :

$$а) \alpha = 0,17; \quad \frac{Nt}{m_{\text{выг}}} = \frac{24}{1,05(1 + \alpha)} = 19,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч/г};$$

$$б) \alpha = 0,52; \quad 15,0 \text{ МВт} \cdot \text{ч/г};$$

$$в) \alpha = 0,35; \quad 16,9 \text{ МВт} \cdot \text{ч/г};$$

$$г) \alpha = 0,08; \quad 21,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч/г}.$$

Таким образом, наиболее дешевая энергия с точки зрения затраты U получается в ЯР на быстрых нейтронах и наиболее дорогая — на промежуточных с энергией нейтронов 100 эВ.

2.1.5. На какой мощности работает ЯР на тепловых нейтронах, если расход ^{235}U составляет 0,5 кг/сут?

Решение. Согласно (2.1.6) $N = m_{\text{выг}}/0,051t = 500/(0,051 \cdot 24) = 408 \text{ МВт}.$

2.1.6. Какой энергозапас выработал ЯР на тепловых нейтронах, если в нем выгорело 0,5 кг ^{235}U ?

Решение. Согласно (2.1.6) $Q_K = m_{\text{выг}}/0,051 = 500/0,051 = 9,8 \times 10^3 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$

2.1.7. ЯР на тепловых нейтронах выработал $2 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ на $N = 50 \text{ МВт}$. Определить скорость выгорания U в единицу времени.

Решение. ЯР работал в течение $t = Q_K/N = 4000 \text{ ч}$. За это время выгорело согласно (2.1.5) $m_{\text{выг}} = 1,23 \cdot 2 \cdot 10^5/24 = 10,2 \text{ кг U}$. Скорость выгорания при работе на стационарной мощности равна $m_{\text{выг}}/t = 2,55 \text{ г/ч} = 0,71 \text{ мг/с}$. То же получаем согласно (2.1.7): $0,051N = 2,55 \text{ г/ч}.$

2.1.8. Определить процентное содержание ^{235}U в топливе в конце кампании ЯР на тепловых нейтронах, имеющего $Q_K = 15 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ и первоначальную загрузку ^{235}U 30 кг как составную часть природного урана.

Решение. Пренебрегая выгоранием ^{238}U , по формуле (2.1.6) определим выгорание ^{235}U за кампанию: $m_{\text{выг}} = 7,7 \text{ кг}$. Учитывая, что в природном уране концентрация ^{235}U составляет 0,7 % ($m_{\text{U-235}}/m_{\text{U}} = 0,007$), определяем ее к концу кампании: $x = (m_{0 \text{ U-235}} - m_{\text{выг}})/(m_{0 \text{ U}} - m_{\text{выг}}) \approx 0,52 \%$.

2.1.9. ЯР с первоначальной загрузкой 3 т урана, обогащенного до 2 % ^{235}U , выработал $4,1 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Определить глубину выгорания U .

Решение. Согласно (2.1.6) $m_{\text{выг}} = 0,051 \cdot 4,1 \cdot 10^5 = 21 \text{ кг}$. Следовательно, глубина выгорания по урану (2.1.12) равна $\bar{B}_1 = 21/3 = 7 \text{ кг/т}$. При загрузке 3 т урана с обогащением 2 % ^{235}U масса делящегося изотопа составляет $0,02 \cdot 3 \cdot 10^3 = 60 \text{ кг}$. Таким образом, глубина выгорания по делящемуся изотопу согласно (2.1.15) составляет $\bar{B}_3 = 35 \%$. Глубина выгорания по полученной энергии согласно (2.1.10) равна $\bar{B} \approx 137 \cdot 10^3 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т} \approx 5700 \text{ МВт} \cdot \text{сут/т}.$

2.1.10. ВВЭР-1000 имеет $N_T = 3000 \text{ МВт}$; $m_{\text{U}} = 71,5 \text{ т}$; $\tau_{\text{ЯР}} = 7000 \text{ ч}$. Обогащение свежезагружаемого топлива — 3,3 %. Определить среднюю глубину выгорания топлива при двух- и трех-частичных перегрузках.

Решение. Согласно (2.1.11):

$$\text{при } n=2 \quad \bar{B}_1 = \frac{7000}{24} \frac{3000}{71,5 \cdot 10^3} 2 = 24,47 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг U};$$

при $n=3$ $\bar{B} = 36,7$ МВт·сут/кг U.

2.1.11. Какова связь между \bar{B} (МВт·сут/кг U), \bar{B}_2 (%) и \bar{B}_3 (%)?

Решение. Согласно (2.1.14) и (2.1.5)

$$\begin{aligned}\bar{B}_2(\%) &= \frac{m_{\text{выг}}(\text{г})}{m_{\text{U}}(\text{г})} 100 = \frac{m_{\text{выг}}(\text{г}) \cdot 100}{m_{\text{U}}(\text{кг}) \cdot 10^3 (\text{г/кг})} = \frac{1,23Nt (\text{МВт} \cdot \text{сут})}{m_{\text{U}}(\text{кг}) \cdot 10} = \\ &= 0,123\bar{B} \left(\frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кг U}} \right),\end{aligned}$$

откуда

$$\bar{B} (\text{МВт} \cdot \text{сут/кг U}) = 8,14\bar{B}_2 (\%).$$

Таким образом, 1 % выгорания соответствует 8,14 МВт·сут/кг U (иногда для оценки принимают ~ 10 МВт·сут/кг U).

Учитывая, что \bar{B} (МВт·сут/кг U) = 0,814 \bar{B}_1 (кг/т U) и \bar{B} (МВт·сут/кг U) = 8,14 \bar{B}_2 (%), находим \bar{B}_1 (кг/т U) = 10 \bar{B}_2 (%). Это соотношение можно получить и так:

$$\bar{B}_1 (\text{кг/т U}) = \frac{m_{\text{выг}}(\text{кг})}{m_{\text{U}}(\text{т})} = \frac{m_{\text{выг}}(\text{кг})}{m_{\text{U}}(\text{кг}) \cdot 10^{-3} (\text{т/кг})} \frac{100}{100} = 10\bar{B}_2 (\%).$$

Связь между \bar{B}_2 (%) и \bar{B}_3 (%) находим из (2.1.14) и (2.1.1):

$$\bar{B}_2 (\%) = \frac{m_{\text{выг}}}{m_{\text{U}}} 100 = \frac{m_{\text{выг}}}{m_{\text{U} \cdot 235}} x_{\text{U} \cdot 235} (\%) = 10^{-2} x_{\text{U} \cdot 235} \bar{B}_3 (\%);$$

$$\bar{B}_3 (\%) = 100 \frac{\bar{B}_2 (\%)}{x_{\text{U} \cdot 235}}.$$

Например, при $x_{\text{U} \cdot 235} = 20$ % и $\bar{B}_3 = 30$ % $\bar{B}_2 = 6$ %.

2.1.12. Определить глубину выгорания топлива в ВВЭР-440 за 300 эф. сут работы при начальной загрузке ^{235}U 1028 кг (всего топлива 42 т).

Решение. Из (2.1.5) имеем $m_{\text{выг}} = 1,23 \cdot 1375 \cdot 300 = 507,38$ кг.

Согласно (2.1.12) — (2.1.15) $\bar{B}_1 = 507,38/42 = 12,08$ кг/т U; $\bar{B} = 0,814 \bar{B}_1 = 9,8$ МВт·сут/кг; $\bar{B}_3 = (m_{\text{выг}}/m_{\text{U} \cdot 235}) \cdot 100$ % $\approx 507,38/1028 = 0,49 = 49$ %.

2.1.13. АЭС имеет электрическую мощность 500 МВт. ЯР работает на природном уране с глубиной выгорания $\bar{B}_1 = 3,5$ кг/т. КПД АЭС равен 28 %. Число часов работы ЯР за год в пересчете на $N_{\text{ном}}$ составляет 7000 ч/год. Определить удельный и полный расход U.

Решение. Расход на единицу полезной (электрической) энергии с $\eta = 0,28$ согласно (2.1.5) равен

$$\frac{m_{\text{выг}}}{N_3 t} = \frac{1,23}{\eta} \text{ г/(МВт} \cdot \text{сут)} = \frac{1,23}{24 \cdot 0,28} = 0,18 \text{ г/(МВт} \cdot \text{ч)},$$

а всего выгорает в год $0,18 \cdot 500 \cdot 7000 = 630$ кг ^{235}U . Полный расход U за год в соответствии с (2.1.16)

$$m_{\text{U}} = 51 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 7 \cdot 10^3 / (0,28 \cdot 3,5) = 182 \text{ т/год}.$$

Для сравнения можно оценить расход условного органического топлива с теплотворной способностью 7000 ккал/кг для тепловой электростанции такой же мощности. Исходя из соотношений

$$7000 \text{ ккал/кг} = 29,33 \text{ МДж/кг} = 8,15 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$$

и формул

$$N = N_0/\eta; \quad m \text{ (кг/ч)} \cdot Q \text{ (кВт} \cdot \text{ч/кг)} = N \text{ (кВт)},$$

получаем

$$m_{\text{усл}} = \frac{N \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}}{Q_{\text{усл}} \text{ (кВт} \cdot \text{ч/кг)}} = \frac{N_0}{Q_{\text{усл}} \eta} = \frac{500}{8,15 \cdot 0,28} \approx 220 \text{ т/ч}.$$

Результат довольно убедительный: урана расходуется за год примерно столько же, сколько органического топлива за 1 ч работы, причем если органическое топливо расходуется полностью, то урана сгорает только 630 кг из 182 т, а остальной идет на переработку и повторное использование (это $\sim 640 \text{ кг } ^{235}\text{U}$ и $\sim 180 \text{ т } ^{238}\text{U}$). Кроме того, необходимо учесть, что в ЯР на тепловых нейтронах на природном уране происходит воспроизводство топлива (§ 2.2, задача 2.2.3). В зависимости от величины $K_B \approx 0,2 \div 0,8$ на каждый мегаватт-час получаемой электрической энергии в данном случае образуется $0,18(0,2 \div 0,8) = (0,04 \div 0,14) \text{ г } ^{239}\text{Pu}$, что за год работы АЭС даст $(0,04 \div 0,14) \cdot 500 \cdot 7000 \approx (140 \div 490) \text{ кг}$ плутония.

2.1.14. Оценить удельный расход ядерного топлива в топливном цикле при однократном использовании обогащенного урана в ЯР типа ВВЭР при начальном обогащении $x=3\%$, если: в отвале обогатительного производства $x_{\text{отв}}=0,25\%$, в природном уране $x_U=0,71\%$, средняя глубина выгорания $\bar{B}=30 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг U}$, КПД АЭС $\eta=30\%$.

Решение. По формуле (2.1.18) определяем

$$q_U = \frac{1}{24 \cdot 30 \cdot 0,3} \frac{3,0 - 0,25}{0,71 - 0,25} = 28 \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}} \approx 670 \frac{\text{г}}{\text{МВт} \cdot \text{сут}}.$$

2.1.15. Атомное судно «Саванна» при работе ЯР на мощности 74 МВт имеет скорость хода 21 узел. Атомное судно «Отто Ган» имеет скорость хода 16 узлов при мощности ЯР 38 МВт. Определить расход топлива на 1 милю пройденного пути для обоих судов.

Решение. Согласно (2.1.19) расход на 1 милю пройденного пути (1 миля = 1,852 км, 1 узел = 1 миля/ч) равен: а) для судна «Саванна» $q_m = 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot 74/21 = 0,18 \text{ г/миля}$; б) для судна «Отто Ган» — 0,12 г/миля.

Контрольные вопросы и задачи

1. Каковы следствия выгорания делящегося нуклида?
2. Какой глубине выгорания в МВт·сут/т соответствует выгорание 1 % загруженного топлива?
3. В ЯР на тепловых нейтронах $N_{\text{ном}}=64 \text{ МВт}$, загрузка составляет 7 т U с $x=4,4\%$ ^{235}U . Оценить обогащение U в конце кампании, равной 800 сут.

4. Определить количество разделившегося ^{235}U и ^{238}U в ЯР на тепловых нейтронах на природном уране, работающем на $N_{\text{ном}}=100$ МВт, в течение 200 сут. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах $\mu=1,04$.

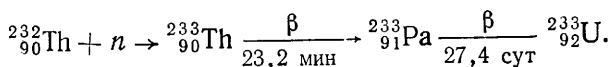
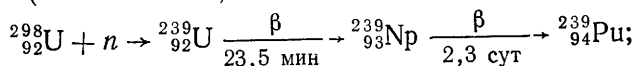
5. В ЯР на тепловых нейтронах, кампания которого равна $25 \cdot 10^3$ ч, $N_{\text{ном}}=100$ МВт, загружено 60 кг ^{235}U . Оценить глубину выгорания ^{235}U , если в качестве топлива используется уран, обогащенный изотопом ^{235}U до 1,5 %.

6. Оценить, какому количеству органического топлива теплотворной способностью 7000 ккал/кг соответствует использование 1 т слабообогатщенного урана при освоенной в настоящее время глубине выгорания для ВВЭР ~ 30 МВт·сут/кг?

7. Атомный ледокол «Ленин» при работе двух ЯР на мощности 90 МВт каждый на чистой воде идет со скоростью 18 узлов. Чему равен расход топлива на 1 милю пути в данном случае и при плавании во льдах со скоростью 8 узлов на той же мощности?

§ 2.2. ВОСПРОИЗВОДСТВО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Воспроизводство ядерного топлива — это процесс образования в ЯР вторичных делящихся нуклидов (^{239}Pu или ^{233}U) из ядерного сырья (^{238}U или ^{232}Th):



В качестве первичных делящихся нуклидов используется ^{235}U , а также накопленные ^{239}Pu или ^{233}U . Запасов ^{238}U и ^{232}Th в природе на два порядка больше, чем делящегося ^{235}U . Накопление вторичного топлива характеризуют *коэффициентом воспроизводства*, представляющим собой отношение количества образовавшихся ядер вторичного топлива $N_{\text{вт}}$ к числу сгоревших ядер $N_{\text{выг}}$:

$$КВ = \frac{N_{\text{вт}}}{N_{\text{выг}}} = \frac{A_{\text{выг}}}{A_{\text{вт}}} \frac{m_{\text{вт}}}{m_{\text{выг}}}, \quad (2.2.1)$$

где A и m — соответственно массовые числа и массы вторичного и выгоревшего топлива; $N_{\text{выг}}$ учитывает выгорание и вторичного топлива.

Если вторичный делящийся нуклид отличается от выгорающего, КВ называют *коэффициентом конверсии* (превращения), а ЯР — *конвертером*. Если вторичным нуклидом является плутоний, КВ иногда называют *плутониевым коэффициентом*. При $КВ > 1$ воспроизводство является расширенным и общее количество делящихся нуклидов в ЯР возрастает со временем. Такой ЯР называют *размножителем* (в литературе использовался также термин *бридер*), а КВ — *коэффициентом накопления* топлива. ЯР-размножители дают возможность осуществить замкнутый топливный цикл с дополнительной подпиткой только ядерным сырьем (природным или отвальным ураном, торием).

Топливный цикл — это процесс использования ядерного топлива, который включает добычу урана (тория), выделение делящихся и сырьевых нуклидов, обогащение, изготовление и хранение твэлов, облучение их в ЯР (выгорание и воспроизводство), выгрузку (полную или частичную), выдержку, транспортировку, регенерацию, изготовление новых твэлов и т. д.

Регенерация топлива — это совокупность радиохимических и химико-металлургических процессов переработки отработавшего кампанию топлива с целью выделения делящихся нуклидов для повторного использования. Воспроизводство с $KB > 1$ является основным звеном в замкнутом топливном цикле, позволяющим использовать природный уран и торий для получения ядерной энергии.

По получаемому радионуклиду различают плутониевые и ториевые циклы. В первом случае делящимся нуклидом является ^{235}U , ^{233}U или ^{239}Pu , сырьем — ^{238}U и вторичным топливом — ^{239}Pu ; во втором случае делящимся нуклидом — ^{235}U , ^{233}U или ^{239}Pu , сырьем — ^{232}Th , вторичным топливом — ^{233}U .

В настоящее время в основном используется цикл $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$. Образующийся в таком ЯР ^{239}Pu сам участвует в делении и, кроме того, поглощая нейтрон без деления, превращается в ^{240}Pu . Последний делится только быстрыми нейтронами, но при радиационном захвате снова дает делящийся тепловыми нейтронами изотоп ^{241}Pu и т. д. На рис. 2.2.1 приведены кривые накопления изотопов Pu и выгорания ^{235}U в ЯР на природном уране с глубиной выгорания $\sim 4500 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{т} = 4,5 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}$. Для энергетических ЯР на природном уране или обогащенном уране $KB < 1$ (для ВВЭР он равен 0,5—0,6, для тяжеловодных и уран-графитовых 0,7—0,8) при этом максимальное количество ^{238}U , которое может быть переработано в ^{239}Pu , составляет не более 3 % (см. задачу 2.2.1). При обогащении 3—5 % и глубине выгорания $(30 \div 40) \cdot 10^3 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{т}$ накопление делящегося Pu составит 0,15—0,20 кг/(год·МВт) = 0,4 ÷ 0,55 г/(МВт·сут). Для ЯР на тепловых нейтронах, работающего на уране с обогащением x по ^{235}U ,

$$KB = \frac{\sigma_a^8}{\sigma_a^5} \frac{1-x}{x} + 2,08\mu(1-\varphi) e^{-B^2\tau}$$

Как видно из формулы, чем больше нейтронов поглощается в ^{238}U (больше σ_a^8) и меньше в ^{235}U (меньше σ_a^5), чем меньше обогащение x , т. е. чем больше в топливе ^{238}U , тем больше KB. Кроме того, KB растет с увеличением резонанс-

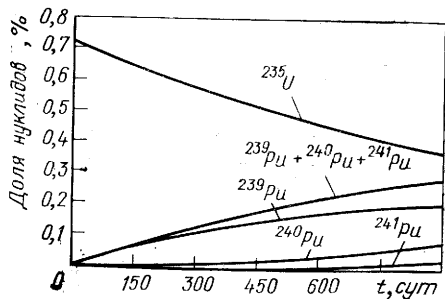


Рис. 2.2.1. Выгорание ядер ^{235}U и накопление изотопов Pu

ного захвата в ^{238}U (уменьшение ϕ), увеличением размножения на быстрых нейтронах (увеличение μ) и уменьшением утечки нейтронов в процессе замедления (увеличение $e^{-B^2\tau}$). Обозначения см. в § 1.3 и 1.4.

Оценить накопление Pu в энергетическом ЯР можно по формуле (2.2.1), записав ее с учетом (2.1.5) и (2.1.6) в таком виде:

$$m_{\text{Pu}} = 1,25 \text{ KB } \bar{N}t (\text{сут}) \text{ г} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ KB } \bar{N}t (\text{ч}) \text{ кг}, \quad (2.2.2)$$

где \bar{N} — средняя мощность ЯР, МВт; t — время работы.

Образующийся в процессе работы ЯР Pu является дополнительным топливом, увеличивающим выработку энергии на единицу массы сгоревшего ^{235}U .

После останова ЯР происходит временное увеличение концентрации Pu, обусловленное распадом накопившегося на момент останова Np :

$$\Delta N_{\text{Pu}}(t) = N_{0\text{Pu}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Np}}t}) \text{ ядер/см}^3, \quad (2.2.3)$$

где $N_{0\text{Pu}} = \Phi \Sigma_a^8 / \lambda_{\text{Np}}$ — максимальное увеличение концентрации Pu после останова ЯР; $\lambda_{\text{Np}} = 0,693/T_{\text{Np}} = 0,693/(2,3 \cdot 24 \cdot 3600) = 3,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; Φ — плотность потока нейтронов, соответствующая мощности перед остановкой, нейтр/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); Σ_a^8 — макроскопическое сечение поглощения ^{238}U , см^{-1} .

Примечание. Временем установления стационарной концентрации плутония $N_{0\text{Pu}}$ можно считать время, когда концентрация будет отличаться от равновесной на 5—10%. Это соответствует примерно 4—5 периодам полураспада Np (см. рис. 1.2.1).

Этот Pu играет существенную роль в ЯР на природном уране, поскольку компенсирует прометиевый провал после останова ЯР (см. § 2.7, задачу 2.7.9).

В ЯР на природном уране $1,97 > \text{KB} > 0,57$ [7, 15]. ВВЭР имеют $\text{KB} = N_{\text{Pu}} / (N_{\text{выгU}} + N_{\text{выгPu}}) < 0,8$. В тепловых ЯР максимальный KB (до 1,05—1,1) можно получить, используя ториевый цикл $^{233}\text{U} \rightarrow ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$. Максимальный KB возможен в ЯР на быстрых нейтронах в плутониевом цикле $^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$. В экспериментальном ЯР с металлическим плутонием получен $\text{KB} > 2$. В реальном быстром ЯР с более мягким спектром нейтронов $\text{KB} \approx 1,1 \div 1,6$.

Одна из наиболее универсальных технико-экономических характеристик быстрых ЯР — время удвоения T_2 количества делящихся нуклидов, т. е. время, в течение которого в работающем ЯР накапливается количество вторичного топлива, достаточное для эксплуатации нового такого же ЯР. Расчет T_2 довольно громоздкий, но для оценки можно воспользоваться одной из приближенных формул [15]:

$$T_2 \approx 1,75 \frac{1/\text{КИМ} + T_{\text{п}}/T_{\text{а.з}}}{P_{\text{Pu}} (\text{KB} - 1 - \varepsilon/\bar{B}_{\text{Pu}})} \text{ год},$$

где $\bar{V}_{Pu} = \Delta m_{\text{выг}} / m_{\text{загр}}$ — относительная глубина выгорания ^{239}Pu за кампанию топлива $T_{a.з.}$; $P_{Pu} = N_{\text{ном}} / m_{\text{загр}}$ — энергонапряженность Pu в ЯР, МВт/кг, (1.5.2); $T_{a.з.}$, $T_{п}$ — время нахождения топлива в активной зоне и во внешнем топливном цикле; $\text{КИМ} = \bar{N} / N_{\text{ном}}$ — коэффициент использования установленной мощности [см. (3.7.5)], обычно $\text{КИМ} \approx 0,8$; КВ — коэффициент воспроизводства; ε — доля Pu , теряемого при переработке (обычно $\varepsilon \approx 0,02$).

Как следует из формулы и физического смысла, для уменьшения T_2 необходимо иметь по возможности большие КВ , $T_{a.з.}$, КИМ , P_{Pu} , \bar{V}_{Pu} и меньшие $T_{п}$ и ε . Согласно оценкам для реальных промышленных систем время удвоения составит 5—10 лет.

Задачи с решениями

2.2.1. Какой процент ^{238}U может быть использован в природном уране при работе ЯР на тепловых нейтронах, имеющего $\text{КВ} = 0,8$?

Решение. При выгорании $m_{\text{выг}}^{U-235}$ кг образуется $m^{Pu} = \text{КВ} \times m_{\text{выг}}^{U-235}$ кг Pu , который в свою очередь, выгорая, дает $\text{КВ}^2 \times m_{\text{выг}}^{U-235}$ кг Pu и т. д. В конечном счете при совместном выгорании ^{235}U и образующегося ^{239}Pu используется следующее суммарное количество топлива:

$$\begin{aligned} m_{\text{выг}}^{U-235} &= m_{\text{выг}}^{U-235} + \text{КВ} m_{\text{выг}}^{U-235} + \text{КВ}^2 m_{\text{выг}}^{U-235} + \dots = \\ &= m_{\text{выг}}^{U-235} / (1 - \text{КВ}) = 5 m_{\text{выг}}^{U-235}. \end{aligned}$$

Из этого выгоревшего топлива на вторичное (Pu , образующийся из ^{238}U) приходится

$$m_{\text{выг}}^{Pu} = m_{\text{выг}}^{Pu, U-235} - m_{\text{выг}}^{U-235} = m_{\text{выг}}^{U-235} \frac{\text{КВ}}{1 - \text{КВ}} = 4 m_{\text{выг}}^{U-235}.$$

Если предположить, что выгорает весь ^{235}U , содержащийся в природном уране в количестве 0,7 %, то при этом используется также ^{238}U (после превращения его в ^{239}Pu) в количестве $4 \cdot 0,7 \% = 2,8 \%$. Таким образом, при $\text{КВ} = 0,8$ может быть использовано $\sim 0,7 \% \text{ } ^{235}\text{U}$ и $\sim 2,8 \% \text{ } ^{238}\text{U}$, т. е. всего лишь $\sim 3,5 \%$ природного урана.

2.2.2. В реакторе-размножителе, имеющем $\text{КВ} \approx 1,5$, загруженное топливо массой m_0 выгорает за 5 лет. Чему равен годовой прирост топлива?

Решение. Накопление вторичного топлива за 5 лет составляет $m_{\text{вт}} = \text{КВ} m_0 = 1,5 m_0$. Прирост за 5 лет равен

$$\frac{m_{\text{вт}} - m_0}{m_0} = \frac{\text{КВ} m_0 - m_0}{m_0} = \text{КВ} - 1 = 0,5 = 50 \%,$$

что составляет $50/5 = 10 \%$ в год.

2.2.3. Сколько ^{239}Pu образуется за год работы АЭС, имеющей $\text{КВ} = 0,6$?

Решение. Удельный расход первичного топлива на АЭС равен 0,18 г/(МВт·ч) (см. решение задачи 2.1.13). Согласно

(2.2.1) на 1 МВт·ч получаемой электрической энергии образуется $0,18 \cdot 239/235 = 0,11$ г ^{239}Pu , что за год работы АЭС даст $m_{\text{Pu}} = 0,11 \cdot 500 \cdot 7000 = 385$ кг.

2.2.4. ВВР имеет $\text{KB} \approx 0,5$. Какое количество вторичного топлива можно использовать в таких ЯР?

Решение. Используя рассуждения из задачи 2.2.1, получаем

$$m_{\text{выг}}^{\text{Pu}} = m_{\text{выг}}^{\text{U-235}} \frac{0,5}{1 - 0,5} = m_{\text{выг}}^{\text{U-235}}.$$

Вывод: в ЯР, имеющем $\text{KB} = 0,5$, можно сжечь примерно одинаковое количество загруженного и образующегося в процессе работы топлива, т. е. удвоить количество выгорающего ядерного топлива.

2.2.5. В тяжеловодном ЯР на природном уране $\bar{V} = 9$ МВт × сут/кг U, а при $x = 1,4\%$ 20 МВт·сут/кг U. Какой вклад в выгорание топлива дает Pu?

Решение. Согласно (2.1.13) в первом случае на 1 т U выгорает $m_{\text{выг}} = \bar{V} m_{\text{U}} / 0,814 \approx 11$ кг ^{235}U , а во втором 24,6 кг ^{235}U . Содержание ^{235}U в природном уране составляет 7 кг/т U, а в обогащенном — до 1,4% — 14 кг/т U, т. е. на $11 - 7 = 4$ кг и на $24,6 - 14 = 10,6$ кг меньше, чем выгорает. Следовательно, доля выгоревшего Pu составляет $4/11 \approx 36\%$ и $10,6/24,6 \approx 43\%$ соответственно.

2.2.6. Быстрый ЯР с плутониевым циклом имеет $\text{KB} = 1,5$, $N_0 = 1000$ МВт, КПД $\eta = 40\%$ и работает в течение года 7000 ч. Сколько Pu нарабатывает ЯР за год?

Решение. Тепловая мощность ЯР $N = 1000/0,4 = 2500$ МВт = 2,5 ГВт. Энерговывработка за год $Q_{\text{год}} = 2500 \cdot 7000 = 17,5 \cdot 10^6$ МВт × ч/год. Масса выгоревшего топлива согласно (2.1.9) $m_{\text{выг}} = 0,063 \cdot 17,5 \cdot 10^6 \approx 1100$ кг/год и накопившегося плутония $m_{\text{Pu}} = \text{KB} m_{\text{выг}} = 1,5 \cdot 1100 = 1650$ кг/год. Таким образом, дополнительная наработка нового топлива $\Delta m_{\text{Pu}} = 1650 - 1100 = 550$ кг.

2.2.7. В 1 т выгруженного из ВВЭР-1000 топлива с глубиной выгорания $\bar{V} = 40\,000$ МВт·сут/т U при начальном обогащении $x = 4,4\%$ (44 кг ^{235}U /т U) содержится примерно 12,6 кг ^{235}U ; 930 кг ^{238}U ; 5 кг ^{236}U ; 5,6 кг ^{239}Pu ; 1,8 кг ^{241}Pu и 0,6 кг ^{237}Np . Оценить вклад каждого делящегося нуклида в энергосыработку АЭС.

Примечание. Для ВВЭР-1000 за ~3 года нахождения топлива в активной зоне доля ядер ^{238}U , разделившихся под действием быстрых нейтронов, составляет ~5% всех разделившихся ядер.

Решение. При $\bar{V} = 40\,000$ МВт·сут/т согласно (2.1.3) $m_{\text{дел}} \approx 1,05 \cdot 40 \cdot 10^3$ г/т U = 42 кг/т. ^{235}U разделится $44 - (12,6 + 5 + 0,6) = 25,8$ кг/т; ^{238}U $0,05 \cdot 42 = 2,1$ кг/т; ^{239}Pu и ^{241}Pu $42 - (25,8 + 2,1) = 14,1$ кг/т. Следовательно, в общей энергосыработке на долю ^{235}U приходится ~61% (25,8/42), ^{239}Pu и ^{241}Pu — ~34% (14,1/42) и ^{238}U — 5% (2/42). Кроме того, в выгруженном топливе содержится (5,6 + 1,8) = 7,4 кг/т ^{239}Pu и ^{241}Pu .

Контрольные вопросы и задачи

1. Как изменяется концентрация накапливаемого ^{239}Pu при работе ЯР с большим и малым КВ?
2. Почему в ЯР на тепловых нейтронах различаются формулы (2.1.5) и (2.1.9)?
3. Оценить КВ ^{239}Pu в ЯР на тепловых нейтронах, имеющем следующие характеристики: $x=5\%$; $\mu=1,015$; $\phi=0,9$; $p_{\text{зам}}=0,85$.
4. Какое количество ^{239}Pu образуется в ЯР на 1 кг сгоревшего ^{235}U с учетом выгорания образующегося Pu при КВ=50%?
5. Оценить процентное содержание делящихся нуклидов (с учетом воспроизводства) после выработки $5 \cdot 10^5$ МВт·ч, если начальная загрузка составляла 10 т природного урана, а КВ=30%.

§ 2.3. ШЛАКОВАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

При делении ^{235}U тепловыми нейтронами образуется ~ 60 осколков (~ 30 пар) с массовыми числами от 72 (самый легкий) до 161 (самый тяжелый). Наиболее вероятно деление на осколки с отношением масс 3:2 ($\sim 6\%$, см. рис. 1.3.2). Вероятность деления на равные массы составляет $\sim 10^{-2}\%$. *Осколки* — это многозарядные положительные ионы, потерявшие электроны в момент деления ядра. Интенсивно тормозясь в среде и приобретая недостающие в электронной оболочке электроны, осколки превращаются в нейтральные атомы. Все они, имея избыток нейтронов, β -радиоактивны и претерпевают в среднем три (от одного до шести) β -распада до превращения в стабильные нуклиды. Всего в цепочках распада обнаружено более 200 нуклидов. В состоянии равновесия $\sim 25\%$ из них составляют редкоземельные элементы, $\sim 15\%$ — изотопы Zr, $\sim 12\%$ — Mo, $\sim 6,5\%$ — Cs, $\sim 16\%$ — благородные газы (Xe, Kr) и др. Все продукты деления в различной степени поглощают нейтроны, уменьшая реактивность. В ЯР на тепловых нейтронах по характеру воздействия на ρ их удобно разделить на две группы: *отравители и шлаки*. К первым относят ^{135}Xe и ^{149}Sm , сильно поглощающие тепловые нейтроны. Их концентрация сравнительно быстро достигает равновесного значения. Все остальные нуклиды, иногда включая и образующийся ^{236}U , объединяют в одну группу со средним сечением на пару шлаков поглощения $\bar{\sigma}_{\text{шл}}^{\text{пл}} \approx (30 \div 40) \cdot 10^{-24}$ см².

Количество накопившихся шлаков за время работы ЯР t (сут) на мощности N (МВт) (2.1.5)

$$m_{\text{шл}} \approx m_{\text{выг}} = 1,23 Nt, \quad (2.3.1)$$

а без учета ^{236}U (2.1.3)

$$m_{\text{шл}} \approx m_{\text{дел}} = 1,05 Nt \text{ г.}$$

Скорость их накопления равна скорости выгорания топлива [для Pu см. (2.1.9)], т. е. прямо пропорциональна мощности ЯР, а $\bar{\sigma}_{\text{шл}}^{\text{пл}}$ зависит от энергии нейтронов (см. приложение 10).

Концентрация (средняя) при делении $m_{\text{дел}}$ (г) урана

$$N_{\text{шл}} \approx 2N_{\text{дел}}^{\text{топ}} = \frac{2m_{\text{дел}}}{V} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ ядер/см}^3 = 51 \cdot 10^{20} \frac{m_{\text{шл}}}{V} \text{ ядер/см}^3, \quad (2.3.2)$$

где $N_{\text{дел}}^{\text{топ}}$ — число разделившихся в среднем на два осколка ядер в единице объема активной зоны, ядер/см³; V — объем активной зоны (для гомогенизированной среды) или объем твэлов (для гетерогенного ЯР), см³. Для удобства сечение взаимодействия берут на пару нуклидов (на одно разделившееся ядро).

Осколки деления, претерпевая радиоактивный распад, а также поглощая нейтроны, превращаются в ядра самых различных нуклидов, но их поглощающая способность (за исключением ¹⁴⁹Sm и ¹³⁵Xe, см. § 2.4—2.7) в среднем остается постоянной. Поэтому потеря $\rho_{\text{зал}}$ вследствие накопления шлаков растет, не достигая равновесного уровня, пропорционально энерговыработке (см. § 2.9), т. е. глубине выгорания топлива. Шлакование влияет на $\rho_{\text{зал}}$ так же, как и выгорание, хотя топливо при этом не расходуется.

Для отдельных нуклидов, имеющих $\sigma_{ai} \gg \sigma_a^{U-235}$, достигается максимальное значение их концентрации, не зависящее от глубины выгорания топлива, обратно пропорциональное $\sigma_{ai}^{\text{шл}}$. Количество таких шлаков и их влияние на характер изменения ρ незначительны; из них можно выделить только ¹⁴⁹Sm. Учитывая характер изменения концентрации ¹⁴⁹Sm при работе ЯР на мощности и после его остановки, Sm чаще относят к отравителям (см. § 2.6, 2.7).

Сверхкритическую загрузку, необходимую для компенсации выгорания и шлакования в течение кампании, компенсируют в свою очередь введением в активную зону поглотителей нейтронов. С точки зрения распределения энерговыделения лучше всего это делать с помощью твердых или жидких ВП (см. § 1.5).

Иногда глубину выгорания топлива (2.1.12) характеризуют массой шлаков, накапливающихся в 1 т топлива $\bar{V}_{\text{шл}}$ [кг/т U (Pu)]. Так как $m_{\text{шл}}$ (кг) равна массе выгоревших ядер топлива, то

$$\bar{V}_{\text{шл}} (\text{кг шл/тU}) \approx \bar{V}_1 (\text{кг} \cdot \text{выг. U/тU}).$$

$\bar{V}_{\text{шл}}$ зависит от обогащения топлива. Для природного урана $\bar{V}_{\text{шл}} \approx 2 \div 5$ кг/т U, для слабообогащенного — 10—30 кг/т U. Больше всего накапливается шлаков в топливе активных зон быстрых ЯР, где $\bar{V}_{\text{шл}}$ достигает 75—100 кг/т U (Pu). Это существенно сказывается на надежности твэлов (см. § 4.3).

Можно также судить о глубине выгорания топлива по отношению количества ядер накопившихся осколков деления (2.3.2) к объему среды V (см³), в которой разделилось $m_{\text{дел}}$ (г) ²³⁵U:

$$\bar{V}_4 = N_{\text{оск}} = 51 \cdot 10^{20} m_{\text{дел}} / V_{\text{ядер/см}^3}.$$

Задачи с решениями

2.3.1. ЯР выработал 50 000 МВт·ч. Сколько шлаков (без учета ²³⁶U) накопилось в активной зоне?

Решение. Согласно (2.3.1) $m_{\text{оск}} = 1,05 \cdot 5 \cdot 10^4 / 24 = 2,2$ кг. Кон-

центрация осколков определяется по формуле (2.3.2) при известном объеме топлива.

2.3.2. Оценить относительную потерю нейтронов в шлаках для четырех ЯР с различным спектром нейтронов после деления 10 % топлива. Энергия нейтронов, производящих деление, соответственно равна 0,025 эВ, 100 эВ, 10 кэВ, 1 МэВ.

Решение. Так как при делении каждого ядра образуется в среднем два осколка, то после деления $0,1N_{\text{топ}}$ ядер/см³ концентрация шлаков (без учета ²³⁶U) будет в 2 раза больше: $N_{\text{шл}} = 2 \cdot 0,1N_{\text{топ}}$ ядер/см³. При плотности потока Φ [нейтр/(см²·с)] в шлаках будет поглощаться $\Phi \sigma_a^{\text{шл}} N_{\text{шл}} = \Phi \sigma_a^{\text{шл}} \cdot 2 \times 0,1N_{\text{топ}}$ нейтр/(см³·с), а в топливе, концентрация которого уменьшится на 10 %, будет поглощаться $\Phi \sigma_a^{\text{топ}} \cdot 0,9N_{\text{топ}}$ нейтр/(см³·с).

Относительная потеря нейтронов в шлаках, таким образом, составит

$$\begin{aligned} \Phi \sigma_a^{\text{шл}} N_{\text{шл}} [\Phi \sigma_a^{\text{топ}} \cdot 0,9N_{\text{топ}} + \Phi \sigma_a^{\text{шл}} N_{\text{шл}}]^{-1} &= [1 + 9\sigma_a^{\text{топ}}/2\sigma_a^{\text{шл}}]^{-1} = \\ &= [1 + 9(1 + \alpha)\sigma_f^{\text{топ}}/2\sigma_a^{\text{шл}}]^{-1}. \end{aligned}$$

Подставив соответствующие значения $\sigma_f/2\sigma_a^{\text{шл}}$ и α (см. приложения 10 и 9), получим, что потеря нейтронов в шлаках после выгорания 10 % топлива составит: 1) при энергии нейтронов 0,025 эВ — 0,9 %; 2) 100 эВ — 4,7 %; 3) 10 кэВ — 1,1 %; 4) 1 МэВ — 0,7 %.

Таким образом, наибольшая потеря ρ за счет шлакования имеет место в ЯР на промежуточных нейтронах, а наименьшая — в ЯР на быстрых нейтронах.

2.3.3. Определить связь между глубиной выгорания топлива и массой накопившихся шлаков с учетом ²³⁶U при загрузке m_U .

Решение. Согласно (2.3.1) и (2.1.10)

$$m_{\text{шл}}(t) = 1,23 \bar{V} \left(\frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кг U}} \right) m_U (\text{кг}).$$

2.3.4. Сколько шлаков накопится в ядерном топливе при $\bar{V} = 40$ МВт·сут/кг U?

Решение. Согласно решению задачи 2.3.3 на 1 кг загруженного топлива накопится $1,23 \cdot 40 = 49,22$ г шлаков с учетом ²³⁶U.

2.3.5. С какой скоростью накапливаются шлаки при работе ЯР на $N_0 = 1000$ МВт ($\eta_{\text{АЭС}} = 30$ %)?

Решение. Согласно (2.1.7) $\frac{dm_{\text{шл}}}{dt} = 0,51 \frac{N_0}{\eta} = \frac{0,051 \cdot 1000}{0,3} = 17$ г/ч.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается влияние на ρ выгорания и шлакования?
2. Влияет ли радиоактивный распад продуктов деления на $\rho_{\text{шл}}$?
3. Чем ограничена глубина выгорания ядерного топлива?

§ 2.4. СТАЦИОНАРНОЕ ОТРАВЛЕНИЕ КСЕНОНОМ

Среди осколков деления и продуктов их распада есть два отравителя — нуклиды $^{135}_{54}\text{Xe}$ и $^{149}_{62}\text{Sm}$, поведение которых в активной зоне и влияние на ρ существенно отличаются от шлакования (см. § 2.3).

Можно выделить четыре характерные для отравления особенности:

- 1) очень большое сечение поглощения тепловых нейтронов (на 3—5 порядков больше, чем при шлаковании);
- 2) быстрое достижение равновесной концентрации (для Xe через 30—40 ч, для Sm — 8—10 сут);
- 3) увеличение отравления после остановки ЯР (иодная яма и прометиевый провал);
- 4) временное увеличение или уменьшение ρ , обусловленное изменением концентрации Xe и Sm после изменения мощности ЯР.

Примечание. Иногда стационарное отравление ^{149}Sm относят к шлакованию. Но нестационарное отравление Sm (прометиевый провал, см. § 2.7) нужно учитывать отдельно от других поглотителей.

Уменьшение ρ , а следовательно, и $\rho_{\text{зак}}$, обусловленное поглощением нейтронов в сильных поглотителях, удобно характеризовать *отравлением* — отношением количества поглощений в поглотителе к количеству поглощений в топливе:

$$W = (\bar{\Phi} \Sigma_a V)_{\text{погл}} / (\bar{\Phi} \Sigma_a V)_{\text{топл}}, \quad (2.4.1)$$

где Φ [нейтр/(см²·с)], Σ_a (см⁻¹), V (см³) — плотность потока нейтронов, макроскопическое сечение поглощения, объем топлива и поглотителя нейтронов соответственно.

Для поглотителей, находящихся непосредственно в месте расположения топлива, $V_{\text{топл}} = V_{\text{погл}}$, $\Phi_{\text{топл}} = \Phi_{\text{погл}}$ и, следовательно,

$$W = \Sigma_a^{\text{погл}} / \Sigma_a^{\text{топл}} = (\sigma_a^{\text{погл}} / \sigma_a^{\text{топл}}) (N_{\text{погл}} / N_{\text{топл}}),$$

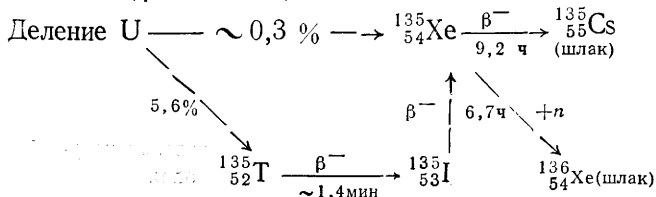
где $N_{\text{погл}}$ и $N_{\text{топл}}$ — концентрация поглотителя и топлива, ядер/см³.

Для ЯР на тепловых нейтронах *потеря реактивности за счет отравления*

$$\rho_{\text{отр}} \approx -\theta W, \quad (2.4.2)$$

где θ — коэффициент использования тепловых нейтронов неотравленного ЯР (1.4.4). В ЯР на быстрых нейтронах $\rho_{\text{отр}} \approx 0$ (см. задачу 2.4.4).

Нуклид ^{135}Xe образуется в активной зоне как продукт распада ^{135}I (удельный выход $\gamma_{\text{I}} \approx 5,6\%$) и непосредственно как осколок деления ($\gamma_{\text{Xe}} \approx 0,3\%$):



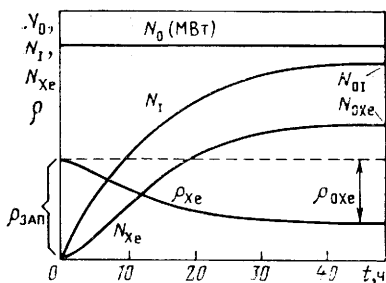


Рис. 2.4.1. Динамика установления стационарного отравления Хе

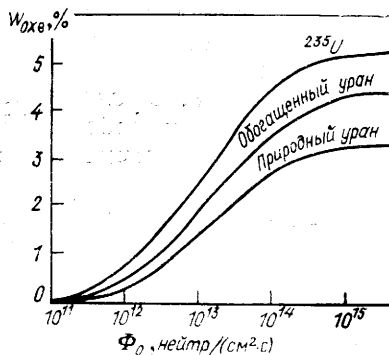


Рис. 2.4.2. Зависимость стационарного отравления Хе от Φ и обогащения U

На рис. 2.4.1 показан характер изменений концентрации I, Хе отравления Хе и $\rho_{\text{зап}}$, происходящих при работе ЯР на стационарной мощности.

Накопление I при работе ЯР на стационарной мощности N_0 , т. е. при постоянной скорости образования I, происходит по экспоненциальному закону с периодом полураспада $T_I = 6,7$ ч:

$$N_I(t) = N_{0I} (1 - e^{-\lambda_I t}).$$

Равновесная концентрация I прямо пропорциональна мощности ЯР (плотности потока Φ_0):

$$N_{0I} = \frac{\gamma_I}{\lambda_I} \Sigma_f^{\text{топ}} \Phi_0 \text{ ядер/см}^3, \quad (2.4.3)$$

где $\gamma_I = 0,056$ — удельный выход I; $\lambda_I = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — постоянная распада I; $\Sigma_f^{\text{топ}}$ — макроскопическое сечение деления топлива, см^{-1} . Равновесие наступает, когда скорость радиоактивного распада I становится равной скорости его рождения из распадающегося Те, выход которого пропорционален мощности.

Стационарная концентрация Хе определяется равновесием между скоростью прибыли Хе из распадающегося I и непосредственно как осколка деления и скоростью убыли его вследствие поглощения нейтронов и радиоактивного распада. При работе на стационарной мощности (плотность потока Φ_0)

$$N_{0Xe} = \Phi_0 \Sigma_f^{U-235} (\gamma_I + \gamma_{Xe}) / (\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0) \text{ ядер/см}^3, \quad (2.4.4)$$

где $\gamma_{Xe} = 0,003$ — удельный выход Хе; $\lambda_{Xe} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — постоянная распада Хе.

Временем установления равновесной концентрации I и Хе при практических расчетах можно считать время, когда их концентрация достигает значения, отличающегося от равновесного на 10—15%. Это соответствует времени, равному примерно 4—5 пе-

риодам полураспада рассматриваемого нуклида, что в данном случае составляет ~ 40 ч работы на стационарной мощности (см. рис. 1.2.1, 1.2.2).

Уменьшение ρ , а следовательно, и $\rho_{\text{зап}}$ из-за стационарного отравления Хе при работе ЯР на постоянном уровне мощности в течение ~ 40 ч стремится к значению

$$\rho_{0 \text{ Хе}} = -\theta W_{0 \text{ Хе}} = -\theta \frac{\sigma_{\text{Хе}} (\gamma_{\text{I}} + \gamma_{\text{Хе}}) \Phi_0}{\lambda_{\text{Хе}} + \sigma_{\text{Хе}} \Phi_0} \frac{\sigma_f^{U-235}}{\sigma_a^{U-235} + \sigma_a^{U-238} (1-x)/x}, \quad (2.4.5)$$

где $W_{0 \text{ Хе}}$ — отравление ЯР Хе; θ — коэффициент использования тепловых нейтронов; $\sigma_{\text{Хе}}$ — сечение поглощения нейтронов Хе, см^2 ; $\gamma_{\text{I}} = 0,056$, $\gamma_{\text{Хе}} = 0,003$ — удельный расход I и Хе как продуктов деления; x — обогащение изотопом ^{235}U ; σ_f^{U-235} , σ_a^{U-235} , σ_a^{U-238} — микроскопические сечения деления (f) и поглощения (a) изотопов урана, см^2 .

Стационарное отравление Хе, как видно из формулы (2.4.5), зависит от сечения поглощения нейтронов, обогащения топлива и плотности потока нейтронов (мощности ЯР).

В табл. 2.4.1 приведена зависимость сечения поглощения нейтронов Хе от температуры (энергии) нейтронов в узком интервале теплового спектра (при энергии нейтронов 0,084 эВ $\sigma_{\text{Хе}} = 3,5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$).

Таблица 2.4.1

$T, \text{ К}$	300	400	500	600	700	800
$\sigma_{\text{Хе}}, 10^{-18} \text{ см}^2$	2,75	2,52	2,29	2,07	1,87	1,7

С увеличением обогащения отравление Хе возрастает. Это объясняется тем, что при прочих равных условиях в двух ЯР с различным обогащением и одинаковой загрузкой ^{235}U доля поглощений в Хе меньше в том ЯР, где больше ^{238}U , который для тепловых нейтронов является поглотителем. С уменьшением концентрации ^{238}U при той же плотности потока и загрузке ^{235}U доля поглощений в Хе увеличивается (рис. 2.4.2).

С увеличением концентрации топлива в активной зоне при постоянном обогащении отравление Хе уменьшается, так как при одной и той же концентрации Хе (т. е. для данной мощности) с увеличением концентрации топлива доля поглощений в Хе уменьшается. При небольших Φ_0 или малом $\sigma_{\text{Хе}}$ (для надтепловых и быстрых нейтронов), когда $\lambda_{\text{Хе}} \gg \sigma_{\text{Хе}} \Phi_0$, как следует из (2.4.5), отравление и потеря $\rho_{\text{зап}}$ пропорциональны Φ :

$$\rho_{0Xe} \approx -\theta (\gamma_I + \gamma_{Xe}) \frac{\sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe}} \frac{\Sigma_f^{U-235}}{\lambda_{Xe} \Sigma_a^U} \Phi_0.$$

При очень больших Φ_0 [для ЯР на тепловых нейтронах при $\Phi_0 > 10^{14}$ нейтр/(см²·с)] и большом σ_{Xe} , когда $\lambda_{Xe} \ll \sigma_{Xe} \Phi_0$, ρ_{0Xe} не зависит от Φ_0 :

$$\rho_{0Xe} \approx -\theta (\gamma_I + \gamma_{Xe}) \Sigma_f^{U-235} / \Sigma_a^U. \quad (2.4.6)$$

Это объясняется тем, что при большом Φ_0 скоростью радиоактивного распада Xe можно пренебречь по сравнению со скоростью его выгорания. А это значит, что прибыль и убыль Xe зависят только от плотности потока нейтронов: на сколько изменится прибыль, на столько же изменится и убыль. Следовательно, равновесная концентрация Xe, как и Sm (см. § 2.6), для различных уровней мощности остается постоянной (см. задачу 2.4.3).

Для чистого ²³⁵U отравление Xe достигает максимального значения, но не более 5%:

$$\rho_{0Xe}^{max} \approx -\theta (\gamma_I + \gamma_{Xe}) \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_a} \right)_{U-235} \approx -\theta \cdot 0,059 \cdot 0,85 \frac{1}{0+1} \approx -5 \%.$$

Когда $\lambda_{Xe} \approx \sigma_{Xe} \Phi_0$, что характерно для энергетических ЯР на тепловых нейтронах, зависимость (2.4.5) от мощности имеет вид, представленный на рис. 2.4.3. Это график зависимости потери ρ_{0Xe} из-за стационарного отравления Xe от мощности, на которой реактор ТР работал до установления стационарного отравления, т. е. в течение 30—40 ч. Значения ρ_{0Xe} взяты характерными для ЯР на тепловых нейтронах.

Как видно из рис. 2.4.3, с увеличением мощности ЯР скорость увеличения стационарного отравления Xe уменьшается: так, при

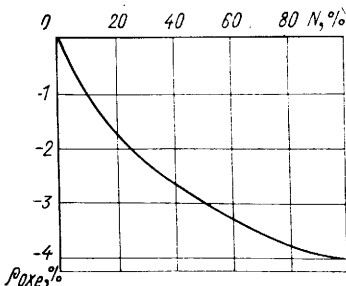


Рис. 2.4.3. Зависимость стационарного отравления Xe от мощности реактора ТР и ВВЭР

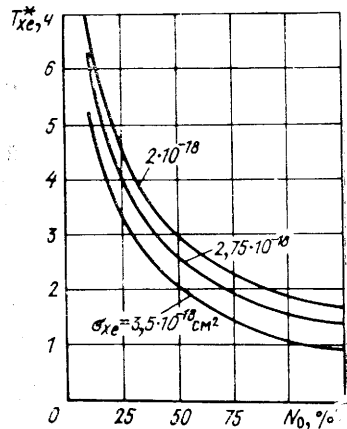


Рис. 2.4.4. Зависимость k_{Xe}^* (2.4.7) от мощности реактора ТР для различных значений σ_{Xe}

мощности 50 % $N_{\text{ном}} \rho_{0\text{Xe}} = -3\%$, а с увеличением мощности еще на 50 % (в 2 раза) $\rho_{0\text{Xe}} = -4\%$, т. е. увеличивается всего на $\Delta\rho_{0\text{Xe}} = -1\%$ (в 1,33 раза).

Зависимость $\rho_{0\text{Xe}}$ от мощности дает возможность получить дополнительный энергозапас после выработки номинальной кампании при дальнейшей работе на мощности $N < N_{\text{ном}}$ (см. § 2.9).

При работе на мощности наряду с радиоактивным распадом Xe с постоянной распада λ_{Xe} (с^{-1}) он уничтожается нейтронами (выгорает) со скоростью $\sigma_{\text{Xe}}\Phi_0$ (с^{-1}) и суммарная убыль его происходит с *эффективным периодом полураспада*

$$T_{\text{Xe}}^* = \frac{0,693}{\lambda_{\text{Xe}}^*} = \frac{0,693}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}}\Phi_0} = 9,2 \left/ \left(1 + \frac{\Phi_{\text{ном}}\sigma_{\text{Xe}}}{10^2\lambda_{\text{Xe}}} N_0 \right) \right.,$$

где $\Phi_{\text{ном}}$ — плотность потока нейтронов, соответствующая $N_{\text{ном}}$; N_0 — мощность, на которой работает ЯР, в процентах $N_{\text{ном}}$ (рис. 2.4.4).

Для реактора ТР $\Phi_{\text{ном}} = 4 \cdot 10^{13}$ нейтр/ ($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), и для $\sigma_{\text{Xe}} = 2,0 \times 10^{-18}$ см^2 получим

$$T_{\text{Xe}}^* = 9,2 / (1 + 0,04N_0) \text{ ч.} \quad (2.4.7)$$

Уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ из-за отравления Xe в любой момент времени t (с) до установления стационарного отравления определяется следующим соотношением:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = \rho_{0\text{Xe}} \left[(\Lambda - 1) e^{-\lambda_{\text{Xe}}^* t} + (1 - \Lambda e^{-\lambda_{\text{I}} t}) \right], \quad (2.4.8)$$

где $\rho_{0\text{Xe}}$ — потеря реактивности при достижении равновесного отравления (2.4.5); $\lambda_{\text{Xe}}^* = \lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}}\Phi_0$ — эффективная постоянная распада (2.4.7), с^{-1} ; $\Lambda = \lambda_{\text{Xe}}^* / (\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_{\text{I}})$.

Для реактора ТР эта зависимость имеет вид

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = \rho_{0\text{Xe}} [0,4 e^{-10^{-4}t} + (1 - 1,4 e^{-2,9 \cdot 10^{-5}t})].$$

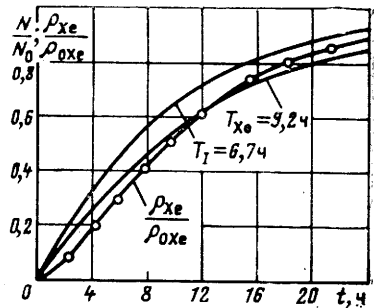
Она представлена в виде графика $\rho_{\text{Xe}}(t)/\rho_{0\text{Xe}} = f(t)$ на рис. 2.4.5. Для сравнения даны экспоненты накопления с $T_{\text{Xe}} = 9,2$ ч и $T_{\text{I}} = 6,7$ ч.

Примечание. По кривой накопления I с $T_{\text{I}} = 6,7$ ч на рис. 2.4.5 можно также определить, какому уровню мощности $N(\Phi)$ по отношению к N_0 соответствует концентрация I в момент t после пуска ЯР (см. задачу 2.5.6).

Так как при $\Phi_0 \geq 10^{13}$ нейтр/ ($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) $\lambda_{\text{Xe}}^* > \lambda_{\text{I}}$, то первый член (2.4.8) стремится к нулю и влияет на характер отравления только на начальном участке кривой, замедляя процесс отравления. Как видно из рис. 2.4.5, кривая отравления Xe в течение ~ 20 ч после пуска ближе к экспоненте с $T_{\text{Xe}} = 9,2$ ч, а потом — с $T_{\text{I}} = 6,7$ ч. Поэтому оценить $\rho_{\text{Xe}}(t)$ до установления стационарного уровня можно по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } t < 20 \text{ ч } \rho_{\text{Xe}}(t) \approx \rho_{0\text{Xe}} (1 - 2^{-t/9}); \\ \text{при } t > 20 \text{ ч } \rho_{\text{Xe}}(t) \approx \rho_{0\text{Xe}} (1 - 2^{-t/7}). \end{array} \right\} \quad (2.4.9)$$

Рис. 2.4.5. Установление концентрации I и стационарного отравления Xe



Погрешность при таком построении кривой потери $\rho_{\text{зап}}$ из-за отравления будет на начальном участке в сторону завышения отравления. Но чем больше мощность ЯР, тем меньше относительная погрешность (см. задачу 2.4.6).

Время $t(\rho_{\text{Xe}})$, когда отравление Xe достигнет значения $\rho_{\text{Xe}}(t)$, можно оценить из (2.4.8) по приближенной формуле (см. задачу 2.4.7)

$$t(\rho_{\text{Xe}}) \approx \frac{1}{\lambda_I} \ln \frac{\Lambda}{(1 - \rho_{\text{Xe}}(t)/\rho_{0 \text{Xe}})} \quad (2.4.10)$$

Оператор должен уметь оценивать отравление в любой момент до установления стационарного значения и использовать графическую зависимость стационарного отравления от мощности при:

- 1) определении критического положения органов регулирования перед пуском ЯР;
- 2) расчете дополнительного энергозапаса в случае работы ЯР на мощности ниже номинальной;
- 3) оценке поведения органов регулирования после вывода ЯР на мощность.

Задачи с решениями

2.4.1. Два ЯР (на тепловых и надтепловых нейтронах) с объемами активных зон $V_{\text{а.з}} = 2,0 \text{ м}^3$ работают на $N_{\text{ном}} = 100 \text{ МВт}$. Оценить равновесную концентрацию I в каждом ЯР.

Решение. Согласно (2.4.3) при работе ЯР любого типа на одной и той же мощности в нем устанавливается одинаковая равновесная концентрация I. Действительно, так как мощности равны, то количество делений в обоих ЯР одинаково:

$$(\Phi \Sigma_f^{U-235})_{\text{т}} = (\Phi \Sigma_f^{U-235})_{\text{н.т}} = \frac{N}{V_{\text{а.з}}} \cdot 3,1 \cdot 10^{13} \frac{\text{дел}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ (кВт)}}{10^6 \cdot 2 \text{ (см}^3)} \times \\ \times 3,1 \cdot 10^{13} \left(\frac{\text{дел}}{\text{кВт} \cdot \text{с}} \right) = 1,55 \cdot 10^{12} \frac{\text{дел}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$$

Таким образом, подставляя в формулу (2.4.3) значения $\gamma_I = 0,056$; $\lambda_I = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и $\Phi \Sigma_f = 1,55 \cdot 10^{12} \text{ дел}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$, получаем

$$(N_{0I})_{\text{т}} = (N_{0I})_{\text{н.т}} = 0,056 \frac{1,55 \cdot 10^{12}}{2,9 \cdot 10^{-5}} = 3 \cdot 10^{15} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

2.4.2. Оценить соотношение между равновесными концентрациями Xe в двух эквивалентных по мощности, но различных по

спектру нейтронов ЯР (см. задачу 2.4.1). В ЯР на тепловых нейтронах $\Phi_T \approx 5 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с) и $\sigma_{Xe}^T \approx 3 \cdot 10^{-18}$ см², а в ЯР на надтепловых нейтронах $\Phi_{н.т} \approx 10^{15}$ нейтр/(см²·с) и $\sigma_{Xe}^{н.т} \approx 10^{-23}$ см².

Решение. Равновесная концентрация Хе определяется соотношением (2.4.4), согласно которому

$$\frac{N_{0Xe}^{н.т}}{N_{0Xe}^T} = \frac{\lambda_{Xe} + (\sigma_{Xe}\Phi)_T}{\lambda_{Xe} + (\sigma_{Xe}\Phi)_{н.т}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} + 3 \cdot 10^{-18} \cdot 5 \cdot 10^{13}}{2,1 \cdot 10^{-5} + 10 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{15}} \approx 8.$$

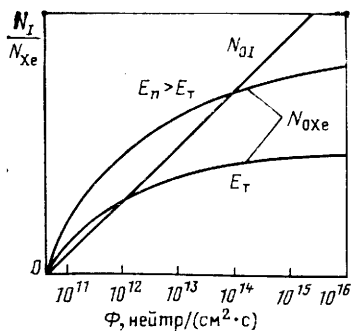
Вывод: в ЯР на надтепловых нейтронах вследствие того что убыль Хе практически определяется только радиоактивным распадом, его равновесная концентрация значительно больше, чем в ЯР на тепловых нейтронах, где Хе еще и выгорает ($\sigma_{Xe}^T \gg \sigma_{Xe}^{н.т}$).

2.4.3. Как изменяется соотношение между равновесными концентрациями I и Хе при увеличении мощности ЯР и при ужесточении спектра нейтронов?

Решение. Из соотношений (2.4.3) и (2.4.4) следует, что равновесная концентрация I прямо пропорциональна мощности ($N_{0I} = aN_0$), равновесная концентрация Хе при увеличении мощности стремится к предельному значению $N_{0Xe} = \frac{1}{b + c/N} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \frac{1}{b}$.

Отношение этих величин $[N_{0Xe}/N_{0I} = \lambda_I / (\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe}\Phi \xrightarrow{\Phi \rightarrow \infty} 0)]$ показывает, что чем больше мощность (плотность потока Φ) ЯР, тем меньше равновесная концентрация Хе по сравнению с равновесной концентрацией I. Для ЯР на тепловых нейтронах при $\sigma_{Xe} = 10^{-18}$ см² $N_{0Xe} \leq N_{0I}$ уже при $\Phi \geq (\lambda_I - \lambda_{Xe}) / \sigma_{Xe} = 4 \times 10^{12}$ нейтр/(см²·с) [из условия $N_{0Xe}/N_{0I} = \lambda_I / (\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe}\Phi) \leq 1$]. При ужесточении спектра нейтронов σ_{Xe} быстро уменьшается и равновесная концентрация Хе по отношению к концентрации I увеличивается. Например, при $\sigma_{Xe} \approx 10^{-21}$ см² $N_{0Xe} \leq N_{0I}$ только при $\Phi \geq 10^{14}$ нейтр/(см²·с).

Из представленных на рис. 2.4.6 графических зависимостей видно, что соотношение между равновесными концентрациями Хе и I при изменении Φ (т. е. мощности ЯР) и спектра нейтронов (т. е. типа ЯР) существенно изменяется: чем больше мощность, тем больше N_{0I} по сравнению с N_{0Xe} , но для более жесткого



спектра нейтронов при той же концентрации I равновесная концентрация Хе увеличивается. Эти зависимости заметно влияют на глубину ямы (см. задачи 2.5.1—2.5.3).

2.4.4. Оценить, во сколько раз больше стационарное отравление Хе в ЯР с тепловым спектром нейтронов, чем с надтепловым. Для оценки взять ЯР, рассмотренные в задачах 2.4.1 и 2.4.2.

Рис. 2.4.6. К задаче 2.4.3

Решение. Для приближенной оценки отравления можно воспользоваться соотношением (2.4.1). Отношение отравлений ЯР при условии, что они работают на одинаковой мощности,

$$W_{0\text{Xe}}^T/W_{0\text{Xe}}^{H.T} = (\Phi \Sigma_a^{Xe})_T / (\Phi \Sigma_a^{Xe})_{H.T} = (\Phi \sigma_{Xe} N_{0\text{Xe}})_T / (\Phi \sigma_{Xe} N_{0\text{Xe}})_{H.T}.$$

Используя значения Φ_T , $\Phi_{H.T}$, σ_{Xe}^T , $\sigma_{Xe}^{H.T}$, $N_{0\text{Xe}}^T/N_{0\text{Xe}}^{H.T}$ из задач 2.4.1 и 2.4.2, получаем

$$W_{0\text{Xe}}^T/W_{0\text{Xe}}^{H.T} \approx 5 \cdot 10^{13} \cdot 3 \cdot 10^{-18} / (10^{15} \cdot 10^{-23} \cdot 8) \approx 2 \cdot 10^3.$$

Вывод: в надтепловом ЯР отравление Хе практически равно нулю.

2.4.5. Как изменится отравление Хе, если, не меняя концентрации топлива и мощности ЯР, уменьшить объем активной зоны в 2 раза?

Решение. Из всех параметров, определяющих $\rho_{0\text{Xe}}$ (2.4.5), только Φ_0 изменится при уменьшении объема активной зоны и поддержании той же мощности. Действительно, согласно (1.5.1) мощность ЯР останется постоянной при уменьшении объема активной зоны в 2 раза ($V_{a.з}/2$), если Φ_0 увеличить в 2 раза ($2\Phi_0$):

$$N = \frac{\Phi_0 \Sigma_f^{U-235} V_{a.з}}{3,2 \cdot 10^{13}} = \frac{(2\Phi_0) \Sigma_f^{U-235} (V_{a.з}/2)}{3,2 \cdot 10^{13}} \text{ кВт.}$$

Вывод: при уменьшении объема активной зоны в 2 раза без изменения концентрации топлива стационарное отравление Хе увеличится так же, как если бы мощность ЯР увеличили в 2 раза. Исходя из (2.4.5), получаем

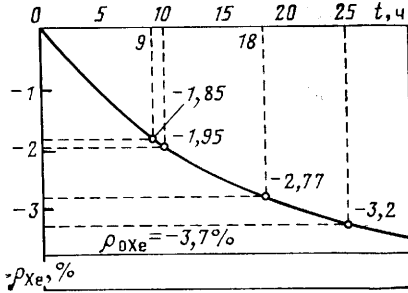
$$\rho_{0\text{Xe}_1}/\rho_{0\text{Xe}_2} = 1/2 (\lambda_{\text{Xe}} + 2\Phi_0 \sigma_{\text{Xe}}) / (\lambda_{\text{Xe}} + \Phi_0 \sigma_{\text{Xe}}).$$

Этот эффект в какой-то мере будет иметь место в ЯР при перемещении в активной зоне тяжелых КР в процессе кампании.

2.4.6. Реактор ТР из разотравленного состояния выведен на мощность 80% $N_{\text{ном}}$. На сколько изменится $\rho_{\text{зап}}$ из-за отравления Хе через 10 ч работы ЯР на этой мощности?

Решение. Потеря $\rho_{\text{зап}}$ из-за стационарного отравления Хе при работе на мощности 80% $N_{\text{ном}}$ более 2 сут (см. рис. 2.4.3) $\rho_{0\text{Xe}} \approx -3,7\%$. Потерю $\rho_{\text{зап}}$ в любой момент до установления стационарного значения удобно и просто определять графически — строить экспоненту, стремящуюся к значению $\rho_{0\text{Xe}}$ согласно (2.4.9) сначала с $T_{\text{Xe}} \approx 9$ ч, а через ~ 20 ч — с $T_1 \approx 7$ ч; через ~ 9 ч $\rho_{\text{Xe}1} = 0,5 \rho_{0\text{Xe}} = 0,5(-3,7)\% = -1,85\%$; через следующие ~ 9 ч, т. е. через ~ 18 ч, $\rho_{\text{Xe}2} = -1,85\% + 0,5(-1,85\%) = -2,77\%$, через следующие ~ 7 ч, т. е. через ~ 25 ч, $\rho_{\text{Xe}} = -2,77\% + 0,5(-0,93) \approx -3,2\%$ и т. д. до $-3,7\%$. Через 10 ч работы (рис. 2.4.7) $\rho_{\text{Xe}} \approx -1,95\%$. По реальной кривой для реактора ТР (рис. 2.4.5) $\rho_{\text{Xe}}(10 \text{ ч})/\rho_{0\text{Xe}} = 0,52$, т. е. $\rho_{\text{Xe}}(10 \text{ ч}) = 0,52(-3,7)\% = -1,92\%$. Оценка по формуле (2.4.10) для $\rho_{\text{Xe}} \approx -1,9\%$ дает $t \approx 10 \ln[1,5/(1 - 1,9/3,7)] \approx 10$ ч (см. задачу 2.4.7).

Рис. 2.4.7. К задачам 2.4.6 и 3.4.8



2.4.7. Оценить время, когда отравление Xe достигнет 80, 90, 95 и 99 % равновесного для реактора ТР.

Решение. Подставляя в формулу (2.4.10) значения $\Phi_{\text{ном}} = 4 \cdot 10^{13}$ нейтр/ (см²·с); $\sigma_{\text{Xe}} = 2 \times 10^{-18}$ см²; $\lambda_{\text{Xe}} = 2,1 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹; $\lambda_1 = 2,9 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹, получаем $t \approx 10 \ln \{1,5/[1 - \rho_{\text{Xe}}(t)/\rho_{0\text{Xe}}]\}$, от-

куда находим, что отравление Xe будет отличаться от равновесного на 20 % через ~ 20 ч, на 10 % через ~ 30 ч, на 5 % через ~ 35 ч, на 1 % через ~ 50 ч.

2.4.8. В момент вывода ЯР на $N_{\text{ном}}$ отравление Xe компенсировало $\Delta\rho_{\text{зап}} = 2$ %. Как изменятся $\rho_{\text{зап}}$ вследствие отравления Xe при работе на мощности после пуска ЯР?

Решение. После вывода ЯР на мощность в нем накапливаются I, Xe и уменьшается $\rho_{\text{зап}}$. Но если в момент пуска в активной зоне уже есть Xe, то он будет уничтожаться потоком нейтронов, соответствующим данной мощности, и, таким образом, эта составляющая отравления будет уменьшаться с эффективным периодом T^*_{Xe} (2.4.7). Суммарный эффект отравления в этом случае удобно определять графически: построить кривую I (рис. 2.4.8) уменьшения $\rho_{\text{зап}}$, согласно (2.4.9) стремящуюся к значению $\rho_{0\text{Xe}}^{100\%} = -4$ %, и кривую II изменения ρ_{Xe} от значения -2 % до нуля с $T^*_{\text{Xe}} = 9,2/(1+4) \approx 1,8$ ч, а также суммарную кривую III изменения $\rho_{\text{зап}}$ после вывода ЯР на $N_{\text{ном}}$. Как видно из рисунка, в течение 2—3 ч после пуска происходит увеличение ρ вследствие интенсивного выгорания Xe. Но в дальнейшем убыль Xe начинает компенсироваться прибылью его из накапливающегося и потом распадающегося I. После 4—5 ч работы отравление Xe происходит практически по закону (2.4.8).

2.4.9. Реактор ТР в разогретом до рабочей температурьк

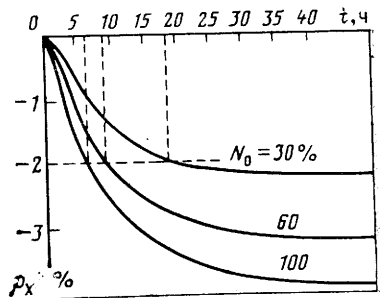
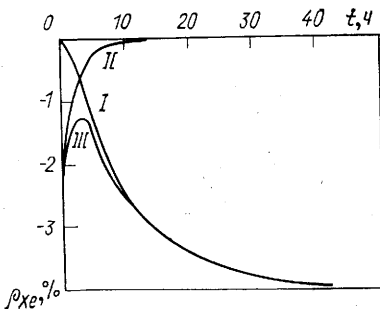


Рис. 2.4.8. К задаче 2.4.8

Рис. 2.4.9. К задаче 2.4.9

разотравленном состоянии имеет $\rho_{\text{зап}}=2\%$. Сколько примерно сможет работать ЯР на мощности 30%, 60% и 100% $N_{\text{ном}}$?

Решение. Как видно из графика рис. 2.4.3, потеря $\rho_{\text{зап}}$ из-за стационарного отравления Хе для мощностей 30, 60, 100% $N_{\text{ном}}$ больше оставшегося $\rho_{\text{зап}}$ в момент пуска. Следовательно, в каждом случае ЯР сможет работать на мощности до тех пор, пока $\rho_{\text{Хе}}(t)$, стремящееся соответственно к значениям $-2,25\%$, $-3,25\%$ и -4% , станет равным -2% . На рис. 2.4.9 построены кривые $\rho_{\text{Хе}}(t)=f(N_0, t)$ согласно (2.4.9), из которых видно, что на мощности 30% ЯР сможет работать около 20 ч, на 60% — около 8 ч, на $N_{\text{ном}}$ — около 6 ч.

2.4.10. Реактор ТР работал на различных уровнях мощности: $N_1=100\%$ в течение $t_1=30$ ч; $N_2=30\%$ в течение $t_2=10$ ч; $N_3=80\%$ в течение $t_3=15$ ч и перед остановкой $N_4=50\%$ в течение $t_4=12$ ч. Чему равно отравление Хе на момент остановки?

Решение. Поскольку на каждом уровне мощности ЯР работал менее 40 ч, $\rho_{\text{Хе}}$ не достигало на момент ее изменения равновесного значения (2.4.5). Поэтому точное определение $\rho_{\text{Хе}}$ требует довольно громоздких построений [4]. Приближенно, но вполне достаточно для практических целей можно оценить $\rho_{\text{Хе}}$ по средней мощности за последние ~ 40 ч работы. Учитывать Хе и I, которые были в ЯР 40 ч и более до остановки, нет смысла, так как к моменту остановки они распадутся и влиять на $\rho_{\text{Хе}}$ не будут. Более того, если ЯР за 40 ч до остановки работал на мощности, существенно отличающейся от полученной средней, учет ее только внесет ошибку в расчет. Итак,

$$\bar{N} = (50 \cdot 12 + 80 \cdot 15 + 30 \cdot 10 + 100 \cdot 3) / 40 = 60\% N_{\text{ном}}$$

По графику рис. 2.4.3 находим $\rho_{0\text{Хе}}^{60\%} = -3,3\%$.

2.4.11. Разотравленный реактор ТР выведен на номинальную мощность. Оценить отравление Хе через 10 и 20 ч работы по точной кривой отравления Хе (см. рис. 2.4.5) и по приближенной методике (см. задачу 2.4.10).

Решение. По кривой $\rho_{\text{Хе}}(t)/\rho_{0\text{Хе}}=f(t)$ на рис. 2.4.5 определяем $\rho_{\text{Хе}}(10 \text{ ч})/\rho_{0\text{Хе}}=0,52$; $\rho_{\text{Хе}}(20 \text{ ч})/\rho_{0\text{Хе}}=0,83$. Так как в данном случае $\rho_{0\text{Хе}}=\rho_{0\text{Хе}}^{100\%}=-4\%$ (см. рис. 2.4.3), то $\rho_{\text{Хе}}(10 \text{ ч})=0,52 \cdot (-4) \approx -2,1\%$; $\rho_{\text{Хе}}(20 \text{ ч})=0,83 \cdot (-4) \approx -3,3\%$.

По приближенной методике оцениваем, какому уровню мощности соответствует работа ЯР в течение ~ 40 ч: $\bar{N}(40 \text{ ч})=(100 \times 10 + 0 \cdot 30) / 40 = 25\% N_{\text{ном}}$; $\bar{N}(40 \text{ ч})=(100 \cdot 20 + 0 \cdot 20) / 40 = 50\% N_{\text{ном}}$. Для этих мощностей находим (рис. 2.4.3) $\rho_{\text{Хе}}^{100\%}(10 \text{ ч}) \approx \rho_{0\text{Хе}}^{25\%} \approx -2,0\%$; $\rho_{\text{Хе}}^{100\%}(20 \text{ ч}) = \rho_{0\text{Хе}}^{50\%} = -3,0\%$, что близко к полученным выше результатам.

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем отличается влияние на работу ЯР отравления Хе от шлакования?
2. Как изменяется равновесная концентрация I и Хе с увеличением мощности?

3. С какой скоростью устанавливается равновесная концентрация Xe при работе ЯР на стационарной мощности?

4. Почему с увеличением мощности зависимость ρ_{0Xe} от мощности ослабевает?

5. Какой $\rho_{зап}$ можно использовать для получения дополнительного энергозапаса при работе реактора ТР на мощности 70 % $N_{ном}$?

6. При пуске реактора ТР $\rho_{0Xe} = -1\%$. Как будет изменяться ρ из-за отравления Xe после выхода на мощность 80 % $N_{ном}$?

7. При работе реактора ТР на мощности 50 % $N_{ном}$ в течение 10 сут $\rho_{зап}$ стал почти равным нулю. На какую мощность можно вывести ЯР и в течение какого времени можно работать на этой мощности после 4 сут стоянки?

8. $\rho_{зап}$ должен иметь реактор ТВ в разогретом состоянии, чтобы он смог работать на $N_{ном}$ в течение 20 ч?

§ 2.5. НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОТРАВЛЕНИЕ КСЕНОНОМ

Изменение мощности ЯР приводит к нарушению динамического равновесия между прибылью и убылью Xe. После остановки или снижения мощности происходит временное увеличение концентрации Xe вследствие распада I и соответствующее уменьшение $\rho_{зап}$, которое называют *ямой* (иногда *ксеноновой ямой*). После увеличения мощности наблюдается временное уменьшение концентрации Xe и соответствующее увеличение $\rho_{зап}$.

На рис. 2.5.1, а—в графически представлены процессы, обуславливающие нестационарное отравление Xe при изменении мощности:

а) после остановки ЯР (рис. 2.5.1, а) прекращаются рождение I и выгорание Xe. Накопившиеся к моменту остановки I и Xe продолжают распадаться с $T_I = 6,7$ и $T_{Xe} = 9,2$ ч соответственно. Но так как распад I фактически представляет собой рождение Xe, причем этот процесс происходит быстрее, чем распад Xe, то концентрация Xe временно увеличивается, пока $\lambda_{Xe} N_{Xe} < \lambda_I N_I$. При $\lambda_{Xe} N_{Xe} \geq \lambda_I N_I$, т. е.

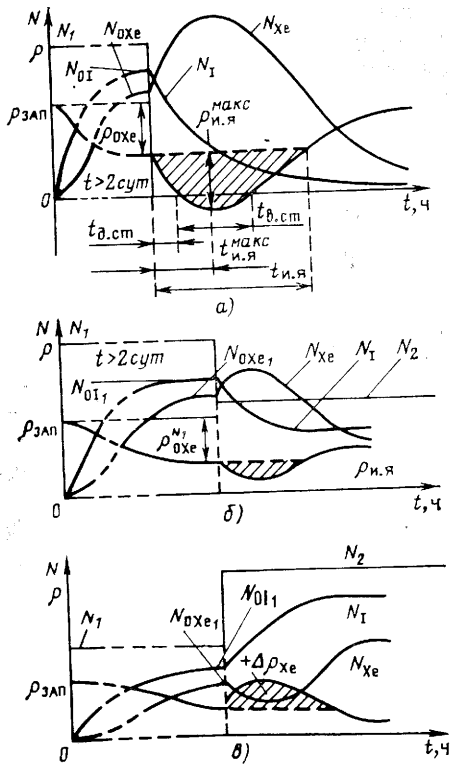


Рис. 2.5.1. Нестационарное отравление Xe после остановки ЯР (а), снижения мощности (б), увеличения мощности (в)

$N_{Xe} \geq \lambda_I N_I / \lambda_{Xe} = 1,38 N_I$, концентрация Хе начинает убывать: сначала медленно, так как распадающийся I хотя бы частично компенсирует распад Хе, а потом быстрее и в конце концов с $T_{Xe} = 9,2$ ч. Пропорционально изменению концентрации Хе, но с обратным знаком изменяется $\rho_{зап}$, образуя иодную яму;

б) после снижения мощности имеет место иодная яма (рис. 2.5.1, б), как и после остановки, но глубина и длительность ее при таком же диапазоне изменения будут меньше. Это объясняется тем, что при снижении мощности концентрация Хе, накапливающегося из избыточного I, уменьшается не с $T_{Xe} = 9,2$ ч, как при остановке, а быстрее, с T^*_{Xe} (2.4.7);

в) после перехода на большую мощность (рис. 2.5.1, в) вследствие увеличения скорости выгорания Хе концентрация его уменьшается, а ρ увеличивается. Но этот процесс со временем замедляется, так как на большой мощности увеличивается выход I, а следовательно, и Хе. Через некоторое время этот эффект начинает преобладать и отравление увеличивается в соответствии с новой равновесной концентрацией I и Хе.

В общем случае при изменении Φ (мощности ЯР) от значения Φ_1 до Φ_2 , после того как при Φ_1 установится стационарное отравление, изменение ρ происходит по следующему закону [6]:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{0Xe} \left[\frac{\lambda_{Xe1}^*}{\lambda_{Xe2}^*} \frac{\Phi_2}{\Phi_1} (1 - e^{-\lambda_{Xe2}^* t}) + \frac{\lambda_{Xe1}^*}{\lambda_{Xe2}^* - \lambda_I} \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times (e^{-\lambda_{Xe2}^* t} - e^{-\lambda_I t}) + e^{-\lambda_{Xe2}^* t} \right]. \quad (2.5.1)$$

Время после изменения мощности, когда нестационарное отравление достигнет экстремального значения (при уменьшении мощности — максимального, а при увеличении — минимального),

$$t^{экс} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe2}^*} \ln \frac{\lambda_I \lambda_{Xe1}^* (\Phi_2 / \Phi_1 - 1)}{\lambda_{Xe1}^* \lambda_I \Phi_2 / \Phi_1 + \lambda_{Xe2}^* (\lambda_{Xe2}^* - \lambda_{Xe1}^* - \lambda_I)}. \quad (2.5.2)$$

Подставляя в (2.5.1) $\Phi_2 = 0$, получаем выражение для $\rho_{Xe}(t)$ после остановки ЯР:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{0Xe} \left[\frac{\lambda_{Xe}^*}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} (e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_{Xe}^* t}) + e^{-\lambda_{Xe}^* t} \right]. \quad (2.5.3)$$

Время, когда иодная яма после остановки ЯР достигает максимального значения, получается из формулы (2.5.2) при $\Phi_2 = 0$:

$$t_{и.я}^{макс} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \ln \left(\frac{1 - \Phi_0 \sigma_{Xe} / \lambda_{Xe}}{1 + \Phi_0 \sigma_{Xe} / \lambda_I} \right) = \\ = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \ln \left(\frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}} \frac{\lambda_{Xe} + \Phi_0 \sigma_{Xe}}{\lambda_I + \Phi_0 \sigma_{Xe}} \right). \quad (2.5.4)$$

В ЯР на тепловых нейтронах с большим Φ [$\Phi_1 \gg \lambda_{Xe}/\sigma_a^{Xe} \approx \approx 10^{14}$ нейтр/(см²·с)] время наступления $\rho_{и.я}^{макс}$ достигает наибольшего значения:

$$t_{и.я}^{макс} = (\lambda_I - \lambda_{Xe})^{-1} \ln(\lambda_I/\lambda_{Xe}) \approx 11 \text{ ч.}$$

После остановки или снижения мощности *иодная яма* равна

$$\rho_{и.я} = \rho_{Xe}(t) - \rho_{0Xe}, \quad (2.5.5)$$

где $\rho_{Xe}(t)$ — изменение ρ при изменении отравления Xe согласно (2.5.1); ρ_{0Xe} — потеря $\rho_{зап}$ из-за отравления в момент изменения мощности (2.4.5).

Промежуток времени, в течение которого $\rho_{зап}$ вследствие накопления Xe будет меньше своего значения на момент остановки, называется *продолжительностью иодной ямы*.

Примечание. Отравление Xe (стационарное значение, глубина и длительность иодной ямы) зависит от Φ , распределение которого неравномерно по активной зоне (см. § 1.5) и существенно изменяется в процессе эксплуатации ЯР. Поэтому для точного расчета отравления необходимо учитывать пространственное распределение плотности нейтронов, а для решения эксплуатационных задач лучше всего иметь экспериментальные кривые стационарного и нестационарного отравления.

При решении задач для конкретного ЯР необходимо иметь графики отравления Xe. На рис. 2.5.2 показан примерный характер зависимости $\rho_{Xe}(t)$ для реактора ТР при остановке его на различных мощностях, когда в момент остановки установилась равновесная концентрация I и Xe. Каждая кривая изменения ρ начинается от значения ρ_{0Xe} , соответствующего мощности ЯР до остановки, на которой он работал не менее ~ 40 ч. Эти кривые удобны для решения задач по определению времени вынужденной и допустимой стоянок ЯР после его остановки.

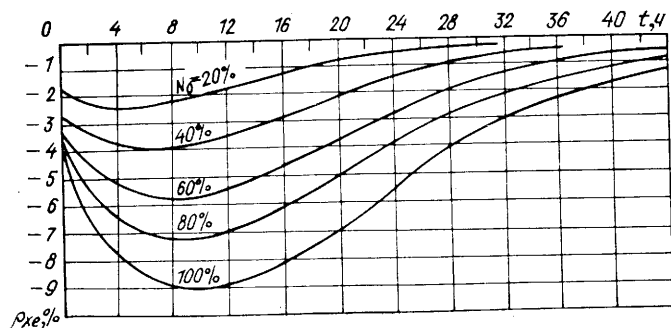


Рис. 2.5.2. Кривые иодных ям для реактора ТР

Рис. 2.5.3. Параметры иодных ям после остановки реактора ТР

Для решения некоторых задач достаточно знать только максимальное значение иодной ямы $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}}$ и время наступления этого максимума $t_{\text{и.я}}^{\text{макс}}$ (рис. 2.5.3).

Если необходимо определить отравление Xe в любой момент после снижения мощности или остановки ЯР, это можно делать аналитически по формулам (2.5.1) и (2.5.3), рассчитав заранее для конкретного ЯР основные составляющие этих зависимостей. Например, отравление Xe после остановки (2.5.3) можно представить так:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = \rho_{0\text{Xe}} \frac{\lambda_{\text{I}} - \sigma_{\text{Xe}} \Phi_0}{\lambda_{\text{I}} - \lambda_{\text{Xe}}} e^{-\lambda_{\text{Xe}} t} - \rho_{0\text{Xe}} \frac{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi_0}{\lambda_{\text{I}} - \lambda_{\text{Xe}}} e^{-\lambda_{\text{I}} t} = A e^{-\lambda_{\text{Xe}} t} - B e^{-\lambda_{\text{I}} t}. \quad (2.5.6)$$

Имея зависимости A и B от Φ_0 , т. е. от мощности ЯР до остановки, и графики экспонент с постоянными распада λ_{Xe} и λ_{I} как функции времени после остановки (рис. 2.5.4), $\rho_{\text{Xe}}(t)$ можно определить тремя арифметическими действиями (см. задачу 2.5.9). При $t=0$ $\rho_{\text{Xe}}(t) = \rho_{0\text{Xe}} = A - B$; при $t \rightarrow \infty$ $\rho_{\text{Xe}}(t) \rightarrow 0$.

Иодная яма через t часов после остановки (2.5.5) равна

$$\rho_{\text{и.я}}(t) = A(e^{-\lambda_{\text{Xe}} t} - 1) - B(e^{-\lambda_{\text{I}} t} - 1).$$

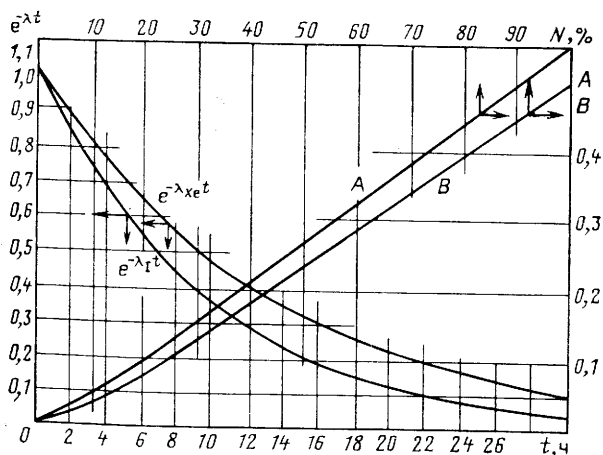


Рис. 2.5.4. К расчету отравления Xe

При снижении мощности от уровня N_1 , на котором уже установилась равновесная концентрация I и Xe, до уровня N_2 имеет место иодная яма (см. рис. 2.5.1, б), параметры которой — максимальную глубину $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}}$ и время наступления максимума $t_{\text{и.я}}^{\text{макс}}$ — можно определить по графикам рис. 2.5.5, построенным по формуле (2.5.1) при $\Phi_2 < \Phi_1$. Так, для определения параметров иодной ямы при переходе с $N_1=80\%$ на $N_2=20\%$ $N_{\text{ном}}$ по кривым для $N_1=80\%$ против значения $N_2=20\%$ (по оси абсцисс) находим по оси ординат $t_{\text{и.я}}^{\text{макс}} \approx 6$ ч (верхняя кривая), $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} \approx -2\%$ (нижняя кривая).

Время после остановки ЯР, в течение которого глубина иодной ямы не превышает $\rho_{\text{зап}} = \rho_{\text{оп}}$ в момент остановки, называется *временем допустимой стоянки* $t_{\text{д.ст}}$ (*оперативным временем*). Время

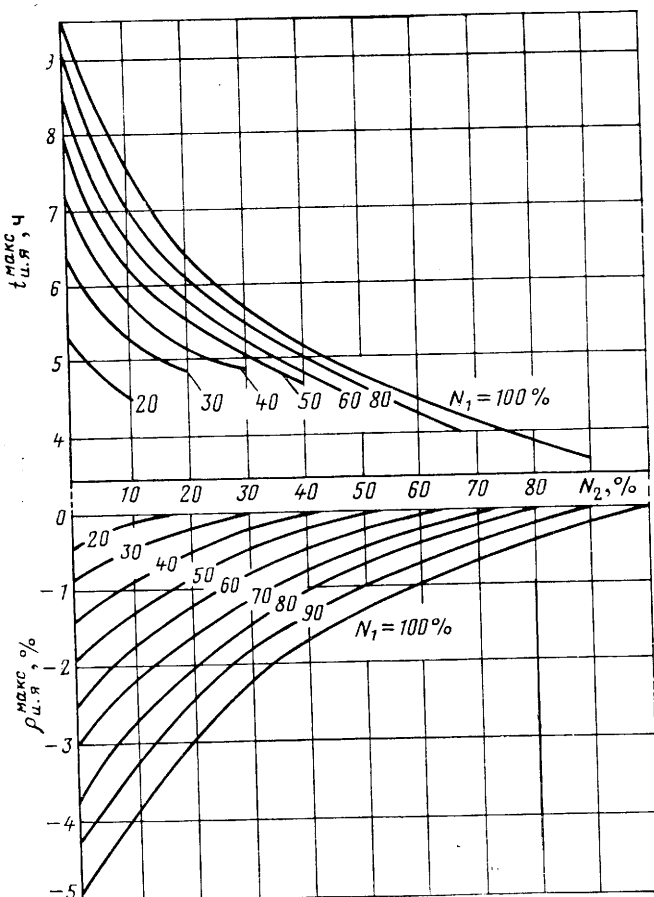


Рис. 2.5.5. Параметры иодных ям после снижения мощности реактора ТР

после остановки, в течение которого глубина иодной ямы больше $\rho_{\text{зап}}$ и ЯР нельзя вывести на мощность, называется *временем вынужденной стоянки* $t_{\text{в.ст}}$. Как видно из рис. 2.5.1, а, времена $t_{\text{д.ст}}$ и $t_{\text{в.ст}}$ зависят от: 1) $\Delta\rho_{\text{зап}}$ в момент остановки, 2) глубины и длительности иодной ямы, т. е. от мощности до остановки, а также 3) времени работы на этой мощности, если оно меньше 40 ч (когда отравление еще не достигло стационарного значения для данной мощности).

Время допустимой стоянки можно оценить исходя из $\Delta\rho_{\text{зап}}$ в момент остановки и скорости уменьшения его за счет иодной ямы ($d\rho_{\text{и.я}}/dt$ при $t=0$):

$$t_{\text{д.ст}} = \Delta\rho_{\text{зап}} / \left(\frac{d\rho_{\text{и.я}}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\Delta\rho_{\text{зап}}}{3600\rho_{0\text{Xe}}\sigma_{\text{Xe}}\Phi_0} \text{ ч}, \quad (2.5.7)$$

где $\rho_{0\text{Xe}}$ — стационарное отравление Xe в момент остановки; Φ_0 — плотность потока нейтронов, соответствующая значению $\rho_{0\text{Xe}}$ в момент остановки. На рис. 2.5.6 приведена зависимость скорости «погружения» в иодную яму в начальный момент времени после остановки с различных мощностей. Формула (2.5.7) дает заниженное значение $t_{\text{д.ст}}$, особенно если оно больше 2—3 ч, так как

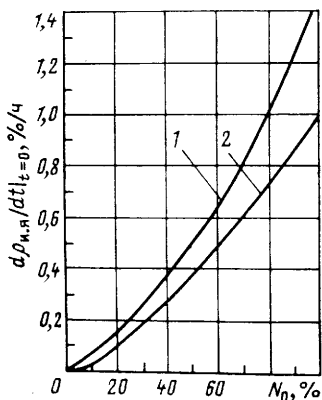


Рис. 2.5.6. Зависимость скорости отравления в начале иодной ямы от мощности ЯДР до остановки:

1 — реактор ТР; 2 — реактор ВВЭР-440

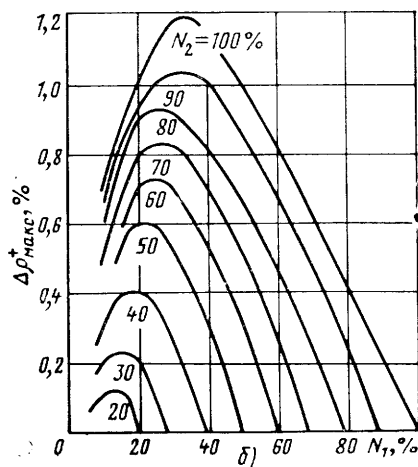
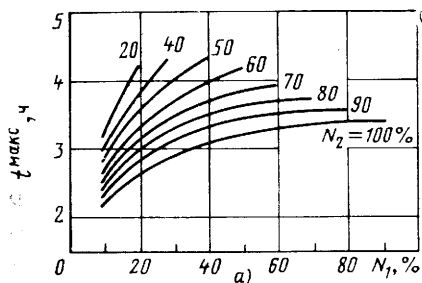


Рис. 2.5.7. Параметры отравления Xe после увеличения мощности реактора ТР

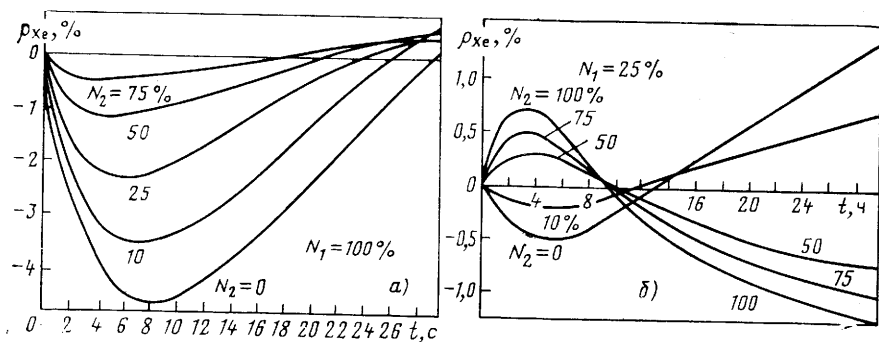


Рис. 2.5.8. Кривые отравления Хе реактора ВВЭР после изменения мощности со 100 % (а) и 25 % (б)

берется наибольшая скорость отравления (при $t=0$). Для определения более точного значения $t_{д.ст.}$, а также $t_{в.ст.}$ нужно пользоваться кривыми иодных ям, полученными экспериментально или построенными на основании графиков (см. рис. 2.5.3 и 2.5.5).

Величину $\Delta\rho^+_{\max}$ и время t^+_{\max} наступления максимального высвобождения ρ при увеличении мощности реактора ТР от значения N_1 до N_2 можно определить по графикам, представленным на рис. 2.5.7, а и б, построенным по формулам (2.5.1) и (2.5.2) для $\Phi_2 > \Phi_1$. Если, например, ЯР работал более 2 сут на мощности 40 % $N_{ном}$, а потом мощность увеличили до $N_{ном}$, то через 3,1 ч (см. рис. 2.5.7, а для $N_1=40\%$ по оси абсцисс до пересечения с кривой для $N_2=100\%$) ρ увеличится на $\Delta\rho^+_{\max} = +1,1\%$ (см. рис. 2.5.7, б для $N_1=40\%$ до пересечения с кривой для $N_2=100\%$).

Чем больше мощность ЯР и чем мягче спектр нейтронов, тем больше глубина иодной ямы по сравнению со стационарным отравлением (см. задачи 2.5.2 и 2.5.3).

На рис. 2.5.8, а, б приведены примеры кривых нестационарного отравления Хе для ВВЭР-440 при его остановке, снижении и увеличении мощности [25].

Графики нестационарного отравления Хе нужны оператору для: 1) оценки возможности маневрирования мощностью ЯР при небольшом $\rho_{зан}$; 2) расчета критического положения органов регулирования при пуске ЯР вскоре после остановки; 3) выбора режима работы и программы снижения мощности, чтобы избежать вынужденной стоянки при кратковременной остановке; 4) определения допустимой и вынужденной стоянок ЯР при попадании в иодную яму; 5) оценки частичного или полного использования $\Delta\rho_{зан}$ на иодную яму для получения дополнительного энергозапаса в конце кампании.

В большинстве случаев для решения этих задач достаточно иметь графики иодных ям при остановке ЯР на различных мощ-

ностях и параметры экстремального нестационарного отравления при изменении мощности. Но возможны ситуации, особенно для судовых ЯР, когда изменение мощности производится до установления равновесной концентрации I и Xe . В этом случае, если к моменту изменения мощности ЯР после пуска работал на стационарном уровне менее 40 ч, прежде чем воспользоваться для определения $\rho_{Xe}(t)$ приведенными выше графиками и формулами, необходимо сначала оценить, какому уровню мощности соответствует концентрация I на момент изменения режима. Дело в том, что иодная яма определяется прежде всего концентрацией I . Поскольку I накапливается по экспоненциальному закону с $T_I=6,7$ ч, а каждому уровню мощности соответствует своя равновесная концентрация I (2.4.3), можно любому значению концентрации I сопоставить мощность, при работе на которой в течение ~ 40 ч установилась бы данная концентрация I . На рис. 2.4.5 построена экспонента для $T_I=6,7$ ч, по которой можно определить, какому уровню мощности соответствует концентрация I в любой момент времени после пуска ЯР (см. задачу 2.5.6). Если же ЯР перед изменением мощности работал на различных уровнях менее чем по ~ 40 ч, то оценочный расчет отравления можно производить исходя из средней мощности за последние ~ 40 ч работы, так как и I и Xe , которые были в ЯР четыре-пять периодов полураспада назад, к моменту остановки распадутся и на отравление влиять не будут. Для более точного расчета необходимо воспользоваться графоаналитическим методом [4].

Наличие большой иодной ямы в ВВЭР и РБМК ставит очень серьезную проблему при решении вопросов обеспечения маневренности АЭС, участвующих в суточном регулировании графика нагрузки в энергосистемах. Чтобы маневрировать мощностью, необходимо иметь оперативный запас $\rho_{оп} = \Delta\rho_{зап} > |\rho_{и.я}|$, позволяющий менять мощность без риска попасть в иодную яму. Для судового ЯР, являющегося единственным источником энергии, это условие обязательно. Для АЭС постоянно иметь такой $\Delta\rho_{зап}$ нерационально с точки зрения себестоимости получаемой электроэнергии. Поэтому на ВВЭР маневренные характеристики непостоянны во времени. После частичной перегрузки (~ 1 раз в год) создается $\Delta\rho_{зап} \sim |\rho_{и.я}|$, который в течение кампании расходуется, и допустимый интервал изменения мощности, а также $t_{д.ст}$ уменьшаются. На АЭС с РБМК благодаря непрерывной замене выгорающих ТВС свежими можно поддерживать $\rho_{оп}$ постоянным в течение всего периода эксплуатации. Но для компенсации иодной ямы при ночных остановках ЯР на 5—8 ч требуется более обогащенное топливо, что увеличивает себестоимость электроэнергии на 15—20%. Поэтому режим ночной разгрузки АЭС с РБМК не предусматривается. Тем не менее небольшой $\Delta\rho_{зап} \approx 1 \div 1,5\%$ позволяет в некоторых случаях осуществлять снижение мощности в небольших интервалах, в том числе и с номинальной, если до изменения ЯР работал меньше 30 ч, пока концентрации I и Xe не достигли равновесного уровня. Имея конкретные характери-

стики ЯР, нужно строить графики зависимостей допустимых режимов изменения мощности от кампании [25].

В крупногабаритных ЯР, где возможно образование локальной (ограниченной в части объема активной зоны) критической массы, случайное увеличение потока нейтронов в ограниченном объеме, вызванное изменением мощности, перемещением стержней или другими причинами может привести сначала к более быстрому выгоранию Xe в этой области, а потом к его накоплению вследствие увеличения концентрации I. Период *ксеноновых колебаний (волн)* может изменяться в пределах 6—10 ч, а вероятность возникновения их тем больше, чем равномернее энерговыделение. Во избежание опасных искажений энерговыделения, связанных с ксеноновой нестабильностью, необходимы разветвленная система измерения энерговыделения в различных точках активной зоны и короткие стержни-поглотители, вводимые в места с повышенным энерговыделением. При достаточно развитой системе локального регулирования ксеноновых колебаний можно избежать.

Задачи с решениями

2.5.1. Как отличаются глубина и длительность иодной ямы в случаях, когда на момент остановки ЯР концентрация I одинаковая, а концентрация Xe различная?

Решение. Рассмотрим три случая (рис. 2.5.9), в каждом из которых концентрация I (N_{0I}) на момент остановки одинакова, а концентрация Xe (N_{0Xe}) различна.

1. $N_{0Xe} = 0$. Так как концентрация Xe на момент остановки ЯР равна нулю, то накопление его из распадающегося I начинается с нуля, достигает максимального значения N_{Xe}^{\max} через время t_1^{\max} согласно зависимости (1.2.3) (рис. 2.5.9, а).

2. $N'_{0Xe} \neq 0$. Накопление Xe из распадающегося I происходит совершенно аналогично, как и в случае 1. Но к этому Xe еще прибавится и тот, который был в момент остановки (N'_{0Xe}) и распался с $T_{Xe} = 9,2$ ч (рис. 2.5.9, б). Таким образом, суммарная концентрация Xe (1.2.4) в любой момент времени в этом случае больше, чем в первом, на величину $N'_{0Xe} e^{-\lambda_{Xe} t}$, но глубина иодной ямы меньше ($\Delta N_{Xe2}^{\max} < \Delta N_{Xe1}^{\max}$) и максимум наступит быстрее ($t_2^{\max} < t_1^{\max}$).

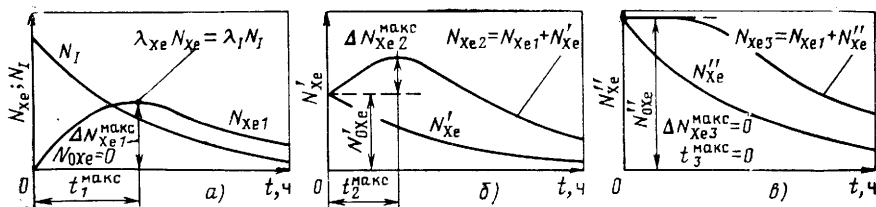


Рис. 2.5.9. Влияние концентрации Xe в момент остановки ЯР на глубину иодной ямы

3. $N''_{\text{оХе}} \gg N'_{\text{оХе}}$. Так как концентрация Хе $N''_{\text{оХе}}$ в момент остановки очень большая, то абсолютное уменьшение его за счет радиоактивного распада превышает прибыль Хе от распадающегося I (рис. 2.5.9, в). Поэтому, хотя суммарная концентрация Хе после останова в этом случае всегда больше, чем в первом и втором случаях, иодной ямы может и не быть.

Вывод: при одной и той же концентрации I чем больше концентрация Хе в момент остановки, тем больше суммарная концентрация Хе в любой момент времени после остановки, но тем меньше глубина и длительность иодной ямы (см. задачу 2.5.2). Этим объясняется уменьшение $\rho_{\text{и.я}}$ по сравнению с $\rho_{\text{оХе}}$ для ЯР с жестким спектром нейтронов (см. задачу 2.5.3).

2.5.2. Как изменяется соотношение между максимальной глубиной иодной ямы и стационарным отравлением Хе на различных мощностях ЯР?

Решение. Как было показано в задаче 2.5.1, глубина иодной ямы тем больше, чем меньше концентрация Хе при данной концентрации I в момент остановки ЯР, а из решения задачи 2.4.3 следует, что чем больше мощность, тем меньше равновесная концентрация Хе по сравнению с концентрацией I (см. рис. 2.4.6). Отсюда вывод: чем больше мощность ЯР, тем больше глубина иодной ямы по сравнению со стационарным отравлением Хе на момент остановки (см. рис. 2.5.2).

2.5.3. Как изменяется глубина иодной ямы по отношению к стационарному отравлению Хе для данной мощности при ужесточении спектра нейтронов в ЯР?

Решение. В задаче 2.5.1 показано, что чем больше концентрация Хе на момент остановки при данной концентрации I, тем меньше глубина иодной ямы, а из решения задачи 2.4.2 следует, что при прочих равных условиях в ЯР с надтепловым спектром нейтронов концентрация Хе при той же концентрации I (т. е. для одной и той же мощности) больше, чем в ЯР на тепловых нейтронах.

Вывод: чем мягче спектр нейтронов в ЯР, тем больше глубина иодной ямы по отношению к стационарному отравлению для данной мощности.

2.5.4. Оценить (без учета неравномерности нейтронного поля) максимальную глубину и время наступления максимума иодной ямы для ЯР на тепловых нейтронах, имеющего $\Phi_{\text{ном}} = 4 \times 10^{13}$ нейтр/(см²·с) и $\bar{\sigma}_{\text{Хе}} = 2,7 \cdot 10^{-18}$ см².

Решение. Для определения максимальной глубины иодной ямы после остановки ЯР необходимо сначала определить время наступления максимума согласно (2.5.4): $t_{\text{и.я}}^{\text{макс}} \approx 9$ ч. Максимальная глубина иодной ямы (2.5.5) равна $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = \rho_{\text{Хе}}^{\text{макс}}(t) - \rho_{\text{оХе}} \approx 1,13 \rho_{\text{оХе}}$. Например, при $\rho_{\text{оХе}} = -4\%$ (см. рис. 2.4.3) $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = -4,5\%$, что близко к значению, взятому для реактора ТР.

2.5.5. Реактор ТР работал на $N_{\text{ном}}$ более 3 сут. Определить

время допустимой (оперативное) и вынужденной стоянок после остановки ЯР, если на момент остановки $\rho_{\text{зап}} = \Delta\rho_{\text{зап}} = 3\%$.

Решение. Так как ЯР работал более 40 ч, воспользуемся графиком иодной ямы на рис. 2.5.2. Откладывая от начала кривой для $N_{\text{ном}}$ $\Delta\rho_{\text{зап}} = 3\%$, находим, что иодная яма достигнет значения -3% (по графику $\rho_{\text{Xe}} = -7\%$) через $\sim 2,5$ ч, а потом при разотравлении через ~ 20 ч после остановки (рис. 2.5.10).

Вывод: оперативное время для вывода ЯР на энергетический уровень мощности составляет $\sim 2,5$ ч (при той же температуре теплоносителя), после чего наступает вынужденная стоянка в течение $\sim 17,5$ ч. Если ЯР до остановки работал менее 40 ч, для решения задачи нужно использовать графоаналитический метод расчета отравления (см. задачу 2.5.6).

С некоторым запасом $t_{\text{д.ст}}$ можно определить по формуле (2.5.7), зная скорость отравления при остановке с $N_{\text{ном}}$. По рис. 2.5.6 находим, что $d\rho_{\text{и.п}}/dt|_{t=0} \approx 1,5\%/ч$ и, следовательно, $t_{\text{д.ст}} = 3/1,5 = 2$ ч. Эта оценка тем точнее, чем меньше оставшийся $\rho_{\text{зап}}$ по сравнению с глубиной иодной ямы.

Время $t_{\text{доп.ст}}$ можно увеличить, а $t_{\text{в.ст}}$ соответственно уменьшить, если очередной пуск производить при более низкой средней температуре теплоносителя по отношению к той, которая была в момент остановки (см. задачу 2.8.6).

2.5.6. Реактор ТР из разотравленного состояния выведен на $N_{\text{ном}}$. После 10 ч работы он был остановлен. Определить время возможного очередного пуска, если в момент остановки $\Delta\rho_{\text{зап}} = 2\%$ и 3% .

Решение. Чтобы оценить возможность пуска ЯР в любой момент после остановки, необходимо определить изменение $\rho_{\text{зап}}$ к моменту пуска за счет ТЭР, отравления Sm (прометиевого провала) и Xe. Поскольку в момент вывода ЯР на мощность он должен быть разогрет до рабочей температуры, изменения $\rho_{\text{зап}}$ вследствие ТЭР не произойдет. Отравление Sm в прометиевом провале происходит с периодом 53 ч, и за время иодной ямы им можно пренебречь (см. § 2.7). Таким образом, остается определить изменение $\rho_{\text{зап}}$ за счет отравления Xe.

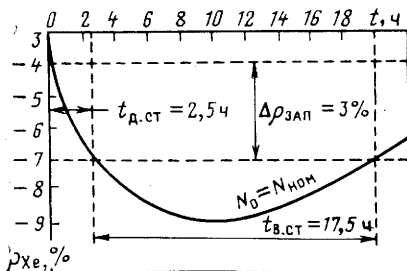


Рис. 2.5.10. К задачам 2.5.5 и 3.5.3

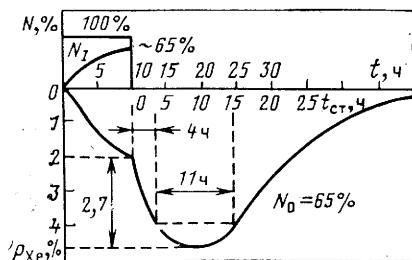


Рис. 2.5.11. К задачам 2.5.6 и 3.5.4

ЯР к моменту остановки работал на стационарном уровне менее 40 ч, поэтому в нем еще не установилась равновесная концентрация I и Xe. Это значит, что для определения iodной ямы нельзя воспользоваться кривыми рис. 2.5.2 или параметрами iodной ямы рис. 2.5.3, так как они соответствуют остановке ЯР после установления равновесной концентрации I и Xe. Поэтому необходимо сначала оценить, какому уровню мощности соответствует концентрация I, и для нее решать задачу. Поскольку концентрация I при работе ЯР на стационарном уровне мощности стремится к равновесному значению с $T_I=6,7$ ч (см. рис. 1.2.2) и каждой концентрации I соответствует вполне определенный уровень мощности (2.4.3), по кривой для $T_I=6,7$ ч на рис. 2.4.5 находим, что через 10 ч концентрация I достигнет уровня, соответствующего мощности 65%: $N_I/N_{0I}=N/N_0=N/N_{ном}=0,65$; $N=65\%$ $N_{ном}$. Из графиков параметров iodных ям рис. 2.5.2 и 2.5.3 переносим кривую для $N_0=65\%$ ($t_{макс}=8,5$ ч; $\rho_{и.я}^{65\%} \approx -2,7\%$) на рис. 2.5.11. Отравление Xe на момент остановки оцениваем по рис. 2.4.3 и 2.4.5: ρ_{Xe} (10 ч) $\approx 0,5$ (-4%) $\approx -2\%$. Итак, из рис. 2.5.11 видно, что при наличии в момент остановки $\Delta\rho_{зап} > |\rho_{и.я}^{65\%}| = 2,7\%$ iodная яма не опасна. При $\Delta\rho_{зап} = 2\%$ и поддержании такой же температуры, как и в момент остановки, через ~ 4 ч наступит вынужденная стоянка и продлится ~ 11 ч. (О возможности использования ТЭР для выхода из iodной ямы см. в § 2.8).

2.5.7. Оценить максимальную глубину iodной ямы и время наступления ее максимума для реактора ТР [$\Phi_{ном} = 4 \times 10^{13}$ нейтр/(см²·с), $\sigma_{Xe} = 2,7 \cdot 10^{-18}$ см²] при переходе с $N_{ном}$, на которой он работал более 40 ч, на мощность 50%.

Решение. Чтобы определить $\rho_{и.я}^{макс}$ при снижении мощности, необходимо знать время наступления максимального отравления. Без учета неравномерности распределения Φ согласно (2.5.2) $t_{Xe}^{макс} \approx 0,18 \cdot 10^5$ с = 5,1 ч. Максимальное отравление при переходе с $N_{ном}$ на 50% согласно (2.5.1) равно $\rho_{Xe}^{макс}(t) = 1,36 \rho_{0Xe}$. Глубина iodной ямы (2.5.5)

$$\rho_{и.я}^{макс} = \rho_{Xe}^{макс}(t) - \rho_{0Xe} = 1,36\rho_{0Xe} - \rho_{0Xe} = 0,36\rho_{0Xe}.$$

При $\rho_{0Xe} = -4\%$ $\rho_{и.я}^{макс} = -1,4\%$, что близко к значению на рис. 2.5.5.

2.5.8. Реактор ТР в течение многих суток работал на $N_{ном}$. Можно ли снизить мощность до 40% при $\Delta\rho_{зап} = 1,5\%$?

Решение. Так как ЯР работал на $N_{ном}$ более 40 ч, то к моменту перехода на мощность 40% в нем установилась равновесная концентрация I и Xe. Это дает право определить параметры iodной ямы по кривым рис. 2.5.5, откуда находим $\rho_{и.я}^{макс} = -1,8\%$ и $t_{и.я}^{макс} = 5,2$ ч. Так как $|-1,8\%| > \Delta\rho_{зап} = 1,5\%$, iodная яма опасна: через некоторое время после снижения мощности произойдет вынужденная остановка ЯР. Для определения этого времени лучше всего воспользоваться соответствующей кривой iodной ямы

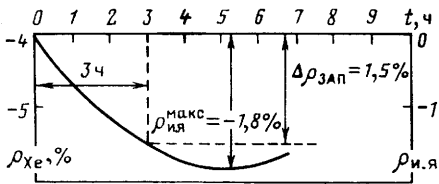


Рис. 2.5.12. К задаче 2.5.8

для данного изменения мощности. При отсутствии таких зависимостей иодную яму можно построить, используя данные рис. 2.5.3 [4]. Скорость увеличения

отравления (т. е. скорость «погружения» в иодную яму) можно приближенно представить как экспоненту, стремящуюся от значения $\rho_{Хе}$ к $\rho_{и.я}^{макс}$ с периодом $T_{и.я}$. Этот период неизвестен, но известно, что всякая экспонента через 4—5 периодов будет отличаться от установившегося значения всего лишь на 7—3 % (см. рис. 1.2.1).

Это позволяет разделить участок времени $t_{и.я}^{макс}$ на четыре или пять одинаковых интервалов, равных $T_{и.я}$, и построить по правилам построения экспоненты кривую: через $t_1 = T_{и.я} = t_{и.я}^{макс}/4$ (или $t_{и.я}^{макс}/5$) $\rho_{Хе1} = \rho_{Хе} + \rho_{и.я}^{макс}/2$; через $t_2 = 2T_{и.я} = t_{и.я}^{макс}/2$ (или $2t_{и.я}^{макс}/5$) $\rho_{Хе2} = \rho_{Хе1} + \rho_{и.я}^{макс}/4$ и т. д. Из сравнения построенных таким образом кривых с экспериментальной видно, что лучшее совпадение наблюдается при делении интервала $t_{и.я}^{макс}$ на четыре периода.

Используя этот метод, построим кривую иодной ямы на ниспадающем ее участке (рис. 2.5.12). В дальнейшем отравление уменьшается вследствие преобладания скорости убыли Хе над скоростью прибыли его из I, стремясь к стационарному значению для 40 % $N_{ном}$, равному $-2,6$ % (см. рис. 2.4.3). Из рис. 2.5.12 видно, что для того чтобы не допустить вынужденной остановки ЯР, необходимо не позже чем через ~ 3 ч снова увеличить мощность (см. рис. 2.5.16) или же использовать ТЭР (см. § 2.8) для компенсации отравления $-0,3$ % $-1,8 + 1,5$.

2.5.9. ЯР работал на мощности 80 % $N_{ном}$ 20 сут. Определить отравление через 10 и 30 ч после остановки, используя построенные для этого ЯР зависимости составляющих формулы (2.5.6) на рис. 2.5.4.

Решение. Подставляя в (2.5.6) значения ее составляющих для $N = 80$ % и $t = 10$ и 30 ч, находим

$$\rho_{Хе} (10 \text{ ч}) = (-0,45) \cdot 0,46 - (-0,38) \cdot 0,35 \approx -7,4\%;$$

$$\rho_{Хе} (30 \text{ ч}) = (-0,45) \cdot 0,10 - (-0,38) \cdot 0,04 \approx -2,9\%.$$

Полученный результат включает в себя и стационарное отравление, которое было на момент остановки ЯР. Зависимость его от мощности известна (см., например, рис. 2.4.3); она используется при расчете коэффициентов A и B .

Примечание. Для более точного расчета отравления по формуле (2.5.6) лучше вместо графиков рис. 2.5.4 иметь таблицы значений A , B , $\exp(-\lambda_{Хе}t)$ и $\exp(-\lambda_{и}t)$ с точностью до 0,0001.

2.5.10. Реактор ТР после пуска из разотравленного состояния работал на $N=100\%$ в течение 15 ч. Чему равно отравление Хе через 6 ч после остановки?

Решение. Поскольку ЯР работал на стационарном уровне мощности менее 40 ч, определим сначала по кривой рис. 2.4.5, какой мощности соответствует концентрация йода на момент остановки (см. задачу 2.5.6). Через 15 ч после пуска $N_I/N_{0I} = N/N_0 = 0,77$. Следовательно, $N = 0,77N_0 = 0,77 \cdot 100 = 77\%$ $N_{ном}$. Из рис. 2.5.2 по интерполированной кривой для $N=77\%$ и $t=6$ ч находим $\rho_{Хе}(t) = -6,9\% = \rho_{0Хе}^{77\%} + \rho_{и.я} \approx 3,5 + 3,4\%$ (рис. 2.4.3 и 2.5.3). Некоторая неточность при решении этой задачи связана с тем, что отравление Хе через 15 ч работы немного не соответствует мощности $77\% N_{ном}$. Это можно учесть, используя графоаналитический метод расчета отравления [4].

2.5.11. Реактор ТР работает на $N_{ном}$ в течение 50 ч. До какого уровня можно снизить мощность, чтобы через 40 ч можно было остановить ЯР без опасности попасть в иодную яму, если в момент снижения $\rho_{зап} = 2\%$?

Решение. При выборе уровня, до которого можно снизить мощность, необходимо, во-первых, определить, для какой мощности потеря $\rho_{зап}$ от суммы стационарного и нестационарного отравления не превышает 0,06, т. е. суммарной реактивности, скомпенсированной Хе при работе на $N_{ном}$ (4%) (см. рис. 2.4.3), и имеющегося $\rho_{зап}$ в момент снижения мощности (2%). Во-вторых, нужно проверить, не превышает ли глубина иодной ямы при снижении на выбранную мощность имеющегося $\rho_{зап} = 2\%$.

По графикам для стационарного (см. рис. 2.4.3) и нестационарного (см. рис. 2.5.3) отравления или сразу по кривым рис. 2.5.2 определяем, что сумма $|\rho_{Хе} + \rho_{и.я}^{макс}| \leq 6\%$ для мощности 60% $N_{ном}$: $\rho_{Хе} \approx -3,2\%$, $\rho_{и.я}^{макс} \approx -2,5\%$, $|\rho_{Хе} + \rho_{и.я}^{макс}| = 0,057 = 5,7\%$. Это справедливо в том случае, если к моменту остановки с мощности 60% концентрация I и Хе не превышает уровня, соответствующего мощности 60%.

Вторая часть задачи сводится к проверке, не попадет ли ЯР в иодную яму после снижения мощности с $N_{ном}$ до 60%. Из рис. 2.5.5 находим, что глубина иодной ямы в этом случае равна -1% , что в 2 раза меньше имеющегося $\rho_{зап}$. Следовательно, переход на мощность 60% $N_{ном}$ возможен.

2.5.12. Оценить максимальное изменение $\rho_{зап}$ и время наступления максимума разотравления для ЯР на тепловых нейтронах [$\Phi_{ном} = 4 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с), $\bar{\sigma}_{Хе} = 2,7 \cdot 10^{-18}$ см²] при переходе с мощности 50%, на которой он работал более 2 сут, на $N_{ном}$.

Решение. Время максимального уменьшения отравления без учета неравномерности поля нейтронов определяем по формуле (2.5.2): $t^{макс} \approx 0,125 \cdot 10^5$ с $\approx 3,5$ ч. Максимальное высвобождение ρ в момент $t^{макс}$ после увеличения мощности согласно (2.5.1) и (2.5.5) равно

$$\Delta\rho_{Хе}^+ = \rho_{Хе}(t^{макс}) - \rho_{0Хе}^{50\%} = -0,3\rho_{0Хе}^{50\%}.$$

Если, например, $\rho_{0\text{Xe}}^{50\%} = -3,5\%$, то $\Delta\rho_{\text{Xe}}^{\pm} \approx 1,0\%$, что близко к значению на рис. 2.5.7.

2.5.13. Реактор ТР работал на мощности 50% 4 сут, потом мощность увеличили до $N_{\text{ном}}$. Определить изменение $\rho_{\text{зап}}$ после увеличения мощности.

Решение. В момент увеличения мощности $\rho_{0\text{Xe}}^{50\%} = -3\%$ (см. рис. 2.4.3). По графикам рис. 2.5.7, а определяем время наступления максимального нестационарного отравления при переходе с той мощности, которой соответствует концентрация I. В данной задаче при переходе с 50% $N_{\text{ном}}$ до 100% $t_{\text{макс}} = 3,2$ ч.

По графикам рис. 2.5.7, б определяем максимальное изменение $\rho_{\text{зап}}$ в момент $t_{\text{макс}}^{\pm}$: $\Delta\rho_{\text{Xe}}^{\pm}(t_{\text{макс}}) \approx +1\%$. Строим восходящий участок (рис. 2.5.13) по известной методике (см. задачу 2.5.8): делим время $t_{\text{макс}}$ на четыре периода и строим экспоненту.

Дальше отравление стремится к стационарному значению для $N_{\text{ном}}$: $\rho_{0\text{Xe}} = -4\%$, сначала медленно, а потом примерно по экспоненте с периодом 6,7 ч.

2.5.14. Реактор ТР последние 50 ч работает на мощности 50% до выхода КС в крайнее верхнее положение. Можно ли получить дополнительный энергозапас, не останавливая ЯР?

Решение. Выход КС в верхнее положение сигнализирует о том, что весь $\rho_{\text{зап}}$ при работе ЯР на мощности 50% израсходован. Дальнейшая работа может быть обеспечена только в случае такого изменения режима, который сопровождается высвобождением $\rho_{\text{зап}}$. К таким изменениям относятся: 1) увеличение мощности ЯР; 2) снижение средней температуры теплоносителя (см. § 2.8); 3) снижение мощности ЯР.

Увеличение мощности (см. задачу 2.5.13) даст временное высвобождение $\rho_{\text{зап}}$ из-за нарушения баланса между скоростями рождения и выгорания Xe. Из рис. 2.5.7 видно, что чем на большую мощность переводится ЯР с 50% $N_{\text{ном}}$, тем больше высвобождается ρ , но тем меньше время наступления максимума. А так как на большей мощности и скорость накопления Xe больше, то высвободившаяся ρ от максимума убывает быстрее, чем при переходе на более низкий уровень. Это значит, что для увеличения времени работы нужно переходить сначала на мощность 60% и работать до возвращения поглотителей в верхнее положение (после некоторого опускания за счет $\Delta\rho_{\text{Xe}}^{\pm}$), потом перейти на мощность 70% и т. д. до 100%. На каждом следующем уровне время работы уменьшается, но тем не менее определенный дополнительный энергозапас будет получен. Для точного решения задачи необходимо графически по-

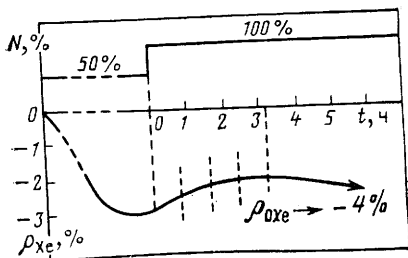


Рис. 2.5.13. К задаче 2.5.13

строить кривую отравления, как, например, в задаче 2.5.13, где дополнительное время работы составило бы ~ 10 ч (см. рис. 2.5.13).

Снижение средней рабочей температуры высвобождает $\Delta\rho_{\pm}$, зависящую от типа ТЭР (см. рис. 2.8.1) и интервала снижения температуры (см. задачи 2.8.2, 2.9.8, 2.9.9).

Снижение мощности даст высвобождение $\rho_{\text{зап}}$ в результате уменьшения стационарного отравления Хе на величину $\Delta\rho_{\text{Хе}} = |\rho_{0\text{Хе}}^{50} - \rho_{0\text{Хе}}^{N < 50\%}|$. Но такой маневр нельзя делать при нахождении КС в крайнем верхнем положении, так как ЯР остановится вследствие иодной ямы. Если же сначала снизить температуру и высвободить $\Delta\rho_{\pm} \geq |\rho_{\text{и.я.}}|$, то можно снизить мощность и получить в конечном счете дополнительный $\rho_{\text{зап}}$ (см. задачи § 2.9).

2.5.15. Реактор ТР после работы на $N_{\text{ном}}$ в течение 100 ч был остановлен. В момент остановки $\rho_{\text{зап}} = 4,5\%$. Как обеспечить возможность пуска ЯР в любой момент после остановки?

Решение. За 100 ч работы установится равновесная концентрация I и Хе. После остановки имеет место иодная яма: через 9,5 ч $\rho_{\text{и.я.}}^{\text{макс}} = -5\%$ (см. рис. 2.5.3), что в сумме со стационарным отравлением $\rho_{0\text{Хе}} = -4\%$ (см. рис. 2.4.3) уменьшит $\rho_{\text{зап}}$ на 9%. Если в момент остановки $\rho_{\text{зап}} = 4,5\%$, то через 6 ч после остановки наступит вынужденная стоянка (рис. 2.5.14). Чтобы не допустить вынужденной стоянки, необходимо к концу времени $t_{\text{д.ст.}}$, т. е. через 6 ч, вывести на непродолжительное время ЯР на мощность, чтобы уничтожить часть накопившегося Хе потоком нейтронов. Чем больше эта мощность, тем быстрее с периодом $T_{\text{Хе}}^*$ высвобождается ρ , но быстрее накапливается и I, который после остановки снова идет на образование иодной ямы. При этом суммарный результат уменьшения глубины иодной ямы может оказаться меньше, чем при более кратковременной работе на мощность. На рис. 2.5.14 показан случай вывода ЯР на $N_{\text{ном}}$ и остановки через 0,5 и 1 ч. Практически достаточно было бы проработать 15—20 мин,

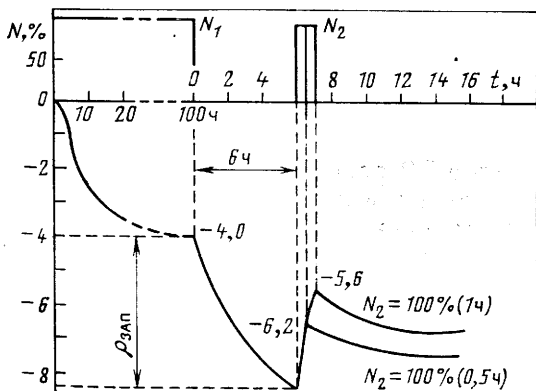


Рис. 2.5.14. К задаче 2.5.15

чтобы исключить попадание в иодную яму. Метод построения кри-
вых отравления аналогичен изложенному в предыдущих задачах
и в [4].

Чтобы не упустить момент вывода ЯР на мощность N_2 , лучше
держат мощность на МКУ и следить за положением органов ком-
пенсации $\rho_{зап}$, когда они выйдут в верхнее положение.

Для ЯР, имеющих большой отрицательный ТКР при рабочей
температуре (см. § 2.8) при незначительном превышении глубины
иодной ямы над имеющимся $\rho_{зап}$, можно произвести пуск ЯР и
из иодной ямы, но при меньшей рабочей температуре (см.
задачу 2.8.6). Безусловно, что в этом случае выводить ЯР нужно
на мощность ниже $N_{ном}$, пока высвобождающаяся ρ в результате
выгорания Хе не даст возможности разогреть ЯР до номинальных
параметров.

2.5.16. Реактор ТР с момента пуска работал непрерывно в
следующем режиме: на мощности 90 % — 15 сут; 60 % — 1 сут;
80 % — 10 ч; $N_{ном}$ — 20 ч; 50 % — 25 ч, после чего был остановлен.
Определить возможность пуска через 6 ч, если в момент остановки
 $\rho_{зап} = 1,5$ %.

Решение. В данном случае ЯР работал на различных мощ-
ностях в течение длительного времени, причем на каждом уровне
время работы было недостаточным для установления стационар-
ной концентрации I и Хе. Для точного определения $\rho_{хе}$ можно ис-
пользовать графоаналитический метод [4]. Для примерной, но
достаточной для практических целей оценки $\rho_{хе}$ можно усреднить
мощность за последние 40 ч работы и для нее определить $\rho_{хе}$ по
соответствующим графикам. В данной задаче перед остановкой
 $\bar{N} = (100 \cdot 15 + 50 \cdot 25) / 40 \approx 70$ %. Интерполируя кривую иодной ямы
на рис. 2.5.2 для $N_0 = 70$ %, находим: при $\Delta\rho_{зап} = 1,5$ % на момент
остановки вынужденная стоянка начнется через ~ 2 ч и продлится
 ~ 14 ч. Следовательно, пуск через 6 ч при той же средней темпе-
ратуре теплоносителя невозможен.

Если бы в задаче требовалось построить иодную яму после
перехода с $N_{ном}$ на $N = 50$ %, то, поскольку на $N_{ном}$ ЯР работал
только 20 ч, нужно было бы определить \bar{N} за ~ 40 ч до снижения
и для этой мощности $\left(\bar{N} = \frac{100 \cdot 20 + 80 \cdot 10 + 60 \cdot 10}{40} = 85\% \right)$ найти
параметры иодной ямы по кривым рис. 2.5.5 при переходе с 85 %
на 50 % $N_{ном}$.

2.5.17. Реактор ТР работал на $N_{ном}$ 50 ч. Какие будут глубина
и длительность иодной ямы, если: 1) ЯР остановить сразу; 2) сни-
зить мощность ступенями по 20 %, работая на каждом уровне:
а) по 2 ч и б) по 4 ч? Каким должен быть режим остановки ЯР,
чтобы обеспечить возможность пуска его в любой момент после
остановки? В момент остановки (начала снижения мощности)
 $\rho_{зап} = 3$ %.

Решение. 1) К моменту остановки установилась равновес-
ная концентрация I и Хе (рис. 2.5.15). После остановки $\rho_{зап}$ умень-
шается вследствие иодной ямы глубиной 5 % и длительностью

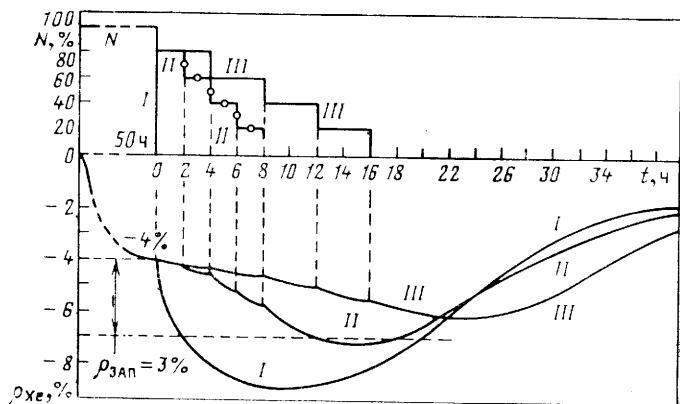


Рис. 2.5.15. К задаче 2.5.17

28 ч (см. рис. 2.5.2 и 2.5.3). При $\rho_{зап}$ в момент остановки 3 % через 2—3 ч начинается время вынужденной стоянки, равное примерно 18 ч. Таким образом, пуск с выходом на $N_{ном}$ возможен только в течение первых 2—3 ч после остановки и через ~ 20 ч после остановки (см. рис. 2.5.15, кривая I).

2) Чтобы уменьшить глубину иодной ямы, необходимо снижать мощность в течение продолжительного времени, что практически удобнее делать ступенями. На рис. 2.5.15 построены кривые изменения $\rho_{зап}$ при остановке ЯР ступенями по 20 % и работе на каждой ступени в течение 2 ч (кривая II) и 4 ч (кривая III), что соответствует непрерывной скорости снижения примерно 10 % и 5 % $N_{ном}$ в час соответственно.

Как видно из рис. 2.5.15, при работе на каждом сниженном уровне в течение 2 ч максимальная глубина иодной ямы немного превышает имеющийся $\rho_{зап}$, что может привести к вынужденной остановке и стоянке ЯР. Используя ТЭР (см. задачу 2.8.6), в некоторых случаях можно вывести ЯР на мощность ниже $N_{ном}$ в любой момент после остановки.

При работе на каждом уровне мощности по 4 ч (кривая III) максимальная глубина иодной ямы равна всего 2 % вместо 5 % в первом случае (кривая I) и 3,5 % во втором (кривая II).

Таким образом, чем медленнее производится снижение мощности по сравнению с T_I , тем меньше глубина иодной ямы, так как накапливающийся из распадающегося иода Хе уничтожается потоком нейтронов.

2.5.18. Реактор ТР работает на $N_{ном}$ при установившемся стационарном отравлении Хе; $\rho_{зап}=1$ %. Как снизить мощность до 50 % $N_{ном}$, чтобы ЯР не попал в иодную яму?

Решение. Переход с $N_{ном}$ на 50 % сопровождается иодной ямой глубиной 1,3 % (см. рис. 2.5.5), что приведет примерно через 2 ч работы на мощности 50 % к вынужденной остановке ЯР

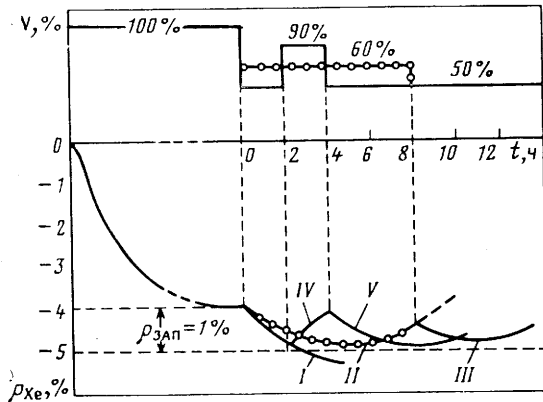


Рис. 2.5.16. К задаче 2.5.18

(рис. 2.5.16, кривая I). Имеются две возможности избежать этого:

а) плавный (ступенчатый) переход на более низкую мощность вплоть до 50 %. Можно, например, сначала перейти на мощность, большую 50 %, но меньшую $N_{ном}$, для которой иодная яма меньше $\rho_{зап} = 1\%$, и после прохождения максимального отравления снизить мощность до 50 % (см. задачу 2.5.17);

б) переход на мощность 50 % и работа на этой мощности до полного расходования $\rho_{зап}$. В последний момент нужно увеличить мощность, поработать некоторое время и потом, после уничтожения части Xe, снова перейти на мощность 50 %. На рис. 2.5.16 эти варианты представлены графически.

Из кривых, определяющих глубину и длительность иодной ямы при снижении мощности (см. рис. 2.5.5), находим, что в случае перехода на $N < N_{ном}$ глубина иодной ямы меньше 1 % при переходе на мощность $N \geq 60\% N_{ном}$. При снижении до 60 % $\rho_{и.я}^{макс} \approx -1\%$, $t_{и.я}^{макс} \approx 4$ ч (кривая II). После иодной ямы мощность можно снизить до 50 %. В этом случае иодная яма уже не опасна (кривая III).

Если снизить мощность с $N_{ном}$ до 50 %, то через 2 ч, чтобы не допустить остановки ЯР, мощность увеличиваем, например, до 90 %. При этом ρ увеличивается (кривая IV). Если через 2 ч мощность снова снизить, то иодная яма уже не будет опасна (кривая V). Нужно иметь в виду, что чем на большую мощность выводится ЯР, тем быстрее и больше высвобождается ρ за счет выгорания Xe, но в то же время быстрее накапливается I, который после снижения мощности даст более глубокую иодную яму. Таким образом, существует оптимальный вариант увеличения мощности и времени работы на ней, который обеспечивает дальнейшую работу на сниженном уровне без вынужденной остановки ЯР.

2.5.19. Реактор ТР пущен через 10 ч после остановки с $N_{\text{ном}}$, на которой работал более 2 сут. Определить скорость изменения ρ (1/ч) в первый момент после выхода на мощность 90 % $N_{\text{ном}}$.

Решение. Через 10 ч после остановки ЯР с $N_{\text{ном}}$ (рис. 2.5.17) наступит максимальное отравление Хе: $\rho_{\text{0Хе}}^{\text{ном}} = -4\%$, $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = -5\%$ и $t_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = 9,5$ ч (см. рис. 2.5.2). Если в этот момент вывести ЯР на мощность 90 %, начнется быстрое выгорание Хе

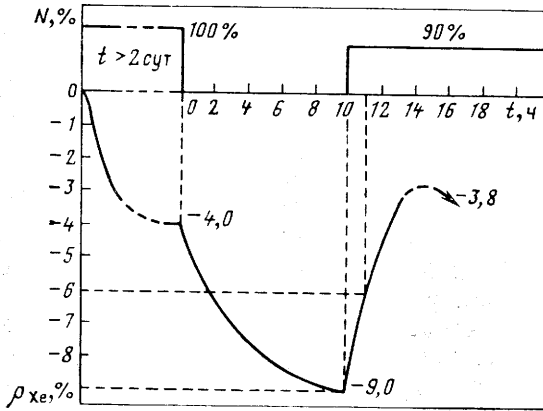


Рис. 2.5.17. К задаче 2.5.19

и высвобождение вследствие этого $\rho_{\text{зап}}$. Основную роль в изменении концентрации Хе в первое время после пуска ЯР будет играть выгорание Хе с $T_{\text{Хе}}^* = 9,2/(1+3,6) = 2$ ч. За первый час $\rho_{\text{зап}}$ увеличится на 2,3 %, что соответствует скорости высвобождения реактивности $d\rho/dt \approx 0,04\%/\text{мин} = 0,7 \cdot 10^{-3}\%/\text{с}$. Это требует сравнительно быстрого опускания органов регулирования для удержания мощности на стационарном уровне (см. задачу 3.4.15).

Вывод: не рекомендуется при пуске ЯР в иодной яме выводить его на большой уровень мощности.

2.5.20. Реактор ТР работает более суток на $N_{\text{ном}}$, имея $\Delta\rho_{\text{зап}} = 1,5\%$. На каком уровне мощности можно работать, чтобы иодная яма после остановки ЯР не была опасной?

Решение. При остановке с $N_{\text{ном}}$ $\rho_{\text{и.я}} = -5\%$ (см. рис. 2.5.3) и уже через $t_{\text{д.ст}} \approx 2$ ч (см. рис. 2.5.2) наступает вынужденная стоянка в течение более 20 ч. Для $N < N_{\text{ном}}$ $t_{\text{д.ст}}$ увеличивается, а $t_{\text{в.ст}}$ уменьшается вследствие того, что, во-первых, уменьшается глубина иодной ямы и, во-вторых, увеличивается $\Delta\rho_{\text{зап}}$ за счет уменьшения стационарного отравления Хе. Иодная яма становится безопасной для мощности N_i , для которой $|\rho_{\text{0Хе}}^{N_i} + \rho_{\text{и.я}}^{N_i}| \leq \leq |\rho_{\text{0Хе}}^{100\%} + 1,5| = 5,5\%$. Из рис. 2.5.2 и 2.5.5 находим, что $|\rho_{\text{0Хе}}^{N_i} + \rho_{\text{и.я}}^{N_i}| \leq 5,5\%$ для $N_i < 55\% N_{\text{ном}}$ и $\rho_{\text{и.я}}^{100\% \rightarrow 55\%} = |-1,2| < < \Delta\rho_{\text{зап}} = 1,5\%$.

2.5.21. Реактор ТР в течение последних 10 сут работал на мощности 50 % до полного подъема КС. Можно ли после остановки снова вывести ЯР на мощность? Если да, то через какое время, на какой уровень и как долго можно работать?

Решение. После остановки ЯР $\rho_{\text{зап}}$ сначала уменьшается вследствие иодной ямы, а потом увеличивается до полного разотравления. Увеличение ρ за счет ТЭР можно не учитывать, так как прежде чем снова вывести ЯР на мощность, его нужно разогреть до рабочей температуры, и этот $\rho_{\text{зап}}$ при очередном пуске снова будет израсходован. Из рис. 2.5.2 видим, что время полного разотравления после остановки ЯР с мощности 50 % составляет ~ 40 ч, а время выхода из иодной ямы равно ~ 20 ч. Следовательно, через 20 ч (рис. 2.5.18) ЯР можно вывести на любую мощность, а если рассматривать и ТЭР (см. § 2.8), то и раньше, но в этом случае мощность ограничена рабочей температурой. Ждать полного разотравления при необходимости пустить ЯР не нужно, так как достаточно вывести его на мощность, при которой $T_{\text{Хе}}^* < T_I$ (т. е. скорость убыли Хе больше скорости рождения его из I), и отравление Хе начнет уменьшаться. В этом случае ЯР сможет работать фактически столько же, сколько бы он работал, если бы был пущен после полного разотравления. Минимальную мощность, после выхода на которую убыль Хе вследствие выгорания и радиоактивного распада преобладает над рождением его из накапливающегося I, можно определить из соотношения (2.4.7): $T_{\text{Хе}}^* = 9,2/(1+0,04 N_{\text{мин}}) \leq T_I = 6,7$ ч. Решив его относительно $N_{\text{мин}}$, получим $N_{\text{мин}} \geq 9 \% N_{\text{ном}}$.

После выхода ЯР на мощность $\rho_{\text{зап}}$ уменьшается в результате отравления Хе, выгорания топлива и других эффектов. В течение короткого промежутка времени после пуска практически можно учитывать только изменение отравления Хе. Поэтому если вывести ЯР на $N_{\text{ном}}$, то он сможет работать до тех пор, пока отравление Хе не достигнет значения, соответствующего стационарному для мощности 50 %, на которой он работал до остановки. Так как концентрацией I в момент пуска (через 20 ч после остановки) можно пренебречь, изменение $\rho_{\text{зап}}$ за счет отравления Хе можно

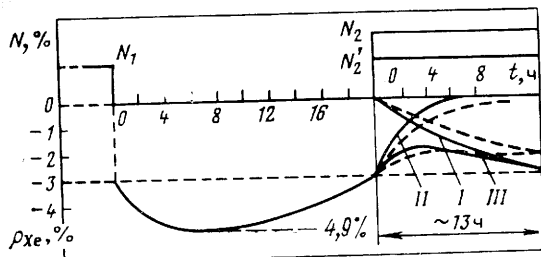


Рис. 2.5.18. К задаче 2.5.21

представить как сумму двух кривых: кривой *I* уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ из-за накопления Хе с периодом полураспада $\sim 9,2$ ч и кривой *II* высвобождения $\rho_{\text{зап}}$ из-за убыли Хе с эффективным периодом $T_{\text{Хе}}^*$.

Как видно из рис. 2.5.18, в этом случае время работы на $N_{\text{ном}} = N_2$ составляет около 13 ч. Если ЯР вывести на мощность $N'_2 = 50\%$, то время работы составит около 2 сут, т. е. до установления стационарного отравления для мощности 50% (см. пунктирные кривые на рис. 2.5.18). Для точного расчета времени работы необходимо учесть в этом случае уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ из-за выгорания и шлакования (см. § 2.9).

Если вывести ЯР на мощность меньше 50%, то время работы будет больше 2 сут. Эта добавка определяется высвобождающимся $\rho_{\text{зап}}$ вследствие уменьшения стационарного отравления (см. § 2.9).

Вывод: после остановки с мощности 50% при полном расходовании $\rho_{\text{зап}}$ на этом уровне ЯР можно снова вывести: 1) через 20 ч на $N_{\text{ном}}$ и работать около 13 ч; 2) на мощность $N < N_{\text{ном}}$, но больше 50%, и работать в течение ~ 40 ч; 3) на $N < 50\%$ и работать более 2 сут.

Примечание. Во втором и третьем случаях время стоянки может быть меньше 20 ч при использовании ТЭР (см. § 2.8).

Контрольные вопросы и задачи

1. Почему после остановки ЯР или снижения мощности происходит временное увеличение концентрации Хе, а после увеличения мощности — ее временное уменьшение?

2. Как зависит глубина иодной ямы от концентрации Хе в момент остановки ЯР?

3. Могут ли различаться глубина и длительность иодной ямы после остановки ЯР с одинаковой мощностью?

4. Можно ли использовать $\rho_{\text{зап}}$ на иодную яму для получения дополнительного энергозапаса?

5. От чего зависит время допустимой и вынужденной стоянок ЯР?

6. Как исключить или хотя бы уменьшить $t_{\text{в.ст}}$, если ЯР при работе на мощности перед остановкой не имеет достаточного $\rho_{\text{зап}}$ для компенсации иодной ямы?

7. Определить потерю $\rho_{\text{зап}}$ из-за отравления Хе через 15 ч после остановки реактора ТР, который работал до остановки 10 сут на мощности 80% $N_{\text{ном}}$.

8. Реактор ТР работает на $N_{\text{ном}}$ в течение 15 ч. Мощность необходимо снизить до 50% $N_{\text{ном}}$ и работать еще 30 ч. При каком $\rho_{\text{зап}}$ в момент снижения возможен этот переход?

9. Оценить, какой нужно иметь $\rho_{\text{зап}}$ в разогретом до рабочей температуры разотравленном реакторе ТР, чтобы можно было 1 сут работать на мощности 75% $N_{\text{ном}}$, а потом снизить до 30% $N_{\text{ном}}$ и работать 10 ч.

10. Реактор ТР через 10 ч работы на $N_{\text{ном}}$ имеет $\rho_{\text{зап}} = 1\%$. До какого уровня можно снижать мощность, чтобы избежать вынужденной остановки ЯР?

11. Реактор ТР из разотравленного состояния выведен на $N_{\text{ном}}$. Можно ли через 2 ч работы снизить мощность до 25%, чтобы ЯР не попал в иодную яму, если на момент пуска $\rho_{\text{зап}} = 2\%$?

12. Какой $\rho_{\text{зап}}$ должен иметь реактор ТР, чтобы а) не попасть в иодную яму, если до остановки он работал непрерывно в следующем режиме: $N_{\text{ном}} - 20$ ч; 50 % $N_{\text{ном}} - 10$ ч; 80 % $N_{\text{ном}} - 15$ ч; б) $t_{\text{доп.ст}} \geq 2$ ч.

13. Реактор ТР выведен на $N_{\text{ном}}$ через 5 ч после остановки с мощности 80 %. Определить среднюю скорость высвобождения ρ в течение первого часа работы ЯР?

14. Определить $t_{\text{доп.ст}}$ и $t_{\text{в.ст}}$ после остановки реактора ТР, работающего непрерывно 20 ч на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$, 10 ч — на $N_{\text{ном}}$, 15 ч — на 60 % $N_{\text{ном}}$. В момент остановки $\rho_{\text{зап}} = 1$ %.

15. Можно ли снизить мощность ВВЭР-440 (см. рис. 2.5.8, а) с $N_{\text{ном}}$ до 25 % $N_{\text{ном}}$, а через 8 ч снова выйти на $N_{\text{ном}}$, если имеющийся для компенсации иодной ямы $\rho_{\text{зап}} = 1,75$ %?

§ 2.6. СТАЦИОНАРНОЕ ОТРАВЛЕНИЕ САМАРИЕМ

При работе ЯР на мощности конечным нуклидом в цепочке распада осколка деления $^{149}_{60}\text{Nd}$ является $^{149}_{62}\text{Sm}$: деление $U \rightarrow ^{149}_{60}\text{Nd} \xrightarrow[1,8 \text{ ч}]{\beta^-} ^{149}_{61}\text{Pm} \xrightarrow[53 \text{ ч}]{\beta^-} ^{149}_{62}\text{Sm} + n \rightarrow ^{150}_{62}\text{Sm}$ (шлак). Удельный выход Nd, а следовательно, Pm и Sm равен $\gamma_{\text{Sm}} = 1,13$ %; сечение поглощения тепловых нейтронов ^{149}Sm $\sigma_{\text{Sm}} \approx 5 \cdot 10^{-20}$ см².

На рис. 2.6.1 представлена зависимость изменения концентрации Pm и Sm, а также потеря $\rho_{\text{зап}}$ вследствие отравления Sm при работе ЯР на стационарной мощности и после остановки (см. § 2.7). Поскольку Nd сравнительно быстро превращается в Pm, его не учитывают в динамике процесса отравления Sm. Накопление Pm при работе на стационарной мощности происходит по экспоненциальному закону с периодом полураспада $T_{\text{Pm}} = 53$ ч:

$$N_{\text{Pm}}(t) = N_{0\text{Pm}}(1 - e^{-\lambda_{\text{Pm}}t}) = N_{0\text{Pm}}(1 - e^{-0,693t/T_{\text{Pm}}})$$

где

$$N_{0\text{Pm}} = \gamma_{\text{Pm}} \sum_f^{U-235} \Phi_0 / \lambda_{\text{Pm}} \quad (2.6.1)$$

— стационарная (равновесная) концентрация Pm, прямо пропорциональная мощности, на которой ЯР работал не менее 8 сут; $\gamma_{\text{Pm}} = 0,011$ — удельный выход Pm; $\lambda_{\text{Pm}} = 0,693/T_{\text{Pm}} = 3,6 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹ — постоянная распада Pm, \sum_f^{U-235} — макроскопическое сечение деления топлива, см⁻¹; Φ_0 — плотность потока нейтронов, соответствующая стационарной мощности, нейтр/(см²·с).

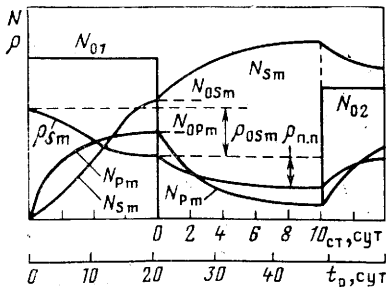


Рис. 2.6.1. Динамика отравления Sm

Примечание. Теоретически концентрация Рm достигает равновесного значения при $t \rightarrow \infty$; $N_{0\text{Рm}} = N_{\text{Рm}}(t = \infty)$. Но практически временем установления стационарной концентрации можно считать время, когда концентрация Рm будет отличаться от равновесной на 5—10 %. Это соответствует примерно $(4 \div 5) T_{\text{Рm}} \approx 8 \div 10$ сут (см. рис. 1.2.1).

Равновесная концентрация Sm, рождающегося из Рm,

$$N_{0\text{Sm}} = \lambda_{\text{Рm}} N_{0\text{Рm}} / \sigma_{\text{Sm}} \Phi_0 = \gamma_{\text{Рm}} \Sigma_f^{U-235} / \sigma_{\text{Sm}} \quad (2.6.2)$$

Потеря $\rho_{\text{зап}}$ при стационарном отравлении $W_{0\text{Sm}}$ [(2.4.1), (2.4.2)] не зависит от мощности, а определяется только характеристиками активной зоны: коэффициентом использования тепловых нейтронов θ , макроскопическим сечением деления Σ_f (см^{-1}) и поглощения Σ_a (см^{-1}) топлива, а также удельным выходом Рm $\gamma_{\text{Рm}}$:

$$\rho_{0\text{Sm}} = -\theta W_{0\text{Sm}} = \gamma_{\text{Рm}} \theta \Sigma_f^{U-235} / \Sigma_a^U = -\gamma_{\text{Рm}} \theta \sigma_f^{U-235} / [\sigma_a^{U-235} + \sigma_a^{U-238} (1-x)/x], \quad (2.6.3)$$

где $x = N_{U-235} / N_U$ — обогащение урана изотопом ^{235}U . В табл. 2.6.1

Таблица 2.6.1

$x, \%$	0,7 (природный уран)	1	2	5	7	10	20	100
$W_{0\text{Sm}}, \%$	0,60	0,67	0,78	0,87	0,89	0,90	0,92	0,96

приведены значения стационарного отравления Sm реактора на тепловых нейтронах для некоторых значений обогащения топлива. Отравление быстро растет при увеличении x до $\sim 10\%$, а потом изменяется очень мало.

Потеря реактивности при отравлении ^{149}Sm в любой момент времени t (с) до установления стационарного значения определяется из соотношения

$$\rho_{\text{Sm}}(t) = \rho_{0\text{Sm}} \left[1 - \lambda_{\text{Рm}} e^{-\sigma_{\text{Sm}} \Phi_0 t} / (\lambda_{\text{Рm}} - \sigma_{\text{Sm}} \Phi_0) + \sigma_{\text{Sm}} \Phi_0 e^{-\lambda_{\text{Рm}} t} / (\lambda_{\text{Рm}} - \sigma_{\text{Sm}} \Phi_0) \right]. \quad (2.6.4)$$

Эту зависимость можно представить в виде графика для различных значений Φ_0 , т. е. для различных мощностей ЯР. Зная для конкретного ЯР величину $\rho_{0\text{Sm}}$ и Φ_0 , по этим кривым можно определять $\rho_{\text{Sm}}(t)$ в любой момент времени до установления стационарного отравления. Для многих ЯР $\rho_{0\text{Sm}} \approx (0,6 \div 0,8)\%$. На рис. 2.6.2 даны зависимости изменения ρ при установлении стационарного отравления во времени для различных мощностей реактора ТР, имеющего $\rho_{0\text{Sm}} = -0,7\%$ и $\bar{\Phi}_{\text{ном}} = 4 \cdot 10^{13}$ нейтр/ ($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Для ВВЭР-440 $\rho_{0\text{Sm}} = -0,82\%$ после 30 эф. сут работы.

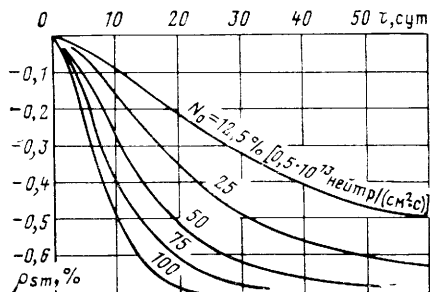


Рис. 2.6.2. Установление ρ_{0Sm} при работе реактора ТР на различных уровнях мощности

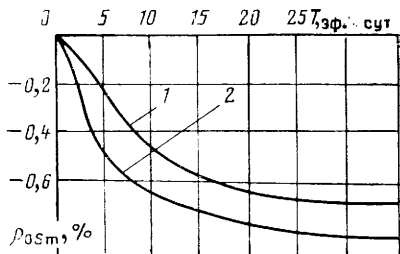


Рис. 2.6.3. Установление ρ_{0Sm} в процессе энерговыработки реактора ТР (1) и ВВЭР-440 (2)

Скорость достижения стационарного отравления Sm , как это следует из (2.6.4) и рис. 2.6.2, существенно зависит от мощности ЯР. Время установления ρ_{0Sm} обратно пропорционально мощности, т. е. плотности потока нейтронов Φ_0 , нейтр/(см²·с):

$$t_{уст} \approx 10^{20}/\Phi_0 \text{ с} \approx 10^{15}\Phi_0 \text{ сут.}$$

Если, например, известно время установления $t_{ном}$ для $N_{ном}$, то приблизительно время установления для любой мощности N_i определится из соотношения $N_i t_{уст} = t_{ном} N_{ном}$, откуда

$$t_{уст} \approx \frac{N_{ном}}{N_i} t_{ном} \quad \text{или} \quad t_{уст}^{N_2} \approx t_{уст}^{N_1} \frac{N_1}{N_2}. \quad (2.6.5)$$

Как правило, в течение времени, достаточного для установления ρ_{0Sm} , ЯР, особенно судовой, работает на различных мощностях. В таком случае $\rho_{Sm}(t)$ можно оценить по кривым рис. 2.6.2 для средней мощности $\bar{N} = \sum_i N_i t_i / \sum_i t_i$ исходя из энерговыработки $\sum_i N_i t_i$ и времени работы $t = \sum_i t_i$ (см. задачу 2.6.5).

В энергетических ЯР на тепловых нейтронах отравление Sm достигает стационарного значения через ~ 20 сут работы на $N_{ном}$. В течение этого времени оператор при расчете критического положения органов регулирования (см. § 3.5) учитывает изменение отравления Sm , используя кривые рис. 2.6.2. Иногда стационарное отравление включают в кривую энерговыработки (см. § 2.9). В этом случае необходимость в графиках рис. 2.6.2 отпадает.

Можно также для конкретного ЯР (рис. 2.6.3) построить зависимость отравления Sm от энерговыработки Q_k [МВт·ч или эффективное время работы (2.9.1)]. Для любого уровня мощности $\bar{N} = \sum_i N_i t_i / \sum_i t_i$, на которой ЯР работал в течение $t = \sum_i t_i$ ча-

сов, отравление Sm по этому графику можно приблизительно определять для $Q_k = \sum_i N_i t_i = \bar{N} t$ (МВт·ч) и для $\tau_{эф} = Q_k / N_{ном}$ (ч).

Задачи с решениями

2.6.1. Реактор ТР работает с начала кампании на мощности 75 % $N_{\text{ном}}$ в течение 15 сут. Чему равно $\rho_{\text{см}}$?

Решение. Используя соотношение (2.6.4) для $\Phi_0 = 4 \times 10^{13}$ нейтр/(см²·с), соответствующего $N_{\text{ном}}$ реактора ТР, и значение $\rho_{\text{осм}} = -0,7\%$, определяем для $t = 15 \cdot 24 \cdot 3600 = 1,3 \cdot 10^6$ с $\rho_{\text{см}} \approx -0,5\%$. Удобнее для решения такого типа задач использовать график рис. 2.6.2, по которому непосредственно для $t = 15$ сут по кривой уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ при работе на мощности 75 % [$\Phi_0 = 3 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с)] определяем $\rho_{\text{см}}$ (15 сут, 75 % $N_{\text{ном}}$) $\approx -0,5\%$.

По кривой на рис. 2.6.3 для $Q_{\text{к}} = 0,75 \cdot 80 \cdot 15 \cdot 24 = 21\,600$ МВт·ч или для $\tau_{\text{эф}} = Q_{\text{к}}/80 = 270$ ч находим то же значение $\rho_{\text{см}} = -0,5\%$.

2.6.2. Через какое время отравление Sm достигнет 80 % стационарного при работе реактора ТР на $N_{\text{ном}}$?

Решение. По графику рис. 2.6.2 определяем, что $\rho_{\text{см}}(t) = 0,8 \rho_{\text{осм}} = -0,8 \cdot 0,7\% = -0,56\%$ при работе на $N_{\text{ном}}$ наступит примерно через 12,5 сут.

Из рис. 2.6.3 получаем тот же результат: $\rho_{\text{см}} = -0,56\%$ при $Q_{\text{к}} = 25 \cdot 10^3$ МВт·ч, что при $N_{\text{ном}}$ соответствует времени работы $t = \tau_{\text{эф}} = Q_{\text{к}}/N_{\text{ном}} = 25 \cdot 10^3/80 \approx 13$ сут.

2.6.3. Реактор ТР работает с начала кампании на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$. Через какое время наступит $\rho_{\text{осм}}$?

Решение. Из рис. 2.6.2 по кривой для мощности 80 % определяем, что стационарное отравление наступит через ~ 27 сут работы (характер кривой для мощности 80 % оцениваем путем интерполяции). Оценку времени установления можно также сделать по приближенной формуле (2.6.5), если известно время установления для другой мощности. Например, на рис. 2.6.2 для $N_{\text{ном}}$ определяем $t_{\text{ном}} \approx 23$ сут. Следовательно, при работе на мощности 80 % $t_{\text{уст}} \approx N_{\text{ном}} t_{\text{ном}}/N_i = 100 \cdot 23/80 \approx 29$ сут.

Из графика рис. 2.6.3 видно, что $\rho_{\text{осм}}$ достигает стационарного значения примерно через 20 эф. сут. Следовательно, для $N = 80\%$ $t_{\text{уст}} = 20 \cdot 80 \cdot 1/0,8 \cdot 80 = 25$ сут.

2.6.4. Через какое время работы реактора ТР на мощности 50 % $N_{\text{ном}}$ отравление Sm достигнет в нем такого же значения, как при работе на $N_{\text{ном}}$ через 15 сут?

Решение. По графикам рис. 2.6.2 определяем, что $\rho_{\text{см}}$, соответствующее 15 сут работы на $N_{\text{ном}}$, будет достигнуто при работе на мощности 50 % примерно через 31 сут. Эту оценку можно сделать также по формуле (2.6.5): $t_2 = N_1 t_1/N_2 = Q_{\text{к}}/N_2 = 80 \cdot 15/40 = 30$ сут.

2.6.5. Реактор ТР работал с начала кампании 5 сут на $N_1 = 80\%$ $N_{\text{ном}}$, 2 сут на $N_2 = 100\%$ и 3 сут на $N_3 = 60\%$. Оценить $\rho_{\text{см}}$.

Решение. Энерговывработка ЯР равна $Q_{\text{к}} = \sum_i N_i t_i = [5 \cdot 0,8 + 2 \cdot 1,0 + 3 \cdot 0,6] 80 = 624$ МВт·сут $\approx 15 \cdot 10^3$ МВт·ч. По кривой на рис. 2.6.3 определяем $\rho_{\text{см}} \approx -0,4\%$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем отличается стационарное отравление Sm от шлакования?
2. Почему $\rho_{0\text{Sm}}$ не зависит от мощности ЯР?
3. Реактор ТР работал с начала кампании в следующем режиме: 80 % $N_{\text{ном}}$ — 10 сут, 50 % $N_{\text{ном}}$ — 5 сут. Чему равно отравление Sm ?
4. Через какое время в реакторе ТР установится стационарное отравление Sm при работе в среднем на мощности 75 % $N_{\text{ном}}$?

§ 2.7. НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОТРАВЛЕНИЕ САМАРИЕМ

При изменении мощности и особенно после остановки ЯР нарушается динамическое равновесие между скоростью появления ^{149}Sm из ^{149}Pm и скоростью его убыли из-за поглощения нейтронов (выгорания). После остановки ЯР убыль Sm (см. рис. 2.6.1) прекращается, так как поток нейтронов практически равен нулю, а прибыль его из Pm продолжается до полного распада последнего. Практически через $(4 \div 5) T_{\text{Pm}} \approx 8 \div 10$ сут распадается ~ 90 % Pm .

Уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ при накоплении Sm из распадающегося Pm после остановки ЯР — *прометиевый (самариевый) провал* — прямо пропорционально мощности (плотности потока нейтронов Φ_0 , рис. 2.7.1) до остановки, которой соответствует установившаяся концентрация Pm

$$\rho_{\text{п.п}} = -\theta W_{\text{п.п}} = -\theta \frac{\gamma_{\text{Pm}} \sigma_{\text{Sm}}}{\lambda_{\text{Pm}}} \frac{\Sigma_f^{U-235}}{\Sigma_a^{U-235}} \Phi_0 = \rho_{0\text{Sm}} \frac{\sigma_{\text{Sm}}}{\lambda_{\text{Sm}}} \Phi_0$$

(обозначения см. в § 2.6).

Для решения задач на рис. 2.7.2 дана зависимость прометиевого провала реактора ТР от мощности, на которой до остановки установилась равновесная концентрация Pm . При остановке с

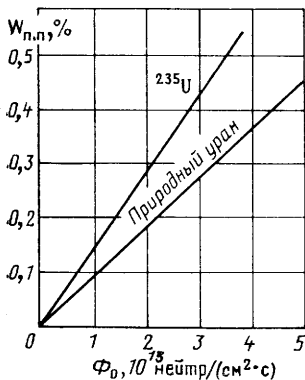


Рис. 2.7.1. Зависимость $\rho_{\text{п.п}}^{\text{макс}}$ от Φ и обогащения урана

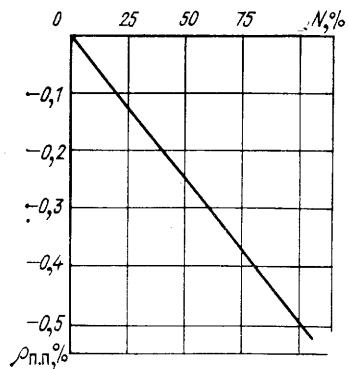


Рис. 2.7.2. Зависимость максимальной глубины $\rho_{\text{п.п}}$ от мощности реактора ТР до остановки

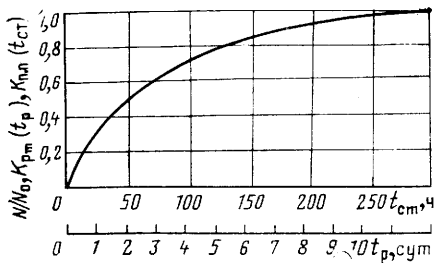


Рис. 2.7.3. Накопление Pm при работе ЯР на стационарной мощности и отравление Sm после остановки ЯР

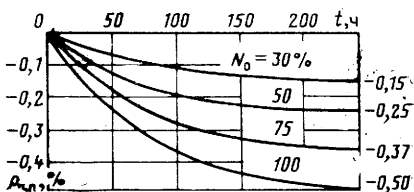


Рис. 2.7.4. Кривые прометивных провалов реактора ТР

любой мощности N_i , на которой ЯР работал не менее 8 сут,

$$\rho_{п.п}^{N_i} = \rho_{п.п}^{\text{НОМ}} N_i / N_{\text{НОМ}}. \quad (2.7.1)$$

Для реактора ТР $\rho_{п.п}^{\text{НОМ}} = -0,5 \%$, следовательно,

$$\rho_{п.п}^{N_i} = -0,5 N_i / N_{\text{НОМ}} \%. \quad (2.7.2)$$

При работе ЯР на стационарной мощности менее 8 сут концентрация Pm не достигает равновесного значения. Но так как мощности соответствует своя стационарная концентрация Pm (2.6.1), то можно любому значению концентрации Pm сопоставить мощность, при работе на которой в течение не менее 8 сут установилась бы данная концентрация Pm.

На рис. 2.7.3 построена экспонента для $T_{Pm} = 53$ ч. По оси ординат в относительных единицах отложены: концентрация Pm по отношению к стационарной ($K_{Pm}(t_p) = N_{Pm}(t_p) / N_{0Pm}$) для той мощности, на которой работает ЯР в течение времени t_p ; мощность по отношению к N_0 , на которой работает ЯР (N/N_0). На этом графике каждому значению концентрации Pm соответствует мощность, на которой установилась бы такая концентрация Pm, если бы ЯР работал на этой мощности в течение $(4 \div 5) T_{Pm}$. График используется также для определения прометивного провала (2.7.3) во время стоянки ЯР ($t_{ст}$), так как потеря $\rho_{зап}$ при отравлении Sm в прометивном провале $\Delta\rho_{п.п}$ происходит со скоростью распада Pm, накопившегося к моменту остановки ЯР, т. е. со скоростью накопления Sm из распадающего Pm

$$\Delta N_{Sm}(t_{ст}) = N_{0Pm} [1 - \exp(-\lambda_{Pm} t_{ст})], \quad (2.7.2)$$

стремясь к максимальному значению $\rho_{п.п}$ для той мощности, которой соответствует концентрация Pm в момент остановки:

$$\Delta\rho_{п.п} = \rho_{п.п} [1 - \exp(-\lambda_{Pm} t_{ст})]. \quad (2.7.3)$$

Эта зависимость представлена на рис. 2.7.3 ($K_{п.п}(t_{ст}) = \Delta\rho_{п.п}/\rho_{п.п}$), по которой можно определять глубину прометиевого провала в любой момент времени после остановки ЯР:

$$\Delta\rho_{п.п} = K_{п.п}(t_{ст})\rho_{п.п}$$

Значение $\rho_{п.п}$ определяется по графику рис. 2.7.2.

Удобнее всего для конкретного ЯР иметь семейство кривых — прометиевых провалов — для различных уровней мощности до остановки, на которой ЯР работал не менее 10 сут (рис. 2.7.4). Если в момент остановки еще не установилась равновесная концентрация P_m для данной мощности, то необходимо определить, какой мощности она соответствует (рис. 2.7.3), и для нее взять значение $\rho_{п.п}$ из рис. 2.7.2, 2.7.3 или 2.7.4.

В общем случае глубину прометиевого провала в любой момент времени $t_{ст}$ после остановки ЯР с мощности N_i , на которой он работал в течение времени t_p , можно определить, используя рис. 2.7.3, по формуле

$$\rho_{п.п}^{N_i}(t_{ст}) = \rho_{п.п}^{\text{ном}} \frac{N_i}{N_{\text{ном}}} K_{P_m}(t_p) K_{п.п}(t_{ст}). \quad (2.7.4)$$

Если ЯР и работал на мощности N_i и стоял более чем по 10 сут, то $K_{P_m} \approx 1$, $K_{п.п} \approx 1$ и формула (2.7.4) превращается в (2.7.1).

Перед остановкой ядерный реактор, особенно судовый, может работать на различных мощностях. В этом случае $\rho_{п.п}$ можно определить исходя из средней мощности за последние ~10 сут работы, так как тот P_m , который накопился до этого, к моменту остановки практически полностью превратится в S_m и на глубину прометиевого провала влиять не будет.

После очередного пуска прометиевый провал вследствие выгорания той части S_m , которая превышает равновесную, полностью исчезнет и отравление снова установится на стационарном уровне (см. рис. 2.6.1, 2.7.8 и 2.7.9). Уменьшение отравления S_m вследствие его выгорания происходит по экспоненциальному закону

$$\rho_{S_m}(t) = \rho_{S_m}^* \exp(-\sigma_{S_m} \Phi_0 t) = \rho_{S_m}^* \exp(-0,693t/T_{S_m}^*), \quad (2.7.5)$$

где $\rho_{S_m}^*$ — отравление в момент пуска ЯР; σ_{S_m} — микроскопическое сечение поглощения S_m , см²; Φ_0 — плотность потока нейтронов, соответствующая мощности, на которой работает ЯР, нейтр/(см²·с); $T_{S_m}^*$ — эффективный период полувывгорания S_m (2.7.6).

На рис. 2.7.5 представлены кривые выгорания S_m для различных мощностей реактора ТР; они учитывают только ту составляющую отравления S_m , которая была в момент пуска ЯР, и не учитывают вновь накапливающегося S_m (2.6.4) (см. рис. 2.6.2).

Эффективный период полувывгорания S_m , характеризующий скорость уменьшения его вследствие радиационного захвата нейт-

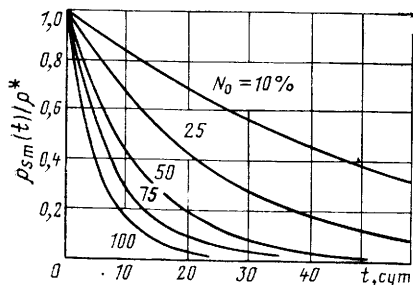


Рис. 2.7.5. Уменьшение отравления Sm с эффективным периодом полувыгорания (2.7.6)

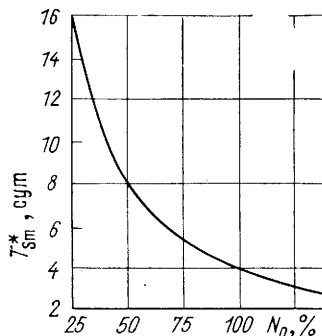


Рис. 2.7.6. Зависимость T^*_{sm} от мощности реактора ТР

ронов, при работе на мощности с плотностью потока Φ_0 [нейтр/($см^2 \cdot с$)]

$$T^*_{sm} = 0,693/\lambda^*_{sm} = 0,693/\sigma_{sm}\Phi_0 = 16 \cdot 10^{13}\Phi_0 \text{ сут.}$$

Если взять $\Phi_0 = \Phi_{ном} = 4 \cdot 10^{13}$ нейтр/($см^2 \cdot с$), то для мощности $N_i \leq N_{ном}$ (рис. 2.7.6)

$$T^*_{sm} = 4\Phi_{ном}/\Phi_i = 4N_{ном}/N_i \text{ сут.} \quad (2.7.6)$$

При $\Phi_0 < 10^{14}$ нейтр/($см^2 \cdot с$) $|\rho_{пл}| < |\rho_{0Xe}|$, поэтому нестационарное отравление Sm после остановки не может повлиять на возможность очередного пуска ЯР, так как ρ , высвободившаяся вследствие распада Xe , больше глубины прометиевого провала (см. задачу 2.7.9). В ЯР с большим потоком нейтронов может оказаться, что $|\rho_{пл}| > |\rho_{0Xe}|$, и тогда не исключена ситуация, когда пуск ЯР после остановки невозможен (задача 2.7.10). Из соотношений (2.4.6) и (2.6.3) следует, что $\rho_{пл}/\rho_{0Xe} = \gamma_{рм}\sigma_{sm}\Phi_0/\lambda_{рм}\gamma_{Xe} > 1$ при $\Phi_0 > 4 \cdot 10^{14}$ нейтр/($см^2 \cdot с$).

При изменении мощности временно изменяется концентрация Sm , что обусловлено нарушением динамического равновесия между его прибылью и убылью. Скорость убыли непосредственно связана с потоком нейтронов (мощностью), а прибыли — с периодом полураспада Nd и Pm . Увеличение мощности сопровождается временным высвобождением $\rho_{зап}$, а уменьшение — потерей $\rho_{зап}$, что по аналогии с иодной ямой можно назвать *прометиевой ямой*. Из-за малости этого эффекта существенного влияния на работу ЯР он не оказывает. После длительной работы на новой мощности отравление Sm возвращается к стационарному для данного ЯР значению. В [25] приведены графики прометиевых ям для реактора ВВЭР-440.

При снижении мощности до нового уровня прометиевый провал (яма) меньше, чем после остановки, так как часть Sm выгорает.

Время наступления максимального провала примерно равно 10 сут ($\sim 5 T_{\text{Рм}}$). Если ЯР выведен на мощность при наличии прометиевого провала, то происходит ускоренное выгорание Sm, провал уменьшается и отравление Sm стремится к стационарному. Возможен даже положительный выбег реактивности (см. рис. 2.6.1, 2.7.8, 2.7.9). Для ВВЭР-440 максимальный выбег равен $+0,25\%$ через ~ 5 ч после выхода на $N_{\text{ном}}$ в максимальном прометиевом провале [25].

В ЯР на природном или слабообогатенном уране, где заметную роль играет накопление Pu из ^{238}U (см. § 2.2), после остановки ЯР продолжается накопление Pu из накопившегося во время работы ЯР Nr. В некоторых случаях по воздействию на ρ этот положительный эффект сравним с отрицательным эффектом прометиевого провала и может его частично или полностью скомпенсировать (см. задачу 2.7.9).

Так как $|\rho_{\text{п.п}}| < |\rho_{\text{о.е}}|$, то иметь дополнительный $\rho_{\text{зап}}$ на компенсацию $\rho_{\text{п.п}}$ нет необходимости (см. задачу 2.7.10). Графики нестационарного отравления Sm и зависимости, характеризующие величину и скорость изменения отравления, необходимы оператору для расчета критического положения КР при очередных пусках ЯР и оценки возможности маневрирования мощностью при малом $\rho_{\text{зап}}$.

Задачи с решениями

2.7.1. ЯР работает на мощности $90\% N_{\text{ном}}$. Какой стационарной мощности соответствует концентрация Рm на четвертые сутки работы, если при выходе на мощность Рm в активной зоне не было?

Решение. По графику рис. 2.7.3 определяем, что через 4 сут работы на стационарной мощности концентрация Рm, стремясь к равновесной для мощности 90% , достигнет 70% равновесной: $K_{\text{Рм}} = N_{\text{Рм}}/N_{\text{орм}} = N/N_0 = 0,7$. Следовательно, в данный момент концентрация его соответствует стационарной мощности $63\% N_{\text{ном}}$: $N = 0,7 N_0 \cdot 0,7 \cdot 90\% = 63\%$.

2.7.2. Реактор ТР работал на мощности $75\% N_{\text{ном}}$ более 20 сут. Определить $\Delta\rho_{\text{п.п}}$ через 50 ч после остановки.

Решение. Так как до остановки ЯР работал на мощности 75% более 20 сут, концентрация Рm в нем практически достигла равновесного значения (см. рис. 2.7.3). Максимальную глубину прометиевого провала в этом случае можно определить непосредственно из рис. 2.7.2: $\rho_{\text{п.п}} \approx -0,37\%$. Но этого значения отравления достигнет примерно через 10 сут. Для определения глубины прометиевого провала через 50 ч нужно построить экспоненту с периодом полураспада 53 ч, стремящуюся к значению $-0,37\%$. Так как интересующее нас время почти равно $T_{\text{Тм}} = 53$ ч, то можно сказать, что через 50 ч $\Delta\rho_{\text{п.п}} \approx 0,5 \rho_{\text{п.п}} \approx -0,18\%$. Тот же результат находим по кривой для $N_0 = 75\%$ на рис. 2.7.4.

В общем случае можно воспользоваться универсальным графиком рис. 2.7.3, по которому определяем для $t_{\text{ст}} = 50$ ч $\Delta\rho_{\text{п.п}}/\rho_{\text{п.п}} =$

$=0,48$; $\Delta\rho_{\text{п.п}}=0,48 \rho_{\text{п.п}}$. Подставляя значение $\rho_{\text{п.п}}$ из рис. 2.7.2, получаем $\Delta\rho_{\text{п.п}}=-0,48 \cdot 0,37=-0,18\%$.

То же самое получим, используя формулу (2.7.4) и рис. 2.7.3: $\Phi_{\text{п.п}}=-0,5 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 0,48=-0,18\%$.

2.7.3. Реактор ТР работал на $N_{\text{ном}}$ 4 сут. Определить $\Delta\rho_{\text{п.п}}$ через 5 сут после остановки.

Решение. Так как за 4 сут работы концентрация Рт не достигла равновесного значения для данной мощности, то по графику рис. 2.7.3 определим, что через 4 сут $N_{\text{Ртм}}/N_{0\text{Ртм}}=N/N_0=0,7$, т. е. $N=0,7 N_0=0,7 N_{\text{ном}}=70\%$. Это значит, что в момент остановки концентрация Рт соответствует стационарному значению для $N=70\% N_{\text{ном}}$. Из рис. 2.7.2 определяем для мощности 70%: $\rho_{\text{п.п}}=-0,35\%$. Через 5 сут после остановки (см. рис. 2.7.3) $(\Delta\rho_{\text{п.п}}/\rho_{\text{п.п}})_{5\text{сут}}=0,8$; $\Delta\rho_{\text{п.п}}=-0,8 \cdot 0,35=-0,28\%$.

Тот же результат получаем по формуле (2.7.4), определяя коэффициенты по рис. 2.7.3: $\rho_{\text{п.п}}=-0,5 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,8=-0,28\%$, или непосредственно по интерполированной кривой для $N_0=70\%$ из рис. 2.7.4.

2.7.4. В момент пуска реактора ТР отравление Sm составляло $\rho_{\text{Sm}}^* = \rho_{0\text{Sm}} + \rho_{\text{п.п}} = -1,2\%$. С какой скоростью высвобождается $\rho_{\text{зап}}$ при изменении концентрации Sm в первое время после выхода на $N_{\text{ном}}$?

Решение. Накопление Sm после пуска ЯР происходит медленно, так как он появляется из Рт, который только начинает образовываться. Убыль Sm после выхода на $N_{\text{ном}}$ происходит с эффективным периодом $T_{\text{Sm}}^* = 4$ сут (2.7.6). Построив эту зависимость (рис. 2.7.7), найдем, что за первые сутки, когда накоплением Sm еще можно пренебречь, $d\rho_{\text{Sm}}/dt \approx +0,2\%/24 = +8,3 \cdot 10^{-3}\%/ч$.

Аналогичный ответ должен получиться, если определить скорость как производную выражения (2.7.5) при $t=0$: $d\rho_{\text{Sm}}/dt|_{t=0} = 0,693 \rho_{0\text{Sm}}^*/T_{\text{Sm}}^* \approx 8,6 \cdot 10^{-3}\%/ч$. Как и следовало ожидать, второй результат несколько больше, так как он дает скорость при $t=0$, а в первом случае по графику рис. 2.7.7 получена средняя скорость за сутки.

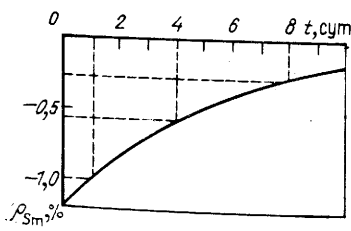


Рис. 2.7.7. К задаче 2.7.4

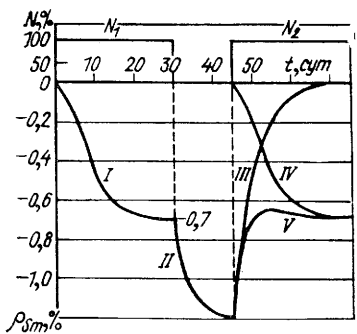


Рис. 2.7.8. К задачам 2.7.5 и 3.5.1

2.7.5. Реактор ТР работал на $N_{\text{ном}}$ один месяц и был остановлен. Определить ход отравления Sm после очередного вывода ЯР на $N_{\text{ном}}$ через 15 сут стоянки.

Решение. Поскольку ЯР работал на $N_{\text{ном}}$ без перерыва 30 сут, в нем установилась равновесная концентрация Pm (см. рис. 2.7.3) и Sm (см. рис. 2.6.2). Характер уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ при отравлении Sm за 30 сут работы (если это время от начала кампании) показан на рис. 2.7.8 [кривая I (взята из рис. 2.6.2)]. После остановки ЯР Pm распадается, т. е. имеет место прометиевый провал. Глубину его определяем из рис. 2.7.2 ($\rho_{\text{п.п}} \approx -0,5\%$), а характер изменения — из рис. 2.7.3 (с $T_{Pm} = 53$ ч). За 15 сут прометиевый провал практически достигает максимального значения (кривая II) и суммарное уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ из-за Sm составляет $\rho_{sm} = \rho_{osm} + \rho_{\text{п.п}} \approx -1,2\%$. После очередного вывода ЯР на $N_{\text{ном}}$ характер изменения ρ_{sm} определяется двумя противоположными процессами, влияющими на концентрацию Sm в активной зоне: уменьшением количества ядер Sm вследствие выгорания (см. рис. 2.7.5) с $T_{Sm}^* = 4$ сут (2.7.6) (кривая III) и увеличением количества ядер Sm , обусловленным накоплением Pm и его распадом с образованием Sm (см. рис. 2.6.2 и 2.7.8, кривая IV). Результирующее изменение ρ дает кривая V. В конечном счете отравление снова стремится к стационарному значению. При этом если в момент пуска концентрация Sm была большой и ЯР выведен на выскокий уровень мощности, то возможно уменьшение отравления Sm ниже установившегося стационарного значения (выбег реактивности), пока эффект выгорания Sm не будет скомпенсирован прибылью его из вновь накапливающегося Pm (см. рис. 2.7.8).

2.7.6. Реактор ТР с начала кампании 5 сут работал на мощности 50% $N_{\text{ном}}$. После 3 сут стоянки он снова выведен на мощность 75%. Построить кривую отравления Sm на протяжении 15 сут с момента первого пуска ЯР.

Решение. После вывода ЯР на мощность 50% начинается отравление Sm . Потерю $\rho_{\text{зап}}$ через 5 сут работы определяем по рис. 2.6.3 для $Q_k = 0,5 \cdot 80 \cdot 24 = 4800$ МВт·ч или из рис. 2.6.2 по кривой для мощности 50%: $\rho_{sm} - 0,11\%$ (рис. 2.7.9, кривая I). После остановки ЯР образуется прометиевый провал, глубина которого зависит от концентрации Pm в момент остановки. По

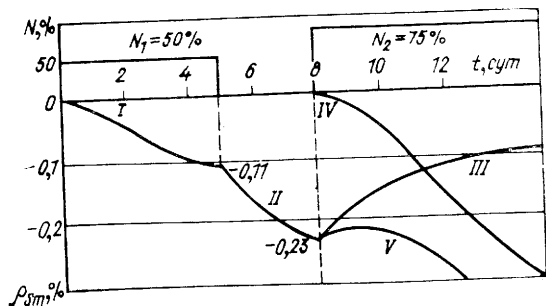


Рис. 2.7.9. К задаче 2.7.6

рис. 2.7.3 определяем, что за 5 сут работы на стационарной мощности концентрация Рm составит примерно 80 % стационарной для мощности в данном случае 50 % $N_{\text{ном}}$, что соответствует равновесному значению для мощности 40 % $N_{\text{ном}}$: $N_{\text{Рm}}/N_{0\text{Рm}}=0,8$; $N=0,8 N_0=0,8 \cdot 50 \% = 40 \% N_{\text{ном}}$.

По рис. 2.7.2 находим максимальную глубину прометиевого провала для мощности 40 %: $\rho_{\text{п.п}}=-0,2\%$. Через 3 сут (см. рис. 2.7.3) $\Delta\rho_{\text{п.п}}=0,6\rho_{\text{п.п}}=-0,6 \cdot 0,2=-0,12\%$, или по формуле (2.7.4) и рис. 2.7.3 $\Delta\rho_{\text{п.п}}=-0,5 \cdot (50/100) \cdot 0,79 \cdot 0,6 \approx -0,12\%$.

Тот же результат получаем из рис. 2.7.4 по кривой для $N_0=40\%$: через 3 сут $\Delta\rho_{\text{п.п}} \approx -0,12\%$.

Таким образом, суммарное отравление в момент выхода на мощность 75 % составит $-0,11-0,12=-0,23\%$ (см. рис. 2.7.9, кривая II). После выхода на мощность 75 % отравление Sm, с одной стороны, будет уменьшаться с $T_{\text{Sm}}^*=5,3$ сут (2.7.6) (кривая III на рис. 2.7.9), с другой стороны, будет приближаться к стационарному значению ($-0,7\%$) при работе на мощности 75 % (см. рис. 2.6.2) — кривая IV на рис. 2.7.9. Суммарное изменение ρ_{Sm} представлено кривой V, стремящейся к $\rho_{0\text{Sm}}=-0,7\%$.

Как видно из рис. 2.7.9 и 2.7.8, при очередном пуске ЯР вследствие интенсивного выгорания Sm несколько увеличивается $\rho_{\text{зап}}$. Выбег реактивности зависит от мощности, на которую выведен ЯР, и от степени отравления Sm в момент пуска.

2.7.7. Реактор ТР работал в следующем режиме: 15 сут на мощности 100 %, 2 сут — 40 %, 3 сут — 50 % $N_{\text{ном}}$, а затем был остановлен. Определить $\rho_{\text{п.п}}^{\text{макс}}$ после остановки.

Решение. Для определения прометиевого провала необходимо знать, какой стационарной мощности соответствует концентрация Рm в момент остановки. Если перед остановкой ЯР работал на стационарной мощности не менее 8 сут, то задача решается непосредственно по графикам рис. 2.7.2 для данной мощности до остановки. Если же ЯР работал на различных мощностях, причем на последней время работы было менее 8 сут, то глубина прометиевого провала зависит также от предыдущего режима работы. Строго говоря, в этом случае нужно строить кривую переходного процесса отравления при каждом изменении мощности, но, учитывая малость нестационарного отравления Sm, можно ограничиться оценкой отравления по средней мощности за последние примерно 8 сут перед остановкой, так как сколько бы ни было Рm за ~ 8 сут до остановки, к моменту остановки он распадется. Поэтому определяем среднюю мощность за последние 8 сут работы

$$\bar{N} = (50 \cdot 3 + 40 \cdot 2 + 100 \cdot 3)/8 = 66\% N_{\text{ном}}$$

и для этой мощности находим прометиевый провал (2.7.1): $\rho_{\text{п.п}}=-0,5 \cdot 66/100=-0,33\%$ (см. также рис. 2.7.2 или 2.7.4).

2.7.8. Реактор ТР после выработки 50 эф. сут остановлен при $N=80\% N_{\text{ном}}$. Оценить $\rho_{\text{п.п}}$ через 5 сут после остановки.

Решение. Так как на момент остановки Рm достиг равновесной концентрации для 80 %, то по рис. 2.7.4 для $N_{\text{ном}}$ через 120 ч определяем $\rho_{\text{Sm}}^{\text{ном}} = -0,4 \%$, а для $N=80 \%$ в соответствии с (2.7.4) $\rho_{\text{Sm}}^{80\%} = -0,4 \cdot 0,8 = -0,32 \%$.

2.7.9. Как будет изменяться ρ ЯР на тепловых нейтронах вследствие изменения концентрации Sm и Pu после остановки ЯР?

Решение. Согласно (2.2.3), (2.6.2), (2.7.2) и (2.6.1) после остановки ЯР, проработавшего на стационарной мощности не менее 8 сут, концентрация Pu и Sm увеличивается вследствие распада накопившихся к моменту остановки соответственно Np и Pm:

$$\Delta N_{\text{Pu}}(t) = \Phi_0 \frac{\Sigma_a^{U-238}}{\lambda_{\text{Np}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Np}} t}) \text{ ядер/см}^3,$$

$$\Delta N_{\text{Sm}}(t) = \gamma_{\text{Pm}} \Phi_0 \frac{\Sigma_f^{U-235}}{\lambda_{\text{Pm}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Pm}} t}) \text{ ядер/см}^3.$$

Так как $T_{\text{Np}} = 2,3 \text{ сут} \approx T_{\text{Pm}} = 2,2 \text{ сут}$ ($\lambda_{\text{Np}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; $\lambda_{\text{Pm}} = 3,6 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$), то примерно через 8 сут около 90 % накопившихся на момент остановки ядер Np и Pm превратится соответственно в Pu и Sm:

$$\Delta N_{\text{Pu}} \approx \Phi_0 \Sigma_a^{U-238} / \lambda_{\text{Np}}; \quad \Delta N_{\text{Sm}} \approx \gamma_{\text{Pm}} \Phi_0 \Sigma_f^{U-235} / \lambda_{\text{Pm}}.$$

Если ЯР до остановки работал менее 8 сут, то в нем еще не установилась равновесная концентрация Np и Pm и, следовательно, при определении ΔN_{Pu} и ΔN_{Sm} вместо Φ_0 нужно брать то значение плотности потока нейтронов, которое соответствует достигнутой на момент остановки концентрации Np и Pm (см. задачу 2.7.1).

Изменение ρ пропорционально плотности потока нейтронов и макроскопическим сечениям деления и поглощения соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{|+\Delta\rho_{\text{Pu}}|}{|-\Delta\rho_{\text{Sm}}|} &= \frac{\sigma_f^{\text{Pu}} \Sigma_a^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Sm}} \Sigma_f^{\text{Sm}}} = \frac{\sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Sm}}} \frac{\Delta N_{\text{Pu}}}{\Delta N_{\text{Sm}}} = \frac{\sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Sm}}} \Phi_0 \frac{\Sigma_a^{U-238}}{\lambda_{\text{Np}}} \left| \frac{\sigma_a^{\text{Sm}} \gamma_{\text{Pm}} \Phi_0 \frac{\Sigma_f^{U-235}}{\lambda_{\text{Pm}}}}{\lambda_{\text{Pm}}} \right| = \\ &= \frac{\sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Sm}}} \frac{\sigma_a^{U-238}}{\sigma_a^{U-235}} \frac{\lambda_{\text{Pm}}}{\lambda_{\text{Np}}} \frac{1}{\gamma_{\text{Pm}}} \frac{N_{U-238}}{N_{U-235}} = \frac{715}{4,08 \cdot 10^4} \frac{2,75}{570} \times \\ &\times \frac{3,6 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 10^{-6}} \frac{1}{1,13 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) = 7,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{x} - 1 \right), \end{aligned}$$

где $x = N_{U-235} / (N_{U-235} + N_{U-238})$ — обогащение урана.

Из полученного соотношения видно, что чем больше обогащение (т. е. меньше ^{238}U), тем меньше образуется ^{239}Pu и, следовательно, меньше его влияние на ρ : $(+\Delta\rho_{\text{Pu}}) / (-\Delta\rho_{\text{Sm}}) \xrightarrow{x \rightarrow 1} 0$.

Наибольший положительный эффект получается в ЯР на природном уране ($x=0,007$): $|(+\Delta\rho_{\text{Pu}}) / (-\Delta\rho_{\text{Sm}})| \approx 1,1$, где прометиевый провал перекрывается увеличением ρ за счет накопления Pu. На рис. 2.7.10 приведена зависимость $|(+\Delta\rho_{\text{Pu}}) / (-\Delta\rho_{\text{Sm}})|$ от обога-

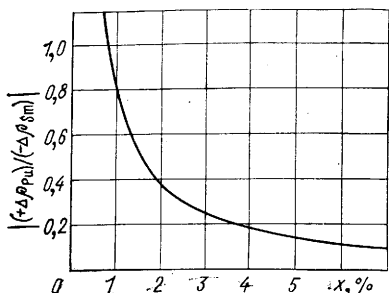


Рис. 2.7.10. К задаче 2.7.9

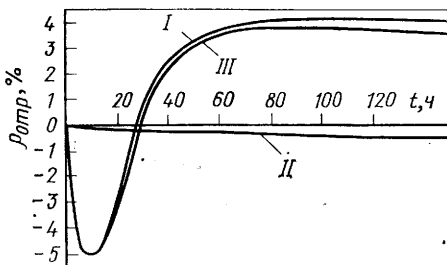


Рис. 2.7.11. К задаче 2.7.10

щения урана, из которой видно, что в ЯР на тепловых нейтронах с обогащением урана менее 1,5 % влияние прометиевого провала на ρ после остановки можно не учитывать, так как $|\Delta\rho_{Sm}| < 0,5 \Delta\rho_{Ru}$, а при $x > 1,5 \%$ можно пренебречь влиянием накопления Pu на компенсацию прометиевого провала, поскольку

$$+\Delta\rho_{Pu} < 0,5 |\Delta\rho_{Sm}|.$$

2.7.10. Реактор ТР работает на $N_{ном}$ в течение 20 сут. Как изменится $\rho_{зап}$ из-за отравления Xe и Sm после остановки ЯР?

Решение. Поскольку ЯР работал более 20 сут на стационарной мощности, в нем установилась равновесная концентрация I, Xe, Pu и Sm. После остановки ЯР $\rho_{зап}$ уменьшается вследствие $(\rho_{и.я} + \rho_{п.п})$. По прохождении максимума иодной ямы $\rho_{зап}$ начнет высвобождаться. Прометиевый же провал будет уменьшать $\rho_{зап}$ до полного распада Pu. Суммируя кривые, построенные на основании данных рис. 2.5.2 и 2.7.2, получим изменение $\rho_{зап}$ из-за отравления Xe и Sm (рис. 2.7.11). Как видно из рисунка, несмотря на то что прометиевый провал (кривая II) безвозвратно (до очередного пуска) уменьшает $\rho_{зап}$, после распада Xe (кривая I), соответствовавшего стационарному отравлению, прометиевый провал не опасен для ЯР с точки зрения возможности последующего пуска (кривая III). После распада Xe всегда будет положительный $\Delta\rho_{зап} = |\rho_{0Xe}| - |\rho_{п.п}|$. Кроме того, для ЯР на природном или слабообогащенном уране прометиевый провал будет полностью или частично скомпенсирован Pu, накопившимся из распадающегося после остановки ЯР Pu (см. задачу 2.7.9).

2.7.11. ЯР имеет $\Phi_{ном} > 4 \cdot 10^{14}$ нейтр/(см²·с). Стационарное отравление Xe для $N_{ном}$ $\rho_{0Xe} = -4,5 \%$, иодная яма $\rho_{и.я} = -5,5 \%$, прометиевый провал $\rho_{п.п} = -6 \%$. Как будет изменяться $\rho_{зап}$ вследствие изменения концентрации Xe и Sm после остановки ЯР, который работал более 10 сут на $N_{ном}$?

Решение. После остановки начинается отравление Xe (иодная яма) и Sm (прометиевый провал). Используя экспериментальные кривые иодных ям и прометиевых провалов для данного ЯР, находим суммарное изменение $\rho_{зап}$ (рис. 2.7.12). Если в мо-

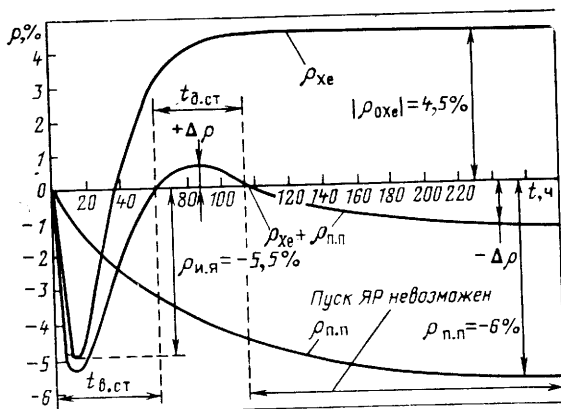


Рис. 2.7.12. К задаче 2.7.11

мент остановки $\rho_{\text{зап}}=0$, то, как следует из рисунка, в течение ~ 60 ч будет вынужденная стоянка из-за иодной ямы. Потом в течение $110 - 60 = 50$ ч вследствие более быстрого распада Хе по сравнению с накоплением Sm ρ становится положительной, но после 110 ч стоянки глубина прометиевого провала становится больше высвобожденной ρ благодаря распаду Хе и ЯР становится подкритичен на все последующее время. Такой ЯР можно пустить, только используя отрицательные мощностной и температурный эффекты реактивности. Если это невозможно, наступает «самариевая смерть» реактора, что может иметь место в исследовательском высокопоточном ЯР с малым $\rho_{\text{зап}}$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Влияет ли прометиевый провал на энергозапас ЯР?
2. Может ли прометиевый провал быть причиной, исключающей пуск энергетического ЯР после остановки?
3. Как изменяется отравление Sm при изменении (увеличении, уменьшении) мощности ЯР? Чем отличается оно от аналогичного изменения для Хе?
4. Зависит ли глубина прометиевого провала от отравления Sm в момент остановки?
5. Реактор ТР работал на мощности 75 % $N_{\text{ном}}$ 30 сут. Определить $\rho_{\text{п.п}}$ и суммарное отравление Sm через 15 сут после остановки.
6. Через какое время после остановки $\rho_{\text{п.п}}$ достигнет половины своего максимального значения?
7. В каком из двух ЯР на тепловых нейтронах, работающих на природном и обогащенном уране, больше $\rho_{\text{п.п}}$ и почему?
8. Реактор ТР работал на $N_{\text{ном}}$ 15 сут. Через какое время после остановки отравление Sm увеличится в 1,5 раза?
9. Реактор ТР с начала кампании работал в следующем режиме: 10 сут — на мощности 75 % $N_{\text{ном}}$, 5 сут стоял, 1 мес — на мощности $N_{\text{ном}}$, после чего остановлен. Построить кривую изменения $\rho_{\text{зап}}$ из-за отравления Sm.

10. Каковы возможности пуска ЯР, рассмотренного в задаче 2.7.11, после остановки с $N_{ном}$, если $\rho_{зап}$ в момент остановки равен: а) 0,5 %, б) 1,5 %?

§ 2.8. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ

Изменение ρ , обусловленное изменением температуры всех компонентов активной зоны от значения $T_1(^{\circ}\text{C})$ в холодном ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) ЯР до $T_2(^{\circ}\text{C})$ в рабочем горячем состоянии на номинальной мощности называют *температурным эффектом реактивности* (ТЭР):

$$\rho_T = \rho(T_2) - \rho(T_1) = \frac{K_{эф2} - K_{эф1}}{K_{эф1} K_{эф2}}.$$

Характер ТЭР (абсолютное значение и знак) зависит от типа ЯР, т. е. от спектра нейтронов, вида замедлителя, концентрации различных компонентов активной зоны и т. п. ТЭР является интегральной характеристикой и определяет влияние температуры на $\rho_{зап}$, т. е. на энергозапас ЯР.

Изменение ρ , соответствующее изменению температуры активной зоны на 1°C , называется *температурным коэффициентом реактивности* (ТКР):

$$\alpha_T = d\rho_T/dT = dK_{эф}/K_{эф}dT \text{ 1/}^{\circ}\text{C}. \quad (2.8.1)$$

ТКР — дифференциальная характеристика, определяет устойчивость работы ЯР в зависимости от абсолютного значения и знака ТЭР.

С эксплуатационной точки зрения ρ_T и α_T удобно разделить на две составляющие: медленно изменяющиеся во времени при изменении температуры и режима работы (*изотермические* ρ_i и α_i) и быстродействующие, отслеживающие изменение мощности ЯР (*динамические, мощностные* ρ_N и α_N): $\rho_T = \rho_i + \rho_N$; $\alpha_T = \alpha_i + \alpha_N$.

Изотермический эффект, который собственно и называют температурным, обусловлен равномерным нагревом ЯР от постороннего источника или собственным теплом на малом ($\sim 1\%$ $N_{ном}$) уровне мощности. Этот эффект определяется температурой компонентов, формирующих спектр нейтронов и влияющих на утечку их из активной зоны (теплоноситель, замедлитель, отражатель, корпус).

Для ВВР изотермический эффект ρ_i проявляется прежде всего как зависимость плотности замедлителя от температуры. В этом случае его называют *плотностным*. При повышении температуры воды $t_{\text{H}_2\text{O}}$ ($^{\circ}\text{C}$) ее плотность γ (г/см^3) и, следовательно, концентрация ядер $N_{\text{H}_2\text{O}}$ (ядер/см 3) уменьшаются, ухудшается замедляющая способность $K_{зам}$ (см. § 1.4), ужесточается спектр тепловых нейтронов, уменьшаются сечение деления и ρ :

$$t_{\text{H}_2\text{O}} \uparrow \rightarrow \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \downarrow \rightarrow N_{\text{H}_2\text{O}} \downarrow \rightarrow E_n \uparrow \rightarrow \sigma_f \downarrow \rightarrow \rho \downarrow.$$

На рис. 2.8.1 представлены возможные варианты температурных эффектов. Реактор ТР имеет ТЭР, описываемый кривой IV.

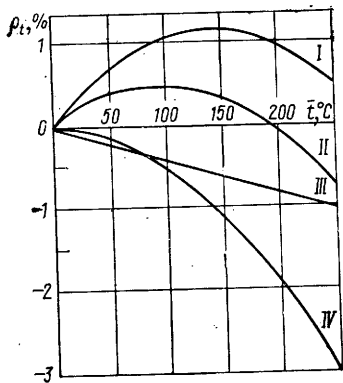


Рис. 2.8.1. Характерные зависимости ТЭР для различных ЯР (IV — для реактора ТР)

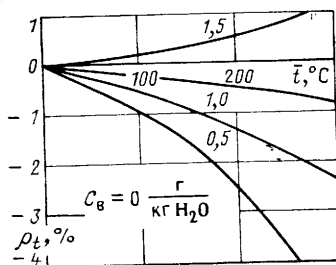


Рис. 2.8.2. ТЭР ВВЭР-440 при различных концентрациях бора

На рис. 2.8.2 даны ТЭР ВВЭР-440 для различных концентраций H_3BO_3 . Ход кривых определяется свойствами данного ЯР. В некоторых случаях происходит выбег ρ_t^+ при разогреве, равный разности максимальной в процессе разогрева и начальной реактивностей. В основном это имеет место, когда в холодном состоянии соотношение концентраций ядер водорода и урана выше оптимального с точки зрения замедления нейтрона до тепловой энергии. Уменьшение концентрации ядер водорода с ростом температуры приведет к уменьшению поглощения нейтронов в них, не ухудшая замедляющей способности. На этом участке изменения температуры (разогрев ЯР) α_t будет положительным (рис. 2.8.1, кривые I и II).

В ЯР с борным регулированием ТЭР и ТКР сильно зависят от массовой концентрации борной кислоты (см. табл. 2.8.1 и рис. 2.8.2

Таблица 2.8.1

Массовая концентрация В, г/кг H_2O	Массовая концентрация H_3BO_3 , г/кг H_2O	ρ_t при температуре теплоносителя			
		20° С	100° С	200° С	285° С
0	0	-0,009	-0,021	-0,033	-0,051
0,5	2,86	-0,006	-0,013	-0,021	-0,030
1,0	5,72	-0,003	-0,004	-0,0067	-0,0068
1,5	8,58	-0,0003	+0,005	+0,008	+0,018

для ВВЭР-440). По мере уменьшения массовой концентрации бора возрастают $|\rho_t^-|$ и $|\alpha_t|$, влияние колебаний температуры на ρ становится все более ощутимым. Для больших концентраций бора ТКР может стать положительным, что с точки зрения ядерной бе-

зопасности крайне нежелательно. Причина такой зависимости — уменьшение плотности H_3BO_3 с ростом температуры, вследствие чего снижается концентрация ядер ^{10}B в активной зоне и ρ растет [25]. Например, в одном из ВВЭР в отсутствие H_3BO_3 $\alpha_{t=250^\circ\text{C}} = -5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, а при концентрации H_3BO_3 8 г/кг $\alpha_{t=250^\circ\text{C}} = +1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Значение ТЭР и характер хода его кривой влияют на $\rho_{\text{зап}}$ и выбор физического веса КР. Положительный ТЭР в рабочей точке (рис. 2.8.1, кривая I) увеличивает $\rho_{\text{зап}}$, отрицательный ТЭР уменьшает его (кривые II, III, IV), т. е. требует для компенсации $-\rho_t$ дополнительной загрузки топлива, уменьшает глубину выгорания. Физический вес КР должен быть достаточным для компенсации $|-\rho_t|$ в холодном ЯР, а также положительного выбега ρ^+ в процессе разогрева.

Мощностной эффект определяется температурой урана и наличием в нем изотопа ^{238}U , в котором в результате доплер-эффекта при повышении температуры увеличивается поглощение нейтронов. Чем выше температура топлива и меньше обогащение урана (больше ^{238}U), тем больше мощностной эффект. В топливе с высокой теплопроводностью, например в металлокерамике U—Al, мощностным эффектом можно пренебречь. Если же в качестве топлива используется, например, двуокись урана UO_2 , имеющая крайне низкую теплопроводность, то мощностной эффект существен.

На рис. 2.8.3 представлен вариант кривых мощностного эффекта в зависимости от мощности ЯР и расхода теплоносителя G . Для $N_{\text{ном}}$ $\rho_N = \rho(N_{\text{ном}}, G) - \rho(N_{\text{мкУ}})$.

Изменение ρ , вызванное бесконечно малым изменением мощности, называется *мощностным коэффициентом реактивности*:

$$\alpha_N = d\rho_N/dN \quad \text{1/МВт (1\%)}. \quad (2.8.2)$$

ВВЭР-440 имеет $\alpha_N = -(1,5 \div 1,8) \cdot 10^{-3} \text{ 1/МВт}$. В ЯР с высоким обогащением топлива, т. е. с малым содержанием ^{238}U (например, в ЯР на быстрых нейтронах), связанный с повышением температуры топлива доплер-эффект для делящихся нуклидов (^{235}U , ^{239}Pu) может преобладать над увеличением поглощения в ^{238}U и мощностной эффект и коэффициент будут положительными.

Изотермический α_t (1/°C) и мощностной α_N (1/МВт) коэффициенты реактивности определяют устойчивость, регулируемость, надежность и безопасность ЯР. Динамический мощностной коэффициент во всем диапазоне изменения мощности должен быть отрицательным: $\alpha_N = \pm \Delta\rho_N / (\mp \Delta N) < 0$, благодаря чему безопасность ЯР можно обеспечить даже при небольшом $\alpha_t > 0$. Изотермический ТКР

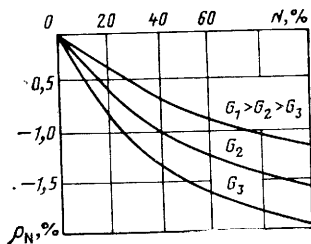


Рис. 2.8.3. Мощностной эффект реактивности

(α_t) для обеспечения саморегулирования ЯР должен быть отрицательным в интервале Δt ($^{\circ}\text{C}$) рабочей температуры $\bar{t}_{\text{раб}}$:

$$\alpha_t(\bar{t}_p \pm \Delta t) = \pm \Delta \rho_t / (\mp \Delta t) \quad 1/^{\circ}\text{C} < 0.$$

Саморегулирование ЯР — это способность ЯР без системы регулирования изменять тепловую мощность в соответствии с ее потреблением. При наличии достаточно большого отрицательного ТКР ($|\alpha_t| > 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) можно обойтись без стержней АР для изменения и поддержания мощности в соответствии с изменяющейся нагрузкой (см. задачи 2.8.8 и 2.8.9).

ТЭР и ТКР для некоторых ЯР (см. рис. 2.8.1) при средней рабочей температуре 250°C соответственно равны:

$$\begin{array}{ll} I & \rho_t = +0,5\%, \quad \alpha_t = -1,1 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}; \\ II & \rho_t = -0,7\%, \quad \alpha_t = -1,4 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}; \\ III & \rho_t = -1,1\%, \quad \alpha_t = -0,4 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}; \\ IV & \rho_t = -3,0\%, \quad \alpha_t = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}. \end{array}$$

В рабочей точке α_t для ВВР составляет $-(1 \div 4) \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, для ЯР с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем — на порядок меньше: $-(0,3 \div 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Изменение ρ из-за ТЭР при изменении температуры активной зоны на Δt ($^{\circ}\text{C}$) равно $\Delta \rho_t = \int_{\Delta t} \alpha_t dt$. В случае постоянного значения α_t ($1/^{\circ}\text{C}$) в данном диапазоне температур

$$\Delta \rho_t = \alpha_t \Delta t. \quad (2.8.3)$$

Снизив среднюю рабочую температуру при $\alpha_t < 0$ от значения \bar{t}_1 до $\bar{t}_2 < \bar{t}_1$, можно высвободить $\Delta \rho_t = \alpha_t (\bar{t}_2 - \bar{t}_1)$ и получить, таким образом, дополнительный энергозапас (см. § 2.9). Если в данном диапазоне температур α_t не является постоянной величиной, то значение $\Delta \rho_t$ нужно определять непосредственно по кривой ТЭР.

Скорость изменения реактивности $d\rho_t/d\tau$ ($1/c$) при изменении температуры со скоростью $dt/d\tau$ ($^{\circ}\text{C}/c$) и α_t ($1/^{\circ}\text{C}$), соответствующую данной температуре, равна

$$d\rho/d\tau = \alpha_t(t) dt/d\tau \text{ } 1/c. \quad (2.8.4)$$

Чрезвычайно важно для безопасности ЯР иметь отрицательный мощностной коэффициент, который обеспечит надежное ограничение мощности в аварийных ситуациях. Но большой отрицательный коэффициент α_N существенно ограничивает возможности саморегулирования ЯЭУ, так как противодействует ТКР, стабилизирующему параметры ЯР на новой мощности, достигнутой изменением нагрузки (см. задачу 2.8.9).

При работе на мощности N ниже номинальной в случае $\alpha_N < 0$ высвобождается

$$\Delta \rho_N = \alpha_N (N - N_{\text{ном}}), \quad (2.8.5)$$

которая может быть использована для получения дополнительного энергозапаса (см. задачу 2.9.17). В большинстве случаев α_N примерно на порядок меньше α_t , однако в переходных режимах быстрый вклад их в реактивность по значению примерно одинаков, так как изменение температуры топлива в этих случаях примерно на порядок выше изменений температуры теплоносителя. Динамически α_N более быстродействующий, а для безопасности ЯР при $\alpha_N < 0$ это главное. Но большой $|\alpha_N|$, как и $|\alpha_t|$, улучшая безопасность ЯР, требует большого физического веса КР для обеспечения подкритичности после остановки и расхолаживания ЯР.

Зависимость ρ от температуры характерна для всех типов ЯР, но в каждом случае имеет свои особенности. Так, для ВВР кипящего типа определяющим является паровой эффект реактивности $\rho_{\text{п}}$, имеющий отрицательный коэффициент $\alpha_{\text{п}} = \Delta\rho_{\text{п}}/m_{\text{п}} < 0$, где $\Delta\rho_{\text{п}}$ — изменение ρ , обусловленное изменением средней (с учетом пара) плотности теплоносителя на различных уровнях мощности; $m_{\text{п}}$ — массовая доля пара в пароводяной смеси. Рост парообразования уменьшает количество замедлителя в активной зоне, снижая ρ , и наоборот. Отрицательный $\alpha_{\text{п}}$ обеспечивает саморегулирование кипящего ЯР.

В ЯР с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем $\alpha_{\text{п}}$ может быть положительным, так как изменение доли пара в пароводяной смеси практически не влияет на замедление нейтронов (концентрация графита, определяющая спектр нейтронов, остается постоянной), а поглощение нейтронов в воде уменьшается.

Паровой коэффициент, как и доплеровский, зависит непосредственно от мощности ЯР, поскольку изменение количества пара в активной зоне связано с уровнем мощности и происходит практически при постоянной температуре теплоносителя, равной температуре кипения.

В ЯР с газовым или жидкометаллическим теплоносителем знак и значение изменения ρ при изменении температуры зависят в основном от поглощающей и рассеивающей способностей наиболее чувствительных к температуре компонентов активной зоны. Например, в ЯР с воздушным охлаждением эффект, вызванный тепловым расширением теплоносителя, имеет порядок $+2 \cdot 10^{-5}$ 1/°С. Но для таких ЯР необходимо также учитывать барометрический эффект — зависимость ρ от давления в контуре (так как число атомов газа в 1 м³ сильно зависит от давления): $\alpha_P = d\rho(P)/dP$ 1/МПа, где $\rho(P)$ — изменение ρ при изменении давления P (МПа) теплоносителя. Для воздуха барометрический коэффициент в ЯР на тепловых нейтронах имеет порядок $-(10^{-2} \div 10^{-1})$ 1/МПа. Барометрический коэффициент для ВВР мал, так как вода — сжимаемая жидкость. При резком увеличении давления в первом контуре в определенных условиях возможно увеличение ρ , которого нельзя не учитывать с точки зрения ядерной безопасности. Более сильно барометрический эффект проявляется в кипящих ЯР.

В ЯР на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем изотермический эффект на порядок меньше, чем в тепловых. В реакторе БР-5 $\alpha_t \approx -3 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Мощностной коэффициент для него $\alpha_N \approx -4,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/МВт} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/\% } N_{\text{ном}}$. Кроме того, для этих ЯР очень важное значение имеет натриевый пустотный эффект — зависимость ρ от частичного (вплоть до полного) удаления натрия из активной зоны. Причиной такого удаления может быть вскипание натрия. При этом происходит изменение спектра, сечений захвата и утечки нейтронов. Поскольку действие этих составляющих на ρ имеет разный знак, суммарный эффект зависит от типа топлива и размеров ЯР. В небольшом ЯР эффект отрицателен, т. е. удаление натрия приводит к уменьшению ρ , в больших ЯР с плутониевым топливом он положителен.

Зависимость ρ от температуры и мощности требует специального подхода к вопросу выбора статических характеристик ЯР (зависимости температур теплоносителя на входе, выходе и средней от мощности). Для ВВЭР с незначительным $|\alpha_N|$ наиболее надежна программа регулирования с поддержанием средней температуры теплоносителя постоянной (см. рис. 3.7.1).

При характеристиках с $\bar{t} = \text{const}$ наибольшее изменение ρ происходит при разогреве до средней температуры, а при работе на энергетическом уровне и изменении мощности имеют место только незначительные колебания температуры относительно среднего значения, которые при отрицательном α_t самостабилизируются (саморегулирование). В ЯР с высоким $|\alpha_N|$ для обеспечения режима саморегулирования лучше, чтобы с повышением мощности средняя температура понижалась, компенсируя температурным эффектом мощностной.

Графики ТЭР и ТКР необходимы оператору для: 1) расчета критического положения органов регулирования; 2) определения дополнительного энергозапаса в конце кампании; 3) оценки поведения ЯР при изменении режима работы с точки зрения саморегулирования и обеспечения ядерной безопасности.

Задачи с решениями

2.8.1. Какой из температурных эффектов на рис. 2.8.1 выгоднее с точки зрения энергозапаса ЯР?

Решение. Энергозапас определяется $\rho_{\text{зап}}$, необходимым на различные эффекты (выгорание, шлакование и т. п.), среди которых важное место занимает ТЭР. Чем меньше отрицательный $|\rho_t|$ (см. кривые II, III, IV) или чем больше положительный ρ_t (кривая I), тем больше $\rho_{\text{зап}}$ в рабочем состоянии, т. е. больше энергозапас, кампания ЯР и глубина выгорания топлива (см. задачи в § 2.9).

2.8.2. Какой дополнительный $\rho_{\text{зап}}$ можно получить при снижении средней рабочей температуры на 50°C (от 250°C) для ЯР с различными температурными эффектами (см. рис. 2.8.1)?

Решение. По графикам рис. 2.8.1 определяем дополнительный $\rho_{\text{зап}}$ при снижении средней температуры с 250 до 200 °С:

$$I \Delta \rho_{\text{зап}} = \rho_t(200 \text{ °С}) - \rho_t(250 \text{ °С}) = 0,9 - 0,5 = +0,4\%;$$

$$II \Delta \rho_{\text{зап}} = -0,1 - (-0,7) = +0,6\%;$$

$$III \Delta \rho_{\text{зап}} = +0,3\%; \quad IV \Delta \rho_{\text{зап}} = +1,1\%.$$

Этот $\Delta \rho_{\text{зап}}$ можно расходовать на получение дополнительного энергозапаса (см. § 2.9) на $N < N_{\text{ном}}$.

2.8.3. В процессе кампании ТЭР, представленный кривой *IV* на рис. 2.8.1, вследствие изменения нуклидного состава активной зоны к концу кампании принял вид *II*. На сколько изменится $\rho_{\text{зап}}$ и как это скажется на глубине выгорания?

Решение. Вследствие подъема кривой ТЭР $\rho_{\text{зап}}$ в рабочем (горячем) состоянии увеличивается на $\Delta \rho_{\text{зап}} = (-0,7) - (-3,0) = +2,3\%$. Благодаря этому увеличится кампания при данной нагрузке топлива, т. е. увеличится глубина его выгорания (см. § 2.9).

2.8.4. Как изменится ρ при скачке температуры на $\pm 10^\circ$ при разогреве и во время работы ЯР на мощности?

Решение. Согласно (2.8.3) изменение ρ при изменении температуры на $\pm 10^\circ\text{С}$ равно $\Delta \rho_t = \pm 10 \alpha_t$. Абсолютное значение и знак изменения ρ зависят от того, при какой температуре и в какую сторону она изменится. В начале разогрева при $\Delta t = +10^\circ\text{С}$ для ТЭР *I* и *II* (см. рис. 2.8.1) Δt имеет положительный знак, а для *III* и *IV* — отрицательный. Поскольку α_t для всех эффектов, кроме *III*, в этой области переменный, для определения величины $\Delta \rho_t$ нужно брать α_t для данного диапазона Δt или находить $\Delta \rho_t$ непосредственно по графикам. Для ТЭР *III* $\alpha_t = -0,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{С} = \text{const}$, поэтому во всем диапазоне температур при $\Delta t = \pm 10^\circ\text{С}$ $\Delta \rho_t = \mp 0,4 \cdot 10^{-3} = \mp 0,04\%$. В области температур выше 150 °С α_t во всех случаях отрицательный, следовательно, изменение ρ имеет знак, обратный изменению температуры, а величина $\Delta \rho_t$, например при $\bar{t} = 250^\circ\text{С}$, соответственно равна:

$$I - 1,1 \cdot 10^{-4} (\pm 10^\circ\text{С}) = \mp 0,11\%; \quad II - \mp 0,14\%;$$

$$III - \mp 0,04\%; \quad IV - \mp 0,25\%.$$

2.8.5. С какой скоростью увеличивается ρ при равномерном снижении температуры от 250 до 200 °С (см. рис. 2.8.1) за 1 ч?

Решение. При постоянном α_t в диапазоне изменения температуры и скорости снижения температуры 50 °С/ч скорость изменения реактивности $d\rho_t/dt$ согласно (2.8.1) и (2.8.4) равна:

$$I \quad 0,55\%/ч; \quad II \quad 0,70\%/ч; \quad III \quad 0,20\%/ч; \quad IV \quad 1,25\%/ч.$$

При дальнейшем снижении температуры с постоянной скоростью изменение ρ в связи с уменьшением $|\alpha_t|$ уменьшается (за исключением случая *III*). Расчет в этом случае нужно делать для небольших интервалов температур, где можно принять $\alpha_t = \text{const}$.

2.8.6. ЯР попал в иодную яму (см. § 2.5). Какую температуру лучше поддерживать, чтобы скорее пустить ЯР, т. е. уменьшить время вынужденной стоянки?

Решение. Чем ниже температура в диапазоне отрицательного α_i , тем больше $\rho_{\text{зап}}$ в момент выхода из одной ямы и, следовательно, меньше $t_{\text{в.ст.}}$. Но температура, естественно, не должна быть ниже предельно допустимой, при которой ЯР можно вывести на мощность и ускорить выгорание Хе. После уменьшения отравления необходимо разогреть ЯР до рабочей средней температуры.

2.8.7. При какой средней температуре перед выводом ЯР на мощность лучше изменять режим циркуляции теплоносителя для ЯР, имеющих ТЭР I—IV (см. рис. 2.8.1)?

Решение. Изменение расхода теплоносителя, естественно, меняет температуру активной зоны, а следовательно, и ρ . Чтобы уменьшить колебания ρ , связанные с изменением температуры, желательно производить (при необходимости, которая может возникнуть при пуске и разогреве ЯР) изменение режима циркуляции в диапазоне температур, в котором α_i минимален, а еще лучше, когда он равен нулю (см. рис. 5.5.1). Так, для ЯР с ТЭР I $\alpha_i \approx 0$ при температуре около 140°C , а для ТЭР II — около 100°C . Для ТЭР III и IV во всем диапазоне температур $\alpha_i \neq 0$, поэтому резких колебаний ρ можно избежать только плавной регулировкой расхода теплоносителя. Это относится и к первым двум ЯР, если изменение режима циркуляции производится при $\alpha_i \neq 0$, в том числе и при рабочей температуре.

2.8.8. Как изменится мощность ЯР в режиме саморегулирования при отрицательном α_i в случае: а) уменьшения расхода теплоносителя через активную зону; б) понижения температуры воды второго контура на входе в ПГ; в) ухудшения вакуума в конденсаторе турбины; г) падения давления пара после ПГ?

Решение. При работе ЯР на мощности в режиме саморегулирования изменение параметров ЯЭУ влияет на мощность следующим образом:

а) уменьшение расхода теплоносителя через ЯР приведет к увеличению температуры активной зоны, что в свою очередь уменьшит ρ (см. рис. 2.8.1). Мощность при этом уменьшится до значения, при котором установится соответствие между количеством выделяющегося тепла в ЯР и новым расходом теплоносителя;

б) понижение температуры питательной воды в ПГ увеличит отвод тепла от первичного теплоносителя, что приведет к охлаждению активной зоны и росту ρ , мощность при этом увеличится, температура теплоносителя снова повысится, а ρ уменьшится, стабилизируя мощность на новом более высоком уровне;

в) ухудшение вакуума в конденсаторе турбины приведет к повышению температуры питательной воды и в конечном счете к уменьшению мощности ЯР;

г) падение давления пара после ПГ повлияет на параметры вторичного теплоносителя, и прежде всего снизится температура кипения, что приведет к более интенсивной теплоотдаче от пер-

вичного теплоносителя, снижению температуры активной зоны, росту ρ и увеличению мощности до нового значения, обеспечивающего необходимое давление пара.

Аналогично можно рассмотреть любое изменение параметров ЯЭУ. При этом нужно иметь в виду, что во всех случаях характер процесса установления нового стационарного состояния зависит от абсолютного значения и знака α_t , α_N , от скорости и диапазона изменения (колебания) исходного параметра ЯЭУ.

2.8.9. Как будет вести себя ЯЭУ в режиме саморегулирования при изменении нагрузки на турбогенератор (ТГ), если ЯР имеет большие отрицательные α_t и α_N и статические характеристики с постоянной средней температурой теплоносителя (см. рис. 3.7.1)?

Решение. Снижение мощности ТГ сопровождается уменьшением отбора пара из ПГ, в результате чего давление пара в ПГ начинает расти из-за избыточного тепла первого контура, так как мощность ЯР остается пока постоянной. С ростом давления повышается температура насыщения в ПГ, уменьшаются температурный напор в нем и отвод тепла из первого контура, что при неизменной мощности ЯР приводит к увеличению средней температуры теплоносителя первого контура на величину $+\Delta\bar{t}$ и появлению отрицательной реактивности $-\Delta\rho = -\alpha_t\Delta\bar{t}$. Мощность ЯР начинает уменьшаться. Если бы мощностной эффект был равен нулю, то средняя температура первого контура вернулась бы к прежнему значению, т. е. уменьшилась бы на $-\Delta\bar{t}$, высвободив $+\Delta\rho = (-\alpha_t)(-\Delta\bar{t})$, стабилизируя мощность на новом уровне, соответствующему отбору тепла из ПГ. Стабилизируются также давление и температурный напор в ПГ. В таком ЯР управлять мощностью можно изменением расхода питательной воды, отказавшись от автоматических регуляторов. Чем больше $|\alpha_t|$, тем жестче связь расхода с мощностью, тем устойчивее регулирование. Но при этом ЯР более опасен при аварийном (быстром) снижении температуры теплоносителя (см. задачу 4.2.4).

При наличии большого отрицательного α_N с уменьшением мощности сразу же высвобождается положительная ρ , компенсируя первоначальное уменьшение ее после повышения температуры первого контура. В конце концов процесс стабилизируется на мощности, соответствующей новой нагрузке, но температура первого контура возрастает до значения, обеспечивающего полную взаимную компенсацию $|\Delta\rho_t|$ и $+\Delta\rho_N$. Рост температуры приведет к повышению давления в первом контуре и повышению давления пара в ПГ (обеспечивающем необходимое для новой мощности значение температурного напора). В режиме саморегулирования эти отклонения могут быть выше допустимых, поэтому необходимо воздействие органов регулирования или выбор статических характеристик ЯР, обеспечивающих компенсацию мощностного эффекта [19, 21].

2.8.10. В ЯР, имеющем мощностной эффект (рис. 2.8.3), на $N=60\%$ $N_{\text{ном}}$ увеличили расход с G_2 до G_1 . Как при этом изменяются $\rho_{\text{зап}}$ и динамические свойства ЯР?

Решение. Из рис. 2.8.3 видно, что при увеличении расхода от G_2 до G_1 высвобождается $\Delta\rho_{\text{зап}} = -0,8 - (-1,25) = +0,45\%$, который можно израсходовать на дополнительную энерговыработку (см. § 2.9), при этом крутизна кривой ρ_N , т. е. $|\alpha_N|$, уменьшится, отрицательная обратная связь по ρ при изменении мощности станет слабее.

Контрольные вопросы и задачи

1. Как влияет температурный эффект на энергозапас ЯР?
2. В чем суть саморегулирования ЯР и ЯЭУ?
3. Как влияет мощностной эффект на саморегулирование?
4. На сколько $\rho_{\text{зап}}$ ЯР с ТЭР I (см. рис. 2.8.1) в разогретом состоянии отличается от $\rho_{\text{зап}}$ ЯР с ТЭР IV (при прочих равных условиях)?
5. Какой из ТЭР (I—IV, см. рис. 2.8.1): а) обеспечит наиболее безопасный разогрев ЯР; б) наилучший с точки зрения устойчивости работы ЯР при быстром снижении температуры теплоносителя?
6. При какой разнице в $\rho_{\text{зап}}$ (при прочих равных условиях) ЯР с ТЭР II и III (см. рис. 2.8.1) имеют одинаковую кампанию?
7. В каком диапазоне температур и с какой максимальной скоростью увеличивается ρ ЯР с ТЭР I (см. рис. 2.8.1) при разогреве со скоростью $200^\circ\text{C}/\text{ч}$?
8. Определить максимальную скорость уменьшения ρ при расхолаживании ЯР со скоростью $50^\circ\text{C}/\text{ч}$ в области положительного ТКР (см. рис. 2.8.1, кривая I).
9. Какую температуру лучше держать в ЯР с ТЭР, представленными на рис. 2.8.1, чтобы увеличить время допустимой стоянки?
10. Можно ли регулировать мощность ЯР, имеющего отрицательный ТКР, изменением расхода питательной воды (второго контура)?
11. Как осуществляется саморегулирование в кипящем ЯР?
12. Почему с увеличением G (см. рис. 2.8.3) уменьшается $|\rho_N|$?
13. Какие дополнительные $\rho_{\text{зап}}$ и соответствующие ему энергозапас и время работы можно получить после снижения мощности ВВЭР-440 с $N_{\text{ном}}$ до 50 % $N_{\text{ном}}$?

§ 2.9. КАМПАНИЯ РЕАКТОРА

Продолжительность работы ЯР без перегрузки топлива, пересчитанную на $N_{\text{ном}}$, называют *компанией* ЯР $\tau_{\text{я}}$.

Кампания топлива $\tau_{\text{т}}$ — это время пребывания ядерного топлива в активной зоне ЯР в пересчете на $N_{\text{ном}}$ в течение полного цикла с учетом n частичных перегрузок до получения максимальной глубины выгорания:

$$\tau_{\text{т}} = n\tau_{\text{я}}$$

Каждая выгружаемая часть топлива находится в ЯР n интервалов времени $\tau_{\text{я}}$ между перегрузками.

Если по окончании кампании ЯР перегружается все топливо активной зоны, как это делается в судовых ЯР, то $\tau_{\text{я}} = \tau_{\text{т}}$. *Номинальная мощность* ЯР — это наибольшая мощность, при которой он может работать на всех предусмотренных режимах в течение

расчетной кампании. Единица измерения кампании — *эффективные сутки (часы)* $\tau_{\text{эф}}$. При работе ЯР на различных уровнях $N_i \leq N_{\text{ном}}$ в течение τ_i календарных суток (часов) из соотношения $\sum_i N_i \tau_i = N_{\text{ном}} \tau_{\text{эф}}$ получаем выражение для расчета кампании в эффективных сутках (часах):

$$\tau_{\text{эф}} = \frac{1}{N_{\text{ном}}} \sum_i N_i \tau_i = \frac{Q_{\text{к}}}{N_{\text{ном}}} = \sum_i \frac{N_i}{N_{\text{ном}}} \tau_i. \quad (2.9.1)$$

Эффективным суткам или эффективному часу соответствует вполне определенный энергозапас данного ЯР. Для реактора ТР, например, 1 эф. сут \equiv 80 МВт·сут \equiv 1920 МВт·ч; 1 эф. ч \equiv 80 МВт·ч.

Полное количество тепловой энергии, произведенной за рассматриваемый календарный период эксплуатации ЯР, называется *энерговывработкой*:

$$Q_{\text{к}} = \sum_i N_i \tau_i \text{ МВт} \cdot \text{ч} = N_{\text{ном}} \sum_i \frac{N_i}{N_{\text{ном}}} \tau_i \text{ МВт} \cdot \text{ч} = \frac{100}{Q_{\text{ном}}} \sum_i N_i \tau_i \%, \quad (2.9.2)$$

где N_i — различные мощности, на которых работал ЯР в течение τ_i (ч), МВт; $Q_{\text{ном}}$ — номинальный энергозапас, МВт·ч. Потенциальные возможности энерговывработки характеризуют энергозапасом и энергоресурсом.

Энергозапас активной зоны ЯР — это энерговывработка от начала ее эксплуатации до исчерпания $\rho_{\text{зап}}$ при работе на $N_{\text{ном}}$.

Энергоресурс активной зоны ЯР — это энерговывработка от начала ее эксплуатации на $N_{\text{ном}}$ до появления неустранимых дефектов активной зоны, при которых дальнейшее использование ее невозможно. Обычно предусматривается некоторое завышение $\rho_{\text{зап}}$ для гарантированного обеспечения расчетного энергоресурса. Календарная продолжительность эксплуатации активной зоны до выработки энергоресурса называется *сроком службы*.

Понятие энергозапаса для энергетического ЯР АЭС, работающего с перегрузкой топлива, не имеет такой определенности, как для ЯР с полной перегрузкой активной зоны. Можно говорить об энергозапасе до получения максимальной глубины выгорания за время полного цикла перегрузки.

Кампания ЯР определяется *запасом реактивности* $\rho_{\text{зап}}$, который расходуется в процессе работы ЯР на рассмотренные выше эффекты (см. § 2.1—2.8). Чтобы обеспечить работу ЯР на всех предусмотренных режимах до перегрузки топлива, $\rho_{\text{зап}}$ должен быть не меньше суммы абсолютных значений всех эффектов, уменьшающих ρ в течение кампании. Для судовых ЯР это требование можно записать так:

$$\rho_{\text{зап}} \geq |\rho_{\text{к}}| + |\rho_{\text{оХе}}| + |\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}}| + |\rho_{\text{т}}| + |\rho_{\text{N}}|,$$

где $\rho_{\text{к}}$ — уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ из-за выгорания топлива, шлакования и стационарного отравления Sm ; $\rho_{\text{оХе}}$ — потеря $\rho_{\text{зап}}$ из-за стацио-

нарного отравления Хе; $\rho_{н.я}^{макс}$ — потеря $\rho_{зап}$ из-за иодной ямы; ρ_t — отрицательный ТЭР; ρ_N — мощностной эффект. Численные значения этих составляющих для реактора ТР даны в приложении 30. На неточность расчета взят резервный запас реактивности $\rho_{рез}$. При таком $\rho_{зап}$ ЯР сможет работать на $N_{ном}$ (МВт), допуская все варианты маневрирования: изменение мощности и остановку с последующим выходом на любой уровень в любой момент времени после остановки.

Для ЯР АЭС требование к $\rho_{зап}$ может быть менее жестким:

$$\rho_{зап} \geq |\rho_K| + |\rho_{0Хе}| + |\rho_t| + |\rho_N| + \Delta\rho_{оп},$$

где $\Delta\rho_{оп} < |\rho_{п.я}|$ — оперативный (маневренный) $\rho_{зап}$, достаточный для компенсации иодной ямы при небольшом снижении мощности или для пуска ЯР после запланированной стоянки, когда иодная яма не будет максимальной. Такое требование характерно для АЭС, участвующих в покрытии переменной части графика нагрузок в общей энергосистеме.

Если АЭС работает только на $N_{ном}$, то возможно

$$\rho_{зап} \geq |\rho_K| + |\rho_{0Хе}| + |\rho_t| + |\rho_N|.$$

Составляющие $\rho_{0Хе}$, ρ_t и ρ_N зависят от режима работы ЯР, а ρ_K — от энерговыработки. Часть $\rho_{зап}$, предназначенного для быстрого изменяющихся эффектов ($\rho_{Хе}$, ρ_t , ρ_N , $\rho_{п.я}$), который иногда называют *оперативным*, полностью или частично компенсируют подвижными компенсаторами реактивности (КР), остальной запас — выгорающим поглотителем (ВП) в твердом или жидком виде. Изменение $\rho_{зап}$ в процессе эксплуатации ЯР в результате выгорания Sm называют *кривой энерговыработки* $\rho_K = f(Q_K)$. При использовании ВП в зависимости от типа поглотителя и способа размещения его в активной зоне кривая энерговыработки может иметь положительный или отрицательный выбег реактивности. На рис. 2.9.1 показаны четыре варианта кривой энерговыработки: 1) с положительным выбегом ρ , когда скорость выгорания ВП в начале кампании больше скорости выгорания топлива (гомогени-

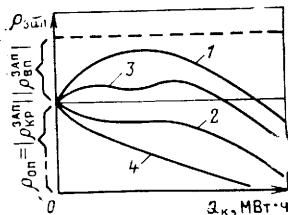


Рис. 2.9.1. Варианты кривых энерговыработки

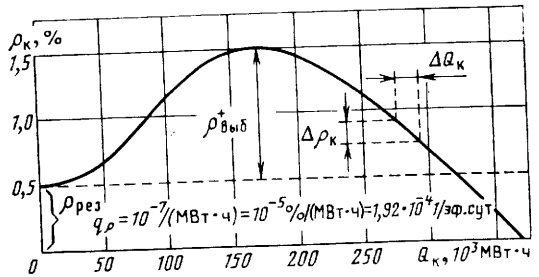


Рис. 2.9.2. Кривая энерговыработки реактора ТР

зированное расположение ВП); 2) с отрицательным выбегом ρ , когда скорость выгорания ВП замедлена (блокированное расположение ВП); 3) с небольшим положительным выбегом (комбинированное расположение ВП); 4) без ВП. Идеальным вариантом следует считать такой, когда скорость уменьшения ρ вследствие выгорания и шлакования топлива равна скорости увеличения ρ в результате выгорания ВП. В случаях 1) и 3) необходимо иметь дополнительный КР (подвижный или жидкий), чтобы компенсировать положительный выбег ρ . Это особенно важно в остановленном ЯР (см. задачу 4.2.10). В случаях 2) и 4) нужен дополнительный $\rho_{\text{зап}}$, скомпенсированный в начале кампании КР. Если часть $\rho_{\text{зап}}$ компенсируют жидким поглотителем, например борной кислотой H_3BO_3 в теплоносителе первого контура, изменение ρ можно ускорить или замедлить по сравнению с выгоранием бора заменой части теплоносителя чистой водой или концентрированным раствором H_3BO_3 (см. § 3.4).

Скорость уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ в процессе кампании характеризуют *темпом выгорания* — изменением $\rho_{\text{зап}}$ за счет выгорания, шлакования, воспроизводства и стационарного отравления Sm при энерговыработке в 1 МВт·ч (или на 1 эф. сут, на 1 эф. ч):

$$q_\rho = d\rho_{\text{K}}/dQ_{\text{K}} \text{ 1/(МВт}\cdot\text{ч)} \text{ (1/эф. сут, 1/эф. ч)}.$$

На рис. 2.9.2 приведена кривая энерговыработки реактора ТР, имеющего к концу кампании $q_\rho = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ 1/(МВт}\cdot\text{ч)} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ \%/(МВт}\cdot\text{ч)} = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ 1/эф. сут} = 1,92 \cdot 10^{-2} \text{ \%/\эф. сут} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ \%/\эф. ч}$. Для ВВЭР-440 $q_\rho = 0,03 \text{ \%/\эф. сут} = 10^{-8}/(\text{МВт}\cdot\text{ч}) \times \text{ч}$ (1 эф. сут $\equiv 1375 \cdot 24 = 33\,000 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$).

Для ЯР с ВП q_ρ в процессе кампании изменяет знак и бывает равным нулю. Темп выгорания необходимо знать для решения таких эксплуатационных задач, как расчет критического положения КР (КС, РК) при пуске ЯР (см. § 3.5) и оценка оставшегося энергозапаса (2.9.3).

При $\rho_{\text{зап}}$ на энерговыработку $\Delta\rho_{\text{K}}$ и постоянном темпе выгорания $q_\rho \text{ [1/(МВт}\cdot\text{ч)]}$ оставшийся энергозапас ЯР

$$\Delta Q_{\text{K}} = \Delta\rho_{\text{K}}/q_\rho \text{ МВт}\cdot\text{ч}. \quad (2.9.3)$$

При $\rho_{\text{зап}}$ в холодном разотравленном ЯР и постоянном темпе выгорания $q_\rho \text{ [1/(МВт}\cdot\text{ч)]}$ энергозапас при работе на мощности $N_i \text{ (МВт)}$ без опасности попадания в иодную яму после остановки равен

$$\Delta Q_{\text{K}} = \Delta\rho_{\text{K}}/q_\rho = \frac{\rho_{\text{зап}} - |\rho_{\text{OXe}}^{N_i}| - |\rho_t| - |\rho_{N_i}| - |\rho_{\text{и.я}}^{N_i}|}{q_\rho} \text{ МВт}\cdot\text{ч},$$

где $\rho_{\text{OXe}}^{N_i}$, ρ_t , ρ_{N_i} , $\rho_{\text{и.я}}^{N_i}$ — потеря $\rho_{\text{зап}}$ из-за стационарного отравления Хе, ТЭР, мощностного эффекта, иодной ямы для мощности N_i , на которой предполагается расходование энергозапаса ΔQ_{K} в течение времени $\tau_i = \Delta Q_{\text{K}}/N_i \text{ ч}$. Если q_ρ еще не достиг установивше-

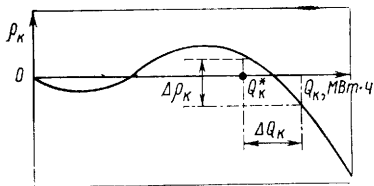


Рис. 2.9.3. Графическое определение оставшегося энергозапаса по кривой энерговыработки

ментально уточненной кривой энерговыработки (рис. 2.9.3), откладывая по оси ординат значение $\Delta\rho_k$ от точки на кривой, соответствующей энерговыработке в момент расчета. Пересечение экстраполированной кривой с нижней границей значения $\Delta\rho_k$ даст на оси абсцисс значение полного энергозапаса YR , вычитая из которого отработанный, получаем оставшийся энергозапас. Безусловно, графически можно решать задачу и при установившемся значении q_p .

Если оставшийся энергозапас ΔQ_k (МВт·ч) известен из расчета на $N_{ном}$, то время работы на любой другой мощности $N_i < N_{ном}$

$$\tau_i = \frac{\Delta Q_k}{N_i} + \frac{\Delta\rho}{q_p N_i} = \frac{1}{N_i} \left(\Delta Q_k + \frac{\Delta\rho}{q_p} \right), \quad (2.9.4)$$

где $\Delta\rho$ — высвобождающийся $\rho_{зап}$ в результате всех эффектов при переходе на меньшую мощность N_i .

В конце кампании можно получить дополнительный энергозапас, используя ту часть $\rho_{зап}$, которая предназначена для компенсации иодной ямы, частично стационарного отравления Хе, ТЭР и мощностного эффекта. Используя запас на иодную яму, можно работать на любой мощности. В остальных случаях высвобождение $\rho_{зап}$ можно получить только при работе на $N_i < N_{ном}$.

Задачи с решениями

2.9.1. ЯР, имеющий $Q_{ном} = 8 \cdot 10^5$ МВт·ч, при $N_{ном} = 200$ МВт выработал на 90 % $N_{ном}$ $1,8 \cdot 10^5$ МВт·ч. Какова кампания ЯР? Сколько суток он работал на мощности 90 %? Сколько эффективных суток и какой процент кампании отработал?

Решение. Согласно (2.9.1) и (2.9.2) кампания $\tau_{ном} = Q_{ном}/N_{ном} = 4000$ ч ≈ 167 сут; ЯР работал на мощности 90 % в течение $\tau = Q_k/N_i = 1000$ ч ≈ 42 сут и отработал $\tau_{эф} = Q_k/N_{ном} = 900$ ч = 37,5 сут = 22,5 % $\tau_{ном}$.

2.9.2. ЯР, имеющий $N_{ном} = 150$ МВт, работал в следующем режиме: на мощности 50 % $N_{ном}$ — 15 сут; 80 % — 40 сут и 100 % — 60 сут. Определить среднюю мощность, энерговыработку в мегаватт-часах и время работы в эффективных сутках.

Решение. Согласно (2.9.1) и (2.9.2) средняя мощность $\bar{N} = \sum N_i \tau_i / \sum \tau_i = 129,8$ МВт = 86,5 % $N_{ном}$;
 энерговыработка $Q_k = N_{ном} \sum (N_i/N_{ном}) \tau_i = 14\,925$ МВт·сут = $3,58 \cdot 10^5$ МВт·ч;
 время работы $\tau_{эф} = Q_k/N_{ном} = 99,5$ эф. сут.

2.9.3. Реактор ТР с начала кампании работал в следующем режиме: на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$ — 100 ч, 100 % — 200 ч, 50 % — 1000 ч. На сколько изменился $\rho_{\text{зап}}$ за счет энерговыработки?

Решение. ЯР работал согласно (2.9.1) $\tau_{\text{эф}} = \sum (N_i/N_{\text{ном}}) \tau_i = 32,5 \text{ сут} = 780 \text{ ч}$. По кривой энерговыработки рис. 2.9.2 определяем для $\Delta Q_{\text{к}} = 62\,400 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ $\Delta \rho_{\text{к}} = +0,2 \%$.

2.9.4. Реактор ТР отработал 80 % кампании. Сколько времени он сможет еще работать на мощности 50 % $N_{\text{ном}}$ и $N_{\text{ном}}$?

Решение. Если кампания соответствует расчетной ($Q_{\text{ном}} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$, см. приложение 30), то оставшийся энергозапас $\Delta Q_{\text{к}} = (100 - 80) Q_{\text{ном}} = 20 \% Q_{\text{ном}} = 6,4 \cdot 10^4 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$. Согласно (2.9.4) при таком энергозапасе время работы на мощности 50 % $N_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 80 \text{ МВт} = 40 \text{ МВт}$ с $\rho_{\text{зап}}$ на компенсацию iodной ямы равно

$$\tau = (1/N) (\Delta Q_{\text{к}} + \Delta \rho / q_{\rho}) = 1600 + 1025 = 2625 \text{ ч},$$

где $\Delta \rho = |\rho_{0\text{Xe}}^{100\%} - \rho_{0\text{Xe}}^{50\%}| + |\rho_{\text{и.я}}^{100\%} - \rho_{\text{и.я}}^{50\%}| = |-4 + 3| + |-5 + 1,9| = 4,1 \%$ (см. рис. 2.4.3 и 2.5.3); $q_{\rho} = 10^{-5} \% / (\text{МВт}\cdot\text{ч})$ (см. рис. 2.9.2).

На номинальной мощности $\tau = \Delta Q_{\text{к}} / N_{\text{ном}} = 6,4 \cdot 10^4 / 80 = 800 \text{ ч}$.

2.9.5. Какой дополнительный энергозапас имеет реактор ТР и сколько суток он сможет работать на $N_{\text{ном}}$ за счет резервного $\Delta \rho_{\text{зап}} = 0,5\%$

Решение. Дополнительный энергозапас согласно (2.9.3) равен

$$\Delta Q_{\text{к}} = \Delta \rho_{\text{зап}} / q_{\rho} = 0,5 / 10^{-5} = 5 \cdot 10^4 \text{ МВт}\cdot\text{ч},$$

а время работы на $N_{\text{ном}}$ (2.9.4)

$$\tau = \Delta Q_{\text{к}} / N_{\text{ном}} = 5 \cdot 10^4 / 80 = 625 \text{ ч} = 26 \text{ сут}.$$

2.9.6. Определить полный энергозапас и время работы реактора ТР на мощности 60 % $N_{\text{ном}}$.

Решение. Полный энергозапас при работе на мощности 60 %

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{ном}} + \Delta \rho_{\text{Xe}} / q_{\rho} = 3,2 \cdot 10^5 + 3,2 / 10^{-5} = 6,4 \cdot 10^5 \text{ МВт}\cdot\text{ч},$$

где $\Delta \rho_{\text{Xe}} = 3,2 \%$ — высвобождение ρ благодаря уменьшению отравления Хе и уменьшению $\rho_{\text{зап}}$ на iodную яму (см. рис. 2.4.3 и 2.5.3) при работе на мощности 60 % $N_{\text{ном}}$ по сравнению с $N_{\text{ном}}$. Полное время работы на мощности 60 % согласно (2.9.4) $\tau = Q_{\text{к}} / N = 555 \text{ сут}$. Если учесть и резервный $\Delta \rho_{\text{зап}} = 0,5 \%$, который дает $0,5 \cdot 10^5 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ (см. задачу 2.9.5), то полный энергозапас при работе на мощности 60 % равен $6,9 \cdot 10^5 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$, а время работы на $N = 60 \%$ — 599 сут.

2.9.7. Чему равны дополнительный энергозапас и дополнительное время работы реактора ТР на мощности 30 % $N_{\text{ном}}$?

Решение. Дополнительный энергозапас обеспечивается расходом $\rho_{\text{зап}}$, высвобождающегося вследствие уменьшения стационарного отравления Хе и уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ на iodную яму (см.

рис. 2.4.3 и 2.5.3):

$$\Delta\rho_{\text{Xe}} = \left| \rho_{0\text{Xe}}^{N_{\text{ном}}} - \rho_{0\text{Xe}}^{30\%N_{\text{ном}}} \right| + \left| \rho_{\text{и.я}}^{N_{\text{ном}}} - \rho_{\text{и.я}}^{30\%N_{\text{ном}}} \right| = \\ = 1,7\% + 4,2\% = 5,9\%.$$

Согласно (2.9.3)

$$\Delta Q_{\text{к}} = 5,9/10^{-5} = 5,9 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

и

$$\Delta\tau = \Delta Q_{\text{к}}/N = 5,9 \cdot 10^5/24 = 2,46 \cdot 10^4 \text{ ч} = 1024 \text{ сут.}$$

2.9.8. Реактор ТР отработал номинальную кампанию. Сколько времени он еще сможет работать на мощности 30 % $N_{\text{ном}}$, если снизить среднюю рабочую температуру с 250 до 230 °С (если позволяют параметры пара)?

Решение. После выработки номинальной кампании при дальнейшей работе на мощности 30 % и средней температуре 230 °С можно еще расходовать резервный $\Delta\rho_{\text{зап}} = 0,5\%$ (приложение 30), высвобождающийся $\rho_{\text{зап}}$ из-за уменьшения стационарного отравления Xe и иодной ямы 5,9 % (см. задачу 2.9.7), а также $\rho_{\text{зап}}$, высвобождающийся вследствие снижения средней температуры, $\Delta\rho_i = \rho_i(250\text{ °С}) - \rho_i(230\text{ °С}) = 0,5\%$ (см. рис. 2.8.1). Таким образом, согласно (2.9.3)

$$\Delta Q_{\text{к}} = \Delta\rho_{\text{к}}/q_{\rho} = (0,5 + 5,9 + 0,5)/10^{-5} = 6,9 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

и

$$\Delta\tau = \Delta Q_{\text{к}}/N_i = 6,9 \cdot 10^5/24 = 29 \cdot 10^3 \text{ ч} = 1208 \text{ сут.}$$

2.9.9. На сколько различаются кампании (при прочих равных условиях) ЯР, имеющих ТЭР I и II (см. рис. 2.8.1) и $q_{\rho} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/(МВт} \cdot \text{ч)}$, при рабочей температуре 250 °С?

Решение. При одинаковом q_{ρ} различие в энергозапасе определяется абсолютным значением и знаком ТЭР. При прочих равных условиях ЯР и ТЭР I имеет больше $\rho_{\text{зап}}$ на $\Delta\rho_{\text{зап}} = \rho_i^I - \rho_i^{II} = 0,5 + 0,7 = 1,2\%$, что обеспечивает согласно (2.9.3)

$$\Delta Q_{\text{к}} = \Delta\rho_{\text{к}}/q_{\rho} = 1,2/5 \cdot 10^{-5} = 24 \cdot 10^3 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

2.9.10. Какой энергозапас теряет реактор ТР из-за необходимости иметь $\rho_{\text{зап}}$ на компенсацию иодной ямы?

Решение. Для компенсации иодной ямы при остановке с $N_{\text{ном}}$ ЯР имеет $\Delta\rho_{\text{зап}} = \left| \rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} \right| = 5\%$ (см. рис. 2.5.3), что согласно (2.9.3) соответствует энергозапасу $\Delta Q_{\text{к}} = 5/10^{-5} = 5 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, который мог бы обеспечить работу на $N_{\text{ном}} = 80 \text{ МВт}$ в течение $\tau = \Delta Q_{\text{к}}/N_{\text{ном}} = 5 \cdot 10^5/80 = 6250 \text{ ч} = 260 \text{ сут.}$

2.9.11. Реактор ТР в данный момент кампании в разотравленном по Xe и разогретом до средней температуры состоянии имеет $\rho_{\text{зап}} = 8\%$. Сколько времени сможет ЯР работать на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$, чтобы после остановки: а) иодная яма не была опасна; б) время допустимой стоянки было не менее 1 ч?

Решение. а) После вывода ЯР на мощность 80 % и установления стационарного отравления Хе $\rho_{\text{зап}}$ уменьшится на 3,7 % (см. рис. 2.4.3). Иодная яма после остановки с этой мощности равна 3,7 % (см. рис. 2.5.3). Следовательно, на энерговыработку остается $\Delta\rho_{\text{к}} = 8\% - 7,4\% = 0,6\%$, что при $q_{\rho} = 10^{-5} \%/(\text{МВт}\cdot\text{ч})$ обеспечивает время работы (2.9.4) на мощности 80 %

$$\tau = \Delta\rho_{\text{к}}/q_{\rho}N = 0,6/10^{-5} \cdot 64 = 937 \text{ ч.}$$

б) По кривым иодных ям (см. рис. 2.5.2) для мощности 80 % определяем, что для обеспечения $t_{\text{д.ст}} = 1$ ч необходимо иметь $\Delta\rho_{\text{зап}} = 1,2\%$. Следовательно, в этом случае на энерговыработку остается $\Delta\rho_{\text{к}} = 8\% - (\rho_{\text{Хе}}^{80\%} + \Delta\rho_{\text{зап}}) = 3,1\%$, что обеспечивает время работы $\tau = 3,1/(10^{-5} \cdot 64) = 4844 \text{ ч} = 202 \text{ сут.}$

2.9.12. Какой $\rho_{\text{зап}}$ должен иметь реактор ТР в горячем отравленном состоянии, чтобы обеспечить работу на $N_{\text{ном}}$ в течение 1000 ч?

Решение. Для обеспечения $\Delta Q_{\text{к}} = N_{\text{ном}}\Delta\tau = 80 \cdot 1000 = 8 \cdot 10^4 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ при $q_{\rho} = 10^{-7} 1/(\text{МВт}\cdot\text{ч})$ необходимо иметь $\rho_{\text{зап}}$ в горячем отравленном ЯР согласно (2.9.3) $\Delta\rho_{\text{зап}} = \Delta\rho_{\text{к}} = q_{\rho}\Delta Q_{\text{к}} = 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^4 = 0,8\%$.

2.9.13. Реактор ТР работал на мощности 60 % $N_{\text{ном}}$ до выхода КС в крайнее верхнее положение. Определить энерговыработку ЯР.

Решение. Если $\rho_{\text{зап}}$ соответствует расчетному (см. приложение 30), то в данном случае ЯР израсходовал сверх того $\rho_{\text{зап}}$, который соответствует номинальному энергозапасу, запас, предусмотренный на максимальную иодную яму (5 %), часть запаса на стационарное отравление Хе (0,7 %) и резервный запас (0,5 %), т. е. $\Delta\rho_{\text{зап}} = 5 + 0,7 + 0,5 = 6,2\%$. Согласно (2.9.3) в этом случае

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{н}} + \Delta\rho_{\text{зап}}/q_{\rho} = 3,2 \cdot 10^5 + 6,2/10^{-5} = 9,4 \cdot 10^5 \text{ МВт}\cdot\text{ч} \approx 3Q_{\text{ном}}.$$

2.9.14. ЯЭУ имеет два ЯР типа ТР. В одном из них остался энергозапас без $\rho_{\text{зап}}$ на иодную яму $\Delta Q_1 = 5\% Q_{\text{ном}}$, а в другом — $Q_2 = 15\% Q_{\text{ном}}$. На каких мощностях должны работать ЯР, чтобы суммарная мощность их была не менее 100 % (80 МВт) и энергозапас их был израсходован одновременно?

Решение. При небольшом отравлении Хе задача решается просто: если один ЯР имеет $\Delta Q_1 = N_1\tau_1$, а второй $\Delta Q_2 = N_2\tau_2$, то для одновременной выработки необходимо выполнение условия $\tau_1 = \tau_2$, т. е. $\Delta Q_1/N_1 = \Delta Q_2/N_2$, откуда $N_1 = N_2\Delta Q_1/\Delta Q_2$. Выбирая необходимую суммарную мощность $N = N_1 + N_2$, определяем

$$N_1 = \Delta Q_1 N / (\Delta Q_1 + \Delta Q_2); \quad N_2 = N - N_1 = \Delta Q_2 N / (\Delta Q_1 + \Delta Q_2);$$

$$\tau = (\Delta Q_1 + \Delta Q_2) / N.$$

В нашем случае мощности должны быть: $N_1 = 25\% N_{\text{ном}} = 20 \text{ МВт}$; $N_2 = 75\% N_{\text{ном}} = 60 \text{ МВт}$, а время работы $\tau = 3,2 \cdot 10^5 (0,05 + 0,15) / 80 \approx 800 \text{ ч.}$ Однако такое решение для ЯР типа ТР, имею-

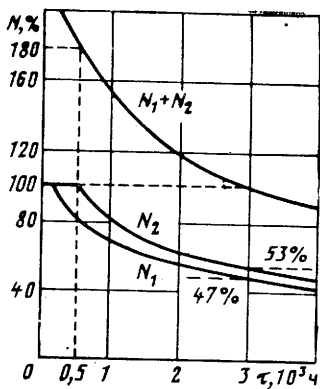


Рис. 2.9.4. К задаче 2.9.14

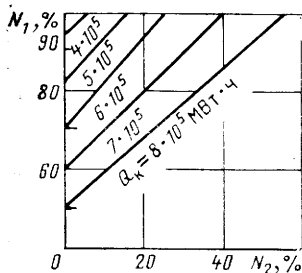


Рис. 2.9.5. К задаче 2.9.15

щих большое отравление Хе, очень неточное, так как оно не учитывает зависимость отравления от мощности. Для точного решения задачи необходимо построить взаимозависимость времени работы каждого ЯР и мощности при оставшемся энергозапасе $\Delta Q_{\text{к}}$ с учетом изменения отравления Хе

$$\tau = \Delta Q_{\text{к}}/N_i + \Delta \rho_{\text{0Xe}}^{N_i} / \lambda \rho_{\text{p}} N_i$$

(рис. 2.9.4) и для каждого момента времени определить суммарную мощность $N_1 + N_2$, которую могут дать ЯР при условии одновременной энерговыработки. Полученная зависимость позволяет выбрать мощность каждого ЯР, обеспечивающую необходимую суммарную мощность $N_1 + N_2 \leq 200\% N_{\text{ном}}$ и одновременное израсходование энергозапаса. Из графика определяем, что время работы обоих ЯР, когда суммарная мощность равна 100%, составляет ~ 3000 ч, а мощности должны быть соответственно равны $N_1 \approx 47\% N_{\text{ном}} = 37,6$ МВт и $N_2 \approx 53\% N_{\text{ном}} = 42,4$ МВт. Этот результат существенно отличается от полученного по приближенной оценке.

При суммарной мощности 180% $N_{\text{ном}}$ одинаковое время работы ~ 500 ч возможно на $N_1 \approx 80\%$ и $N_2 = 100\%$.

2.9.15. На какой мощности можно работать после выработки номинальной кампании реактора ТР, чтобы исключить возможность попадания в иодную яму после его остановки и при снижении мощности?

Решение. Для реактора ТР иодная яма не опасна для последующего пуска после остановки с $N_{\text{ном}}$ до выработки энергозапаса, обусловленного номинальным и резервным $\rho_{\text{зап}}$ ($3,7 \cdot 10^5$ МВт·ч). В этот момент ЯР имеет $\rho_{\text{зап}}$ на $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}}$ при остановке с $N_{\text{ном}}$. Дальнейшая эксплуатация возможна только при расходе $\rho_{\text{зап}}$ на иодную яму и стационарное отравление Хе. Но в этом слу-

чае чем больше мощность и энерговыработка по сравнению с $3,7 \cdot 10^5$ МВт·ч, тем больше $t_{в.ст}$ после остановки, а при снижении мощности появляется ограничение по минимальному уровню, ниже которого уменьшать мощность нельзя, так как ЯР попадет в иодную яму, что повлечет за собой вынужденную остановку. Определяя по кривой энерговыработки (см. рис. 2.9.2), сколько расходуется $\rho_{зап}$ для различных Q_K сверх $3,7 \cdot 10^5$ МВт·ч, и вычитая его из $|\rho_{и.я}^{ном} + \rho_{0Xe}^{ном}|$, находим оставшийся $\rho_{зап}$ на $|\rho_{и.я}^{N_i} + \rho_{0Xe}^{N_i}|$ для мощности $N_i \leq N_{ном}$. Допустимые варианты изменения мощности, включая остановку, определяем по рис. 2.5.5 и строим семейство кривых (рис. 2.9.5), по которым можно определить в любой момент кампании допустимые варианты изменения мощности, включая остановку. Например, чтобы энерговыработка составила $Q_K = 5 \cdot 10^5$ МВт·ч, необходимо сверх $3,7 \cdot 10^5$ МВт·ч еще выработать $(5 \cdot 10^5 - 3,7 \cdot 10^5) = 1,3 \cdot 10^5$ МВт·ч. При $q_\rho = 10^{-7}$ 1/(МВт·ч) для этого необходимо $\Delta\rho_{зап} = 1,3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-7} = 1,3$ ‰. Следовательно, на $\rho_{0Xe}^{N_i} + \rho_{и.я}^{N_i}$ остается $|\rho_{0Xe}^{ном} + \rho_{и.я}^{ном}| - 1,3 = 9 - 1,3 = 7,7$ ‰, что соответствует $N_0 \approx 85$ ‰ (см. рис. 2.5.2). При работе в это время на $N_{ном}$ для компенсации иодной ямы остается $\rho_{и.я}^{ном} - 1,3 = 5 - 1,3 = 3,7$ ‰, что позволит безопасно снизить мощность до $N_2 \approx 15$ ‰ (см. рис. 2.5.5).

По значениям мощности N_1 , на которой ЯР работает не менее 2 сут, и энерговыработки Q_K в данный момент кампании по кривым рис. 2.9.5 определяем минимальную мощность N_2 , до которой возможно снижение без опасности попадания в иодную яму. Можно также в любой момент кампании выбрать максимальную мощность N_1 , снижение с которой возможно до заданного значения N_2 без попадания в иодную яму. Например, при $Q_K \leq 3,7 \cdot 10^5$ МВт·ч возможен переход с $N_{ном}$ на любую мощность, включая остановку. При $Q_K = 7 \cdot 10^5$ МВт·ч, чтобы избежать вынужденной остановки, можно уменьшить мощность с $N_{ном}$ не ниже 40 ‰ $N_{ном}$, а с 80 ‰ — не ниже 20 ‰.

При $Q_K = 8 \cdot 10^5$ МВт·ч, чтобы не попасть в иодную яму при снижении мощности, например до 30 ‰ $N_{ном}$, можно работать на мощности не выше 77 ‰ и т. п.

2.9.16. Построить для реактора ТР зависимость дополнительного энергозапаса ΔQ_K и времени работы $\Delta\tau_{доп}$ от уровня мощности (N_i).

Решение. После выработки всего $\rho_{зап}$ на $N_{ном}$ ЯР сможет работать только на $N_i < N_{ном}$ за счет уменьшения ρ_{0Xe} и, если возможно, снижения температуры теплоносителя. Учитывая только $\Delta\rho_{Xe}^{N_i} = |\rho_{0Xe}^{ном} - \rho_{0Xe}^{N_i}|$, определяем $\Delta Q_K = \Delta\rho_{Xe}^{N_i}/q_\rho$, $\Delta\tau_{доп} = \Delta Q_K/N_i$ и строим графики (рис. 2.9.6).

2.9.17. ЯР, имеющий $\rho_{\bar{N}}$, представленный на рис. 2.8.3, и темп выгорания в конце кампании $q_\rho = 5 \cdot 10^{-7}$ 1/(МВт·ч), выработал на $N_{ном}$ полный энергозапас. Какой дополнительный энергозапас можно получить при снижении мощности до 50 ‰ $N_{ном}$?

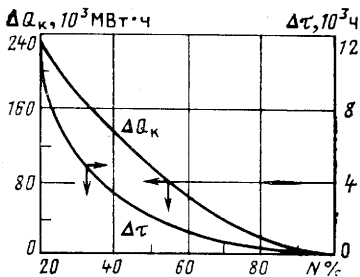


Рис. 2.9.6. К задаче 2.9.17

Решение. Из рис. 2.8.3 находим, что при снижении мощности со 100 до 50 % $N_{\text{ном}}$, сохраняя номинальный (G_1) расход теплоносителя, получаем $\Delta\rho_N = -0,75 - (-1,15) = 0,4$ % и $\Delta Q_K = 0,4 / (5 \times 10^{-5}) = 8 \cdot 10^3$ МВт/ч. Если же при снижении мощности соответ-

ственно снижать и расход, $+\Delta\rho_N$ будет уменьшаться, а при $G < G_2$ для $N > 50$ % $N_{\text{ном}}$ $\Delta\rho_N \leq 0$.

2.9.18. Реактор типа ТР, обладающий и мощностным коэффициентом реактивности, работал в режиме, представленном в верхней части рис. 2.9.7. Построить качественный график изменения $\rho_{\text{зап}}$ с момента пуска ЯР из холодного разотравленного состояния до остановки, полного расхолаживания и разотравления.

Решение. Рассматривая изменение $\rho_{\text{зап}}$, будем учитывать ТЭР (ρ_t), стационарное отравление Хе ($\rho_{\text{оХе}}$), иодную яму ($\rho_{\text{и.я}}$) и мощностной эффект (ρ_N). Предположим, что в данном ЯР для $N_{\text{ном}}$ они имеют такие значения: $\rho_t \approx -3$ %; $\rho_{\text{оХе}} \approx -4$ %; $\rho_{\text{и.я}} \approx -5$ %; $\rho_N \approx -2$ %.

После выхода ЯР в критическое состояние мощность поднимают до нескольких процентов номинальной, что достаточно для разогрева теплоносителя. Изменением $\rho_{\text{зап}}$ вследствие упомянутых эффектов на данном уровне можно пренебречь. С повышением температуры (см. пункт на верхнем графике рис. 2.9.7) $\rho_{\text{зап}}$ начнет изменяться в соответствии с характером кривой ТЭР. В данном случае взят ρ_t типа IV на рис. 2.8.1.

После разогрева до средней рабочей температуры и увеличения мощности до 100 % сразу же (практически одновременно с ростом мощности) $\rho_{\text{зап}}$ уменьшится на величину ρ_N , а потом начнется отравление Хе, которое за 44 ч работы на стационарной мощности достигнет равновесного значения. При снижении мощности до 40 % $N_{\text{ном}}$ сначала произойдет быстрое увеличение $\rho_{\text{зап}}$ из-за ρ_N , а потом медленное уменьшение вследствие иодной ямы. Примерно в области максимума иодной ямы мощность увеличили до 80 % $N_{\text{ном}}$, в результате чего $\rho_{\text{зап}}$ скачком уменьшится на ρ_N и сразу же начнет расти вследствие выгорания Хе. Характер кривой изменения $\rho_{\text{зап}}$ на этом участке зависит от концентрации I и Хе, а также интервала увеличения мощности (см. пунктирные кривые). В конце концов при работе ЯР на постоянной мощности установится стационарное отравление Хе, соответствующее мощности 80 % $N_{\text{ном}}$. В момент остановки ЯР $\rho_{\text{зап}}$ сначала увеличится на ρ_N , а потом будет изменяться вследствие двух противоположно действующих эффектов: увеличиваться при расхолаживании ЯР и уменьшаться вследствие иодной ямы. Суммарный ход кривой зависит от скорости расхолаживания и абсолютных значений ρ_t и

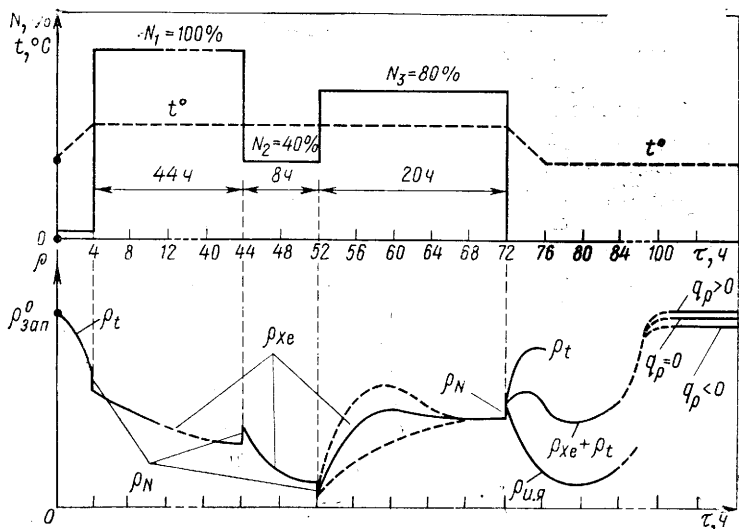


Рис. 2.9.7. К задаче 2.9.18

Реш. В данном случае влияние ρ_t вначале преобладает и $\rho_{зап}$ несколько увеличивается, потом уменьшается до минимума одной ямы и в конце концов снова растет вследствие разотравления, достигая примерно первоначального уровня до разогрева перед пуском ЯР. Различие начального и конечного значений $\rho_{зап}$ зависит от характера и величины неучтенных нами из-за их малости эффектов: темпа выгорания при работе на мощности, глубины прометиевого провала и накоплений $P_{и}$ после остановки ЯР. Если, например, $S_{п}$ прометиевого провала и $P_{и}$ друг друга компенсируют (см. задачу 2.7.8), то при положительном темпе выгорания ($q_p > 0$) на данном участке кампании $\rho_{зап}$ несколько увеличится, а если $q_p < 0$, — уменьшится (см. рис. 2.9.7).

2.9.19. Сколько суток сможет работать ВВЭР-440 за счет снижения мощности с $N_{ном}$ до 90 %, если H_2O_3 в контуре нет, а рабочая группа РК находится уже на ВКВ?

Решение. При $\alpha_N = -0,0015 \text{ \%}/\text{МВт}$ и $\Delta N = 10 \text{ \%}$ $N_{ном} = 137,5 \text{ МВт}$ $\Delta \rho_N = \alpha_N \Delta N = +0,21 \text{ \%}$; $\Delta \rho_{хе} = 0,20 \text{ \%}$ (см. рис. 2.4.3). Согласно (2.9.3) при $q_p = 0,03 \text{ \%}/\text{эф. сут}$ $\Delta Q_N = \Delta \rho / q_p = (0,21 + 0,20) : 0,03 = 13,7 \text{ эф. сут} = 452 \cdot 100 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ и $\Delta \tau = \Delta Q_N / N \approx 15 \text{ сут}$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем определяется характер кривой энерговыработки?
2. Чем опасны большой положительный и отрицательный выбеги ρ кривой энерговыработки?
3. ЯР имеет кампанию 800 сут, $N_{ном} = 70 \text{ МВт}$. Чему равен оставшийся энергозапас, если энерговыработка на данный момент равна $2 \cdot 10^5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$?
4. Какой из ЯР, имеющих кривые энерговыработки, представленные на

рис. 2.9.1, должен иметь при прочих равных условиях ббльший $\rho_{зап}$, чтобы кампании ЯР были одинаковы?

5. Реактор ТР израсходовал из $\rho_{рез}$ на энерговыработку 0,2 %. Чему равна энерговыработка ЯР с начала кампании?

6. Реактор ТР отработал 4000 эф. ч. Сколько суток он еще сможет работать на мощности 60 % $N_{ном}$?

7. Реактор ТР, работая последнее время на мощности 80 % $N_{ном}$, выработал весь $\rho_{зап}$. Сколько он еще сможет работать на мощности 50 %?

8. Какой дополнительный энергозапас можно получить в ЯР, имеющих ТЭР II и III (см. рис. 2.8.1), если перейти со средней температуры 250 °C на 230 °C при $q_p = 5 \cdot 10^{-7}$ 1/(МВт·ч)?

9. При изменении мощности от 50 до 100 % $N_{ном}$ (800 МВт) $\rho_N = -2$ %. Оценить, сколько часов сможет дополнительно работать ЯР на мощности 60 % $N_{ном}$, используя $\Delta\rho_N$, если $q_p = 5 \cdot 10^{-7}$ 1/(МВт·ч).

10. Реактор ТР выработал номинальный и резервный $\rho_{зап}$ на мощности $N_{ном}$. Сколько он сможет еще выработать на мощности 75 % $N_{ном}$: а) до выработки $\rho_{зап}$ на иодную яму; б) с $\rho_{зап}$ на иодную яму?

11. С какой мощности не опасно с точки зрения избежания вынужденной стоянки останавливать реактор ТР через 20 эф. сут работы, если перед пуском в холодном разотравленном состоянии $\rho_{зап} = 10$ %?

12. Какой $\rho_{зап}$ должен иметь реактор ТР в холодном разотравленном состоянии, чтобы обеспечить работу на мощности 75 % $N_{ном}$ в течение 1000 ч с гарантией на безопасность иодной ямы?

13. Реактор ТР остановлен после полного израсходования $\rho_{зап}$ на $N_{ном}$. Через какое время ЯР можно снова пустить и на какой мощности он сможет еще работать в течение месяца?

14. Реактор ТР выработал $8 \cdot 10^5$ МВт·ч энергозапаса (см. рис. 2.9.5). На какой мощности он может работать, чтобы:

а) снижение мощности до 40 % $N_{ном}$ не было опасно с точки зрения попадания в иодную яму;

б) иодная яма не была опасной при полной остановке;

в) до какого уровня можно снизить мощность с 80 % $N_{ном}$, чтобы ЯР не попал в иодную яму?

ГЛАВА 3

УПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ

§ 3.1. ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА И СКОРОСТЬ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Мощность ЯР определяется количеством делений ядер топлива в активной зоне в единицу времени и энергией, приходящейся на одно деление:

$$N = n\nu\sigma_f N_{топ} V E_f = An. \quad (3.1.1)$$

В каждом конкретном ЯР объем активной зоны V , энергия, приходящаяся на одно деление, E_f , сечение деления σ_f , концентрация

ядер топлива $N_{\text{топ}}$ и скорость нейтронов (спектр) v в данный момент времени являются постоянными, т. е. $v\sigma_f N_{\text{топ}} V E_f = A$. Поэтому изменять мощность во времени можно только путем изменения плотности нейтронов n [плотности потока нейтронов $\Phi = nv$ нейтр/(см²·с)]:

$$\frac{dN}{dt} = A \frac{an}{dt} = A \frac{n_2 - n_1}{l} = A \frac{K_{\text{эф}} n - n}{l} = An \frac{\delta K_{\text{эф}}}{l} \approx N(t) \frac{\rho}{l}.$$

Скорость изменения мощности в общем случае прямо пропорциональна мощности, избыточному коэффициенту размножения (реактивности) и обратно пропорциональна среднему времени жизни поколения нейтронов l ; $K_{\text{эф}}$ показывает, во сколько раз в каждом следующем поколении увеличивается количество делений (мощность), а l — как часто происходит смена поколений нейтронов. Время жизни l (мгновенных и запаздывающих нейтронов) является величиной постоянной, зависящей от типа ЯР (на быстрых, промежуточных и тепловых нейтронах) и физических характеристик его компонентов (топлива, замедлителя и др.). Единственный параметр, с помощью которого можно изменять мощность ЯР, — это реактивность. В зависимости от значения и знака ρ возможны три состояния, охватывающие весь диапазон управления ЯР:

- 1) $\rho < 0$ ($K_{\text{эф}} < 1$, $\delta K_{\text{эф}} < 0$) — ЯР подкритичен;
- 2) $\rho = 0$ ($K_{\text{эф}} = 1$, $\delta K_{\text{эф}} = 0$) — ЯР критичен;
- 3) $\rho > 0$ ($K_{\text{эф}} > 1$, $\delta K_{\text{эф}} > 0$) — ЯР надкритичен.

В первом случае ЯР может быть стационарно и нестационарно подкритичен. Стационарно подкритичный — это остановленный ЯР; нестационарно подкритичный — это когда работающий ЯР переводится с мощности N_1 на N_2 ($N_1 > N_2 \geq 0$), а также во время изменения $K_{\text{эф}}$ в подкритическом состоянии (см. § 3.2, 3.3). В последнем случае возможны два принципиально отличающихся состояния: а) $0 < \rho < \beta_{\text{эф}}$ ($\beta_{\text{эф}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов, см. § 3.3) ЦР протекает со скоростью, определяемой временем запаздывания нейтронов, ЯР управляем; б) при $\rho > \beta_{\text{эф}}$ ЦР протекает на мгновенных нейтронах, ЯР неуправляем. ЯР ведет себя по-разному в зависимости от исходного состояния его в момент изменения ρ .

Для изменения ρ необходимо изменять размножающие свойства среды (активной зоны), которые определяются параметрами, входящими в формулу (3.1.1), а также концентрацией ядер поглотителей нейтронов. Наиболее приемлемый способ изменения ρ — использование подвижных поглотителей нейтронов. Возможны также варианты с изменением: концентрации ядер топлива (подвижные стержни топлива), утечки нейтронов (изменение объема активной зоны или подвижный отражатель), концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура и др.

Контрольные вопросы

1. Почему скорость изменения мощности зависит от исходной мощности?
2. Как влияет время жизни l на скорость протекания ЦР?
3. Почему v , $N_{\text{топ}}$, σ_f , V (3.1.1) влияют на ρ ? Как можно изменять эти параметры в ЯР?

§ 3.2. ПОДКРИТИЧЕСКОЕ И КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА

Для осуществления ЦР в активной зоне необходимо иметь исходный нейтрон, начинающий процесс деления. Источниками таких нейтронов в неработающем ЯР со свежезагруженным топливом являются:

- 1) спонтанное деление ядер топлива (см. приложение 19). Например, ^{238}U самопроизвольно делится с $T_{\text{U}238} = 8 \cdot 10^{15}$ лет [24,8 дел/(г·ч)], испуская $\nu_f = 2,3$ нейтрона на деление. В 1 т природного урана рождается $\sim 15 \cdot 10^3$ нейтр/с. Изотоп ^{235}U делится в 220 раз медленнее. Спонтанное деление происходит преимущественно на четно-четных ядрах типа ^{238}U , ^{240}Pu и других со своим ν_f ;
- 2) нейтроны космического излучения: на уровне моря $\Phi \approx \approx 6,5 \cdot 10^{-3}$ нейтр/(см $^2 \cdot$ с) = 65 нейтр/(м $^2 \cdot$ с) [~ 23 нейтр/(м $^2 \cdot$ с) с энергией $E < 0,4$ эВ и ~ 42 нейтр/(м $^2 \cdot$ с) с $E > 0,4$ эВ].

Если ЯР уже работал, в нем накапливаются γ -активные нуклиды. При наличии в активной зоне Be или D $_2$ O (в 1 т обычной воды имеется ~ 200 г тяжелой) имеет место фотонейтронная (γ, n) реакция на ядрах ^9Be и ^2H . Кроме того, в работающем ЯР накапливаются спонтанно делящиеся трансурановые элементы (Cf, Am и др.). Наибольший интерес представляет изотоп калифорния ^{252}Cf , в 1 мг которого происходит $8 \cdot 10^3$ дел/с ($T_{\text{Cf}} = 87,5$ лет, $\nu_f = 3,7$ нейтр/дел) и испускается $\sim 3 \cdot 10^9$ нейтр/с.

В течение нескольких минут после остановки ЯР некоторые продукты деления излучают запаздывающие нейтроны (см. § 1.2, 3.3 и 3.8).

При необходимости (см. § 5.2) можно использовать искусственные источники нейтронов, представляющие собой в большинстве случаев смесь α -излучателей (Ra, Pu, Po и др.) с нуклидами, имеющими низкий порог реакции выбивания нейтрона, например Be, В. Стандартный Pu—Be-источник имеет поток нейтронов до $5 \cdot 10^7$ нейтр/с; Po—Be-источник испускает до $4 \cdot 10^8$ нейтр/с, источник на основе Cf — от $1,5 \cdot 10^7$ до 10^9 нейтр/с. Недостаток Ra—Be-источника — высокая интенсивность γ -излучения. Po—Be-источник обладает меньшей γ -активностью, но поток нейтронов его быстро снижается ($T_{\text{Po}} \approx 138$ сут). При пусках ЯР используются источники интенсивностью 10^6 — 10^7 нейтр/с (приложение 20).

В активной зоне объемом V (см 3) плотность нейтронов и плотность потока нейтронов, имеющих скорость v (см/с) и среднее время жизни l (с) и обусловленных источником нейтронов интенсивностью $I_{\text{ист}}$ (нейтр/с), соответственно равны

$$n = I_{\text{ист}} l / V \text{ нейтр/см}^3;$$

$$\Phi_{\text{ист}} = n v = I_{\text{ист}} l v / V \text{ нейтр/}(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (3.2.1)$$

Интенсивность источника, рассредоточенного в размножающей среде, удобно характеризовать *удельной интенсивностью* $I_{\text{уд}}$ [нейтр/(\text{см}^3 \cdot \text{с})]. В этом случае

$$I_{\text{ист}} = I_{\text{уд}} V \text{ нейтр/с};$$

$$\Phi_{\text{ист}} = I_{\text{уд}} v l \text{ нейтр/}(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (3.2.2)$$

Тепловая мощность, обусловленная спонтанным делением урана без учета размножения, создающим поток нейтронов $I_{\text{сп}}$ (нейтр/с),

$$N_{\text{сп}} = I_{\text{сп}} / (3,1 \cdot 10^{13} \nu_f) \approx 1,4 \cdot 10^{-14} I_{\text{сп}} \text{ кВт}, \quad (3.2.3)$$

где $\nu_f = 2,3$ — число нейтронов, приходящихся на одно спонтанное деление U, нейтр/дел.; $3,1 \cdot 10^{13}$ — количество делений, соответствующее 1 кВт (см. задачу 1.5.1), дел/(с · кВт).

Установившаяся интенсивность источника в размножающей среде при подкритичности $-\delta K_{\text{эф}} = K_{\text{эф}} - 1$ ($K_{\text{эф}} < 1$) и $I_{\text{ист}}$ (нейтр/с) равна

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{ист}} K_{\text{эф}} + I_{\text{ист}} K_{\text{эф}}^2 + \dots + I_{\text{ист}} K_{\text{эф}}^i = I_{\text{ист}} \frac{1 - K_{\text{эф}}^i}{1 - K_{\text{эф}}} \xrightarrow{i \rightarrow \infty}$$

$$\rightarrow I_{\text{ист}} / (1 - K_{\text{эф}}) = K_{\text{под}} I_{\text{ист}} = M I_{\text{ист}} \text{ нейтр/с}, \quad (3.2.4)$$

где $K_{\text{под}} = M = 1 / (1 - K_{\text{эф}}) = 1 / |K_{\text{эф}} - 1| = 1 / |-\delta K_{\text{эф}}| \approx 1 / \rho_{\text{под}}$ — *подкритический коэффициент размножения*, который называют *умножением*; $\rho_{\text{под}} = |-\rho| \approx |-\delta K_{\text{эф}}|$ — отрицательная реактивность, называемая *подкритичностью*; $i = t/l$ — количество поколений нейтронов за время t при времени жизни поколения l (с).

Плотность потока нейтронов в подкритическом ЯР ($K_{\text{эф}} < 1$) через время t (с) после введения источника нейтронов интенсивностью $I_{\text{ист}}$ (нейтр/с), которому соответствует $\Phi_{\text{ист}} = n_{\text{ист}} v$ [нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с})] (3.2.1), равна (рис. 3.2.1)

$$\Phi_{\text{под}} = \Phi_{\text{ист}} (1 - K_{\text{эф}}^{t/l}) / (1 - K_{\text{эф}}) \text{ нейтр/}(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

При $i \rightarrow \infty$ ($t \rightarrow \infty$) $\Phi_{\text{под}}$ и N достигают установившегося значения

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{уст}} &= \Phi_{\text{ист}} / (1 - K_{\text{эф}}) \approx \Phi_{\text{ист}} / \rho_{\text{под}} = M \Phi_{\text{ист}} = K_{\text{под}} \Phi_{\text{ист}}; \\ N_{\text{уст}} &= N_{\text{ист}} / (1 - K_{\text{эф}}) \approx N_{\text{ист}} / \rho_{\text{под}} = M N_{\text{ист}} = K_{\text{под}} N_{\text{ист}}; \end{aligned} \right\} \quad (3.2.5)$$

где $\Phi_{\text{ист}}$ и $N_{\text{ист}}$ — плотность потока нейтронов источника и соответствующая ей мощность без учета размножения.

Время установления подкритической плотности потока до уровня $\Phi(t_{\text{уст}})$ зависит от подкритичности ЯР ($1 - K_{\text{эф}}$), времени жизни поколения нейтронов l (с), плотности потока нейтронов источника $\Phi_{\text{ист}}$ [нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с})], т. е. интенсивности источника $I_{\text{ист}}$ (нейтр/с), введенного в активную зону при данной подкритичности:

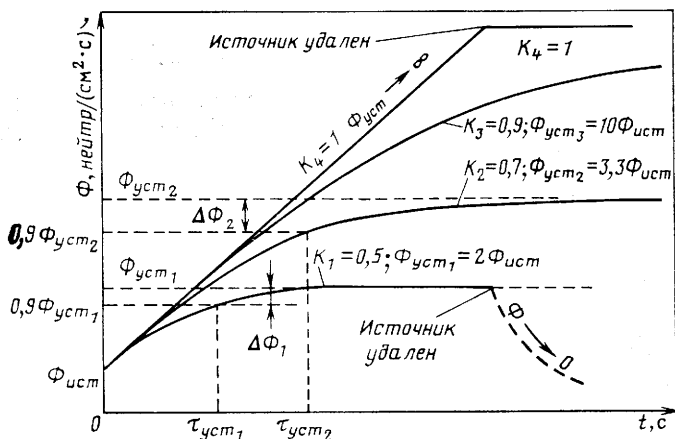


Рис. 3.2.1. Изменение Φ в подкритическом и критическом состояниях ЯР

$$t_{уст} \approx \frac{l}{1 - K_{эф}} \ln \frac{\Phi_{ист}/(1 - K_{эф})}{\Delta\Phi} = \frac{l}{1 - K_{эф}} \ln \frac{\Phi_{уст}}{\Phi_{уст} - \Phi(t_{уст})}, \quad (3.2.6)$$

где $\Delta\Phi = \Phi_{уст} - \Phi(t_{уст})$ — недостающая плотность потока нейтронов в момент времени $t_{уст}$ до установившегося значения (см. рис. 3.2.1).

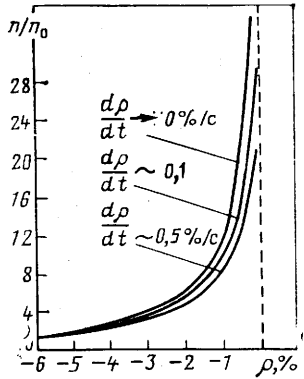
Практически $\Phi_{под}$ можно считать установившейся, когда она достигает значения (90—95) % $\Phi_{уст}$:

$$\left. \begin{aligned} t_{уст} &\approx 2 \frac{l}{1 - K_{эф}} \quad \text{при } \Phi(t_{уст}) = 0,90\Phi_{уст}, \quad \text{т. е. } \Delta\Phi = \\ &= 10\% \Phi_{уст}; \\ t_{уст} &\approx 3 \frac{l}{1 - K_{эф}} \quad \text{при } \Phi(t_{уст}) = 0,95\Phi_{уст}, \quad \text{т. е. } \Delta\Phi = \\ &= 5\% \Phi_{уст}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2.7)$$

При подкритичности, меньшей доли запаздывающих нейтронов, чем ближе $K_{эф}$ к единице, тем в большей степени на время установления влияет время запаздывания запаздывающих нейтронов. В этом случае приведенные выше формулы для $t_{уст}$ будут точнее, если в качестве времени жизни поколения нейтронов брать усредненное по мгновенным и запаздывающим нейтронам время жизни \bar{l} . Например, для ^{235}U $\bar{l} \approx 0,08$ с и $t_{уст} \approx 3\bar{l}/\rho_{под} \approx 0,25/\rho_{под}$ с. Чем ближе критическое состояние, тем больше время стабилизации процесса.

Здесь речь шла об установлении стационарной подкритической плотности потока нейтронов после уменьшения подкритичности и после введения в подкритическую активную зону источника нейтронов. Если же сделать $K_{эф} < 1$ в ЯР, находящемся в критическом или надкритическом состоянии, то изменение Φ характеризуется

Рис. 3.2.2. Зависимость плотности нейтронов от $\rho_{\text{под}}$ при линейном увеличении ρ с различной скоростью



другими закономерностями (см. § 3.3 и 3.8).

При наличии источника нейтронов в подкритическом ЯР $\Phi_{\text{под}}$ и $N_{\text{под}}$ устанавливаются на постоянном уровне (3.2.5). С уменьшением подкритичности

$$\Phi_{\text{под}} = \frac{\Phi_{\text{ист}}}{1 - K_{\text{эф}}} \xrightarrow{K_{\text{эф}} \rightarrow 1} \infty \text{ и } t_{\text{уст}} \rightarrow \infty.$$

Скорость увеличения мощности в подкритическом состоянии определяется скоростью высвобождения ρ и подкритичностью (с приближением ЯР к критическому состоянию, когда $K_{\text{эф}}$ близок к единице, можно считать, что $\delta K_{\text{эф}} \approx \rho$):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_{\text{ист}}}{(1 - K_{\text{эф}})^2} \frac{dK_{\text{эф}}}{dt} = N_{\text{ист}} \frac{d\rho_{\text{под}}/dt}{\rho_{\text{под}}^2} \frac{1}{c}.$$

Из этого выражения следует, что чем ближе ЯР к критическому состоянию, т. е. чем меньше подкритичность, тем быстрее нарастает мощность при постоянной скорости увеличения ρ (рис. 3.2.2). Если высвобождение ρ производится одинаковыми порциями $\delta\rho$ с выдержкой времени между ними, то по изменению подкритической мощности можно точно определить подкритичность ЯР. Действительно, пусть при $\rho_{\text{под}1}$ $N_{\text{под}1} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под}1}$. После высвобождения $+\delta\rho$ подкритичность станет равной $\rho_{\text{под}2} = \rho_{\text{под}1} - \delta\rho$, а $N_{\text{под}2} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под}2} = N_{\text{ист}}/(\rho_{\text{под}1} - \delta\rho)$. Следовательно,

$$N_{\text{под}2}/N_{\text{под}1} = \rho_{\text{под}1}/(\rho_{\text{под}1} - \delta\rho) = (\rho_{\text{под}2} + \delta\rho)/\rho_{\text{под}2}. \quad (3.2.8)$$

Из этих соотношений видно, что чем ближе ЯР к критическому состоянию, тем быстрее растет подкритическая мощность при высвобождении одинаковой реактивности. При $\rho_{\text{под}1} \rightarrow \delta\rho$ $N_{\text{под}2}/N_{\text{под}1} \rightarrow \infty$. По изменению подкритической мощности и высвобождаемой ρ можно определить подкритичность при пуске ЯР:

$$\rho_{\text{под}1} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \delta\rho; \quad \rho_{\text{под}2} = \rho_{\text{под}1} - \delta\rho = \frac{N_1}{N_2 - N_1} \delta\rho. \quad (3.2.9)$$

Оператору полезно запомнить, что при уменьшении $\rho_{\text{под}}$ в 2 раза $N_{\text{под}}$ увеличивается в 2 раза. Следовательно, если при очередном высвобождении ρ подкритическая мощность увеличится в 2 раза, то после следующего такого же увеличения реактивности ЯР станет критичным. Действительно, при $\rho_{\text{под}1} = 2\delta\rho$ $N_{\text{под}1} = N_{\text{ист}}/2\delta\rho$, после уменьшения $\rho_{\text{под}}$ в 2 раза $N_{\text{под}2} = N_{\text{ист}}/\delta\rho = 2N_{\text{под}1}$.

Если же после очередного высвобождения ρ $N_{\text{под}}$ увеличивается более чем в 2 раза, то после следующего увеличения ρ на такую же величину ЯР станет надкритичным на $\Delta\rho = \delta\rho - \rho_{\text{под}2} = \delta\rho(N_2 - 2N_1)/(N_2 - N_1)$. В реальных условиях пуска (см. § 3.6) необходимо иметь в виду, что установление $N_{\text{под}}$ после очередного высвобождения ρ происходит медленно, особенно при приближении к критическому состоянию (см. задачу 3.2.5). Поэтому оценка подкритичности по увеличению подкритической мощности при небольшом промежутке времени между очередными высвобождениями ρ будет завышенной, т. е. с погрешностью в опасную сторону.

В критическом ЯР ($K_{\text{эф}}=1$) каждая цепочка делений, начинающаяся от спонтанного деления или инициируемая другим источником нейтронов, не затухает, а поддерживается на постоянном уровне. Поэтому при постоянно действующем источнике количество делений (мощность) в критическом ЯР будет непрерывно расти с постоянной скоростью пропорционально времени и мощности источника (рис. 3.2.1):

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \frac{S_{\text{ист}}v}{V}t = \Phi_0 + I_{\text{уд}}vt, \quad (3.2.10)$$

где Φ_0 — плотность потока нейтронов в тот момент ($t=0$), когда $K_{\text{эф}}$ стал равным 1, нейтр/(см²·с); $I_{\text{ист}}$ — интенсивность источника, нейтр/с; v — скорость нейтронов, производящих деление, м/с; V — объем активной зоны, см³; $I_{\text{уд}}$ — см. (3.2.2).

Если из критического ЯР удалить источник нейтронов, то поток нейтронов стабилизируется на том уровне, который был в момент удаления источника (см. рис. 3.2.1).

При работе ЯР на мощности поток нейтронов в активной зоне на несколько порядков выше потока от источника, поэтому практически справедливо утверждение, что в критическом ЯР ($K_{\text{эф}}=1$, $\rho=0$) мощность постоянна. Но в пусковом режиме, а также при некоторых НФИ (см. гл. 5), когда поток источника сравним с общим потоком в ЯР, такое предположение не соответствует действительности (см. задачу 3.2.10).

Если в критический ЯР ввести отрицательную реактивность, то он станет подкритичным и $\Phi(N)$ будет уменьшаться по экспоненциальному закону до установления стационарной $\Phi_{\text{под}}(N_{\text{под}})$ (3.2.5), которая, вообще говоря, будет медленно уменьшаться (§ 3.8).

Задачи с решениями

3.2.1. Оценить Φ спонтанного деления и соответствующую ей мощность в ЯР на тепловых нейтронах с объемом активной зоны 3 м³ и загрузкой природного урана 2,2 т. Время жизни мгновенных нейтронов $l=10^{-5}$ с.

Решение. По формулам (3.2.1) — (3.2.3) определяем:

а) количество спонтанных делений за 1 с в активной зоне с загрузкой природного урана $2,2 \cdot 10^3$ кг равно $6,96 \cdot 2,2 \cdot 10^3 =$

$= 15,3 \cdot 10^3$ дел/с, где $6,96$ дел/(кг·с) — удельная скорость спонтанного деления (см. приложение 19). Спонтанным делением ^{235}U пренебрегаем, так как, во-первых, оно происходит в 22 раза медленнее, чем в ^{238}U , и, во-вторых, в природном уране содержится всего $0,7\%$ изотопа ^{235}U ;

б) скорость рождения нейтронов в активной зоне за счет спонтанного деления при рождении на каждый акт деления $\nu_f = 2,3$ нейтр/дел равна $S_{\text{сп}} = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 2,3 = 35 \cdot 10^3$ нейтр/с;

в) удельная скорость рождения нейтронов в активной зоне объемом 3 м^3 равна $35 \cdot 10^3 / 3 \approx 12 \cdot 10^3$ нейтр/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$) $= 0,012$ нейтр/($\text{см}^3 \cdot \text{с}$);

г) плотность нейтронов спонтанного деления при среднем времени жизни их в активной зоне $l = 10^{-5}$ с равна $n_{\text{сп}} = S_{\text{сп}} l / V = 11,7 \cdot 10^{-8}$ нейтр/ $\text{см}^3 \approx 0,12$ нейтр/ м^3 ;

д) $\Phi_{\text{сп}}$ при условии, что все нейтроны замедляются до тепловой энергии, которой соответствует скорость $2,2 \cdot 10^5$ см/с, равна $\Phi_{\text{сп}} = n_{\text{сп}} v = 0,026$ нейтр/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) $= 260$ нейтр/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$);

е) тепловая мощность (3.2.3), соответствующая спонтанному делению урана, равна $N_{\text{сп}} = 35 \cdot 10^3 / (2,3 \cdot 3,1 \cdot 10^{13}) \approx 5 \cdot 10^{-10}$ кВт $= 0,5$ мкВт.

3.2.2. Оценить M , $\Phi_{\text{уст}}$ и $N_{\text{уст}}$, обусловленные спонтанным делением в реакторе ТР (см. задачу 3.2.1) при $K_{\text{эф}} = 0,80$ и $0,99$.

Решение. 1) Умножение в подкритическом ЯР при $K_{\text{эф}} = 0,80$ и $0,99$ согласно (3.2.4) соответственно равно

$$M_1 = 1/(1 - K_{\text{эф}}) = 1/0,2 = 5; \quad M_2 = 1/0,01 = 100.$$

2) Согласно (3.2.5) и п. д) задачи 3.2.1

$$\Phi_{\text{уст}1} = M_1 \Phi_{\text{сп}} = 5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} = 13 \cdot 10^{-2} \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Phi_{\text{уст}2} = M_2 \Phi_{\text{сп}} = 100 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} = 2,6 \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

3) Мощность, обусловленная спонтанным делением, соответственно равна [см. п. е) задачи 3.2.1)] $N_1 = M_1 N_{\text{сп}} = 5 \cdot 0,5 = 2,5$ мкВт; $N_2 = 50$ мкВт.

3.2.3. Определить мощность ЯР в подкритическом состоянии при $\delta K_{\text{эф}} = -0,25$ с внутренним источником нейтронов $I_{\text{ист}} = 10^8$ нейтр/с, равномерно распределенным в активной зоне.

Решение. Согласно (3.2.3) и (3.2.4) $M = 1/(1 - K_{\text{эф}}) = 4$; $I_{\text{уст}} = M I_{\text{ист}} = 4 \cdot 10^8$ нейтр/с; $N_{\text{уст}} = I_{\text{уст}} / (3,1 \cdot 10^{13} \nu_f) = 4 \cdot 10^8 / (3,1 \times 10^{13} \cdot 2,3) \approx 5 \cdot 10^{-6}$ кВт $= 5$ мВт.

3.2.4. ЯР подкритичен. Мощность соответствует 10 делениям шкалы измерительного прибора. После введения в активную зону постороннего источника нейтронов мощностью 10^6 нейтр/с показания прибора увеличились до 15 делений. Оценить мощность внутреннего источника нейтронов, обусловленного спонтанным делением и фотонейтронами ($N_{\text{сп, ф.н}}$).

Решение. Согласно (3.2.5) до введения постороннего источника $N_1 = N_{\text{сп, ф.н}} / (1 - K_{\text{эф}}) = 10$, а после введения $N_2 =$

$= (N_{\text{сп. ф. н}} + N_{\text{ист}}) / (1 - K_{\text{эф}}) = 15$. Из этих соотношений находим

$$N_{\text{сп. ф. н}} = N_{\text{ист}} (N_2 / N_1 - 1)^{-1} = 10^8 / (1,5 - 1) = 2 \cdot 10^8 \text{ нейтр/с.}$$

Этот способ дает возможность оценить мощность внутреннего источника нейтронов, если создаваемый им поток контролируется приборами.

3.2.5. В активной зоне объемом 2 м^3 $I_{\text{ист}} = 5 \cdot 10^7$ нейтр/с, $l = 10^{-6}$ с. Наиболее вероятная энергия нейтронов, вызывающих деление топлива, равна 100 эВ. Оценить $\Phi_{\text{уст}}$ и $t_{\text{уст}}$ при $\rho_{\text{под}} = 0,20$ и 0,01.

Решение. Φ_1 , соответствующая источнику $I_{\text{ист}}$ при данных условиях, согласно (3.2.1), (1.4.2) и приложениям 4 и 27 равна

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ист}} &= \frac{I_{\text{ист}} l}{V} \sqrt{\frac{2E}{m}} = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}{1,675 \cdot 10^{-24}}} = \\ &= 345 \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

В соответствии с (3.2.5) и (3.2.7) $\Phi(t_{\text{уст}})$ и $t_{\text{уст}}$ до уровня 90% $\Phi_{\text{уст}}$ равны:

а) при $\rho_{\text{под}} = 0,20$ $\Phi(t_{\text{уст}}) \approx 1725$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}); $t_{\text{уст}} \approx 10$ мкс;

б) при $\rho_{\text{под}} = 0,01$ $\Phi(t_{\text{уст}}) \approx 3450$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}); $t_{\text{уст}} \approx 200$ мкс.

Когда подкритичность ЯР сравнима с $\beta_{\text{эф}}$, необходимо учитывать долю и время запаздывания запаздывающих нейтронов. Действительно, для мгновенных нейтронов подкритичность равна $\rho_{\text{под}}^{\text{МГН}} = \rho_{\text{под}} + \beta_{\text{эф}}$ и соответственно при $\beta_{\text{эф}} = 0,7\%$:

б) для $\rho_{\text{под}}^{\text{МГН}} \approx 0,207$ $\Phi(t_{\text{уст}}) \approx 1666$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}); $t_{\text{уст}} \approx 10$ мкс;

а) для $\rho_{\text{под}}^{\text{МГН}} \approx 0,017$ $\Phi(t_{\text{уст}}) \approx 2030$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}); $t_{\text{уст}} \approx 120$ мкс.

Таким образом, в случае а) запаздывающие нейтроны можно не учитывать, а в случае б) за время 120 мкс (а не 200 мкс) $\Phi_{\text{МГН}}$ достигнет значения 2030 нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) и в дальнейшем будет расти в основном со скоростью, определяемой временем запаздывания запаздывающих нейтронов. Если, например, взять среднее время жизни с учетом запаздывающих нейтронов $\bar{l} = 0,1$ с, то при $\rho_{\text{под}} = 0,01$ $t_{\text{уст}} \approx 2\bar{l}/\rho_{\text{под}} = 0,2/0,01 = 20$ с.

3.2.6. Во сколько раз изменится $N_{\text{под}}$ после первого, второго и третьего увеличений $K_{\text{эф}}$ каждый раз на величину $\delta K_{\text{эф}} = 0,01$, если исходное значение $K_{\text{эф}} = 0,96$? Как будет изменяться $t_{\text{уст}}$?

Решение. Согласно (3.2.5) подкритичности $1 - K_{\text{эф}} = 1 - 0,96 = 0,04$ соответствует $N_{\text{под1}} = N_{\text{ист}}/0,04 = 25 N_{\text{ист}}$. После увеличения $K_{\text{эф}}$ до значения 0,97 мощность достигнет значения $N_{\text{под2}} = 33 N_{\text{ист}}$, т. е. увеличится в 1,3 раза. После увеличения $K_{\text{эф}}$ еще на 0,01 $N_{\text{под3}} = N_{\text{ист}}/0,02 = 50 N_{\text{ист}}$ и $N_{\text{под3}}/N_{\text{под2}} = 50/33 = 1,5$. Очередное высвобождение ρ увеличит мощность до $N_{\text{под4}} = 100 N_{\text{ист}}$, т. е. в $N_{\text{под4}}/N_{\text{под3}} = 100/50 = 2$ раза, и при следующем увеличении $K_{\text{эф}}$ на 0,01 ЯР станет критичным [см. также (3.2.9)].

Время установления подкритического потока (3.2.7) соответственно равно $t_{\text{уст}} \approx 0,25/0,03 \approx 8$ с; 13 с; 25 с; ∞ , при этом начальная скорость увеличения плотности нейтронов по мере приближения к

критическому состоянию увеличивается. При большом подкритическом потоке это может быть причиной срабатывания АЗ по периоду разгона во время пуска ЯР еще до выхода в надкритическое состояние.

3.2.7. Мощность ЯР в подкритическом состоянии равна $10^{-6} \%$ $N_{\text{ном}}$. После подъема стержней АЗ она увеличилась до $1,2 \cdot 10^{-6} \%$. Это соответствует показаниям прибора изменения мощности 10 и 12 делений шкалы. Чему равно $\rho_{\text{под}}$ до и после подъема стержней АЗ?

Решение. На основании (3.2.5) можем записать: $N_1 = 10^{-6} \%$ = 10 делений; $N_2 = 1,2 \cdot 10^{-6} \%$ = 12 делений; $N_2/N_1 = \rho_{\text{под}1}/(\rho_{\text{под}1} - \rho_{\text{АЗ}}) = 1,2$.

Таким образом, до подъема стержней АЗ согласно (3.2.9) $\rho_{\text{под}1} = N_2 \rho_{\text{АЗ}} / (N_2 - N_1) = (1,2/0,2) \rho_{\text{АЗ}} = 6 \rho_{\text{АЗ}}$, а после подъема $\rho_{\text{под}2} = 6 \rho_{\text{АЗ}} - \rho_{\text{АЗ}} = 5 \rho_{\text{АЗ}}$. Зная физический вес АЗ, можно определить $\rho_{\text{под}}$. Мощность необходимо измерять после установления $\Phi_{\text{под}}$ (3.2.7).

3.2.8. Чувствительность прибора контроля мощности по нейтронам равна 10^5 нейтр/(см²·с) на одно деление шкалы. Чему равна $\Phi_{\text{ист}}$, обусловленная спонтанным делением и фотонейтронами, если при высвобождении $\Delta\rho = 10^{-3}$ стрелка отклонилась с 2 до 5 делений шкалы?

Решение. После высвобождения $\Delta\rho = 10^{-3}$, как следует из (3.2.9), $\rho_{\text{под}} = \Delta\rho / (N_2/N_1 - 1) = 6,6 \cdot 10^{-4}$, а $\Phi_{\text{уст}}$, соответствующая пяти делениям шкалы, равна $10^5 \cdot 5 = 5 \cdot 10^5$ нейтр/(см²·с). Таким образом, согласно (3.2.5) $\Phi_{\text{ист}} = \Phi_{\text{уст}} (1 - K_{\text{эф}}) \approx \Phi_{\text{уст}} \rho_{\text{под}} = 330$ нейтр/(см²·с).

3.2.9. Какой должна быть чувствительность прибора, чтобы в подкритическом состоянии при $\delta K_{\text{эф}} = -0,005$ он контролировал Φ в ЯР с источником нейтронов спонтанного деления интенсивностью 10^2 нейтр/с?

Решение. При подкритичности $(1 - K_{\text{эф}}) = 0,005$ согласно (3.2.3) и (3.2.5)

$$N_{\text{уст}} = 1,4 \cdot 10^{-14} I_{\text{сп}} / (1 - K_{\text{эф}}) = 1,4 \cdot 10^{-12} / 0,005 = 0,28 \text{ мкВт.}$$

Следовательно, чтобы стрелка прибора отклонилась хотя бы на несколько делений, чувствительность прибора должна быть не менее 0,2 мкВт на деление.

3.2.10. Объем активной зоны ЯР на тепловых нейтронах равен $2,5 \text{ м}^3$. Внутренний источник имеет $I_{\text{ист}} = 5 \cdot 10^7$ нейтр/с; $\Phi_{\text{ном}} = 10^{13}$ нейтр/(см²·с). На какой мощности и в какой степени будет заметным увеличение Φ за счет источника при $K_{\text{эф}} = 1$?

Решение. Если источник нейтронов $I_{\text{ист}}$ (нейтр/с) рассредоточить в критическом ЯР объемом V (см³), то плотность нейтронов в нем будет увеличиваться пропорционально мощности источника и времени пребывания его в данной среде (3.2.10):

$$n(t) = I_{\text{ист}} t / V = I_{\text{уд}} t \text{ нейтр/см}^3.$$

Скорость увеличения плотности нейтронов пропорциональна только интенсивности источника:

$$dn(t)/dt = I_{\text{уд}} \text{ нейтр}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}).$$

В рассматриваемом ЯР $dn(t)/dt = I_{\text{уд}} = 20$ нейтр/(\text{см}^3 \cdot \text{с}). Для оценки влияния источника на точность поддержания ЯР в критическом состоянии удобно рассмотреть относительное приращение количества нейтронов dn/dt к плотности нейтронов n_0 в данный момент при $K_{\text{эф}} = 1$:

$$\frac{1}{n_0} \frac{dn}{dt} 100 \% \text{ за единицу времени}$$

ИЛИ

$$\frac{1}{n_0} \frac{dn}{dt} t \cdot 100 \% \text{ за время } t.$$

Для данного ЯР n_0 при работе его на $N_{\text{НОМ}}$ равна $n_{\text{НОМ}} = \Phi_{\text{НОМ}}/v = 10^{13}/2,2 \cdot 10^5 = 4,5 \cdot 10^7$ нейтр/см³, где $v = 2,2 \cdot 10^5$ см/с — скорость тепловых нейтронов. Относительная скорость приращения n за счет источника в этом случае, таким образом, равна

$$\frac{1}{n_{\text{НОМ}}} \frac{dn}{dt} = \frac{20}{4,5 \cdot 10^7} = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1} = 4,4 \cdot 10^{-5} \%/\text{с}.$$

Это значит, что при $K_{\text{эф}} = 1$ мощность ЯР увеличится на 1 % за $t = 1/4,4 \cdot 10^{-5} \approx 6$ ч, что практически заметить невозможно.

При пуске ЯР, когда Φ соответствует чувствительности приборов контроля мощности, картина несколько другая. Пусть, например, пусковой прибор начинает контролировать 10^8 нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}), что составляет $10^8/10^{13} = 10^{-5} \Phi_{\text{НОМ}}$. На этой мощности $n_0 = 10^{-5} n_{\text{НОМ}} = 4,5 \cdot 10^2$ нейтр/см³ и $\frac{1}{n_0} \frac{dn}{dt} = \frac{20}{450} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} = 4,4 \%/\text{с}$. При такой относительной скорости увеличения n мощность за 23 с увеличится на 100 %, т. е. в 2 раза, что по прибору контроля мощности легко заметить.

Таким образом, постоянный источник нейтронов оказывает существенное влияние в пусковом режиме, а его влияние при работе на мощности практически незаметно и им можно пренебречь.

3.2.11. Можно ли вывести ЯР с $\Phi_{\text{уст}} = 10$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) на контролируемый уровень [$\sim 10^6$ нейтр/(\text{см}^2 \cdot \text{с})], не доводя его до критического состояния?

Решение. При наличии в ЯР источников нейтронов [постороннего или внутреннего, обусловленного спонтанным делением урана, реакцией (α, n) , (γ, n) на Ве и др.] любой подкритичности $1 - K_{\text{эф}} = \delta K_{\text{эф}}$ ($K_{\text{эф}} < 1$) соответствует $\Phi_{\text{уст}}$ (3.2.5) и $t_{\text{уст}}$ (3.2.6). При уменьшении подкритичности, т. е. при $K_{\text{эф}} \rightarrow 1$, $\Phi_{\text{уст}}$ и $t_{\text{уст}}$ стремятся к бесконечности. При этом нужно иметь в виду, что, когда подкритичность становится сравнимой с $\beta_{\text{эф}}$, $t_{\text{уст}}$ определяется временем запаздывания запаздывающих нейтронов, а не

временем жизни мгновенных нейтронов (см. задачу 3.2.5). Таким образом, при бесконечно медленном увеличении ρ каждому значению $\rho_{\text{под}}$ соответствует своя установившаяся подкритическая плотность потока. Следовательно, можно, не доводя ЯР до критического состояния, получить в нем сколь угодно большую плотность потока нейтронов (мощность). Но важно, чтобы для каждой подкритичности мощность достигала своего установившегося значения, т. е. чтобы скорость высвобождения ρ не опережала скорость установления $\Phi_{\text{под}}$. С увеличением скорости высвобождения ρ $\Phi_{\text{под}}$ не будет успевать достигать своего установившегося значения. Следовательно, в момент достижения критического состояния $\Phi_{\text{под}}$ будет меньше, чем при более медленном подходе к критическому состоянию. При очень быстром высвобождении ρ в тот момент, когда ЯР станет критичным, $\Phi_{\text{под}}$ практически мало будет отличаться от плотности потока в момент начала высвобождения ρ . На рис. 3.2.2 [24] показана зависимость относительной плотности нейтронов от подкритичности ЯР при линейном высвобождении ρ с постоянной скоростью (для различных значений этой скорости). Из графика видно, что чем больше $d\rho/dt$ при подходе к критическому состоянию, тем при меньшем значении $\Phi_{\text{под}}$ достигается критическое состояние. Отсюда следует вывод: поскольку в каждом ЯР есть какая-то, пусть самая незначительная с точки зрения чувствительности пусковых приборов, плотность потока нейтронов $\Phi_{\text{ист}}$, всегда можно высвобождать ρ настолько медленно, что Φ увеличится при $K_{\text{эф}} < 1$ до такого значения, при котором пусковые приборы станут чувствовать ее нарастание. Следовательно, переход через критическое состояние будет контролируемым.

Теоретически это так, но практически при малой мощности источника трудно выполнимо. Например, в данной задаче, чтобы установилась $\Phi_{\text{под}} \approx \Phi_{\text{ист}}/\rho_{\text{под}} = 10/\rho_{\text{под}}$ нейтр/(см²·с) = 10⁶ нейтр/(см² × с), нужно создать подкритичность $\rho_{\text{под}} = \Phi_{\text{ист}}/\Phi_{\text{уст}} = 10/10^6 = 10^{-5}$. Практически сделать это очень трудно, так как погрешность в определении положения органов регулирования и флуктуации ρ сравнимы с полученным значением подкритичности.

По мере приближения ЯР к критическому состоянию, особенно при $\rho < \beta$, только при бесконечно медленном высвобождении ρ подкритическая плотность потока [с учетом времени установления (3.2.6) на запаздывающих нейтронах] будет успевать следовать за уменьшением подкритичности.

3.2.12. Чему равна установившаяся плотность потока нейтронов, создаваемая запаздывающими нейтронами в критическом ЯР, и как она будет изменяться при изменении ρ ?

Решение. При $K_{\text{эф}} = 1$, если нет источника нейтронов, плотность потока во времени не изменяется и равна Φ_0 . На мгновенных нейтронах ЯР в этом случае подкритичен на $\rho_{\text{под}} \approx \delta K_{\text{мгн}} = 1 - K_{\text{мгн}} = 1 - K_{\text{эф}}(1 - \beta) = \beta$. Источником нейтронов в таком «подкритическом» ЯР являются запаздывающие нейтроны, составляющие β -ю долю Φ_0 : $\Phi_{\text{зап}} = \beta\Phi_0$. Согласно (3.2.5) установившаяся

плотность потока, создаваемая запаздывающими нейтронами,

$$\Phi_{уст} = \Phi_{зап}/\rho_{под} = \beta\Phi_0/\beta = \Phi_0.$$

При увеличении $K_{эф}$ на ρ ($0 < \rho < \beta$) ЯР становится надкритичным, но на мгновенных нейтронах он подкритичен на величину $(\beta - \rho)$. Этой подкритичности соответствует

$$\Phi'_{уст} = \Phi_{зап}/(\beta - \rho) = \beta\Phi_0/(\beta - \rho),$$

которая установится примерно за время

$$t_{уст} \approx \bar{l}/(\beta - \rho) \text{ с.}$$

При уменьшении $K_{эф}$ на $|\rho|$ подкритичность ЯР на мгновенных нейтронах сразу же увеличится до значения $(\beta + |\rho|)$ и плотность потока практически скачком снизится до уровня

$$\Phi''_{уст} = \Phi_{зап}/(\beta + |\rho|) = \beta\Phi_0/(\beta + |\rho|).$$

Интересно сравнить полученные результаты с (3.3.2), (3.3.11) и (3.3.12). Дальнейший ход изменения Φ в обоих случаях можно представить как изменение подкритической плотности потока, обусловленной изменением плотности потока запаздывающих нейтронов (см. § 3.8):

$$\Phi(t) = \Phi_{зап}(t)/(1 - K_{эф}).$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Как влияет источник нейтронов на поведение подкритического и критического ЯР?
2. Будет ли отличаться Φ в ЯР в момент перехода через критическое состояние при различной скорости высвобождения ρ ? Почему?
3. Как можно судить о степени приближения ЯР к критическому состоянию при подъеме поглотителей в ЯР с контролируемой $\Phi_{под}$?
4. Оценить $n_{сп}$ в ЯР на тепловых нейтронах ($l \approx 10^{-5}$ с) с $V_{а.з.} = 2$ м³ при загрузке 500 кг урана, обогащенного до 20 % ²³⁵U.
5. Оценить $N_{уст}$, обусловленную спонтанным делением при $K_{эф} = 0,95$ в ЯР на тепловых нейтронах с загрузкой природного урана 3 т. При какой подкритичности в ЯР $N_{уст} \approx 1$ МВт?
6. Какую высвободили ρ при исходном значении $\rho_{под} = 0,02$, если $\Phi_{под}$ увеличилась на 25 %?
7. При очередном высвобождении $\rho = 0,005$ мощность увеличилась примерно в 3 раза. Оценить подкритичность ЯР.

§ 3.3. НАДКРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕАКТОРА

Изменение мощности ЯР в надкритическом состоянии ($K_{эф} > 1$, $\rho > 0$) происходит по экспоненциальному закону (см. рис. 3.3.1):

$$N(t) = N(l) e^{t/T} = N(l) 2^{t/T(2)} = N(l) 10^{t/T(10)}, \quad (3.3.1)$$

где

$$N(l) = N_0 \beta_{эф}/(\beta_{эф} - \rho) \quad (3.3.2)$$

Рис. 3.3.1. Изменение мощности ЯР в надкритическом и подкритическом состояниях.

— мощность после скачка на мгновенных нейтронах от значения N_0 (при $\rho = 0$);

$$T = \Phi / \frac{d\Phi}{dt} = N / \frac{dN}{dt} \quad (3.3.3)$$

— период реактора, т. е. время, в течение которого плотность потока и мощность увеличиваются в $e=2,7$ раза;

$$T_{(2)} = T \ln 2 \approx 0,7T \approx T_{(10)} \lg 2 \approx 0,3T_{(10)} \quad (3.3.4)$$

— период удвоения мощности, т. е. время, в течение которого мощность увеличивается в 2 раза; а $T_{(10)}$ — период удесятерения, т. е. время, в течение которого мощность увеличивается в 10 раз (им удобно пользоваться, когда прибор измерения мощности имеет логарифмическую шкалу); $\beta_{эф} = \gamma\beta$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; γ — эффективность запаздывающих нейтронов, доля которых равна β . Коэффициент γ характеризует ценность запаздывающих нейтронов, которая зависит от типа ЯР, вида ядерного топлива, спектра нейтронов и т. п.

Связь T и ρ с учетом запаздывающих нейтронов выражается соотношением, которое иногда называют формулой обратных часов:

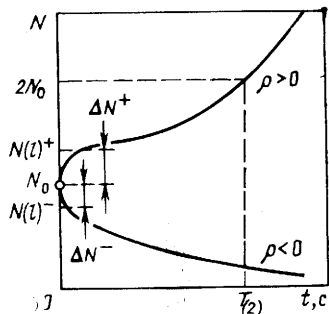
$$\rho = \frac{l}{TK_{эф}} + \sum_i \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} = \frac{l}{TK_{эф}} + \sum_i \frac{\beta_i \tau_i}{\tau_i + T} \approx \frac{l}{T} + \frac{\bar{l}}{\tau_{зап} + T}, \quad (3.3.5)$$

где l — время жизни поколения мгновенных нейтронов, с; $K_{эф} = 1/(1-\rho)$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов; β_i — доля запаздывающих нейтронов i -й группы; λ_i — постоянная распада осколков — источников запаздывающих нейтронов, с⁻¹; $\tau_i = 1/\lambda_i$ — время жизни осколков — источников запаздывающих нейтронов, с; $\tau_{зап} = 1/\lambda_{зап}$ — усредненное по шести группам запаздывающих нейтронов время жизни осколков-источников (для ^{235}U $\tau_{зап} \approx 12$ с); $\lambda_{зап}$ — усредненная постоянная распада; \bar{l} — усредненное по мгновенным (времени жизни) и запаздывающим (времени запаздывания) нейтронам время жизни поколения нейтронов:

$$\bar{l} = (n_{мгн} + \tau_{зап} n_{зап})/n = l_{мгн}/n + \tau_{зап} n_{зап}/n = l(1 - \beta) + \tau_{зап} \beta \text{ с}, \quad (3.3.6)$$

где $n = n_{мгн} + n_{зап}$ — количество мгновенных ($n_{мгн}$) и запаздывающих ($n_{зап}$) нейтронов, приходящихся на акт деления. Для ЯР на тепловых нейтронах с ^{235}U $\bar{l} \approx \tau_{зап} \beta_{эф} \approx 0,083$ с.

Благодаря большому $\tau_{зап}$ запаздывающие нейтроны на два и более порядка увеличивают среднее время жизни нейтронов



одного поколения, создавая возможность управления цепной реакцией. Однако это справедливо только при $\rho < \beta_{эф}$ (см. гл. 4). При $\rho = \beta_{эф}$ влияние запаздывающих нейтронов на скорость изменения мощности ЯР прекращается, это есть граница управляемости ЯР.

Практически для всех ЯР $\gamma > 1$. Так, для ЯР на тепловых нейтронах в связи с тем, что запаздывающие нейтроны рождаются с меньшей энергией, чем мгновенные ($\bar{E}_{зап} \approx 0,5 \text{ МэВ} < \bar{E}_{мгн} \approx \approx 2 \text{ МэВ}$), они имеют меньшие пробеги и утечку. Следовательно, доля запаздывающих нейтронов по отношению к мгновенным после замедления их от 2 до 0,5 МэВ увеличивается: γ может достигать значения 1,2, а $\beta_{эф} \approx 1,2 \cdot 0,64 \% \approx 0,8 \%$ (для ^{235}U). Чем меньше размеры активной зоны, тем больше ценность запаздывающих нейтронов. Для транспортных ВВР $\gamma \approx 1,05 \div 1,1$ ($\beta_{эф} \approx 0,7 \%$). Приблизненно для ВВР $\gamma \approx 1 + 20 B^2$, где B — геометрический параметр активной зоны. Если в активной зоне есть Be и D , то на поведение ЯР вблизи критического состояния ($\rho < \beta$) кроме запаздывающих нейтронов могут оказывать существенное влияние фотонейтроны, появляющиеся при реакциях (γ, n) вследствие облучения ядер Be и D γ -квантами относительно низкой энергии ($\sim 2 \text{ МэВ}$), испускаемыми продуктами деления. Эти фотонейтроны в ЯР на тепловых нейтронах с большим количеством D_2O или Be могут быть сравнимы по ценности с запаздывающими нейтронами деления, их можно рассматривать как одну из эффективных

Таблица 3.3.1

T, с	T ₍₂₎ , с	ρ (дол.) при l			
		10 ⁻⁶ с	10 ⁻⁵ с	10 ⁻⁴ с	10 ⁻³ с
0,1	0,069	0,966	0,980	1,119	2,502
0,2	0,139	0,936	0,943	1,012	1,708
0,4	0,277	0,887	0,891	0,926	1,275
0,6	0,415	0,850	0,852	0,875	1,108
0,8	0,554	0,817	0,819	0,837	1,011
1,0	0,693	0,789	0,791	0,805	0,945
2,0	1,39	0,686	0,687	0,694	0,764
4,0	2,77	0,565	0,566	0,569	0,604
6,0	4,15	0,491	0,491	0,493	0,517
8,0	5,54	0,439	0,439	0,440	0,458
10	6,93	0,399	0,399	0,400	0,414
20	13,9		0,285		0,292
40	27,7		0,190		0,194
60	41,5		0,144		0,147
80	55,4		0,117		0,119
100	69,3		0,099		0,100
200	139		0,0557		
400	277		0,0299		
600	415		0,0205		
800	554		0,0156		
1000	693		0,0126		
3600	2500		0,0036		
6000	4150		0,0022		
10 000	6930		0,0013		

Таблица 3.3.2

$T_{(2)}, c$	$\rho_0, \%$	$T_{(2)}, c$	$\rho_0, \%$	$T_{(2)}, c$	$\rho_0, \%$	$T_{(2)}, c$	$\rho_0, \%$
5	0,293	29	0,118	53	0,077	130	0,038
6	0,271	30	0,115	54	0,076	140	0,035
7	0,254	31	0,113	55	0,075	150	0,033
8	0,239	32	0,110	56	0,074	160	0,031
9	0,226	33	0,108	57	0,073	170	0,030
10	0,215	34	0,106	58	0,072	180	0,028
11	0,205	35	0,104	59	0,071	190	0,027
12	0,196	36	0,102	60	0,070	200	0,026
13	0,188	37	0,100	62	0,069	250	0,021
14	0,181	38	0,098	64	0,067	300	0,018
15	0,175	39	0,097	66	0,066	350	0,015
16	0,168	40	0,095	68	0,064	400	0,014
17	0,163	41	0,093	70	0,063	450	0,012
18	0,158	42	0,092	72	0,061	500	0,011
19	0,153	43	0,091	74	0,060	600	0,009
20	0,148	44	0,089	76	0,059	700	0,008
21	0,144	45	0,087	78	0,057	800	0,007
22	0,140	46	0,086	80	0,056	900	0,0062
23	0,136	47	0,085	85	0,054	1000	0,0056
24	0,133	48	0,083	90	0,051	2500	0,0023
25	0,129	49	0,082	95	0,049	3000	0,0016
26	0,126	50	0,081	100	0,047		
27	0,123	51	0,080	110	0,043		
28	0,120	52	0,079	120	0,040		

Примечание: $\rho = \gamma \rho_0$; $\beta_{эф} = \gamma \beta$; $\gamma > 1$.

групп запаздывающих нейтронов. В ЯР на быстрых нейтронах, где используется для воспроизводства ^{238}U , эффективность запаздывающих нейтронов существенно увеличивается вследствие деления ^{238}U , для которого доля запаздывающих нейтронов на порядок выше, чем для ^{235}U и ^{239}Pu (см. приложение 12). В этом случае даже в ЯР с ^{239}Pu $\beta_{эф}$ будет достаточно большим.

Увеличение ценности запаздывающих нейтронов расширяет диапазон допустимого изменения ρ при управлении ЯР ($\rho < \beta_{эф} = \gamma \beta$).

В табл. 3.3.1 и 3.3.2, а также на рис. 3.3.2 и 3.3.3 даны зависимости T от ρ для различных значений l (с) и $\beta_{эф}$.

При $\rho < \beta_{эф}$ связь T и ρ (3.3.5) можно представить так:

$$\rho = \sum_i \frac{\beta_i \tau_i}{\tau_i + T} \approx \frac{\beta_{эф} \tau}{\tau_{зап} + T} \approx \frac{\beta_{эф}}{1 + \lambda_{зап} T}; \quad T \approx \frac{\beta_{эф} - \rho}{\rho} \tau_{зап}. \quad (3.3.7)$$

При $\rho \ll \beta_{эф}$ ($T \gg \tau$):

$$\left. \begin{aligned} \text{для } ^{235}\text{U } T \approx \beta_{эф} \tau / \rho; \quad \rho \approx 0,08/T = 8/T \% \approx 5,6/T_{(2)} \% ; \\ \text{для } ^{239}\text{Pu } \rho = 0,03/T = 3/T \% \approx 2/T_{(2)} \% . \end{aligned} \right\} \quad (3.3.8)$$

При $\rho = \beta_{эф}$ ЯР становится критичным на одних мгновенных нейтронах. По оценкам при скачкообразном высвобождении $\rho =$

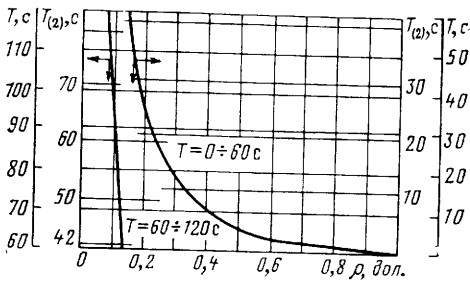
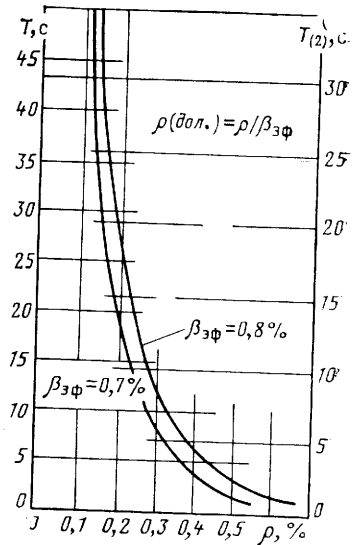


Рис. 3.3.2. Зависимость периодов T и $T_{(2)}$ от ρ , выраженной в долях $\beta_{эф}$ (дол.).

Рис. 3.3.3. Зависимость периодов T и $T_{(2)}$ от ρ для $\beta_{эф} = 0,7\%$ и $0,8\%$



$=\beta_{эф}$ в первые 1,5 с плотность нейтронов возрастает примерно в 10 раз, что соответствует усредненному периоду $\sim 0,65$ с, а затем устанавливается $T \approx 1,5$ с.

При $\rho > \beta_{эф}$ связь T и ρ выражается зависимостью

$$\rho \approx lTK_{эф}, \text{ т. е. } T = l/\delta K_{эф} = l/(K_{эф} - 1). \quad (3.3.9)$$

В этом случае закон изменения мощности (3.3.1) определяется временем жизни мгновенных нейтронов и принимает вид

$$N(t) = N_0 \exp(\delta K_{эф} t/l) \approx N_0 K_{эф}^{t/l}. \quad (3.3.10)$$

При $\rho > \beta_{эф}$ T составляет доли секунды.

Изменение ρ сопровождается переходным процессом по плотности потока нейтронов, обусловленным изменением в течение некоторого времени соотношения между количеством мгновенных $n_{мгн}$ и запаздывающих $n_{зап}$ нейтронов. При положительном скачке ρ ($0 < \rho < \beta_{эф}$) происходит увеличение мощности на мгновенных нейтронах в течение долей секунды, определяемых временем жизни мгновенных нейтронов (3.3.2). Мощность от значения N_0 увеличивается до $N(l)$ на величину

$$\Delta N^+ = N(l) - N_0 = N_0 \rho / (\beta_{эф} - \rho). \quad (3.3.11)$$

После этого в течение некоторого времени количество запаздывающих нейтронов $n_{зап}$ остается на прежнем уровне, а $n_{мгн}$ увеличивается сразу же до нового значения $n'_{мгн}$. Следовательно, уменьшается эффективная доля запаздывающих нейтронов ($n_{зап}/n'_{мгн} < n_{зап}/n_{мгн}$), и процесс протекает ускоренно до установления постоянного соотношения $n_{зап}(t)/n_{мгн}(t)$ и постоянного установившегося периода разгона. Нарушается баланс и при отрицательном

скачке ρ , но в этом случае $\beta_{\text{эф}}$ увеличивается, так как $n_{\text{МГН}}$ сразу же уменьшается, а $n_{\text{зап}}$ некоторое время остается на прежнем уровне. Поэтому при одинаковом по абсолютному значению скачке ρ от нулевого значения, но разного знака ($\pm\rho$) снижение Φ происходит медленнее, чем увеличение. При скачке $\rho < 0$ после снижения мощности на мгновенных нейтронах (3.3.2) до уровня $N(l)$ на величину

$$\Delta N^- = N_0 - N(l) = N_0 \rho / (\beta_{\text{эф}} + |\rho|) \quad (3.3.12)$$

ее дальнейший спад происходит примерно с периодом

$$T \approx \frac{\beta_{\text{эф}} + |\rho|}{|\rho|} \tau_{\text{зап}},$$

т. е. медленнее, чем при таком же положительном значении ρ (3.3.7). Через 2—3 мин скорость спада будет определяться постоянной распада наиболее долгоживущей группы ядер — предшественников запаздывающих нейтронов, т. е. периодом $T = 80,6$ с. Чем больше $|\rho|$, тем быстрее достигается этот период, но увеличить скорость снижения мощности с этого момента невозможно.

Соответственно изменение ρ , обуславливающее скачкообразное изменение мощности в N_2/N_1 раз в любую сторону, равно

$$\rho = \beta_{\text{эф}} (1 - N_1/N_2). \quad (3.3.13)$$

При работе ЯР на стационарной мощности запаздывающие нейтроны не играют никакой роли, так как дефицит в 0,7 % нейтронов после каждого деления компенсируется точно таким же количеством нейтронов, рождающихся из ранее появившихся осколков деления.

Скачкообразное изменение ρ от какого-либо значения $\pm\rho \neq 0$ также приводит к временному изменению соотношения $n_{\text{зап}}(t)/n_{\text{МГН}}(t)$, т. е. к переходному процессу, сопровождающемуся скачкообразным изменением Φ . При этом возрастание или убывание числа нейтронов в переходном процессе после скачка ρ определяется не алгебраическим знаком нового значения ρ , а знаком ее изменения (рис. 3.3.4).

С достаточной для практических целей точностью переходной

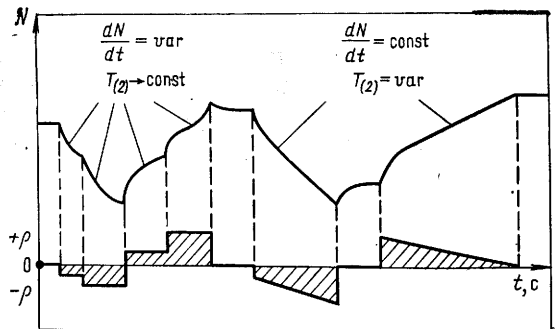


Рис. 3.3.4. Переходные процессы при различных скачках ρ

процесс при скачкообразном изменении ρ можно оценить по формуле

$$N(t) = N_0 \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\rho}{\beta - \rho} \frac{t}{\tau_{зап}}\right) - N_0 \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{l} t\right).$$

Второй член справа влияет только на переходной процесс в первые секунды после изменения ρ . Первый член представляет собой формулу (3.3.1) для случая (3.3.7).

При наличии источника нейтронов в активной зоне изменение мощности ЯР описывается в надкритическом состоянии следующей формулой [12]:

$$N(t) = N_0 e^{t/T} + \frac{N_{ист}}{\rho_{под}} (e^{t/T} - 1) = (N_0 + N_{под}) e^{t/T} - N_{под}, \quad (3.3.14)$$

где N_0 — мощность ЯР в момент увеличения ρ ; $N_{ист}$ — мощность источника; $N_{под} = N_{ист}/\rho_{под}$ — установившаяся мощность в ЯР при $\rho_{под} = |-\delta K_{эф}|$; T — установившийся период при надкритичности $+\delta K_{эф} = |-\delta K_{эф}| \approx \rho_{под}$.

При малых уровнях мощности, когда $\Phi_{ист}$ сравнима с общей плотностью потока нейтронов в ЯР, измеряемый экспериментально период не соответствует значению T , которое входит в приведенную формулу. Надкритичность, измеренная экспериментально по периоду T , в этом случае будет завышенной, так как источники нейтронов повышает скорость увеличения мощности (см. задачу 3.2.10). Это необходимо учитывать при градуировке органов регулирования по периоду (см. § 5.3).

Для измерения ρ используется несколько единиц:

а) исходя из определения ρ как отношения $\delta K_{эф}$ к полному значению $K_{эф}$, получим, что истинное значение ρ представляет собой положительное или отрицательное число, по абсолютному значению меньше единицы:

$$\rho = \pm \delta K_{эф}/K_{эф} = (\pm \delta K_{эф}/K_{эф}) \cdot 100 \text{ \%}.$$

Как всякую относительную величину, ρ можно выражать в процентах. Вернее сказать, в процентах выражается $\delta K_{эф}$ по отношению к полному $K_{эф}$, значение которого принимается за 100 %. В диапазоне $\rho < \beta_{эф}$ справедливо соотношение $\rho \approx \delta K_{эф}$. Физически $\delta K_{эф}$ и ρ численно дают относительное значение изменения мощности ЯР в очередном поколении ЯР (см. § 1.4).

Так как нормальной скорости изменения мощности соответствует ρ , примерно равное одной тысячной, то удобно в качестве единицы измерения ρ и взять единицу *тысячная доля* (т. д.):

$$1 \text{ т. д.} = 10^{-3} = 0,1 \text{ \%}.$$

При $\rho \approx \delta K_{эф} = \pm 0,1 \text{ \%} = 1 \text{ т. д.}$ в каждом очередном поколении делений мощность ЯР изменяется на $\pm 0,1 \text{ \%}$ уровня мощности предыдущего поколения делений. Иногда используется единица — *стотысячная доля* (с. т. д.):

$$1 \text{ с. т. д.} = 10^{-5}; \quad 1 \text{ т. д.} = 100 \cdot 10^{-5} = 100 \text{ с. т. д.};$$

б) *обратный час* (о. ч.) — это ρ , при которой $T=1 \text{ ч}=3600 \text{ с}$. Согласно (3.3.5)

$$1 \text{ о. ч.} = 1/3600 + \sum_i \beta_i / (1 + 3600\lambda_i).$$

Значение обратного часа зависит от времени жизни мгновенных нейтронов l и характеристик запаздывающих нейтронов λ_i и β_i . Это очень маленькая единица ($\sim 2,5 \cdot 10^{-5}$) и в настоящее время применяется на практике очень редко. Чтобы выразить ρ в обратных часах, необходимо ее истинное значение разделить на значение, соответствующее одному обратному часу;

в) ввиду исключительной важности обеспечения ядерной безопасности удобно в основу выбора единицы измерения ρ положить значение, соответствующее мгновенной критичности данного ЯР: $\rho = \beta_{эф}$. Эту единицу в иностранной литературе называют *доллар*. Сотая часть доллара называется *центом* (1 дол. = 100 цент). Центы непосредственно указывают процент предельного значения $\rho = \beta_{эф}$: 1 цент = 1 % $\beta_{эф} = 0,01$ дол.

Надкритичность, выраженная в долларах, равна истинному значению ρ , деленному на $\beta_{эф}$:

$$\rho (\text{дол.}) = \rho / \beta_{эф} = \delta K_{эф} / K_{эф} \beta_{эф} \text{ дол.}$$

Табличная или графическая зависимость ρ , выраженной в $\beta_{эф}$ (дол.), от периода (см. табл. 3.3.1 и рис. 3.3.2) удобна тем, что она справедлива практически для всех ЯР с различным $\beta_{эф}$ для данного типа ядерного топлива. Некоторое отличие будет для различных l , но для $l \leq 10^{-4}$ с при $T > 0,1$ с оно несущественно. Определив по периоду ρ в долларах, находим ее истинное значение, умножив на $\beta_{эф} = \gamma\beta$, где γ — эффективность запаздывающих нейтронов данного ЯР;

г) в практике измерений встречается также единица — *линейный сантиметр* (л. см) — ρ , соответствующая перемещению стержня АР данного ЯР на 1 см в области линейной части его интегральной характеристики. Например, для АР, характеристика которого представлена на рис. 3.4.3 кривой 1, 1 л. см = $6,5 \cdot 10^{-5}$. Эта единица в значительно большей степени, чем остальные, зависит от характеристик конкретного ЯР и его органов регулирования, поэтому использование ее в широком масштабе нецелесообразно.

Задачи с решениями

3.3.1. Мощность ЯР после высвобождения $\rho > 0$ увеличилась за 1 мин от 10 до 27 % $N_{ном}$. Чему равен $T_{(2)}$?

Решение. Согласно (3.3.1) и (3.3.4) $T = 60$ с, так как $N(1 \text{ мин})/N_0 = 2,7$, а $T_{(2)} \approx 0,7 T = 42$ с.

3.3.2. Мощность критического ЯР равна 0,5 % $N_{ном}$. После увеличения ρ мощность через 100 с достигла 0,8 % $N_{ном}$. Определить $T_{(2)}$ и ρ ($\beta_{эф} = 0,7$ %, $l = 10^{-5}$ с).

Решение. Согласно (3.3.1)

$$T_{(2)} = t \frac{\ln 2}{\ln [N(t)/N_0]} = 100 \frac{0,693}{0,470} = 147 \text{ с.}$$

Из табл. 3.3.1 для $T_{(2)}=147$ с находим $\rho=0,055$ дол. $=0,055 \cdot 0,7 = 0,038\%$. При решении не учтен первоначальный скачок мощности (3.3.11). Но при $\rho \ll \beta_{эф}$ им можно пренебречь: $\Delta N^+ \approx 0,03\%$ $N_{ном} \approx 0$.

3.3.3. При пуске ЯР выведен на заданную мощность с $T_{(2)}=30$ с. Определить надкритичность ЯР ($\beta_{эф}=0,7\%$).

Решение. По кривой (см. рис. 3.3.3) для $\beta_{эф}=0,7\%$ определяем, что периоду $T_{(2)}=30$ с соответствует $\rho=0,0012=0,12\%$.

3.3.4. В критическом ЯР ($\beta_{эф}=0,8\%$, $l=10^{-5}$ с), работающем на мощности $0,5\%$ $N_{ном}$, ρ скачком увеличилась на $+0,2\%$. Как изменится мощность в первую секунду и через 1 мин?

Решение. Согласно (3.3.2) при скачке $\rho=+0,2\%$ мощность скачком увеличится до $N(l) \approx 0,7\%$ $N_{ном}$, а потом будет расти с периодом (см. рис. 3.3.3) $T=25$ с ($T_{(2)}=17$ с) и через 1 мин достигнет $N(1 \text{ мин}) = 0,7 \cdot 2^{60/17} \approx 8\%$ $N_{ном}$.

3.3.5. Какой скачок ρ произошел в критическом ЯР ($\beta_{эф}=0,7\%$), если мощность резко увеличилась на 10% по сравнению с исходной и продолжает расти?

Решение. Согласно (3.3.1) $\Delta N^+/N_0 = \rho / (\beta_{эф} - \rho) = 0,1$, откуда $\rho = 0,1 \beta_{эф} / 1,1 = 0,09 \beta_{эф} = 0,063\%$. После скачка мощность будет расти с $T_{(2)} \approx 70$ с (определяем по графику рис. 3.3.2 для $\rho = 0,09 \beta_{эф} = 0,09$ дол.).

3.3.6. При работе ЯР на мощности 80% $N_{ном}$ сработала АЗ и мощность резко упала до 20% $N_{ном}$. Какая отрицательная ρ введена в активную зону ($\beta_{эф}=0,7\%$)?

Решение. Исходя из соотношения (3.3.13) для $\rho < 0$ получаем $\rho = (1 - N_1/N_2) \beta_{эф} = -3$ дол. $= -2,1\%$.

3.3.7. На сколько процентов от исходной изменится мощность ЯР сразу же после скачка ρ на: а) $+0,003$; б) $-0,003$ ($\beta_{эф}=0,007$)?

Решение. Из соотношений (3.3.11) и (3.3.12) для скачков мощности определяем $\Delta N^+ = 75\%$ N_0 ; $\Delta N^- = 30\%$ N_0 .

Несмотря на то что увеличение и уменьшение ρ равны по абсолютному значению $|0,003|$, результат изменения мощности получился различный. Физически это так и должно быть, поскольку изменение ρ представляет собой изменение количества нейтронов в новом поколении. Для иллюстрации можно привести такой пример: если исходное количество нейтронов, например 100, увеличить и уменьшить в 2 раза, то при увеличении получим изменение (прирост) на 100 нейтронов, т. е. 100% , а при уменьшении — изменение (убыль) на 50 нейтронов, т. е. 50% исходного количества.

3.3.8. Во сколько раз увеличится за 1 с мощность ЯР при $K_{эф} = 1,009$, $l = 10^{-4}$ с, $\beta_{эф} = 0,007$?

Решение. ЯР будет подкритичен на мгновенных нейтронах на величину $\delta K_{МГН} = K_{МГН} - 1 = K_{эф}(1 - \beta_{эф}) - 1 = \delta K_{эф} - K_{эф}\beta \approx 0,002$.

Согласно (3.3.10) $N(1 \text{ с}) \approx N_0 e^{20} \approx 5 \cdot 10^8 N_0$.

3.3.9. Каким должно быть время жизни поколения нейтронов, чтобы при $\delta K_{эф} = 0,01$ мощность за 1 мин увеличилась в 2 раза?

Решение. Согласно (3.3.10) $N(60 \text{ с})/N_0 = e^{0,01 \cdot 60/l} = 2$, откуда $l = 0,6/\ln 2 = 0,87 \text{ с}$.

3.3.10. Какому примерно $T_{(2)}$ соответствует увеличение мощности: а) с 10 до 20 % $N_{ном}$; б) с 50 до 60 % $N_{ном}$ и в) с 90 до 100 % $N_{ном}$, если оно происходит со скоростью 0,5 % $N_{ном}/\text{с}$?

Решение. Во всех рассмотренных в задаче случаях время увеличения мощности при постоянной скорости изменения (0,5 % $N_{ном}/\text{с}$) составит $t = (N_2 - N_1)/0,5 = 10/0,5 = 20 \text{ с}$.

Согласно (3.3.1) $N_2 = N_1 2^{20/T_{(2)}}$, откуда $T_{(2)} = 14/\ln(N_2/N_1)$. Следовательно, $T_{(2)}$ в каждом случае будет различным: а) $T_{(2)} \approx 20 \text{ с}$; б) $T_{(2)} \approx 75 \text{ с}$; в) $T_{(2)} = 130 \text{ с}$, а точнее, согласно (3.3.3) увеличение мощности начинается соответственно с: а) $T_{(2)} = 0,7dN/dt = 14 \text{ с}$; б) 70 с; в) 126 с, а заканчивается с: а) $T_{(2)} = 28 \text{ с}$; б) 84 с; в) 140 с, что в среднем [а) 21 с; б) 77 с; в) 133 с] почти соответствует полученному выше результату.

Вывод: для обеспечения постоянной скорости увеличения мощности необходимо с повышением мощности уменьшать положительную реактивность, т. е. увеличивать период (см. задачу 3.7.7). И наоборот, для получения постоянной скорости уменьшения мощности необходимо по мере ее снижения увеличивать отрицательную реактивность (уменьшать $K_{эф}$), чтобы абсолютное уменьшение количества делений оставалось постоянным несмотря на снижение текущей мощности. Например, чтобы при исходном уровне 100 дел/с снижение происходило с постоянной скоростью 10 дел/с, в первую секунду нужен $K_{эф} = 90/100 = 0,90$, в следующую — $80/90 = 0,89$, потом — $70/80 = 0,88$, а при текущем уровне, например, 20 дел/с $K_{эф} = 10/20 = 0,50$ и т. д. На рис. 3.3.4 показан характер изменения мощности ЯР при различных вариантах изменения ρ .

3.3.11. Прибор измерения мощности имеет логарифмическую шкалу делений. Как определить ρ , соответствующую данной скорости изменения мощности, если имеется таблица связи ρ и $T_{(2)}$?

Решение. По логарифмической шкале и секундомеру удобно отсчитывать время, в течение которого мощность увеличивается в 10 раз ($T_{(10)}$). Связь $T_{(10)}$ с $T_{(2)}$ можно определить исходя из закона изменения мощности (3.3.1):

$$N(T_{(10)}) = 10N_0 = N_0 2^{T_{(10)}/T_{(2)}} = N_0 e^{T_{(10)}/T},$$

откуда получаем соотношения (3.3.4):

$$T_{(2)} = 0,30T_{(10)}; \quad T = 0,43T_{(10)}.$$

Реактивность, соответствующую данному T или $T_{(2)}$, определяем по графику или таблице (см. рис. 3.3.2 и 3.3.3, табл. 3.3.1 и 3.3.2).

3.3.12. ЯР имеет $\rho_{зап} = 20$ дол., $\beta = 0,0064$, $\gamma = 1,25$. Чему равен $K_{эф}$?

Решение. Исходя из определения доллара (3.3.15), найдем $\rho = \rho$ (дол.) $\beta_{эф} = \rho$ (дол.) $\gamma \beta = 20 \cdot 1,25 \cdot 0,0064 = 0,15 = 15\%$; $K_{эф} = 1/(1-\rho) \approx 1,18$ и $\delta K_{эф} = K_{эф} - 1 = 0,18$.

3.3.13. Во сколько раз увеличится мощность за 1 мин при $\rho = +0,001$ в ЯР с: а) урановым и б) плутониевым топливом?

Решение. Используя характеристики запаздывающих нейтронов (приложение 12) и связь T и ρ по формуле (3.3.7), находим: а) $T \approx (\beta_{эф} - \rho) \tau / \rho = (0,7 - 0,1) \cdot 12 / 0,1 = 72$ с; $N(60 \text{ с}) / N_0 = e^{60/72} \approx 2$; б) $T \approx (0,3 - 0,1) \cdot 12 / 0,1 = 24$ с, $N(60 \text{ с}) / N_0 \approx 20$. При $\rho > 0,3\%$ (а если $\gamma \approx 1$, то при $\rho > 0,26\%$) плутониевый ЯР становится неуправляемым, в то время как для уранового в этом случае $T \approx 10$ с (см. рис. 3.3.3).

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем отличается экспоненциальный рост мощности от линейного?
2. Почему ценность запаздывающих нейтронов в ЯР больше, чем мгновенных?
3. Чем отличается изменение мощности при: а) $\rho_1 = +0,001$ и б) $\rho_2 = +0,01$?
4. Почему при $\rho > \beta_{эф}$ запаздывающие нейтроны не влияют на скорость изменения мощности?
5. Почему происходит первоначальный скачок мощности ($\pm \Delta N$) при скачке реактивности ($\pm \Delta \rho$)?
6. Мощность ЯР в надкритическом состоянии за 40 с увеличилась от 0,15 % до 0,30 % $N_{ном}$. С каким T и $T_{(2)}$ нарастает мощность?
7. Через какое время после быстрого увеличения ρ на: а) $0,5 \beta_{эф}$ и б) $0,05 \beta_{эф}$ сработает АЗ с уставкой по превышению мощности на 20 % заданной?
8. Мощность ЯР скачком увеличилась с 1,0 до 1,2 % $N_{ном}$. Чему равна ρ ? С каким $T_{(2)}$ будет продолжаться рост мощности?
9. До какого значения мощность ЯР скачком уменьшится от $N_{ном}$ при быстром введении в активную зону $\rho = -5 \beta_{эф} = -5$ дол.?
10. Какой в среднем скорости увеличения мощности соответствует переход с 20 до 30 % $N_{ном}$ с $T_{(2)} = 30$ с?
11. Мощность ЯР при пуске увеличивается с $T_{(2)} = 30$ с. За какое время она увеличится от 10^{-4} % до 1 % $N_{ном}$?
12. По логарифмической шкале указателя мощности за 120 с мощность увеличилась от 10^{-2} до 10^{-4} . С каким $T_{(2)}$ происходит рост мощности?
13. Определить ρ , соответствующую $K_{эф} = 1,07$, и выразить ее во всех известных единицах реактивности ($\beta_{эф} = 0,7\%$).

§ 3.4. ОРГАНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА

Для управления ЯР в нормальных и аварийных режимах характерны три вида регулирования реактивности: 1) компенсация большого запаса реактивности ($\rho_{зап} \gg \beta_{эф}$); 2) небольшие ($\rho < \beta_{эф}$) изменения ρ для управления мощностью ЯР; 3) быстрое уменьшение ρ для аварийной остановки ЯР.

Для компенсации $\rho_{зап}$, высвобождения его в процессе эксплуатации и создания необходимой подкритичности в остановленном ЯР используются поглотители нейтронов — компенсаторы реактивности (КР), конструктивно выполненные, например, в виде компенсирующих стержней (КС) или компенсирующих решеток, набранных из листов поглощающего нейтроны материала. Этот спо-

соб компенсации называют активным. Часть $\rho_{\text{зап}}$, расходуемая на выгорание и шлакование, может быть скомпенсирована пассивным способом — выгорающим поглотителем (ВП), находящимся в топливе, замедлителе или теплоносителе. В этом случае на долю КС приходится $\rho_{\text{зап}}$, который расходуется на компенсацию зависящих от режима работы эффектов (температурного и отравления Хе). Этот запас иногда называют *оперативным* ($\rho_{\text{зап}} = \rho_{\text{зап}}^{\text{ВП}} + \rho_{\text{зап}}^{\text{оп}}$).

Физический вес, или *компенсирующая способность*, — это реактивность, которую КС может скомпенсировать при введении в активную зону и соответственно высвободить при подъеме из активной зоны. Эффективность воздействия стержня на ρ определяется долей нейтронов, поглощенных им в ЯР, а также дополнительной утечкой нейтронов из ЯР, вызванной деформацией нейтронного поля. В зависимости от формы, размеров стержня и места расположения его в активной зоне эффект утечки может составлять более 50 % эффекта поглощения.

Физический вес всех КС ρ_{Σ} в ЯР без ВП должен удовлетворять условию

$$|\rho_{\Sigma}| \geq |\rho_{\text{H}} + \rho_{\text{Хе}} + \rho_{\text{t}} + \rho_{\text{N}}| + \Delta\rho_{\text{t}}^{\pm} + \rho_{\text{рез}} + |\rho_{\text{АР}}|,$$

а в ЯР с ВП

$$|\rho_{\Sigma}| \geq |\rho_{\text{Хе}} + \rho_{\text{t}} + \rho_{\text{N}}| + \Delta\rho_{\text{t}}^{\pm} + \rho_{\text{рез}} + \Delta\rho_{\text{к}}^{\pm} + |\rho_{\text{АР}}|,$$

где $|\rho_{\text{H}}|$ — часть $\rho_{\text{зап}}$, расходуемая на выгорание (с учетом воспроизводства), шлакование и стационарное отравление ^{149}Sm ; $|\rho_{\text{Хе}}|$ — на стационарное и нестационарное отравление ^{135}Xe ; $|\rho_{\text{t}}|$ и $|\rho_{\text{N}}|$ — на отрицательные температурный и мощностной эффекты; $\Delta\rho_{\text{t}}^{\pm}$ — возможное увеличение $\rho_{\text{зап}}$ за счет температурного эффекта (см. рис. 2.8.1, кривые I и II); $\rho_{\text{рез}}$ — резервный $\rho_{\text{зап}}$; $\rho_{\text{АР}}$ — физический вес одного стержня АР; $\Delta\rho_{\text{к}}^{\pm}$ — положительный и отрицательный выбеги ρ , обусловленные ВП.

Дифференциальная характеристика КС — это зависимость эффективности 1 мм перемещения стержня от положения его в активной зоне $d\rho_{\text{КС}}/dH = f(H)$, т. е. изменение ρ при перемещении стержня на 1 мм в различных по высоте положениях. Если физический вес стержня небольшой, то при погружении его в активную зону нейтронное поле по высоте практически не деформируется и дифференциальная характеристика имеет вид симметричной кривой (рис. 3.4.1, кривая 1). При погружении в активную зону сильного поглотителя или нескольких КС нейтронное поле искажается, смещаясь вниз. Максимум дифференциальной характеристики также смещается в нижнюю часть активной зоны (кривая 2).

Дифференциальная характеристика КС измеряется экспериментально (см. гл. 5). Она необходима для:

1) определения допустимого шага $h_{\text{ш}}$ подъема КС исходя из допустимого значения высвобождаемой реактивности ($\rho_{\text{доп}} = 0,1 \div$

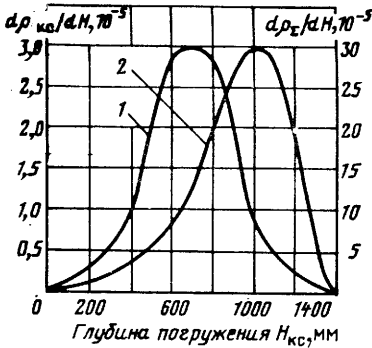


Рис. 3.4.1. Дифференциальная характеристика одного (1) и десяти (2) КС реактора ТР

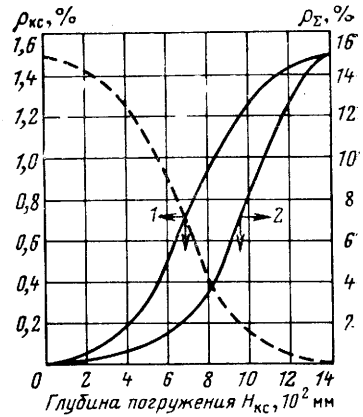


Рис. 3.4.2. Интегральная характеристика одного (1) и десяти (2) КС реактора ТР

0,2 %) и максимальной эффективности КС $(d\rho_{КС}/dH)_{\max}$ по высоте (см. задачу 3.4.1):

$$h_{\text{ш}} = \rho_{\text{доп}} / (d\rho_{КС}/dH)_{\max}, \text{ мм.} \quad (3.4.1)$$

Обычно $(d\rho_{КС}/dH)_{\max} \approx 2 (\overline{d\rho_{КС}/dH})$;

2) нахождения допустимой скорости подъема КС исходя из допустимой скорости высвобождения ρ (§ 4.2) $(d\rho/dt)_{\text{доп}}$ (1/с) и $(d\rho_{КС}/dH)_{\max}$ (см. задачу 3.4.13):

$$(dH_{КС}/dt)_{\text{доп}} = (d\rho/dt)_{\text{доп}} / (d\rho_{КС}/dH)_{\max}, \text{ мм/с;} \quad (3.4.2)$$

3) определения изменения ρ при небольшом перемещении КС на $\Delta H_{КС}$ (при расчете $H_{КС}^{\text{крит}}$, калибровке методом сравнения и др., см. задачи § 3.5 и 5.2):

$$\Delta\rho = \Delta H_{КС} (d\rho_{КС}/dH);$$

4) построения интегральной характеристики (см. задачу 5.4.2).

Интегральная характеристика КС — это зависимость суммарной реактивности, которую компенсирует КС (эффективности погруженной части КС), от глубины погружения его в активную зону:

$$\rho_{КС}(H) = \int_0^H \frac{d\rho_{КС}}{dH} dH. \quad (3.4.3)$$

На рис. 3.4.2 представлены интегральные характеристики одного и десяти КС реактора ТР, построенные сверху вниз активной зоны. Интегральную характеристику можно построить также снизу вверх. В этом случае она для каждого положения КС дает значение высвобожденной ρ при подъеме КС (см. рис. 3.4.2, пунктир).

Интегральная характеристика используется оператором для

расчета критического положения КС перед пуском ЯР (см. § 3.5), определения оставшегося $\rho_{\text{зап}}$ в любой момент кампании для оценки оставшегося энергозапаса (см. задачу 3.4.6), оценки высвобождаемой или компенсируемой ρ при перемещении КС на значительное расстояние (см. задачу 3.4.2), определения подкритичности ЯР после его остановки (см. задачу 3.4.3), анализа поведения ЯР при возникновении неисправностей с отдельными КС (см. § 4.2).

Реактор ТР имеет 10 КС, физический вес каждого $\rho_{\text{КС}} = 1,5\%$, а $(d\rho_{\text{КС}}/dH)_{\text{макс}} = 3 \cdot 10^{-5}$ 1/мм; суммарный физический вес без учета интерференции $\rho_{\Sigma} = 15\%$, а $(d\rho_{\Sigma}/dH)_{\text{макс}} = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/мм (см. рис. 3.4.1 и 3.4.2).

Реактор ВВЭР-440 имеет 73 регулировочные кассеты (РК) в 12 группах. Верхняя часть каждой РК содержит поглотитель нейтронов, нижняя — ядерное топливо. Это значительно увеличивает эффективности РК при перемещении в активной зоне. В табл. 3.4.1 приведены физические веса всех РК в зависимости от температуры теплоносителя и концентрации бора в нем.

Для регулирования ρ в пределах, необходимых для изменения мощности ЯР и поддержания ее на стационарном уровне, служит автоматический регулятор (АР).

Чтобы исключить при автоматическом управлении возможность высвобождения $\rho \geq \beta$, физический вес АР должен быть меньше доли запаздывающих нейтронов $|\rho_{\text{АР}}| < \beta$. Реактор ТР имеет два АР, эффективность которых $2\rho_{\text{АР}} = 2 \cdot 0,5\% = 1\%$.

Рабочим состоянием АР является такое его положение, при котором он, перемещаясь в обоих направлениях (вверх — вниз), изменяет ρ на одинаковую величину $\pm 0,5\rho_{\text{АР}}$. Так как характер интегральной характеристики АР (рис. 3.4.3) зависит от распределения Φ , которое в свою очередь определяется положением более тяжелых поглотителей (КС), рабочее положение АР может быть различным в зависимости от момента кампании и режима работы ЯР (задача 3.4.12). В ЯР с надежным саморегулированием (большой $|\alpha_t|$ и малый $|\alpha_N|$) необходимость в АР отпадает (см. § 2.8). В реакторе ВВЭР-440 для управления мощностью используется одна из РК, интегральная характеристика которой представлена на рис. 3.4.4, при остальных РК на ВКВ и $C_{\text{H}_2\text{O}} = 0$.

Для прекращения ЦР при возникновении аварийных ситуаций, требующих немедленной остановки ЯР, в активную зону с максимальной скоростью вводят поглотители нейтронов, или выводят часть топлива, или другим способом уменьшают ρ . Чаще всего для этого используют стержни — поглотители нейтронов, находящиеся в работающем ЯР вне активной зоны, а при необходимости под действием специальных устройств и собственного веса быстро по-

Таблица 3.4.1

Концентрация В, г/кг H ₂ O	$\rho_{\text{РК}}$, %, при температуре теплоносителя		
	20° С	150° С	285° С
1	—14,4	—18,5	—22,8
0	—15,3	—19,5	—23,4

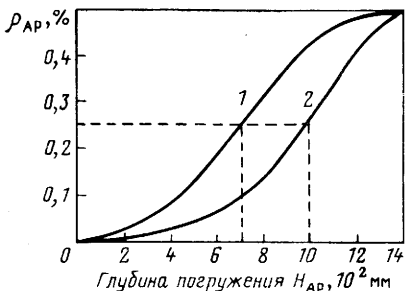


Рис. 3.4.3. Интегральная характеристика АР реактора ТР в неискаженном (1) и искаженном (2) стержнями КС нейтронном поле

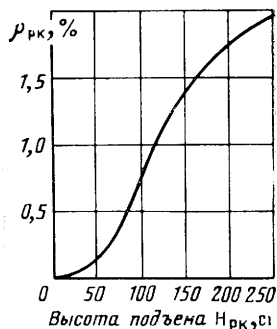


Рис. 3.4.4. Интегральная характеристика РК ВВЭР-440

грузающиеся в нее, в результате чего прекращается ЦР и ЯР удерживается в подкритическом состоянии до опускания в активную зону КС. Физический вес стержней АЗ должен быть не меньше первоначального положительного скачка ρ , обусловленного мощностным и температурным эффектами (см. § 2.8). Функция АЗ может быть возложена на отдельные КС, которые при пуске ЯР поднимаются в первую очередь, а при необходимости в любой момент с повышенной скоростью вводятся в активную зону. Так сделано в ЯР типа ВВЭР.

Реактор ТР имеет три стержня АЗ с физическим весом $3\rho_{AZ} = 3 \cdot 0,6 \% = 1,8 \%.$

Суммарная эффективность нескольких стержней, как правило, не равна сумме эффективностей каждого стержня, измеренных отдельно. Это явление называется *интерференцией*. Оно обусловлено влиянием одного стержня, искажающего нейтронное поле, на эффективность другого. Интерференция может быть нулевой, положительной и отрицательной:

$$\rho_{\Sigma} = k_{\Pi} \sum_i \rho_{КС}^i \quad (3.4.4)$$

где k_{Π} — коэффициент интерференции, который может быть ≥ 1 ; он зависит от расстояния между стержнями и их эффективности. Например, для стержней АЗ БН-600 $k_{\Pi} = + (1,15 \div 1,20)$. Суммарные характеристики 10 КС ρ_{Σ} (см. рис. 3.4.1 и 3.4.2) построены при условии нулевой интерференции ($k_{\Pi} = 1$) и при одинаковом физическом весе каждого из 10 стержней. В реальных условиях даже одинаковые стержни обычно имеют различную эффективность в зависимости от места расположения их в активной зоне. Для конкретного ЯР дифференциальная и интегральная характеристики каждого стержня определяются экспериментально с учетом интерференции в различных комбинациях.

Для управления реактивностью изменением концентрации бора в теплоносителе (жидкостное регулирование) необходимо знать зависимость от изменения концентрации бора на 1 г в 1 кг теплоносителя C_B (г/кг H_2O), т. е. борный коэффициент реактивности

$$\alpha_B = d\rho/dC_B \text{ кг } H_2O/\text{г } B,$$

а также его зависимость от температуры.

Так как бор используется в виде борной кислоты H_3BO_3 , то удобнее иметь коэффициенты реактивности по массовой концентрации H_3BO_3

$$\alpha_{H_3BO_3} = d\rho/dC_{H_3BO_3} \frac{\text{кг } H_2O}{\text{г } H_3BO_3},$$

где $C_{H_3BO_3} = 5,72C_B$ (см. задачу 4.2.6).

Изменение ρ при изменении концентрации H_3BO_3 на величину $\Delta C(t)$ (г/кг H_2O) за время t (ч) равно

$$\Delta\rho_{H_3BO_3}(t) = \alpha_{H_3BO_3}\Delta C(t). \quad (3.4.5)$$

Скорость управляемого изменения концентрации H_3BO_3 определяется подпиткой первого контура чистой водой (для уменьшения концентрации) или водой с повышенной концентрацией кислоты (для повышения концентрации). При начальной концентрации H_3BO_3 C_0 (г/кг H_2O) в объеме первого контура V (m^3), плотности воды при средней температуре теплоносителя γ ($кг/м^3$), концентрации H_3BO_3 в подпиточной воде $C_{\text{подп}}$ (г/кг H_2O), объемном расходе подпитки $G_{\text{подп}}$ ($m^3/ч$), плотности подпиточной воды $\gamma_{\text{подп}}$ ($кг/м^3$), объемном расходе продувочной воды $G_{\text{пр}}$ ($m^3/ч$), плотности продувочной воды $\gamma_{\text{пр}}$ ($кг/м^3$) концентрация H_3BO_3 в любой момент времени t (ч), в течение которого работали насосы,

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{G_{\text{пр}}\gamma_{\text{пр}}}{\gamma V} t\right) + G_{\text{подп}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{\text{пр}}\gamma_{\text{пр}}}{\gamma V} t\right)\right].$$

В случае подпитки чистой водой ($C_{\text{подп}} = 0$)

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{G_{\text{пр}}\gamma_{\text{пр}}}{\gamma V} t\right).$$

Если начальная концентрация H_3BO_3 равна нулю ($C_0 = 0$), то при подпитке контура борной водой в течение времени t

$$C(t) = G_{\text{подп}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{\text{пр}}\gamma_{\text{пр}}}{\gamma V} t\right)\right].$$

Маневренность системы борной компенсации характеризуют относительной скоростью снижения концентрации H_3BO_3 при разбавлении теплоносителя первого контура водой:

$$\frac{dC(t)}{dt} / C(t) = \frac{G_{\text{пр}}\gamma_{\text{пр}}}{\gamma V}.$$

Необходимо также учитывать уменьшение поглощающей способности H_3BO_3 вследствие выгорания изотопа ^{10}B в потоке нейтронов работающего ЯР.

Концентрацию $^{10}\text{В}$ в любой момент t кампании T при начальной концентрации $N_{0\text{В}}$ (ядер/см³) можно определить по формуле

$$N_{\text{В}}(t) = \frac{N_{0\text{В}}}{T} \left[\frac{T_{\text{Iк}}}{T_{\text{а.з}}} \frac{1}{\sigma_a \Phi} + \left(T - \frac{T_{\text{Iк}}}{T_{\text{а.з}}} \frac{1}{\sigma_a \Phi} \right) \exp \left(-\sigma_a \Phi \frac{T_{\text{а.з}}}{T_{\text{Iк}}} t \right) \right] = \\ = \frac{N_{0\text{В}}}{T} \left[\frac{V_{\text{Iк}}}{V_{\text{а.з}}} \frac{1}{\sigma_a \Phi} + \left(T - \frac{V_{\text{Iк}}}{V_{\text{а.з}}} \frac{1}{\sigma_a \Phi} \right) \exp \left(-\sigma_a \Phi \frac{V_{\text{а.з}}}{V_{\text{Iк}}} t \right) \right] \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

где $N_{0\text{В}}/T$ — скорость удаления $^{10}\text{В}$ по мере выгорания и шлакования топлива, ядер/(см³·с); Φ — средняя плотность потока тепловых нейтронов в ЯР, нейтр/(см²·с); σ_a — сечение поглощения тепловых нейтронов изотопом $^{10}\text{В}$, см²; $T_{\text{а.з}}/T_{\text{Iк}}$ — отношение времени прохождения единицы объема теплоносителя через активную зону, в течение которого происходит выгорание В, ко времени прохождения того же объема через весь первый контур, включая активную зону. Это отношение можно принять равным отношению объема теплоносителя в активной зоне $V_{\text{а.з}}$ к общему объему его в первом контуре $V_{\text{Iк}}$. Для ВВЭР-440 при $T=300$ эф. сут выгорание изотопа $^{10}\text{В}$ может достигнуть 10 % начального содержания и привести к заметному снижению эффективности $\text{H}_3\text{ВО}_3$ по реактивности [25].

Задачи с решениями

3.4.1. Оценить допустимый шаг $h_{\text{ш}}$ перемещения 10 и одного КС реактора ТР. Можно ли, и если да, то как и для чего, изменять шаг перемещения КС в процессе кампании?

Решение. Для определения допустимого $h_{\text{ш}}$ КС необходимо знать $d\rho_{\text{КС}}/dH$ и допустимую ρ , которую можно высвободить, поднимая КС на один шаг.

Ориентируясь на худший исход, нужно брать максимальное значение $d\rho_{\text{КС}}/dH$, которое в нашем случае для 10 стержней равно $3 \cdot 10^{-4} \text{мм}^{-1}$ (см. рис. 3.4.1).

Реактивность шага $\rho_{\text{ш}}$ должна обеспечивать нормальный период разгона (см. § 4.2). Например, можно поставить условие, чтобы $\rho_{\text{ш}} < 0,3\beta_{\text{эф}} \approx 0,002 = 0,2 \%$, чему соответствует $T \approx 20$ (см. рис. 3.3.3). В этом случае получим

$$h_{\text{ш}} = \rho_{\text{ш}} / \left(\frac{d\rho_{\Sigma}}{dH} \right)_{\text{макс}} = \frac{20 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-4}} = 6,6 \text{ мм}.$$

Мгновенная критичность при $\beta_{\text{эф}}=0,007$ и шаге 6,6 мм может наступить при перемещении всех КС от критического положения в области максимальной эффективности КС на $\Delta H = 7 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 10^{-4} = 23$ мм. Для одиночного КС соответствующие перемещения увеличиваются в 10 раз (без учета интерференции). Но на перемещение отдельного КС накладываются дополнительные ограничения, связанные с перекосами нейтронного поля (энерговыведения) в месте разбаланса в положениях КС.

При перемещении КС на один и тот же шаг высвобождаемая $\rho_{\text{ш}}$ будет различной в зависимости от положения КС по высоте

активной зоны, т. е. от $d\rho_K$

$H_{KC}^{крит}$ перемещается вверх (для ЯР без ВП это происходит в течение всей кампании, а для ЯР с ВП — в основном только в конце = 1020 мм на рис. 3.4.1), $\rho_{ш}$ идет через точку с $(d\rho_{KC}/dH)_{макс}$ ($H_{KC} = 720$ мм уменьшит $\rho_{ш}$ в 2 раза. Это значит, что шаг можно увеличить, сократив тем самым время пуска при тех же ограничениях по допустимому значению $\rho_{ш}$ (см. задачу 3.6.7).

Если при пуске ЯР желательнее выбрать меньшее состояние не контролируется пусковыми приборами, шаг $h_{ш} = 10^{-3}/(3 \cdot 10^{-4}) \approx 3$ мм и значение $d\rho_{ш}/dH$ ($\rho_{ш} = 0,14 \beta_{эф}$) будет равен $T \approx 60$ с (см. рис. 3.3.2).

3.4.2. При положении в казывает $\Phi_{под1} = 50$ делений на $\Delta H = 100$ мм установившейся $\Phi_{под2}$ соответствует 75 делениям.

Решение. Если есть характеристика КС, то критическое положение данного КС в реакторе ТР. интегральная или дифференциальная ха- рактеристика КС, то критическое положение ее можно определить по значению подкритичнос- тическое положение КС на 100 мм (3.2.9):

$$\rho_{под2} = \rho_{под1} + \Delta\rho / (\Phi_{под2} - \Phi_{под1}),$$

где $\Delta\rho$ — изменение ρ при перемещении одного КС от 1000 до 900 мм.

Если изменение положения КС небольшое, то более точно $\Delta\rho$ можно определить по дифференциальной характеристике (см. рис. 3.4.1, кривая 2):

$$\Delta\rho = (d\rho_{KC}/dH)_{950} \Delta H = (2,8 \cdot 10^{-5}) \cdot 100 = 2,8 \cdot 10^{-3} = 0,28 \%$$

Подкритичность ЯР по положению 1000 мм, таким образом, равна

$$\rho_{под2} = \rho_{под1} + \Delta\rho / (75 - 50) = 0,56 \%$$

Чтобы ЯР стал критическим, необходимо высвободить $\rho = 0,56 \%$, т. е. поднять КС на $\Delta H = 200$ мм в положение $\rho_{под1} = \rho_{под2} / (d\rho_{KC}/dH) = 5,6 \cdot 10^{-3} / (2,8 \cdot 10^{-5}) = 200$ мм.

Учитывая, что в небольшом интервале перемещения КС физический вес изменяется пропорционально глубине погружения (подъема), задачу можно решать непосредственно в единицах

$$\Delta H_{под} = \Phi_{под1} \Delta H / (\Phi_{под2} - \Phi_{под1}) = 50 \cdot 100 / 25 = 200 \text{ мм.}$$

В том случае, когда характеристик КС нет, критическое положение можно определить, построив пусковую кривую (см. задачу 5.2.4).

3.4.3. Чему равна подкритичность реактора ТР в начале кампании и в момент максимального положительного выбега ρ при: а) опущенных КС и б) опущенных КС, АР, АЗ?

Решение. В начале кампании КС компенсируют $\rho_{\text{зап}} = |\rho_{\text{хе}}| + |\rho_t| + |\rho_{\text{рез}}| = 12,5 \%$, а в момент максимального $\Delta\rho_{\text{ВП}}^+$ $\rho_{\text{зап}} = 12,5 + 1,0 = 13,5 \%$ (см. приложение 30 и рис. 2.9.2). При опущенных всех КС, имеющих $\rho_{\Sigma} = 15 \%$, в начале кампании $\rho_{\text{под}} = 15 - 12,5 = 2,5 \%$, а при опущенных КС, АЗ и АР $\rho_{\text{под}} = (15 + 1,8 + 1,0) - 12,5 = 5,3 \%$. В момент максимального выбега $\Delta\rho_{\text{ВП}}^+ = +1,0 \%$ и $\rho_{\text{под}}$ соответственно равно $1,5 \%$ и $4,3 \%$.

3.4.4. Реактор ТР в начале кампании имеет $\rho_{\text{зап}} = 0,125 = 12,5 \%$ $\beta_{\text{эф}} = 17,8$ дол. (при $\beta_{\text{эф}} = 0,7 \%$), скомпенсированный КС. Чему равно критическое положение КС при первом (физическом) пуске ЯР в холодном разотравленном состоянии и в момент максимума $\Delta\rho_{\text{ВП}}^+$?

Решение. Для компенсации $\rho_{\text{зап}} = 12,5 \%$ при поднятых АЗ и АР КС должны находиться в положении $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм (см. рис. 3.4.2). При $\Delta\rho_{\text{ВП}}^+ = 1,0 \%$ $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1270$ мм.

3.4.5. КС реактора ТР находится в положении 800 мм, $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 400$ мм. На сколько нужно поднять КС, чтобы подкритическая мощность ЯР увеличилась в 2 раза?

Решение. Согласно (3.2.5)

$$\frac{N_{\text{под } 1}}{N_{\text{под } 2}} = \frac{\rho_{\text{под } 2}}{\rho_{\text{под } 1}}, \text{ откуда } \rho_{\text{под } 2} = \rho_{\text{под } 1} \frac{N_{\text{под } 1}}{N_{\text{под } 2}} \rho_{\text{под } 1} \frac{1}{2}.$$

По интегральной характеристике КС (см. рис. 3.4.2) определяем $\rho_{\text{под } 1} = \rho_{\Sigma} (800 \text{ мм}) - \rho_{\Sigma} (400 \text{ мм}) = 3,5 - 0,5 = 3 \%$. Следовательно, для увеличения $N_{\text{под}}$ в 2 раза необходимо подкритичность уменьшить до значения $\rho_{\text{под } 2} = 3 \cdot 0,5 = 1,5 \%$, которому соответствует положение КС 600 мм (см. задачу 3.2.6). Тот же результат получается согласно (3.2.9).

3.4.6. В реакторе ТР в холодном разотравленном состоянии во второй половине кампании $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1240$ мм. Какой энергозапас ЯР отработал и какой еще имеет, если при прочих равных условиях в начале кампании $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм?

Решение. По интегральной характеристике КС (см. рис. 3.4.2) определяем, что при опускании КС с 1200 до 1240 мм компенсируется $\Delta\rho = 13,0 - 12,5 = 0,5 \%$. Так как в обоих случаях $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ соответствует одинаковым условиям (ЯР холодный, разотравлен по Хе), то по кривой энерговыработки для реактора ТР (см. рис. 2.9.2) находим, что увеличению $\Delta\rho = 0,5 \%$ соответствует энерговыработка 270 000 МВт·ч (3375 эф. ч, или 84 % $Q_{\text{ном}}$).

Оставшийся $\rho_{\text{зап}}$, скомпенсированный КС, равен 13 %. Он будет израсходован на температурный эффект, отравление Хе и энерговыработку. Для $N_{\text{ном}}$ реактора ТР $\rho_t = -3 \%$ (см. рис. 2.8.1), $\rho_0 \text{хе} = -4 \%$ (см. рис. 2.4.3), $\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = -5 \%$ (см. рис. 2.5.3). На энерговыработку остается $\Delta\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{зап}} - |\rho_t| + \rho_0 \text{хе} + \rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}} = 13,0 - 12,0 =$

$= 1,0 \%$. При постоянном $q_p = 10^{-7}$ 1/(МВт/ч) по формуле (2.9.3) или непосредственно по кривой энерговыработки (см. рис. 2.9.2) определяем оставшийся энергозапас для $N_{\text{ном}}$

$$\Delta Q_K = \frac{\Delta \rho_K}{q_p} = \frac{1,0}{10^{-5}} = 100\,000 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 31,3 \% Q_{\text{ном}}$$

и время работы $\Delta t = \Delta Q_K / N_{\text{ном}} = 10^5 / 80 = 1250$ ч.

Для меньших мощностей в связи с уменьшением ρ_0 Хе и $\rho_{\text{п.я}}$ значение $\Delta \rho_K$ будет больше и, следовательно, Q_K тоже увеличится.

В данной задаче полный энергозапас получился равным 370 000 МВт·ч вместо 320 000 МВт·ч. Это объясняется тем, что в расчете учтен также $\rho_{\text{рез}} = 0,5 \%$. В пересчете на энергозапас он дает $\Delta Q_K^{\text{рез}} = 0,5 \cdot 10^{-2} / 10^{-7} \approx 50\,000$ МВт·ч.

Примечание. Увеличение $\Delta \rho_K = +0,5 \%$ ($H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1240$ мм) может также соответствовать $Q_K = 85\,000$ МВт·ч в первой половине кампании, когда кривая энерговыработки стремится к максимуму (см. рис. 2.9.2). В этом случае еще нет необходимости рассчитывать оставшийся энергозапас.

3.4.7. Определить $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ в работающем реакторе ТР через 50 % кампании, если последние 3 сут он работает на $N_{\text{ном}}$. При первом пуске в холодном разотравленном состоянии $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм.

Решение. Изменение $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ по отношению к первоначальному пуску определяется изменением $\rho_{\text{зап}}$, которое в данном случае обусловлено: энерговыработкой 50 % $Q_{\text{ном}}$, равной 160 000 МВт·ч: $\Delta \rho_K = 1,0 \%$ (см. рис. 2.9.2); стационарным отравлением Хе для $N_{\text{ном}}$: $\rho_{\text{Хе}} = -4,0 \%$ (см. рис. 2.4.3); температурным эффектом: $\rho_t = -3,0 \%$ (см. рис. 2.8.1).

Суммарное изменение составляет $\Delta \rho = +1,0 - 4,0 - 3,0 = -6 \%$. По интегральной характеристике КС (см. рис. 3.4.2) определяем для $\rho_{\Sigma} = 12,5 - 6,0 = 6,5 \%$ $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 940$ мм.

3.4.8. Реактор ТР работает на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$ в течение 10 ч. В данный момент $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 990$ мм. До пуска ЯР 15 сут стоял после работы на мощности 75 % в течение месяца. Чему равен оставшийся энергозапас?

Решение. Для определения оставшегося энергозапаса необходимо знать энерговыработку. Для этого определим, на сколько и в какую сторону изменился $\rho_{\text{зап}}$, скомпенсированный КС в холодном разотравленном состоянии, по отношению к $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ при физическом пуске. Так как при физическом пуске $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм (см. задачу 3.4.4), а в данный момент $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 990$ мм, изменение $\Delta \rho_{\text{зап}} = \rho_{\Sigma}(990) - \rho_{\Sigma}(1200) = 7,8 - 12,5 = -4,7 \%$. Это суммарное изменение $\rho_{\text{зап}}$, обусловленное: отравлением Хе на $N = 80 \%$ через 10 ч работы: $\Delta \rho_{\text{Хе}} = -2,4 \%$ (см. задачу 2.4.6); прометиевым провалом, равным согласно решению задачи 2.7.2 $\Delta \rho_{\text{п.п}} = -0,3 \%$ (с учетом уменьшения прометиевого провала за 10 ч работы на мощности 80 %); температурным эффектом $\Delta \rho_t = -3,0 \%$ (см. рис. 2.8.1) и

энерговывработкой $\Delta\rho_{\text{к}}$, которую определим из соотношений $\Delta\rho_{\text{зап}} = -4,7\% = (\Delta\rho_{\text{хе}} + \Delta\rho_{\text{п.п}} + \Delta\rho_t) + \Delta\rho_{\text{к}}$; $\Delta\rho_{\text{к}} = -4,7 + 5,7 = +1,0\%$.

Как видно из кривой энерговывработки (см. рис. 2.9.2), $\Delta\rho_{\text{к}} = +1,0\%$ соответствует максимальному выбегу ρ при энерговывработке $160 \cdot 10^3$ МВт·ч. Если кривая энерговывработки уточнялась в процессе кампании и соответствует реальной, то оставшийся энергозапас равен $Q_{\text{ном}} = 160 \cdot 10^3$ МВт·ч без учета резервного (см. задачу 2.9.5) и дополнительного (см. задачу 2.9.7).

3.4.9. При пуске реактора ТР $\bar{t}_{\text{H}_2\text{O}} = 50^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{хе}} = 0$; $\rho_{\text{п.п}} = -0,3\%$; $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1000$ мм. Сколько часов еще сможет работать ЯР на мощности 100 и 50% $N_{\text{ном}}$?

Решение. Оставшийся $\Delta\rho_{\text{зап}}$ при данных условиях определяем по интегральной характеристике КС (см. рис. 3.4.2): $\Delta\rho_{\text{зап}} = |\rho_{\Sigma}(1000 \text{ мм})| = 0,08 = 8\%$. Следовательно, с момента первого пуска ЯР выработал $\Delta\rho_{\text{зап}} = 12,5 - (8 + 0,3) = 4,2\%$ (0,3% высвободится при выходе из прометиевого провала). Согласно кривой энерговывработки ЯР уже израсходовал $\rho_{\text{рез}} = 0,5\%$ и еще 3,7% из запаса на iodную яму, равного 5%. Таким образом, на компенсацию iodной ямы осталось $5,0 - 3,7 = 1,3\%$, что обеспечит при остановке с $N_{\text{ном}} t_{\text{д.ст}} < 1$ ч (см. рис. 2.5.2) и допустимое снижение мощности с $N_{\text{ном}}$ до уровня не ниже 50% $N_{\text{ном}}$ (см. рис. 2.5.5.). На $N_{\text{ном}}$ ЯР еще сможет работать до полного расходования $\rho_{\text{зап}}$ на iodную яму в течение $\Delta t = 1,3/q_p N_{\text{ном}} = 1,3/(80 \cdot 10^{-5}) \approx 1600$ ч. На $N = 50\%$ $\Delta t = (1,3 + 1,0)/(40 \cdot 10^{-5}) \approx 5700$ ч с учетом того, что дополнительный $\Delta\rho_{\text{зап}} = |\rho_0^{\text{100\%}}_{\text{хе}}| - |\rho_0^{\text{50\%}}_{\text{хе}}| = 4,0 - 3,0 = 1\%$ (см. рис. 2.4.3).

3.4.10. В холодном разотравленном состоянии реактора ТР $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 900$ мм. На какой максимальной мощности сможет работать ЯР не менее 40 ч?

Решение. Чтобы ЯР мог работать на мощности не менее 40 ч, он должен иметь $\Delta\rho_{\text{зап}}$, достаточный для компенсации ТЭР, и $\rho_0_{\text{хе}}$, которое устанавливается примерно за 40 ч работы. По интегральной характеристике КС (см. рис. 3.4.2) определяем, что в холодном разотравленном состоянии реактор ТР имеет $\Delta\rho_{\text{зап}} = |\rho_{\Sigma}(900 \text{ мм})| = 5,5\%$, а в разогретом $(5,5\% - \rho_t) = 2,5\%$. По графику стационарного отравления (см. рис. 2.4.3) находим, что $|\rho_0_{\text{хе}}| \leq 2,5\%$ для $N \leq 35\% N_{\text{ном}}$.

Таким образом, реактор ТР сможет работать не менее 40 ч на мощности 35%. Потеря $\Delta\rho_{\text{зап}}$ на энерговывработку ($\Delta\rho_{\text{к}} = q_p N t = 10^{-7} \cdot 0,35 \cdot 80 \cdot 40 \approx 0,01\%$) будет скомпенсирована выходом из прометиевого провала, который всегда дает положительный вклад после пуска ЯР.

3.4.11. Реактор ТР работает более 2 сут на $N_{\text{ном}}$ $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 680$ мм. До какого уровня можно снизить мощность, чтобы не попасть в iodную яму?

Решение. Чтобы избежать вынужденной остановки ЯР после снижения мощности, необходимо, чтобы $\rho_{\text{зап}}$ в момент снижения был не меньше глубины iodной ямы, соответствующей предполагаемому переходу. В данном случае $\Delta\rho_{\text{зап}} = [\rho_{\Sigma}(680 \text{ мм})] = 2\%$. По

графикам рис. 2.5.5 определяем, что глубина подной ямы будет меньше 2 % для перехода с $N_{\text{ном}}$ на мощность не ниже 35 %.

3.4.12. ВВЭР-440 работает на $N_{\text{ном}}$ при положении всех РК на ВКВ кроме одной, находящейся в положении $H_{\text{РК}}^{\text{крит}} = 140$ см. Концентрация бора в данный момент $C_{\text{В}} = 0,2$ г/кг H_2O и $\alpha_{\text{В}} = 0,087$ кг $\text{H}_2\text{O}/\text{В}$. Сколько эффективных суток еще сможет работать ЯР на $N_{\text{ном}}$?

Решение. Оставшийся $\Delta\rho_{\text{зап}}$ скомпенсирован РК и бором:

$$\Delta\rho_{\text{РК}}^{\text{зап}} = 1,93 - 1,30 = 0,63 \% \text{ (см. рис. 3.4.4);}$$

$$\Delta\rho_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{\text{зап}} = 5,72\alpha_{\text{В}}C_{\text{В}} = 5,72 \cdot 0,087 \cdot 0,2 = 0,1 \%;$$

$$\Delta\rho_{\text{зап}} = 0,63 + 0,1 = 0,73 \%.$$

При темпе выгорания $q_{\rho} = 0,03$ %/эф. сут

$$\Delta\tau_{\text{ном}} = 0,73/0,03 \approx 24 \text{ эф. сут.}$$

3.4.13. В каком положении должен находиться АР, имеющий интегральную характеристику 1 или 2 (см. рис. 3.4.3), чтобы обеспечить нормальное регулирование мощности ЯР? Какой должна быть скорость подъема АР, чтобы скорость высвобождения ρ была не более $0,04$ $\beta_{\text{эф}}/\text{с} = 2,8 \cdot 10^{-4}$ 1/с (при $\beta_{\text{эф}} = 0,007$)?

Решение. Чтобы АР, работая в режиме автоматического (или ручного) регулирования, мог одинаково успешно компенсировать положительные и отрицательные изменения ρ , он должен находиться в среднем по физическому весу положении. При $\rho_{\text{АР}} = 0,05$ % это соответствует положению, когда физический вес погруженной части АР составляет $0,5$ $\rho_{\text{АР}} = 0,25$ %. Следовательно, для АР с характеристикой 1 глубина погружения должна быть 700 мм, а с характеристикой 2 — 1000 мм.

Согласно (3.4.2), чтобы обеспечить $d\rho_{\text{АР}}/dt \leq 2,8 \cdot 10^{-4}$ 1/с при $d\rho_{\text{АР}}/dH = 6,5 \cdot 10^{-6}$ 1/мм (для линейной части характеристики АР, см. рис. 3.4.3), необходимо иметь скорость перемещения стержня $dH/dt \leq 2,8 \cdot 10^{-4}/6,5 \cdot 10^{-6} = 43$ мм/с.

3.4.14. В данный момент кампании реактора ТР $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 500$ мм. ЯР подкритичен, $H_{\text{КС}} = 600$ мм, а $H_{\text{АР}} = 1000$ мм. Пусковые приборы контролируют $5 \cdot 10^{-3}$ % $\Phi_{\text{ном}}$. На сколько и в какую сторону переместили АР, если Φ стала равной $7 \cdot 10^{-3}$ % $\Phi_{\text{ном}}$?

Решение. Так как Φ увеличилось, то, следовательно, АР высвободили ρ , т. е. переместились вверх. Исходя из закономерности изменения Φ при изменении подкритичности согласно (3.2.5) можно записать $\Phi_{\text{под1}}/\Phi_{\text{под2}} = \rho_{\text{под2}}/\rho_{\text{под1}} = [\rho_{\text{под(КС)}} - \delta\rho_{\text{(АР)}}]/\rho_{\text{под(КС)}}$, откуда получаем $\delta\rho_{\text{(АР)}} = \rho_{\text{под(КС)}}[1 - \Phi_{\text{под1}}/\Phi_{\text{под2}}] = 0,007(1 - 5/7) \approx 0,002$, где $\rho_{\text{под(КС)}} = \rho_{\Sigma}(600) - \rho_{\Sigma}(500) = 1,5 - 0,8 = 0,7$ % получено из характеристики КС (см. рис. 3.4.2).

Из рис. 3.4.3 (кривая 2) определяем, что для высвобождения $\rho = +0,2$ % необходимо АР поднять из положения 1000 мм (среднее рабочее положение) до 500 мм.

3.4.15. С какой скоростью нужно перемещать АР или КС реактора ТР, чтобы поддерживать мощность постоянной при увеличении

р со скоростью 10^{-5} 1/с, что может быть, например, при разогреве ЯР в диапазоне температур с положительным α_t или при разотравлении (выходе из иодной ямы, см. задачу 2.5.19)?

Решение. Чтобы обеспечить постоянство мощности при увеличении ρ , необходимо с такой же скоростью уменьшать ρ , опуская АР или КС. Скорость их погружения (3.4.2) зависит от $(d\rho/dH)$ в месте их перемещения и скорости высвобождения ρ , которую необходимо компенсировать $(d\rho/dt, \text{с}^{-1})$. Для АР в области линейной характеристики $d\rho_{\text{АР}}/dH \approx 6,5 \cdot 10^{-6}$ 1/мм (см. рис. 3.4.3), следовательно, $dH_{\text{АР}}/dt = 10^{-5}/(6,5 \cdot 10^{-6}) = 1,5$ мм/с.

Для 10 КС (см. рис. 3.4.1) $d\rho_{\Sigma}/dH = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/мм (максимальное значение) и $dH_{\text{КС}}/dt_{\Sigma^{-5}}/(3 \cdot 10^{-4}) = 3 \cdot 3 \cdot 10^{-2}$ мм/с ≈ 2 мм/мин.

Для одного КС в том же положении $d\rho/dH$ в 10 раз меньше, а следовательно, скорость перемещения должна быть в 10 раз больше, т. е. 20 мм/мин.

3.4.16. Реактор ТР, отработавший 80 % кампании, последние 60 ч работает на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$ в режиме автоматического регулирования. Через какое время при работе на стационарной мощности АР переместится от среднего рабочего положения (см. рис. 3.4.3) на 25 % хода? На сколько нужно поднять 10 КС, чтобы вернуть АР в среднее положение?

Решение. При работе на стационарной мощности, когда отравление Хе достигло максимального значения, изменение $\rho_{\text{зап}}$ происходит только из-за энерговыработки. После 80 % энерговыработки q_{ρ} становится постоянным, равным 10^{-7} 1/(МВт·ч) (см. рис. 2.9.2). Перемещению стержня на 25 % полного хода (на 350 мм от рабочего положения) соответствует высвобождение $\rho = 0,2$ %. Такое уменьшение ρ из-за энерговыработки при работе ЯР на мощности 64 МВт (80 % $N_{\text{ном}}$) произойдет через время (2.9.4)

$$t = \Delta Q/N = \Delta\rho/(Nq_{\rho}) = 0,2/(64 \cdot 10^{-5}) \approx 300 \text{ ч.}$$

Для возвращения АР в среднее положение необходимо поднять КС, чтобы высвободить $\rho = 0,2$ %. Перемещение зависит от их положения, т. е. от дифференциальной эффективности КС:

$$\Delta H_{\text{КС}} = 0,002/(d\rho_{\Sigma}/dH) \text{ мм.}$$

При работе на мощности 80 % $N_{\text{ном}}$ более 2 сут после 80 % кампании $\rho_{\text{зап}}$ уменьшится на $\Delta\rho = \Delta\rho_{\text{К}} + \Delta\rho_{\text{Хе}} + \rho t = +0,5\% - 3,7\% - 3,0\% = -6,2\%$ (см. рис. 2.9.2, 2.4.3 и 2.8.1) и КС будут находиться в положении $H_{\text{КС}}(12,5 - 6,2) = H_{\text{КС}}(6,3) = 930$ мм (см. рис. 3.4.2), для которого $d\rho_{\Sigma}/dH = 2,7 \cdot 10^{-4}$ (см. рис. 3.4.1). Следовательно,

$$\Delta H_{\text{КС}} = 2 \cdot 10^{-3}/2,7 \cdot 10^{-4} \approx 7,4 \text{ мм.}$$

3.4.17. Можно ли с помощью АР, находящегося в среднем по эффективности критическом положении, увеличить мощность в 2 раза скачком или за 20 с, если $\rho_{\text{АР}} = 0,2$ %?

Решение. Находясь в рабочем положении, АР может изменить ρ на $\pm 0,1$ %. При быстром подъеме АР полностью из актив-

ной зоны мощность согласно (3.3.2) скачком увеличится в $N(I)/N_0 = 0,7/(0,7-0,1) \approx 1,16$ раза. Следовательно, даже при полном быстром выводе АР из активной зоны мощность скачком увеличится менее чем в 2 раза.

Чтобы мощность плавно увеличилась в 2 раза за 20 с, необходимо высвободить ρ , которой соответствует $T_{(2)} = 20$ с, т. е. согласно рис. 3.3.2 $\rho = 0,23$ дол. $= 0,23 \beta_{эф} = 0,23 \cdot 0,7 = 0,16$ %. Это значит, что стержень, имеющий физический вес 0,2 %, даже будучи полностью выведенным из активной зоны (из среднего рабочего положения), обеспечит увеличение мощности в 2 раза не за 20 с, а только за 40 с (см. рис. 3.3.2). С учетом первоначального скачка значение мощности через 20 с

$$N(20 \text{ с}) = 1,16 N_0 \cdot 2^{20/40} = 1,16 \cdot 1,41 N_0 = 1,6 N_0.$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Из каких соображений выбираются физический вес КС, АР, АЗ и шаг КС?
2. Какую часть $\rho_{зап}$ можно компенсировать ВП?
3. Как по $H_{КС}^{крит}$ определить оставшийся $\rho_{зап}$?
4. Во сколько раз может отличаться допустимый шаг перемещения всех КС реактора ТР в области 1000 и 600 мм?
5. В реакторе ТР $H_{КС} = 600$ мм; $H_{КС}^{крит} = 400$ мм. В какое положение нужно поднять КС, чтобы $N_{под}$ увеличилась в 3 раза?
6. Исходное положение АР, имеющего характеристику 1 (см. рис. 3.4.3), равно 700 мм. В каком исходном положении должен находиться АР с характеристикой 2, чтобы за такое же время, как и первый АР, при одинаковой скорости их перемещения скомпенсировать высвобождение $\rho = 0,002$?
7. С какой скоростью будет высвобождаться ρ при подъеме АР (см. рис. 3.4.3) из рабочего положения со скоростью 100 мм/с?
8. С какой скоростью будет перемещаться АР в режиме автоматического регулирования реактора ТР, чтобы поддержать мощность постоянной после выхода на 90 % $N_{ном}$ из одной ямы (см. задачу 2.5.19)?
9. Каким должен быть физический вес АР при $\beta_{эф} = 0,007$, чтобы он мог, находясь в рабочем положении, компенсировать быстрое увеличение ρ , приводящее к скачку мощности на 20 % заданной?
10. Какой темп подъема КС [мм/(МВт·ч)] в линейной части их интегральной характеристики соответствует $q_0 = 10^{-7}$ 1/(МВт·ч)?
11. Реактор ТР 3 сут работает на $N = 50$ %, $H_{КС}^{крит} = 600$ мм. Сколько еще можно работать на этой мощности, чтобы потом иметь возможность увеличить ее до $N_{ном}$ и работать 10 сут?
12. После 4 сут работы реактора ТР на $N = 60$ % $H_{КС}^{крит} = 700$ мм. Сколько еще сможет работать ЯР на $N_{ном}$?
13. В холодном разотравленном состоянии реактора ТР $H_{КС}^{крит} = 850$ мм. На какой максимально возможной мощности сможет работать ЯР в течение 30 сут?

§ 3.5. РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ КС

Одна из основных задач оператора, обеспечивающих безопасность пуска ЯР, — расчет критического положения КС и необходи-

мой концентрации H_3BO_3 (если она используется) в момент пуска.

Критическое положение КС $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ при пуске ЯР определяется по формуле

$$H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = H_{\text{КС}}^* (\rho_{\text{КС}}^*) \pm \Delta H (\Delta \rho) = H_{\text{КС}} (\rho_{\text{КС}}^* + \Delta \rho), \quad (3.5.1)$$

где $H_{\text{КС}}^*$ — критическое положение КС в любой предыдущий момент времени t^* (в момент физического пуска, предыдущего пуска, последней остановки); $\rho_{\text{КС}}^*$ — физический вес КС, соответствующий положению $H_{\text{КС}}^*$; $\Delta \rho$ — изменение $\rho_{\text{зап}}$ с момента t^* до момента пуска; $\pm \Delta H_{\text{КС}}$ — изменение положения КС, обусловленное изменением $\rho_{\text{зап}}$ на величину $\pm \Delta \rho$; $H_{\text{КС}}$ — положение КС, соответствующее физическому весу $(\rho_{\text{КС}}^* + \Delta \rho)$.

Изменение $\rho_{\text{зап}}$ с момента известного критического положения КС до момента очередного пуска в общем случае равно

$$\Delta \rho = \pm \Delta \rho_{\text{R}} \pm \Delta \rho_{\text{Xe}} \pm \Delta \rho_{\text{Sm}} \pm \Delta \rho_{\text{N}} \pm \Delta \rho_{\text{AP}} \pm \Delta \rho_{\text{H}_3\text{BO}_3}, \quad (3.5.2)$$

где: 1) изменение $\rho_{\text{зап}}$ вследствие выгорания, шлакования, воспроизводства топлива и стационарного отравления ^{149}Sm ($\Delta \rho_{\text{R}}$) определяется по кривой энерговыработки (см. рис. 2.9.1). Если на рассматриваемом участке q_{p} постоянный, то $\Delta \rho_{\text{R}} = q_{\text{p}} \Delta Q_{\text{R}}$ (2.9.3). В том случае, когда за известное критическое положение КС берется $H_{\text{КС}}^*$ в момент последней остановки ЯР, $\Delta Q_{\text{R}} = 0$, а следовательно, и $\Delta \rho_{\text{R}} = 0$. В ЯР без ВП всегда $\Delta \rho_{\text{R}} \leq 0$, а в ЯР с ВП эта величина может быть также и положительной;

2) изменение $\rho_{\text{зап}}$ вследствие стационарного и нестационарного отравления Xe ($\Delta \rho_{\text{Xe}} = \pm \rho_{\text{Xe}} \pm \Delta \rho_{\text{и.я}}$) определяется по кривым рис. 2.5.2 для той мощности (\bar{N}_{40}^*), на которой ЯР работал перед предыдущим пуском и перед настоящим (\bar{N}_{40}), или же аналитическим способом (см. рис. 2.5.4). В обоих случаях

$$\Delta \rho_{\text{Xe}} = \rho_{\text{Xe}} (\bar{N}_{40}) - \rho_{\text{Xe}} (\bar{N}_{40}^*).$$

Мощность усредняется за последние ~ 40 ч работы (см. § 2.5);

3) стационарное отравление Sm , если оно не учтено в кривой энерговыработки и еще не достигло стационарного уровня, определяется по кривой рис. 2.6.3 с учетом энерговыработки между пусками. Прометиевый провал необходимо учитывать по графикам рис. 2.7.4 или исходя из формулы (2.7.4):

$$\Delta \rho_{\text{п.п}} = \frac{\rho_{\text{п.п}}^{\text{ном}}}{N_{\text{ном}}} [\bar{N}_{10}^* K_{\text{п.п}}(t_{\text{ст}}^*) - \bar{N}_{10} K_{\text{п.п}}(t_{\text{ст}})],$$

где \bar{N}_{10}^* и \bar{N}_{10} — средняя мощность за последние ~ 10 сут работы (см. § 2.7) перед предыдущим и настоящим пуском (в тех же единицах, что и $N_{\text{ном}}$); $t_{\text{ст}}^*$ и $t_{\text{ст}}$ — время стоянки соответственно; $K_{\text{п.п}}$ определяется по кривой рис. 2.7.3;

4) изменение $\rho_{\text{зап}}$ вследствие различия температуры в момент t^* и в момент пуска ($\Delta \rho_t$) определяется по графикам температурного эффекта (см. рис. 2.8.1);

5) если имеет место мощностной эффект, то его нужно учитывать в том случае, когда $H^*_{КС}$ соответствует моменту остановки ЯР с мощности N^*

$$\Delta\rho_N = + |\alpha_N N^*| ;$$

6) изменение положения органов регулирования дает вклад в $\pm\Delta\rho$ на величину $\pm\Delta\rho_{АР}$, определяемый по характеристикам этих поглотителей;

7) изменение концентрации H_3BO_3 в контуре теплоносителя между пусками на величину $\Delta C_{H_3BO_3}$ (г/кг H_2O) изменит $\rho_{зап}$ на $\Delta\rho_{H_3BO_3}$ (3.4.5).

В связи с изменением физических характеристик, используемых в расчете $H^*_{КС}$, возможна погрешность в определении составляющих $\Delta\rho$ на величину $\pm\Delta\rho_{пор}$. Особенно опасна погрешность, завышающая уменьшение $\rho_{зап}$, когда КС придется поднимать выше действительного $H^*_{КС}$. Поэтому для безопасности нужно к $\pm\Delta\rho$ прибавить $+\Delta\rho_{пор} \approx 0,5\beta_{эф}$ (см. гл. 4).

Определив суммарное изменение $\rho_{зап}$ за время между пусками, находим по характеристикам КС (рис. 3.4.2) критическое положение КС для пуска ЯР. При малом значении $\pm\Delta\rho$ ($<0,5\%$) и незначительном изменении $d\rho_{КС}/dH$ в районе $H^*_{КС}$ более точный результат получим при использовании дифференциальной характеристики (см. рис. 3.4.1)

$$\Delta H_{КС} = \pm \Delta\rho / (d\rho_2/dH)_{H^*_{КС}} \text{ мм.}$$

Если для компенсации $\rho_{зап}$ используются жидкий поглотитель и КС, то перед пуском ЯР производится расчет критической массовой концентрации H_3BO_3 и критического положения КС из условия, чтобы после достижения необходимого уровня мощности и стабилизации температуры и отравления Хе в активной зоне оставались только КС, необходимые для управления ЯР, при минимальном искажении распределения энерговыделения. При этом нужно учитывать зависимость эффективности КС от концентрации борной кислоты.

При пуске ВВЭР сначала рассчитывают критическую массовую концентрацию H_3BO_3 в первом контуре ($C^*_{H_3BO_3, расч}$) при текущей температуре теплоносителя в момент пуска для полностью извлеченных из активной зоны РК

$$C^*_{H_3BO_3, расч} = C^*_{H_3BO_3}(\rho^*) \pm \Delta C_{H_3BO_3}(\Delta\rho),$$

где $C^*_{H_3BO_3}$ — известная критическая массовая концентрация в любой предыдущий момент времени (лучше в момент предыдущего пуска или последней остановки); $\Delta C_{H_3BO_3}$ — изменение $C_{H_3BO_3}$ по отношению к $C^*_{H_3BO_3}$, обусловленное изменением $\rho_{зап}$ на $\Delta\rho$ (3.5.2):

$$\Delta C_{H_3BO_3} = \Delta\rho / \alpha_{H_3BO_3} = 5,72\Delta\rho / \alpha_B.$$

Текущая концентрация в момент расчета ($C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{тек}}$) может отличаться от рассчитанной: $C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{кр.расч}} \geq C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{тек}}$. Если $C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{кр.расч}} > C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{тек}}$, выход ЯР в критическое состояние произойдет при некотором промежуточном положении одной из групп РК, поэтому необходимо рассчитать $H_{\text{РК}}^{\text{крит}}$. Если $C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{кр.расч}} = C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{тек}}$, то ЯР станет критическим при полностью извлеченных РК. Следует ожидать выхода в критическое состояние при подъеме последней группы РК (см. в § 4.2 о пусковом интервале). Если $C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{кр.расч}} < C_{\text{H}_2\text{VO}_3}^{\text{тек}}$, выход ЯР в критическое состояние произойдет после извлечения всех РК в процессе последующего уменьшения массовой концентрации H_2VO_3 .

В [25] рассмотрены конкретные задачи для ВВЭР с борным регулированием.

Задачи с решениями

3.5.1. Реактор ТР с начала кампании работал на $N_{\text{ном}}$ 30 сут, потом был остановлен. Определить $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ для очередного пуска через 15 сут стоянки при средней температуре теплоносителя 100°C . При первом пуске в холодном разотравленном состоянии было $H_{\text{КС}}^* = 1200$ мм.

Решение. Согласно (3.5.1), $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = H_{\text{КС}}^* (1200 \text{ мм}) \pm \pm \Delta H_{\text{КС}}(\Delta\rho) = H_{\text{КС}}^* (12,5 \pm \Delta\rho)$, где положению $H_{\text{КС}}^*$ соответствует $\rho_{\text{КС}}^* = 12,5\% = 0,125$ (см. рис. 3.4.2), а изменение $\rho_{\text{зап}}$ (3.5.2) с момента первого пуска (при $\rho_{\text{к}} = 0$, $\rho_{\text{хе}} = 0$, $\rho_t = 0$ при $\bar{t} = 25^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{п.п}} = 0$) определяется тремя составляющими: $\Delta\rho = +\Delta\rho_{\text{к}} - \Delta\rho_t - \Delta\rho_{\text{п.п}}$. Значение $\Delta\rho_{\text{к}}$ определяем непосредственно по кривой энерговыработки (см. рис. 2.9.2), так как на этом участке до установления стационарного отравления ^{149}Sm $q_{\text{р}}$ переменный. Для $\Delta Q_{\text{к}} = Nt = 80 \cdot 30 \times \times 24 = 57\,600$ МВт·ч $\Delta\rho_{\text{к}} = +0,25\%$. По кривой температурного эффекта (см. рис. 2.8.1) определяем $\Delta\rho_t = \rho_t(100^\circ\text{C}) - \rho_t(25^\circ\text{C}) = -0,6\%$. Прометиевый провал для данного случая определен в задаче 2.7.5: $\Delta\rho_{\text{п.п}} \approx -0,5\%$.

Таким образом, $\Delta\rho = +0,25 - 0,6 - 0,5 = -0,85\% = -0,0085$. По интегральной характеристике КС определяем для

$$\rho_{\Sigma} = \rho_{\Sigma}^* + \Delta\rho = 0,125 - 0,0085 = 0,116 = 11,6\% : H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1150 \text{ мм.}$$

Сержни АР нужно поднять в то же положение, чтобы $\Delta\rho_{\text{АР}} = 0$.

3.5.2. Реактор ТР работал 4 сут на $N_{\text{ном}}$. В момент остановки $\bar{t} = 250^\circ\text{C}$, $H_{\text{КС}}^* = 920$ мм. Определить $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ при очередном пуске: 1) через 10 ч при $\bar{t} = 140^\circ\text{C}$; 2) через 28 ч при $\bar{t} = 100^\circ\text{C}$; 3) через 100 ч при $\bar{t} = 50^\circ\text{C}$.

Решение. Поскольку ЯР до остановки работал на постоянной мощности более 40 ч, в нем установилось $\rho_{\text{хе}} = -4,0\%$ (см. рис. 2.4.3). Потеря $\rho_{\text{зап}}$ из-за ТЭР равна 3% (см. рис. 2.8.1). После остановки изменение $\rho_{\text{зап}}$ в момент пуска согласно (3.5.2) равно $\Delta\rho = \pm\Delta\rho_{\text{хе}} \pm \Delta\rho_t \pm \Delta\rho_{\text{п.п}}$. Составляющая $\Delta\rho_{\text{к}} = 0$, так как расчет ведется по отношению к моменту остановки ЯР. Определим для

каждого из трех случаев, указанных в задаче, остальные составляющие и соответствующее $H_{КС}^{крит}$.

1. Через 10 ч после остановки наступит максимум иодной ямы (см. задачу 2.5.5): $\Delta\rho_{Хе} = \rho_{и.я} = -0,05 = -5\%$. В результате снижения температуры до 140°C $\Delta\rho_t = \rho_t(140^\circ\text{C}) - \rho_t(250^\circ\text{C}) = -1,0 + 3,0 = +2\% = +0,02$.

Прометиевым провалом через 10 ч после остановки можно пренебречь, так как он даже через 53 ч (период полураспада Рm) равен всего $-0,17\%$ (см. задачу 2.7.3).

Итак $\rho_{зап}$ по сравнению с моментом остановки изменится на $\Delta\rho = -0,05 + 0,02 = -0,03 = -3\%$, и, следовательно, новому $H_{КС}^{крит}$ будет соответствовать $\rho_{з} = \rho_{КС}^* + \Delta\rho = 6,0 - 3,0 = 3,0\%$. Из

рис. 3.4.2 находим $H_{КС}^{крит}(3) = 770$ мм.

2. Через 28 ч отравление Хе как раз соответствует концу иодной ямы (см. рис. 2.4.10); следовательно, $\Delta\rho_{Хе} = 0$. Составляющая $\Delta\rho_t = +2,4\%$; $\Delta\rho_{п.п} \approx -0,1\%$, что составляет половину того значения, которого он достигнет через 53 ч (см. задачу 2.7.3).

Таким образом, $\Delta\rho = +2,4 - 0,1 = +2,4\%$ и соответственно $H_{КС}^{крит}(6+2,3) = H_{КС}^{крит}(8,3) = 1010$ мм.

3. Через 100 ч Хе практически полностью распадется. Следовательно, по отношению к моменту остановки в результате разотравления высвободится $\Delta\rho_{зап}$, равная $|\rho_{Хе}^{100\%}| = +4,0\%$. Составляющая $\Delta\rho_t = 2,8\%$. Прометиевый провал за два периода полураспада Рm достигнет 75% максимального значения, равного $-0,0035$, т. е. будет равен $\Delta\rho_{п.п} = 0,75(-0,0035) = -0,26\%$.

Следовательно, $\Delta\rho = +4,0 + 2,8 - 0,26 = +6,54\%$; $H_{КС}^{крит}(6 + 6,54) = H_{КС}^{крит}(12,54) = 1200$ мм.

Итак, $H_{КС}^{крит}$ при очередном пуске ЯР может быть выше, ниже или в том же положении, что и в момент остановки. Все зависит от времени пуска после остановки и температуры теплоносителя. Учет изменения $\rho_{зап}$ из-за изменения отравления и температуры по отношению к тому моменту, когда было известно $H_{КС}^*$, является очень ответственной задачей. Ошибка в значении и особенно в знаке соответствующего изменения $\rho_{зап}$ может внести существенную погрешность в расчет $H_{КС}^{крит}$, что усложнит условия пуска ЯР, а если ошибка приведет к завышению расчетного положения КС, то и к более опасным последствиям, связанным с пуском ЯР с очень малым периодом (см. § 3.6 и 4.2).

3.5.3. При выводе реактора ТР на мощность в момент максимального прометиевого провала, соответствующего мощности 50% $N_{ном}$ при температуре 60°C и $Q_{к} = 3 \cdot 10^5$ МВт·ч, $H_{КС}^{крит} = 1180$ мм по глубине погружения. После 20 сут работы на $N_{ном}$ ЯР остановлен. Определить $H_{КС}^{крит}$ при очередном пуске: 1) через 10 ч при $\bar{t} = 200^\circ\text{C}$ и 2) через 150 ч при $\bar{t} = 60^\circ\text{C}$.

Решение. Для $H_{КС}^* = 1180$ мм $\rho_{КС}^* = 12\% = 0,12$ (см. рис. 3.4.2) при $\rho_t(60^\circ\text{C}) = -0,20\%$ (см. рис. 2.8.1); $\rho_{Хе} = 0$, $\rho_{п.п} = \rho_{п.п}^{50\%} =$

$= -0,25\%$ (см. рис. 2.7.2). Изменение $\rho_{\text{зап}}$ к моменту очередного пуска произойдет за счет температурного эффекта, энерговыработки, изменения отравления Xe и Sm. Определим эти составляющие.

1. ЯР уже отработал более 90% кампании (см. рис. 2.9.2). В это время q_0 имеет отрицательное постоянное значение, равное $10^{-7} \text{ 1/(МВт}\cdot\text{ч)}$. В таком случае $\Delta\rho_{\text{к}} = -10^{-7} \cdot 80 \cdot 20 \cdot 24 = -0,0038 = -0,38\%$.

Примечание. Величину $\Delta\rho_{\text{к}}$ можно оценить непосредственно по кривой энерговыработки (см. рис. 2.9.3), зная энерговыработку за время между пусками, которая в реальных условиях всегда известна.

Отравление Xe через 10 ч после остановки будет соответствовать максимуму иодной ямы (см. рис. 2.5.2 и 2.5.3). Следовательно, по отношению к предыдущему пуску, где отравления Xe не было, $\Delta\rho_{\text{Xe}} = \rho_0 \text{Xe} + \rho_{\text{и.я}} = -4,0\% - 5,0\% = -9,0\%$.

Составляющая $\Delta\rho_t = \rho_t(200^\circ\text{C}) - \rho_t(60^\circ\text{C}) = -1,9 + 0,2 = -1,7\%$.

Глубина прометиевого провала при предыдущем пуске $\rho_{\text{п.п}} = 0,5(-0,005) = -0,0025 = -0,25\%$ (см. рис. 2.7.2). За 20 сут работы на $N_{\text{ном}}$ этот $\Delta\rho_{\text{зап}}$ высвободится и восстановится стационарное отравление Sm. Концентрация Рm достигнет равновесного значения для $N_{\text{ном}}$. После остановки начнется прометиевый провал, но через 10 ч им еще можно пренебречь. Поэтому $\Delta\rho_{\text{п.п}} = +|\rho_{\text{п.п}}^{50}| = +0,25\%$. Таким образом, $\Delta\rho = -0,38 - 9,0 - 1,7 + 0,25 = -10,83\%$, $\rho_{\text{КС}} = 12,0 - 10,8 = 1,2\%$ и $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}(1,2\%) = 570 \text{ мм}$ (см. рис. 3.4.2).

2. Через 150 ч после остановки составляющая энерговыработки остается той же, что и в первом случае: $\Delta\rho_{\text{к}} = -0,38\%$. Отравление Xe практически равно нулю, как и при предыдущем пуске. Так как температуры в обоих случаях пусков одинаковые, то $\Delta\rho_t = 0$. Прометиевый провал через 150 ч почти достигнет максимального значения, равного $-0,5\%$. Следовательно, $\Delta\rho_{\text{п.п}} = \Delta\rho_{\text{п.п}}^{100\%} - \rho_{\text{п.п}}^{50\%} = -0,5 + 0,25 = -0,25\%$.

Таким образом, $\Delta\rho = -0,38 - 0,25 = -0,63\%$, $\rho_{\text{КС}} = \rho_{\text{КС}}^* + \Delta\rho = 12,0 - 0,6 = 11,4\%$ и $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}(11,4) = 1260 \text{ мм}$.

3.5.4. При работе реактора ТР на $N_{\text{ном}}$ через 10 ч после пуска сработала АЗ. КС пошли вниз, но критическое положение их не было зафиксировано. Определить $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ через 8 ч после срабатывания АЗ при $\bar{t} = 150^\circ\text{C}$, если в момент пуска было $H_{\text{КС}}^* = 1100 \text{ мм}$ при $\bar{t} = 100^\circ\text{C}$ и полном разотравлении по Xe.

Решение. В данном случае $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ можно определить, используя известное $H_{\text{КС}}^*$ при выходе на $N_{\text{ном}}$ [1100 мм при $\rho_{\text{Xe}} = 0$, $\rho_t \rho_{\text{зап}}(100^\circ\text{C}) = -0,6\%$]. За 10 ч работы и 8 ч стоянки изменение к моменту пуска произошло: а) из-за температурного эффекта на $\Delta\rho_t = -1,1 + 0,6 = -0,5\%$; б) вследствие отравления Xe на $-4,5\%$ (см. рис. 2.5.11). Уменьшением $\rho_{\text{зап}}$ вследствие энерговыработки за 10 ч на мощности 80 МВт можно пренебречь.

Суммарное изменение $\rho_{\text{зап}}$ и новое $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ равны: $\Delta\rho = -0,5 -$

$$-4,5 = -5 \% ; H_{КС}^{крит} (10,5-5) = H_{КС}^{крит} (5,5) = 900 \text{ мм (см.)}$$

рис. 3.4.2).

3.5.5. Реактор ТР работал более 2 сут на $N_{ном}$. Произошла временная остановка ЯР. Какую нужно иметь \bar{t} теплоносителя, чтобы $H_{КС}^{крит}$ при пуске ЯР через 2 ч было таким же, как и в момент остановки?

Решение. $H_{КС}^{крит}$ после остановки ЯР будет изменяться, с одной стороны, вследствие уменьшения ρ за счет иодной ямы и, с другой стороны, вследствие увеличения ρ при снижении температуры теплоносителя. Прометиевым провалом через 2 ч после остановки можно пренебречь.

Чтобы $H_{КС}^{крит}$ не изменилось, необходимо выполнение условия $|+\Delta\rho_t| = |-\Delta\rho_{и.я}|$. Через 2 ч $\Delta\rho_{и.я} = -2,6 \%$ (см. рис. 2.5.2). По графику температурного эффекта (см. рис. 2.8.1) определяем, что по отношению к $\bar{t} = 250^\circ\text{C}$ высвободится $\Delta\rho_t = +2,6 \%$ при расхолаживании до 80°C .

3.5.6. ВВЭР-440 работает на мощности; $C_{H_3BO_3} = 4,00 \text{ г } H_3BO_3/\text{кг } H_2O$; $\alpha_B = 0,087 \text{ кг } H_2O/\text{гВ}$; последняя группа РК находится в положении $H_{РК}^{крит1} = 200 \text{ см}$. Как нужно изменить концентрацию H_3BO_3 , чтобы РК опустилась в положение $H_{РК}^{крит2} = 125 \text{ см}$?

Решение. Из рис. 3.4.4 определяем уменьшение ρ при опускании РК:

$$\Delta\rho_{РК} = \rho_{РК}(200) - \rho_{РК}(125) = 1,10 - 1,80 = -0,70 \%$$

Чтобы скомпенсировать $-0,7 \%$, нужно уменьшить концентрацию бора согласно (3.4.5) на $\Delta C_B = \Delta\rho/\alpha_B = 0,007/0,087 = 0,08 \text{ г/кг } H_2O$. Для H_3BO_3 (см. задачу 4.2.6) $\Delta C_{H_3BO_3} = 5,72 \cdot 0,8 = 0,46 \text{ г/кг } H_2O$. Следовательно, массовую концентрацию H_3BO_3 в первом контуре необходимо снизить до $(4,00 - 0,46) = 3,54 \text{ г/кг } H_2O$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Определить $H_{КС}^{крит}$ в конце номинальной кампании реактора ТР: а) при работе на $N_{ном}$ и б) в холодном разотравленном состоянии.
2. Реактор ТР отработал 50 % кампании и последние 5 сут перед вынужденной остановкой работал на мощности 80 % $N_{ном}$. Определить $H_{КС}^{крит}$ для очередного пуска ЯР через 7 ч после остановки при $\bar{t} = 150^\circ\text{C}$.
3. Последние 3 сут реактор ТР работал на $N_{ном}$. В момент остановки $H_{КС}^{крит} = 900 \text{ мм}$. Определить $H_{КС}^{крит}$ для очередного пуска: а) через 8 ч при $\bar{t} = 200^\circ\text{C}$; б) через 25 ч при $t = 100^\circ\text{C}$; в) через 150 ч при $t = 40^\circ\text{C}$.
4. Предыдущий пуск реактора ТР производился при максимальном $\rho_{п.п}$ после остановки с мощности 50 % $N_{ном}$, при этом $H_{КС}^{крит} = 100 \text{ мм}$. Очередной пуск производится при прочих равных условиях через 8 сут после остановки с $N_{ном}$, на которой ЯР работал 30 сут. Определить $H_{КС}^{крит}$.

§ 3.6. ПУСК ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Пуск реактора — это вывод его из подкритического в надкритическое состояние с допустимым периодом разгона до уровня плот-

ности потока нейтронов (мощности), надежно контролируемого пусковой аппаратурой (ПА).

Примечание. Первый (физический) пуск ЯР имеет свои особенности, он проводится по специальной программе и будет рассмотрен в гл. 5. Здесь речь пойдет о повторных пусках, проводимых после плановых и аварийных остановок ЯР.

Исходная мощность, с которой начинается пуск ЯР, обусловлена самопроизвольным делением топлива и делением его фотонейтронами или нейтронами источника, если такие имеются. В энергетических ЯР мощность, обусловленная спонтанным делением, составляет $10^{-7} - 10^{-6}$ Вт. С помощью источника нейтронов ее можно повысить до $10^{-3} - 10^{-2}$ Вт (см. § 3.2).

Исходя из чувствительности ПА, используемой для контроля мощности в остановленном ЯР, при пуске и работе на энергетическом уровне интервал мощности обычно разбивают на три диапазона: пусковая мощность ($10^{-5} \div 10^{-3}$) % $N_{\text{ном}}$; минимальная автоматически регулируемая мощность ($10^{-3} \div 1,0$) % $N_{\text{ном}}$; рабочая мощность ($1,0 \div 100$) % $N_{\text{ном}}$. Иногда диапазоны называют *источниковый*, перекрывающий 5—6 порядков, *периодовый* (до 8 порядков) и *мощностной* — несколько больше двух порядков измеряемой величины — плотности потока нейтронов (мощности). Приборы (детекторы и аппаратура) первых двух диапазонов логарифмические, мощностного — линейный. Соседние диапазоны должны перекрываться.

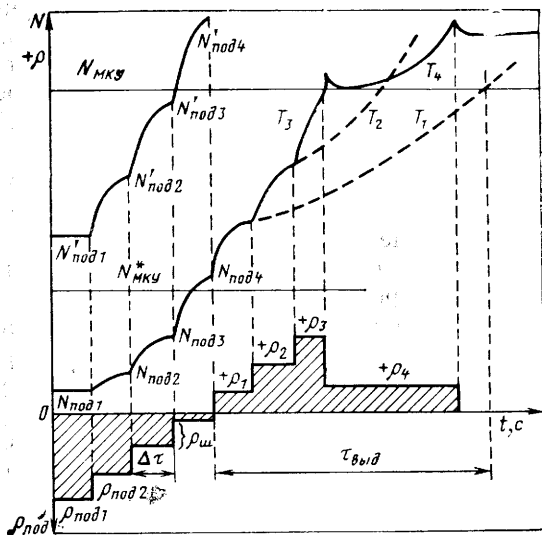
Если не используются никакие меры для увеличения $\Phi_{\text{под}}$, пуск связан с прохождением не контролируемого приборами диапазона увеличения мощности. Вся сложность пуска при этом заключается в том, чтобы выбрать такую скорость высвобождения ρ , которая обеспечила бы вывод ЯР в контролируемое состояние — на минимально контролируемый уровень (МКУ) — с допустимым периодом $T > (20 \div 30)$ с. Наиболее безопасен и надежен вариант пуска, когда МКУ достигается в подкритическом состоянии и переход через критическое состояние контролируется. В практике пусков энергетических ЯР иногда под выходом на МКУ подразумевают вывод ЯР в надкритическое состояние с максимальным надежно контролируемым периодом.

При пуске ЯР после каждого очередного высвобождения ρ в подкритическом состоянии устанавливается мощность $N_{\text{под}}$, которая зависит только от подкритичности $K_{\text{эф}} - 1 = -\delta K_{\text{эф}} \approx \rho_{\text{под}}$ и мощности источника нейтронов $N_{\text{ист}}$ (3.2.5), т. е. мощности, обусловленной делением топлива нейтронами, появляющимися вследствие спонтанного деления ядер ($N_{\text{сп}}$), реакции (γ, n) на Be и D_2O ($N_{\text{ф.н}}$) или нейтронами искусственного источника (см. приложение 20).

В надкритическом состоянии при $\delta K_{\text{эф}} = K_{\text{эф}} - 1 \approx \rho > 0$ мощность увеличивается по экспоненциальному закону (3.3.1).

На рис. 3.6.1 представлена зависимость изменения мощности от ρ в подкритическом и надкритическом состояниях при пуске ЯР.

Рис. 3.6.1 Изменение плотности потока нейтронов (мощности) при пуске ЯР



Для примера рассмотрен распространенный вариант пуска: шаговый подъем поглотителей с высвобождением $\rho_{\text{ш}}$ и выдержкой времени между шагами $\Delta\tau$. Реактивность одного шага $\rho_{\text{ш}}$ выбирается такой, чтобы в надкритическом состоянии ей соответствовал допустимый период разгона, например не менее 20 с (см. задачу 3.4.1).

Как видно из графика, при чувствительности ПА, равной $N_{\text{мкУ}}$, и мощности источника $N_{\text{ист}}$, который обеспечивает подкритическую мощность $N_{\text{под1}} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под1}}$, ЯР будет выведен на МКУ при $+\rho_3 \approx 3\rho_{\text{ш}} \approx 0,003$ с периодом $T_3 \approx 5$ с, т. е. менее 20 с. Есть, по крайней мере, три способа безопасного пуска ЯР с допустимым периодом разгона.

1. Первый способ — увеличение чувствительности ПА до $N_{\text{мкУ}} < N_{\text{мкУ}}$. В этом случае при той же программе высвобождения ρ мощность достигнет контролируемого уровня в подкритическом состоянии при $\rho_{\text{под4}}$, которой соответствует $N_{\text{под4}} > N_{\text{мкУ}}$. Этот вариант уменьшения или полной ликвидации диапазона неконтролируемого пуска используется, но он имеет недостатки: с увеличением чувствительности нейтронных детекторов снижается их надежность. Поэтому они используются, как правило, только при физических пусках (см. гл. 5). Если же они входят в комплект штатной ПА, то после выхода на МКУ их необходимо экранировать от большого потока нейтронов.

Высокую чувствительность имеет импульсная ПА с камерой деления в качестве детектора нейтронов. В отличие от ИК с борным покрытием, где реакция (n, α) сопровождается выделением $\approx 2,3$ МэВ энергии, в камере деления с урановым покрытием при реакции (n, f) выделяется ~ 200 МэВ. Относительный уровень γ -фона в камере деления значительно меньше, чем в борных ИК.

2. Аналогичный эффект дает увеличение мощности внутреннего источника нейтронов $N'_{ист}$. На рис. 3.6.1 показано, как при той же чувствительности $N_{МКУ}$ ЯР выходит на МКУ при $\rho_{подд}$, когда $N'_{подд} > N_{МКУ}$. При первом пуске это достигается введением в активную зону постороннего источника нейтронов. При очередных пусках дополнительным источником служат фотоядерные реакции на Ве и D (если они есть в активной зоне) и спонтанное деление ядер образующихся трансурановых элементов.

3. Наконец, третий способ безопасного пуска, когда переход через критическое состояние не контролируется ПА, — выбор специальной программы подъема поглотителей, предусматривающей такую скорость высвобождения ρ (непрерывную, а чаще ступенчатую с выдержкой времени), при которой Φ (мощность) после перехода через критическое состояние успевает увеличиться до контролируемого уровня раньше, чем будет высвобождена опасная реактивность. Так, из рис. 3.6.1 видно, что при шаговом высвобождении ρ порциями $\rho_{ш} \approx 0,001$ и выдержкой между шагами $\tau_{выд}$ ЯР при чувствительности ПА $N_{МКУ}$ будет выведен в надкритическое состояние с периодом $T_1 \sim 30$ с. Поскольку расчет критического положения КС не дает возможности точно определить, после какого шага КС нужно переходить с выдержки времени Δt на $\tau_{выд}$ (см. рис. 3.6.1), программа подъема КС составляется так, чтобы по мере приближения КС к предполагаемому (рассчитанному) критическому положению скорость высвобождения ρ уменьшалась. Это достигается уменьшением шага КС или увеличением времени выдержки, благодаря чему мощность в надкритическом состоянии ЯР успевает увеличиться до более высокого уровня при меньшем значении надкритичности, что означает вывод ЯР на МКУ с большим периодом. Можно, например, половину расстояния до рассчитанного $N_{КС}^{крит}$ поднимать КС без выдержки между шагами (3.4.1); половину оставшегося расстояния — с выдержками, обеспечивающими высвобождение ρ со скоростью, несколько большей безопасной (4.2.8); остаток расстояния до предельной высоты подъема (4.2.12) — с увеличенными выдержками, соответствующими расчетной безопасной скорости подъема поглотителей (3.4.2). При пуске ВВЭР-440 в неконтролируемом диапазоне РК поднимают шагами ~ 5 см с выдержкой между шагами 15—20 с, а в пределах пускового интервала (см. § 4.2) вдвое уменьшают шаг и увеличивают выдержку до 2 мин.

Основное условие обеспечения ЯБР при пуске — выведение ЯР в контролируемое надкритическое состояние с допустимым периодом разгона и надежным исключением возможности высвобождения $\rho \geq \beta_{эф}$ (разгон на мгновенных нейтронах). Итак, для безопасного пуска ЯР необходимо:

- 1) рассчитать критическое положение и программу подъема КС;
- 2) при включенной ПА, после введения в действие всех обслуживающих систем ЯР, поднять стержни АЗ в верхнее и АР — в рабочее положение;

3) по рассчитанной программе поднять КС в положение, при котором мощность будет увеличиваться с допустимым периодом;

4) при выходе ПА на показания раньше, чем ЯР станет надкритичным, программу подъема КС можно изменить — увеличить скорость высвобождения ρ ;

5) при достижении предельной высоты подъема поглотителей (см. § 4.2) и отсутствии показаний ПА прекратить пуск, проверить расчет $H_{КС}^{крит}$, ПА и повторить пуск.

Контроль пуска осуществляют по всем параметрам, определяющим состояние ЯР, но прежде всего по плотности потока нейтронов (пусковой мощности) и периоду, характеризующему скорость изменения потока (мощности). Чем меньше мощность, тем меньше абсолютное и тем больше относительное изменение ее при перемещении поглотителей. Поэтому первым зафиксирует выход на МКУ периодомер. Если после перемещения поглотителя стрелка периодомера возвратится на ∞ , значит, ЯР подкритичен, если останется в положении $T < \infty$, — надкритичен, при этом изменение показания прибора контроля мощности почти незаметно.

Если пуск ЯР производится вскоре после остановки, необходимо учитывать фон γ -излучения продуктов деления. Гамма-компенсированные ИК частично компенсируют его, но не полностью. Поэтому оператор должен проверить, что контролирует ПА: поток нейтронов или γ -излучение. Для этого необходимо переместить в любом направлении поглотитель нейтронов: если показания прибора изменятся, значит, контролируется поток нейтронов, если нет — γ -фон (задача 3.6.8).

Задачи с решениями

3.6.1. В активной зоне подкритического реактора ТР находятся три стержня АЗ и два АР в нижнем положении, а КС — в положении 1000 мм (см. рис. 3.4.2). Какой должна быть последовательность пуска ЯР, если через некоторое время после подъема первого стержня АЗ Ф увеличилась примерно в 2 раза и больше не изменяется?

Решение. Последовательность пуска должна быть такой, чтобы до вывода его в критическое состояние были полностью подняты стержни АЗ из активной зоны и выведены в рабочее положение АР (если их два, то один используется как резервный). После этого поднимают КС до вывода ЯР в критическое (надкритическое) состояние. В данном случае после подъема первого (из трех) стержня АЗ Ф увеличилась примерно в 2 раза. Это значит, что ЯР после подъема одного стержня АЗ подкритичен на величину (3.2.9)

$$\rho_{\text{под}} = \Phi_1 \rho_{\text{АЗ}} / (\Phi_2 - \Phi_1) = \rho_{\text{АЗ}} = 0,6 \%$$

Следовательно, после подъема второго стержня АЗ ЯР станет критичным, а после подъема третьего — надкритичным на $+|\rho_{\text{АЗ}}| = +0,006 \approx 0,85$ дол. Мощность будет увеличиваться с очень

малым периодом удвоения ($T_{(2)} \approx 0,4$ с, см. табл. 3.3.1), что для нормального пуска недопустимо. Чтобы избежать такой ситуации в тех случаях, когда ЯР может стать надкритичным при подъеме стержней АЗ, необходимо до подъема оставшихся стержней АЗ и АР опустить КС на столько, чтобы перекрыть ρ , которая высвободится при последующем подъеме стержней АЗ и АР.

В данном случае после подъема одного стержня АЗ, когда подкритичность еще равна 0,6 %, будет высвобождаться ρ , равная физическому весу двух стержней АЗ ($2\rho_{AZ} = 1,2$ %) и полутора АР ($1,5\rho_{AP} = 0,75$ %), так как один АР поднимают полностью, а второй — в среднее рабочее положение. Следовательно, КС из положения 1000 мм после подъема одного стержня АЗ нужно опустить на $\Delta H \approx 70$ мм, что соответствует увеличению подкритичности на $(d\rho_{\Sigma}/dH)\Delta H \approx 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot 70 \approx (2\rho_{AZ} + 1,5\rho_{AP}) \approx 2$ % (см. рис. 3.4.2). Теперь после подъема всех стержней АЗ, одного АР из активной зоны и одного АР в среднее положение ЯР будет критичен на величину $\rho_{\text{под}} = \rho_{AZ} = 0,6$ %. При эффективности одного шага 0,2 % (см. задачу 3.4.1) ЯР станет критичным после подъема КС на $\rho_{\text{под}}/\rho_{\text{ш}} = 0,6/0,2 = 3$ шага, а после четвертого будет разгоняться с $T_{(2)} \sim 20$ с.

3.6.2. С каким $T_{(2)}$ в каждом из трех случаев будет выведен ЯР в надкритический режим, если после очередного шага КС из положения 800 мм подкритическая мощность, контролируемая ПА, увеличится: а) с 20 до 30; б) с 20 до 40; в) с 20 до 60 делений шкалы?

Решение. По изменению установившейся $N_{\text{под}}$ при известном значении высвобождаемой ρ можно судить о степени приближения к критическому состоянию и подкритичности ЯР (см. § 3.2). В данном случае при подъеме КС шагами по 6,6 мм (см. задачу 3.4.1) в области 800 мм при каждом шаге высвобождается $\rho_{\text{ш}} = 6,6d\rho_{\Sigma}/dH = 6,6 \cdot 19 \cdot 10^{-4} \approx 0,13$ % (см. рис. 3.4.1). Согласно (3.2.9) (см. также задачу 3.6.3) подкритичность после очередного шага КС, если до и после этого шага мощность была соответственно N_1 и N_2 , равна:

$$\text{а) } \rho_{\text{под}} = N_1\rho_{\text{ш}}/(N_2 - N_1) = 20\rho_{\text{ш}}/(30 - 20) = 2\rho_{\text{ш}} = 0,26 \text{ \%};$$

$$\text{б) } \rho_{\text{под}} = 0,13 \text{ \%}; \quad \text{в) } \rho_{\text{под}} \approx 0,07 \text{ \%}.$$

В первом случае после следующих трех шагов, а во втором после двух ЯР будет выведен на мощность с надкритичностью в один шаг (+0,13 %), т. е. с $T_{(2)} \approx 28$ с ($\beta_{\text{эф}} = 0,7$ %, см. рис. 3.3.3).

В третьем случае после очередного шага ЯР станет надкритичным на $0,13 - 0,07 = 0,06$ % $\approx 0,1$ дол., и мощность будет увеличиваться с $T_{(2)} \approx 60$ с (см. рис. 3.3.2; $\beta_{\text{эф}} = 0,7$ %). Контроль мощности ЯР в подкритическом состоянии обеспечивает надежный вывод его в надкритическое состояние с любым (большим) периодом. Наблюдения за скоростью увеличения подкритической мощности во время выдержки позволяют оператору ориентировочно судить о степени приближения ЯР к критическому состоянию.

3.6.3. Чувствительность ПА по мощности равна $N_{\text{МКУ}} = 10^{-3} \% N_{\text{НОМ}}$. В тот момент, когда ЯР при пуске становится критичным (для выбранной программы пуска), мощность примерно равна $N_{\text{крит}} = 10^{-4} \%$. Оценить, с каким периодом будет выведен ЯР на МКУ, если при каждом шаге КС высвобождается $\rho = +0,001$ ($\beta_{\text{эф}} = 0,007$), а $\tau_{\text{выд}}$ между шагами при подходе к критическому состоянию выбрано равным 2 мин.

Решение. Рассматривается случай так называемого пуска «вслепую», когда переход через критическое и выход в надкритическое состояние производится в том диапазоне мощности, в котором ее не контролирует ПА. Безопасность пуска в этом случае гарантируется только выбранной программой высвобождения ρ : шагом КС и временем выдержки между шагами.

Первая максимальная надкритичность, которая может быть создана в ЯР при пуске, $\rho_{\text{ш}} = 0,1 \% = 0,14 \beta_{\text{эф}}$. При такой надкритичности мощность будет увеличиваться с периодом $T = 60$ с (см. рис. 3.3.2) и через 2 мин выдержки достигнет уровня $N_1 = N_{\text{крит}} \exp(\tau_{\text{выд}}/T) = 10^{-4} e^2 \approx 7,4 \cdot 10^{-4} \% N_{\text{НОМ}}$ (см. приложение 25).

Примечание. Мощность в тот момент, когда ЯР становится критичным ($N_{\text{крит}}$), в общем случае зависит от мощности источника и скорости высвобождения ρ при подходе к критическому состоянию (см. § 3.2). Для принятых при пуске скоростей высвобождения ρ различие в значениях мощности в момент критичности при данной мощности источника нейтронов будет находиться в пределах одного порядка. В данном случае по условиям задачи $N_{\text{крит}} \approx 10^{-4} \% N_{\text{НОМ}}$.

Так как ПА не почувствует потока через 2 мин выдержки ($7,4 \cdot 10^{-4} < N_{\text{МКУ}} = 10^{-3}$), оператор произведет следующий шаг КС. Надкритичность станет равной $2\rho_{\text{ш}} = 0,002 = +0,2 \%$, что соответствует периоду $T = 18$ с ($T_{(2)} = 13$ с, см. рис. 3.3.3). Через 2 мин после этого шага КС мощность увеличится примерно до значения $N_2 = N_1 e^{120/18} = 7,4 \cdot 10^{-4} e^{6,7} = 0,6 \% N_{\text{НОМ}} \gg N_{\text{МКУ}}$. Таким образом, уже примерно через 6 с после создания надкритичности в $2\rho_{\text{ш}}$ ($7,4 \times 10^{-4} e^{6,7} \approx 10^{-3}$) ПА зафиксирует рост мощности с периодом $T = 18$ с ($T_{(2)} = 13$ с).

При решении задачи рассмотрен случай, когда первое надкритическое состояние имеет ρ , соответствующую полному шагу КС. Более вероятным является случай при пуске, когда первая надкритичность меньше $\rho_{\text{ш}}$ (см. рис. 3.6.1). Пусть, например, первая надкритичность равна половине шага КС, т. е. $0,0005 = 0,071$ дол., $T \approx 120$ с. За 2 мин мощность увеличится до $10^{-4} e^1 \approx 3 \cdot 10^{-4} \% N_{\text{НОМ}} < N_{\text{МКУ}}$. После очередного шага КС ЯР будет иметь $\rho = +0,0015$, которой соответствует $T = 30$ с ($T_{(2)} \approx 20$ с). Через 2 мин мощность достигнет $\sim 2 \cdot 10^{-2} \% N_{\text{НОМ}} > N_{\text{МКУ}}$. Таким образом, в данном случае ЯР будет выведен на мощность с большим периодом.

3.6.4. Реактор ТР разотравлен, температура теплоносителя 40°C , $N_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 800$ мм. Оценить, с каким периодом ЯР будет выведен на МКУ при чувствительности ПА $\Phi_{\text{МКУ}} \approx 10^5$ нейтр/(см²·с), шаге КС 8 мм и $\tau_{\text{выд}} = 2$ мин, если: а) $\Phi_{\text{под}}$ обусловлен только спонтанным делением, создающим в момент критичности $\Phi_{\text{крит}} \approx$

Таблица 3.6.1

Количество шагов	Высвобождаемая реактивность, %	T, с	Ф через 2 мин при	
			$\Phi_{\text{крит}} = 10^2 \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\Phi_{\text{крит}} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \cdot 10^4$
1	0,16	28	$10^2 e^{120/28} \sim 10^4$	$\sim 10^8$
2	0,32	7	$10^4 e^{120/7} \sim 10^{11}$	$\sim 10^{13}$

Таблица 3.6.2

Количество шагов	Высвобождаемая реактивность, %	T, с	$N(t) = N_0 e^{t/T}, \% N_{\text{НОМ}}$
1	0,05	125	$10^{-6} e^{180/125} \approx 4 \cdot 10^{-6}$
2	0,10	60	$4 \cdot 10^6 e^3 \approx 8 \cdot 10^{-5}$
3	0,15	30	$\sim 4 \cdot 10^{-2}$

$\approx 10^2$ нейтр/(см²·с); б) $\Phi_{\text{под}}$ обусловлен посторонним источником, обеспечивающим $\Phi_{\text{крит}} \approx 10^4$ нейтр/(см²·с) ($\beta_{\text{эф}}=0,007$).

Решение. При $H_{\text{КС}}=800$ мм $d\rho_{\Sigma}/dH \approx 2 \cdot 10^{-4}$ 1/мм (см. рис. 3.4.1), следовательно, $\rho_{\text{ш}}=8 \cdot 2 \cdot 10^{-4}=0,16$ %. В табл. 3.6.1 приведены данные оценки ρ через 2 мин после каждого шага КС в надкритическом состоянии (см. задачу 3.6.3) для двух значений $\Phi_{\text{крит}}$.

Анализ результатов показывает, что при пуске без постороннего источника нейтронов выбранная методика (шаг и время выдержки) при чувствительности ПА 10^5 нейтр/(см²·с) обеспечивает вывод ЯР с малым периодом — 7с. Наличие постороннего источника увеличивает Φ на два порядка, и ПА зафиксировывает рост мощности с периодом ~ 28 с.

3.6.5. С каким периодом ЯР будет выведен на МКУ по ПА с чувствительностью $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-5}$ и 10^{-3} % $N_{\text{НОМ}}$, если $\rho_{\text{ш}}=+0,05$ % и $\tau_{\text{выд}}=3$ мин? Мощность в момент критичности равна примерно 10^{-6} % $N_{\text{НОМ}}$, $\beta_{\text{эф}}=0,7$ %.

Решение. Данные расчета сведены в табл. 3.6.2.

Как видно из таблицы, ухудшение чувствительности ПА на два порядка при прочих равных условиях пуска существенно уменьшает период, при котором ЯР будет выведен на МКУ. При $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-5}$ % $N_{\text{НОМ}}$ $T=60$ с, а при $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-3}$ % $T \approx 30$ с.

Но даже при $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-3}$ %, что на три порядка больше (хуже) мощности в момент критичности (10^{-6} % $N_{\text{НОМ}}$), ЯР будет выведен на МКУ с большим периодом (~ 30 с). Это объясняется, во-первых, тем, что при каждом шаге высвобождается небольшая ρ , и, во-вторых, сравнительно большой выдержкой между шагами (3 мин). В пересчете на непрерывное высвобождение ρ это соответствует скорости $d\rho/dt=0,05 \cdot 10^{-2}/180 \approx 2,8 \cdot 10^{-6}$ 1/с.

3.6.6. Выбрать $\tau_{\text{выд}}$ между шагами КС, чтобы вывести реактор ТР на МКУ с $T_{(2)} \geq 20$ с, если в момент критичности $N_{\text{крит}} \approx 10^{-6}$ % $N_{\text{НОМ}}$, а чувствительность ПА на порядок хуже. $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ находится в области 900 мм, шаг КС — 6 мм.

Количество шагов	Высвобождаемая реактивность, %	$T_{(2)}, c$	Мощность (%) на конец выдержки при $\tau_{\text{выд}}$			
			30 с	1 мин	2 мин	3 мин
1	0,15	22	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
2	0,30	6	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	45	$3 \cdot 10^5$
3	0,45	3	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^3$!	!
4	0,60	1	$\sim 10^8$!	!	!

Решение. При каждом шаге КС в области 900 мм (см. рис. 3.4.1) высвобождается $\rho_{\text{ш}}=0,15\%$. Оценим изменения мощности после каждого шага КС (табл. 3.6.3), принимая, что первая надкритичность соответствует полному шагу, а $\tau_{\text{выд}}=30$ с, 1, 2 и 3 мин.

Как видно из табл. 3.6.3, при $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-5}\%$ $N_{\text{НОМ}}$ в данных условиях ЯР может быть выведен в надкритическое состояние на МКУ с $T_{(2)} \geq 20$ с при $\tau_{\text{выд}}$ между шагами КС не менее 2 мин. Если $\tau_{\text{выд}}=1$ мин и тем более 30 с, нарастание мощности будет зафиксировано при $T_{(2)} < 10$ с. Для более точного выбора методики пуска необходимо произвести подобную оценку для большого количества вариантов $\tau_{\text{выд}}$ и $\rho_{\text{ш}}$, а также рассмотреть случаи, когда первая надкритичность меньше $\rho_{\text{ш}}$.

3.6.7. С каким $T_{(2)}$ реактор ТР будет выведен на МКУ при пуске, если чувствительность ПА $N_{\text{МКУ}} \approx 10^{-4}\%$ $N_{\text{НОМ}}$, $N_{\text{крит}} \approx 10^{-6}\%$ $N_{\text{НОМ}}$, шаг КС 6,5 мм, $\tau_{\text{выд}}=3$ мин, а $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ равно: а) 1050 мм и б) 500 мм?

Решение. Различие в значении периода, с которым ЯР будет выведен на МКУ, обусловлено разной дифференциальной эффективностью КС в положении 1050 и 500 мм (см. рис. 3.4.1). Для 1050 мм $\rho_{\text{ш}}=6,5 d\rho_{\Sigma}/dH=6,5 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \approx 0,2\%$. Для 500 мм $\rho_{\text{ш}} \approx 6,5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} = 0,04\%$.

Мощность после каждого шага КС и 3 мин выдержки для обоих случаев приведена в табл. 3.6.4. Как и следовало ожидать, при пуске ЯР в случае, когда $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}=1050$ мм, он будет выведен на МКУ с меньшим $T_{(2)}$ (~ 13 с), чем при пуске, когда $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}=500$ мм, где $\rho_{\text{ш}}$ в 5 раз меньше, чем для $H_{\text{КС}}=1050$ мм. Во втором случае $T_{(2)}=55$ с. Чем меньше $\rho_{\text{ш}}$, тем при прочих равных условиях с большим $T_{(2)}$ будет выведен ЯР на МКУ.

3.6.8. При подкритичности ЯР 5% прибор контроля мощности показывает $N_1=18$ делений шкалы. После подъема двух стержней АЗ (физический вес одного стержня равен 0,5%) показания прибора увеличились до значения $N_2=20$ делений. Оценить γ -фон в делениях шкалы прибора.

Решение. Если в качестве детектора нейтронов (мощности) в ЯР используется ИК без компенсации γ -фона или же компенса-

Количество шагов	$H_{КС}^{КРИТ} = 1000 \text{ мм}$			$H_{КС}^{КРИТ} = 500 \text{ мм}$		
	Высвобождаемая реактивность, %	$T_{(2)}, \text{ с}$	$N, \%$	Высвобождаемая реактивность, %	$T_{(2)}, \text{ с}$	$N, \%$
1	0,2	13	$10^{-6} \cdot 2^{180/13} \approx 1,6 \cdot 10^{-2}$	0,04	120	$2,8 \cdot 10^{-6}$
2	0,4	3	$\sim 10^{16}$	0,08	75	$1,5 \cdot 10^{-5}$
3	0,6	≤ 1	!	0,12	55	$1,4 \cdot 10^{-4}$
4	0,8	$\ll 1$!	0,16	35	$4 \cdot 10^{-3}$

ция его недостаточно полная, то прибор контроля мощности будет давать показания в подкритическом состоянии не только от нейтронов, но и от γ -излучения. Чтобы проверить, чем именно обусловлены показания прибора, необходимо изменить подкритичность ЯР, например, небольшим перемещением стержня управления. В этом случае Φ должна изменяться обратно пропорционально подкритичности согласно (3.2.5):

$$\Phi_{\text{под } 2} / \Phi_{\text{под } 1} = \rho_{\text{под } 1} / \rho_{\text{под } 2},$$

где $\Phi_{\text{под } 1}$ и $\Phi_{\text{под } 2}$ — установившаяся подкритическая плотность потока нейтронов при подкритичности соответственно $\rho_{\text{под } 1}$ и $\rho_{\text{под } 2}$. Уровень γ -фона при изменении подкритичности практически остается постоянным. Таким образом, если при перемещении поглотителя нейтронов показания прибора изменяются, значит, он контролирует поток нейтронов, а если не изменяются, то γ -фон. Но изменение показаний прибора еще не говорит о том, что на детектор одновременно не действует и γ -излучение. Чтобы оценить, сколько делений шкалы приходится на γ -фон (N_{γ} — постоянная составляющая), а сколько на поток нейтронов, запишем приведенное выше соотношение в таком виде:

$$\Phi_{\text{под } 2} / \Phi_{\text{под } 1} = (N_2 - N_{\gamma}) / (N_1 - N_{\gamma}) = \rho_{\text{под } 1} / \rho_{\text{под } 2},$$

откуда

$$N_{\gamma} = \left(N_1 \frac{\rho_{\text{под } 1}}{\rho_{\text{под } 2}} - N_2 \right) \left(\frac{\rho_{\text{под } 1}}{\rho_{\text{под } 2}} - 1 \right)^{-1}$$

Для данного в задаче случая

$$N_{\gamma} = (1,25 \cdot 18 - 20) / (1,25 - 1) = 10 \text{ дел.}$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем ограничивается скорость выведения ЯР в надкритическое состояние при пуске?
2. В каких случаях и как Be и D_2O способствуют безопасности пуска ЯР?
3. Из каких соображений выбирается $t_{\text{выд}}$ между высвобождениями ρ при пуске?

4. Чем отличается минимально критический уровень мощности от минимально контролируемого при пуске ЯР?

5. В активной зоне подкритического реактора ТР находятся три стержня АЗ и два АР в крайнем нижнем положении, а КС — в положении 1000 мм. Какой должна быть последовательность пуска ЯР, если через некоторое время после подъема второго стержня АЗ мощность увеличилась до постоянного уровня в 3 раза?

6. С каким $T_{(2)}$ будет выведен ЯР в надкритический режим, если после очередного шага КС на 7 мм из положения 1000 мм показание прибора, контролирующего $N_{под}$, увеличится с 10 до 40 дел. шкалы?

7. Чувствительность ПА $N_{мкУ} = 10^{-3} \% N_{ном}$. В тот момент, когда ЯР при пуске становится критичным (для выбранной программы пуска), $N_{крит} \approx 10^{-4} \% N_{ном}$. Оценить, с каким $T_{(2)}$ будет выведен ЯР на МКУ, если каждым шагом КС высвобождается $\rho = +0,002$ ($\beta_{эф} = 0,007$), а $t_{выд} = 3$ мин.

8. Поток фотонейтронов (γ, n) на Ве через 1 ч после остановки создает в момент критичности $N_{крит} \approx 10^{-3} \% N_{ном}$, а через 1 сут $10^{-5} \% N_{ном}$. С каким $T_{(2)}$ ЯР будет выведен на МКУ через 1 ч и через 1 сут после остановки при $N_{мкУ} = 10^{-4} \% N_{ном}$? Через 1 ч $H_{КС}^{крит} = 900$ мм, а через 1 сут — 1000 мм; $t_{выд} = 2$ мин, $h_{ш} = 5$ мм.

9. Выбрать $t_{выд}$, чтобы вывести реактор ТР на МКУ с $T_{(2)} \geq 20$ с, если $N_{крит} \approx 10^{-3} \% N_{ном}$, а $N_{мкУ}$ на порядок хуже. $H_{КС}^{крит} \approx 900$ мм, $h_{ш} = 6$ мм.

§ 3.7. РАЗОГРЕВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА И РАБОТА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ

Для работы ЯЭУ на энергетических уровнях мощности необходимо привести параметры теплоносителей первого и второго контуров (температуры, давления, расходы) в соответствие со статистическими характеристиками ЯР и ПГ, один из вариантов которых (для ВВР) представлен на рис. 3.7.1 и 3.7.2. Создав необходимое исходное давление и расход, производят разогрев теплоносителя первого контура. Разогрев может быть ядерным (собственным теплом) или безъядерным (от постороннего источника). В отличие от разогрева собственным теплом, т. е. благодаря энергии деления ядер топлива, разогрев от постороннего источника осуществляет-

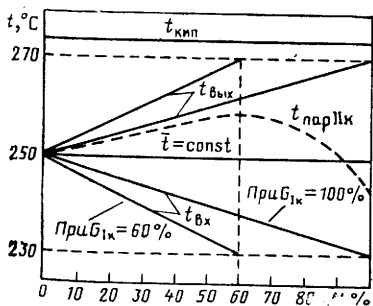


Рис. 3.7.1. Статические характеристики реактора ТР

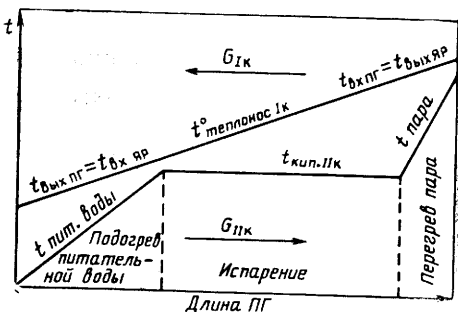


Рис. 3.7.2. Статические характеристики ПГ (вариант)

ся, например, за счет работы ЦНПК (ГЦН) или (и) подачи пара в ПГ по второму контуру. Он используется при некоторых физических измерениях (см. § 5,5), а также при ускоренном вводе ЯЭУ в действие одновременно с приготовлением и пуском ЯР. При этом необходимо вводить коррекцию по температурному эффекту в расчет $H_{КС}^{крит}$. Скорость разогрева лимитируется термическими напряжениями в корпусе, твэлах, конструкционных материалах ЯР. Поддержание необходимой скорости осуществляется изменением мощности ЯР и теплосъема в ПГ, т. е. расходом воды второго контура. Разогрев сопровождается очень важными процессами, связанными с изменением ρ , уровня в КО, давления в первом контуре и др.

В зависимости от характера температурного эффекта при разогреве происходит изменение ρ . С точки зрения ядерной безопасности опасен диапазон разогрева с $\alpha_t > 0$ (см. рис. 2.8.1: кривая I — $t < 150^\circ\text{C}$, кривая II — $t < 100^\circ\text{C}$), где необходимо опускать КС. При $\alpha_t < 0$ нельзя допускать резких охлаждений активной зоны, например скачкообразно увеличивать расход теплоносителя.

Изменение уровня КО и давления в контуре происходит в соответствии с законом Менделеева — Клапейрона, устанавливающего взаимосвязь между давлением P (Па), температурой T (К) и объемом V (м^3) в системах ЯЭУ, где рабочим телом является газ массой m (кг):

$$PV = mRT.$$

Если в нем последовательно взять $T = \text{const}$, $P = \text{const}$, $V = \text{const}$, то получим законы:

а) при $T = \text{const}$ (изотермический процесс) — закон Бойля-Мариотта:

$$P_1V_1 = P_2V_2 = \text{const}; \quad P_2/P_1 = V_1/V_2. \quad (3.7.1)$$

С изменением температуры теплоносителя меняется его объем при этом давление в контуре с газовыми компенсаторами объема изменяется согласно закону Бойля—Мариотта;

б) при $P = \text{const}$ (изобарный процесс) — закон Гей-Люссака:

$$V/T = \text{const}; \quad V_2/V_1 = T_2/T_1 = \gamma_1/\gamma_2 = v_2/v_1;$$

в) при $V = \text{const}$ (изохорный процес) — закон Шарля:

$$P/T = \text{const}; \quad P_2/P_1 = T_2/T_1,$$

где γ — плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; v — удельный объем газа, $\text{м}^3/\text{кг}$; R — универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Расход теплоносителя, имеющего плотность γ ($\text{кг}/\text{м}^3$) и скорость ω ($\text{м}/\text{с}$), через проходное сечение площадью f (м^2) равен

$$G = 3600\gamma\omega f \text{ кг/ч} = 3600\omega f \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3.7.2)$$

Повышая расход теплоносителя через активную зону, можно увеличить при прочих равных условиях тепловую мощность ЯР.

Но этот рост сдерживается увеличением доли энергии на собственные нужды и практическим пределом увеличения скорости из-за вибрации твэлов (для воды 6—7 м/с).

Тепловую энергию, выделяющуюся за 1 с в гидравлической части насоса $Q_{ГЦН}$ (кВт), можно оценить из выражения для КПД насоса $\eta_{ГЦН}$ с полезной мощностью $N_{ГЦН}$:

$$\eta_{ГЦН} = N_{ГЦН} / (N_{ГЦН} + Q_{ГЦН}),$$

откуда

$$Q_{ГЦН} = (1 - \eta_{ГЦН}) N_{ГЦН} / \eta_{ГЦН}.$$

Полезная мощность насоса объемной производительностью G (м³/с) с напором H (м), идущая на создание циркуляции в контуре первичного теплоносителя плотностью γ (кг/м³),

$$N_{ГЦН} = \gamma GH / 102 \text{ кВт.}$$

Часть потребляемой насосом электроэнергии превращается в тепло, идущее на нагрев теплоносителя. Мощность, затрачиваемую на подогрев теплоносителя насосом, можно оценить по формуле [25]

$$N = 27,2 G \Delta P \text{ Вт,}$$

где G — расход теплоносителя, м³/ч; ΔP — давление, создаваемое насосом, кгс/см².

Примечание. Сопоставляя скорость разогрева собственным теплом и от постороннего источника, можно производить первую настройку приборов контроля мощности ЯР.

После разогрева теплоносителя до средней температуры можно увеличивать мощность вплоть до номинальной, поддерживая соответствие между тепловыделением и теплосъемом. Скорость изменения мощности на энергетическом уровне лимитируется термическими напряжениями и, как правило, выбирается постоянной во всем рабочем диапазоне:

$$(dN/d\tau) = N(\tau)/T = \text{const.}$$

Чтобы удовлетворить этому требованию, необходимо пропорционально росту мощности $N(\tau)$ увеличивать T , т. е. уменьшать ρ (см. задачу 3.7.7). При этом следует помнить, что увеличивать мощность в пусковом режиме со скоростью, допустимой для более высоких уровней, ни в коем случае нельзя, так как это будет соответствовать недопустимо малому периоду разгона. Например, при $N \sim 10^{-10} \% N_{\text{НОМ}}$ и $dN/d\tau \sim 0,3 \%/\text{с}$ $T = N / (dN/d\tau) \approx 0,1 / 0,3 \approx 0,3 \text{ с}$! Однако на энергетическом уровне допустимый с точки зрения ядерной безопасности период $T \approx 30 \text{ с}$ неприемлем по причинам теплотехнической надежности, так как чем больше мощность, тем при постоянном периоде больше скорость ее изменения. Например, на уровне $50 \% N_{\text{НОМ}}$ при $T = 30 \text{ с}$ $dN/d\tau = N/T = 50/30 \approx 1,7 \%/\text{с}$, а на уровне $90 \% N_{\text{НОМ}}$ $dN/d\tau = 90/30 = 3 \%/\text{с}$!

При работе на энергетическом уровне мощности основная задача оператора — внимательное слежение за контролируруемыми параметрами ЯР, чтобы своевременно принять меры к предупреждению аварийных ситуаций, за положением КР и концентрацией H_3BO_3 в теплоносителе при борном регулировании. Периодически необходимо проверять соответствие показаний прибора измерения мощности по потоку нейтронов, отградуированного в единицах тепловой мощности, и мощности, рассчитанной по тепловым параметрам первого и второго контуров.

В ЯР с постоянным расходом теплоносителя снимаемая мощность пропорциональна подогреву теплоносителя (см. рис. 3.7.1). При программе регулирования с переменным расходом, как, например, в ЯР БН-600, снимаемая мощность пропорциональна расходу при постоянных средней температуре и подогреве теплоносителя во всем диапазоне изменения мощности, начиная с $\sim 20\%$ $N_{\text{ном}}$.

Тепловую мощность можно рассчитать:

а) по параметрам первого контура

$$N_I = \frac{G_I (i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}})}{860v_{\text{вх}}} \text{ кВт} = \frac{G_I (i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}})}{8,6v_{\text{вх}}N_{\text{ном}}} \% N_{\text{ном}}; \quad (3.7.3)$$

б) по параметрам второго контура

$$N_{II} = \frac{G_{II} (i_{\text{пар}} - i_{\text{п.в}})}{860v_{\text{п.в}}} \text{ кВт} = \eta N_I; \quad (3.7.4)$$

в) по расходу пара из ПГ

$$N_{\text{ПГ}} \approx \frac{G_{\text{пар}} (i_{\text{пар}} - i_{\text{п.в}})}{860} \text{ кВт},$$

где G_I , G_{II} — расход теплоносителя по первому и второму контурам, $\text{м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{пар}}$ — расход пара через ПГ, $\text{кг}/\text{ч}$; $i_{\text{вых}}$, $i_{\text{вх}}$ — энтальпия (теплосодержание) теплоносителя первого контура на выходе и входе в ЯР, $\text{ккал}/\text{кг}$ (см. приложение 22); $i_{\text{пар}}$, $i_{\text{п.в}}$ — энтальпия пара и питательной воды второго контура, $\text{ккал}/\text{кг}$ (см. приложения 23, 22); $v_{\text{вх}}$, $v_{\text{п.в}}$ — удельный объем теплоносителя первого и второго контуров, соответствующий температуре, при которой замеряется расход по первому и второму контурам (см. приложение 24), $\text{м}^3/\text{кг}$; η — КПД, учитывающий потерю тепла при передаче его из первого контура во второй; $N_{\text{ном}}$ — номинальная мощность ЯР, кВт. Для конкретного энергетического ЯР расчетные формулы определения мощности учитывают отбор тепла различными обслуживающими системами и вспомогательными контурами, а поэтому имеют более сложный вид [25].

Точность расчета зависит от точности измерения входящих в формулы параметров, особенно расходов воды и пара.

Когда речь идет о ЯЭУ или АЭС, а не только о ЯР, имеющем мощность N , расчет энергозапаса и энерговыработки можно вести по мощности на выходе установки. Например, для АЭС удобно исходить из электрической мощности:

$$N_{\text{э}} = \eta_{\text{э}} N,$$

а для судовых ЯЭУ энергозапас можно считать по мощности на гребных винтах судна:

$$N_c = \eta_c N,$$

где η_a и η_c — КПД АЭС и судовой ЯЭУ соответственно.

Полноту использования номинальной $N_{\text{ном}}$ (установленной) мощности в течение определенного времени τ характеризуют коэффициентом использования установленной мощности (КИМ, или КУМ), представляющим собой отношение средней мощности (\bar{N}) за данное время (τ) к номинальной (установленной), или отношение энерговыработки за время τ к энерговыработке за это же время, если бы ЯР работал на $N_{\text{ном}}$, или отношение эффективного времени работы $\tau_{\text{эф}}$ к календарному (τ):

$$\text{КИМ} = \frac{\bar{N}}{N_{\text{ном}}} = \frac{Q_k}{N_{\text{ном}}\tau} = \frac{\sum_i N_i \tau_i}{N_{\text{ном}} \sum_i \tau_i} = \frac{\tau_{\text{эф}}}{\tau}, \quad (3.7.5)$$

где $\tau = \sum_i \tau_i$ — календарный период времени, в течение которого ЯР работал на различных мощностях $N_i \leq N_{\text{ном}}$, включая стоянку, сут; \bar{N} — средняя мощность за период τ , МВт; Q_k — энерговыработка за календарное время, МВт·сут; $N_{\text{ном}}$ — номинальная мощность ЯР, МВт; $\tau_{\text{эф}}$ — время работы, выраженное в эффективных сутках (2.9.1).

КИМ за весь срок службы установки (интегральный КИМ) позволяет определить стоимость энергии, выработанной за все время работы.

Как показатель напряженности и качества работы АЭС применяется *годовой коэффициент использования мощности*, который равен отношению количества выработанной энергии в течение года $Q_{\text{год}} = \sum_i \tau_i N_i$ МВт·ч (где $\sum_i \tau_i = \tau_{\text{год}} = 8760$ ч) к тому количеству, которое могло быть выработано за год при работе на установленной мощности:

$$\text{КИМ}^{\text{год}} = \frac{Q_{\text{год}}}{N_{\text{ном}} \cdot 8760} = \frac{\bar{N}_{\text{год}}}{N_{\text{ном}}} = 100 \tau_{\text{эф}}^{\text{год}} / 8760 \%. \quad (3.7.6)$$

$\text{КИМ}^{\text{год}}$ характеризует, как полно в течение года используется номинальная мощность. По динамике изменения $\text{КИМ}^{\text{год}}$ во времени можно судить о тенденции в изменении эксплуатации АЭС, уровне квалификации обслуживающего персонала, наличии различных недостатков АЭС. Об эффективности работы АЭС можно судить также по среднегодовому (эффективному за год) числу часов использования $N_{\text{ном}}$, равному отношению годовой выработанной энергии к $N_{\text{ном}}$:

$$\tau_{\text{эф}}^{\text{год}} = \sum_{\text{год}} (N_i \tau_i / N_{\text{ном}}).$$

Для современных АЭС расчетное $\tau_{\text{эф}}^{\text{год}} = 6500 \div 7000$ ч, что соответствует $\text{КИМ} = 0,74 \div 0,8$.

Фактическое значение КИМ ($\text{КИМ}^{\text{ф}}$) может отличаться от расчетного ($\text{КИМ}^{\text{р}}$) вследствие, например, работы на $N < N_{\text{ном}}$ при использовании температурного и мощностного эффектов, непредвиденного изменения работоспособности оборудования и т. п. Учитывать эти отклонения можно коэффициентом качества эксплуатации:

$$K_{\text{кач}} = \text{КИМ}^{\text{ф}} / \text{КИМ}^{\text{р}}.$$

Повышая качество ремонта и уровень эксплуатации, можно получить $K_{\text{кач}} > 1$. При анализе эффективности использования $N_{\text{ном}}$ применяют понятие КИМ^* только за время работы ЯР на мощности, которое точнее характеризует реальную мощность во время работы АЭС:

$$\text{КИМ}^* = \bar{N}^* / N_{\text{ном}}, \quad (3.7.7)$$

где \bar{N}^* — средняя мощность за время работы без учета остановок. Бездействие АЭС при использовании КИМ^* учитывается в этом случае КИВ (коэффициентом использования времени):

$$\text{КИВ} = \tau_{\text{р}} / \tau, \quad (3.7.8)$$

где $\tau_{\text{р}}$ — время работы ЯР на мощности; τ — календарное время эксплуатации АЭС.

КИМ , КИМ^* и КИВ связаны простым соотношением:

$$\text{КИМ} = \text{КИМ}^* \cdot \text{КИВ}.$$

В течение первых 2—3 лет после введения в строй АЭС с ВВЭР длится период приработки, характерный более частыми остановками и снижением мощности ($\text{КИМ} \approx 60\%$). В дальнейшем КИМ достигает $\sim 80\%$. Это значение КИМ обычно используют для экономических расчетов.

Если при расчете КИМ исключить все случаи остановок ЯР и снижений мощности, не вызванные неисправностями, а связанные с режимом работы всей энергосистемы, включающей в себя данную АЭС, то КИМ можно считать показателем надежности АЭС. Основной фактор, приводящий к снижению КИМ АЭС, — это время, затрачиваемое на перегрузки ЯР и планово-предупредительные ремонты между перегрузками.

Для АЭС наиболее эффективное использование энергозапаса соответствует работе ЯР на $N_{\text{ном}}$ с наибольшим КПД.

Для судовых ЯР очень важной характеристикой является экономичность использования ядерного топлива — расход энергозапаса (топлива) на милю пройденного пути (1 миля = 1852 м):

$$B_s = \frac{\Delta Q_{\text{к}}}{s} = \frac{\bar{N}\tau}{v\tau} = \frac{\bar{N}}{v} \text{МВт} \cdot \text{ч/миля}, \quad (3.7.9)$$

где $\Delta Q_{\text{к}}$ (МВт·ч) — израсходованный энергозапас на мощности \bar{N} (МВт) за время τ (ч) прохождения расстояния s (миля) со ско-

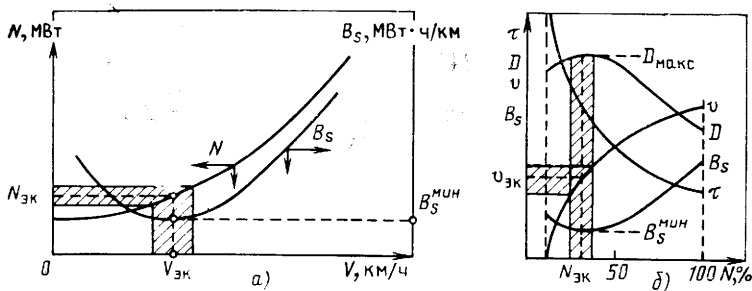


Рис. 3.7.3. Характер зависимости расхода энергозапаса от скорости атомного судна (а) и мощности ЯР (б)

ростью \bar{v} (узел) (1 узел = 1 миля/ч). Величина \bar{N}/\bar{v} имеет минимум при экономической скорости $v_{\text{эк}}$ [20], когда на милю пройденного пути расходуется минимальный энергозапас, т. е. минимальное количество топлива. Эта скорость обеспечивается экономической мощностью $N_{\text{эк}}$. При увеличении мощности выше $N_{\text{эк}}$ B_s растет в связи со значительным увеличением сопротивления движению судна. При уменьшении мощности ниже $N_{\text{эк}}$ B_s растет из-за относительного увеличения расхода энергии на собственные (судовые) нужды (рис. 3.7.3, а, б). Экономической скорости соответствует максимальная дальность плавания при заданном энергозапасе

$$D_{\text{макс}} = Q_R / B_s^{\text{мин}} = Q_R v_{\text{эк}} / N_{\text{эк}}$$

При этом следует иметь в виду, что в реальных условиях средний расход энергозапаса на единицу пути за кампанию Q_R (МВт·ч) всегда больше, чем средний расход на милю пути за время плавания $\tau_{\text{пл}}$, в течение которого пройдено s миль:

$$\bar{B}_s = \frac{\bar{N}(\tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{ст}})}{s} > \bar{B}_{s \text{ пл}} = \frac{\bar{N}\tau_{\text{пл}}}{s}$$

Для экономии энергозапаса (топлива) необходимо свести к минимуму расход энергозапаса во время стоянок $\tau_{\text{ст}}$. Тогда

$$\bar{B}_s \xrightarrow{\tau_{\text{ст}} \rightarrow 0} \bar{B}_{s \text{ пл}}$$

Задачи с решениями

3.7.1. ВВР с объемом первого контура 10 м^3 начали разогревать при давлении 100 кгс/см^2 и $\bar{t} = 50^\circ\text{C}$. КО наполовину заполнены водой ($V_{\text{КО}} = 3 \text{ м}^3$). Можно ли разогреть теплоноситель до $\bar{t} = 250^\circ\text{C}$, не дренируя воду первого контура?

Решение. Объем воды изменяется прямо пропорционально изменению удельного объема:

$$V_{250^\circ\text{C}} / V_{50^\circ\text{C}} = v_{250^\circ\text{C}} / v_{50^\circ\text{C}} |_{P=100 \text{ кгс/см}^2}$$

откуда, используя данные приложения 24, получаем

$$V_{250 \text{ } ^\circ\text{C}} = 10 \cdot 1,241 \cdot 10^{-3} / 1,008 \cdot 10^{-3} = 12,3 \text{ м}^3.$$

Изменение объема составляет $\Delta V = 12,3 - 10,0 = 2,3 \text{ м}^3$. Следовательно, чтобы не дренировать воду, необходимо иметь свободный объем в КО больше $2,3 \text{ м}^3$. В данном случае свободный объем КО составляет 50 % $V_{\text{КО}} = 0,5 \cdot 3 \text{ м}^3 = 1,5 \text{ м}^3$, которого явно недостаточно, чтобы принять вытесняемый из контура объем воды. Если бы свободный объем был больше $2,3 \text{ м}^3$, то необходимо было бы учитывать изменение давления при разогреве, которое может существенно превысить рабочее (см. задачу 3.7.4).

3.7.2. В ЯР с характеристиками, указанными в задаче 3.7.1, $\bar{t} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$, КО заполнены на 30 %, давление в первом контуре равно 100 кгс/см^2 . Можно ли без подпитки контура снизить температуру теплоносителя до $100 \text{ } ^\circ\text{C}$?

Решение. Используя рассуждения из задачи 3.7.1 и приложение 24, определим, какой объем будет занимать теплоноситель при $\bar{t} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, если при $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ он равен 10 м^3 :

$$V_{100 \text{ } ^\circ\text{C}} = V_{250 \text{ } ^\circ\text{C}} \frac{v_{100 \text{ } ^\circ\text{C}}}{v_{250 \text{ } ^\circ\text{C}}} \Big|_{P=100 \text{ кгс/см}^2} = 10 \frac{1,038 \cdot 10^{-3}}{1,241 \cdot 10^{-3}} = 8,36 \text{ м}^3.$$

Таким образом, в контуре появляется свободный объем $\Delta V = 10 - 8,36 = 1,67 \text{ м}^3$. В КО имеется $0,3 \cdot 3 = 0,9 \text{ м}^3$ воды, которой недостаточно для пополнения первого контура. При этом нужно иметь в виду температуру в КО. Если это газовый КО с температурой, например, $60 \text{ } ^\circ\text{C}$, то масса воды в нем

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,9}{v_{|60 \text{ } ^\circ\text{C}, 100 \text{ кгс/см}^2}} = \frac{0,9}{1,013 \cdot 10^{-3}} = 0,89 \cdot 10^3 \text{ кг} = 0,89 \text{ т}.$$

Если КО паровой с температурой, например, $300 \text{ } ^\circ\text{C}$, то

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,9}{v_{|300 \text{ } ^\circ\text{C}, 100 \text{ кгс/см}^2}} = \frac{0,9}{1,398 \cdot 10^{-3}} = 0,64 \cdot 10^3 \text{ кг} = 0,64 \text{ т}.$$

Масса воды, необходимой для компенсации уменьшения объема теплоносителя в контуре,

$$\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,64}{v_{|100 \text{ } ^\circ\text{C}, 100 \text{ кгс/см}^2}} = \frac{1,64}{1,038 \cdot 10^{-3}} = 1,58 \cdot 10^3 \text{ кг} = 1,58 \text{ т}.$$

Оценки и по объему, и по массе показывают, что в обоих случаях (для двух типов КО) нельзя снижать температуру в данном интервале без подпитки первого контура. В противном случае в контур попадет газ. Но может быть такой случай, когда, несмотря на то что уменьшение объема воды в контуре будет меньше заполненного объема в КО, массы воды в КО окажется недостаточно для компенсации. Это возможно, когда температура в КО выше температуры в контуре (для паровых КО).

3.7.3. Объем воды в первом контуре ЯР $V_{\text{Iк}} = 50 \text{ м}^3$, $\bar{t}_{\text{Iк}} = 270 \text{ } ^\circ\text{C}$,

$P_{\text{IK}} = 140 \text{ кгс/см}^2$. На сколько изменится объем воды в КО при снижении t_{IK} до 260°C ?

Решение. При снижении температуры объем воды уменьшится до (см. задачи 3.7.1 и 3.7.2 и приложение 24)

$$V_{260^\circ\text{C}} = V_{270^\circ\text{C}} \frac{v_{260^\circ\text{C}}}{v_{270^\circ\text{C}}} = 50 \frac{1,258 \cdot 10^{-3}}{1,283 \cdot 10^{-3}} = 49 \text{ м}^3.$$

Следовательно, из КО в контур должно перейти такое количество воды, которое при температуре 260°C составит $50 - 49 = 1 \text{ м}^3$. По массе изменение количества воды в контуре составляет

$$\Delta m = \frac{V_{\text{IK}}}{v_{260^\circ\text{C}}} - \frac{V_{\text{IK}}}{v_{270^\circ\text{C}}} = 50 \left(\frac{10^3}{1,258} - \frac{10^3}{1,283} \right) = 39,7 - 39,0 = 0,7 \text{ т.}$$

Изменение объема воды в КО равно $\Delta V_{\text{КО}} = \Delta m v_{\text{КО}}$. Например, при $t_{\text{КО}} = 100^\circ\text{C}$ (для газового КО) и $P = 140 \text{ кгс/см}^2$

$$\Delta V_{\text{КО}} = 0,7 \cdot 10^3 \cdot 1,037 \cdot 10^{-3} = 0,73 \text{ м}^3.$$

При $t_{\text{КО}} = 350^\circ\text{C}$ (для парового КО) и $P = 140 \text{ кгс/см}^2$

$$\Delta V_{\text{КО}} = 0,7 \cdot 10^3 \cdot 1,55 = 1,09 \text{ м}^3.$$

С уменьшением объема теплоносителя изменяется соответственно уровень воды в КО.

3.7.4. ЯР с $V_{\text{IK}} = 12 \text{ м}^3$ и $V_{\text{КО}} = 4 \text{ м}^3$ выведен на мощность 1 МВт при средней температуре теплоносителя в контуре и в КО 60°C , давлении $P_{\text{IK}} = 100 \text{ кгс/см}^2$, уровне воды в КО $30\% V_{\text{КО}}$. До какой температуры и за какое время можно разогреть ЯР, чтобы уровень в КО составлял $60\% V_{\text{КО}}$? Какое изменение давления соответствует изменению температуры?

Решение. Изменение уровня воды в КО должно произойти согласно условию задачи на

$$\Delta V = 60\% V_{\text{КО}} - 30\% V_{\text{КО}} = 30\% V_{\text{КО}} = 0,3 \cdot 4 = 1,2 \text{ м}^3,$$

что в пересчете на массу составляет (см. приложение 24)

$$\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,2 \text{ (м}^3\text{)}}{v_{120^\circ\text{C}} \text{ (м}^3\text{/кг)}} = \frac{1,2}{1,05 \cdot 10^{-3}} = 1,14 \text{ т,}$$

где v — удельный объем воды при температуре в КО после разогрева, которую для предварительной оценки считаем равной 120°C при $P_{\text{IK}} \approx 150 \text{ кгс/см}^2$. Уменьшение массы воды в контуре на 1,14 т может произойти при соответствующем увеличении удельного объема до значения v_{t_2} , которое можно определить из соотношения $\Delta m = m_{\text{IK}}(t_1) - m_{\text{IK}}(t_2) = V_{\text{IK}}/v_{60^\circ\text{C}} - V_{\text{IK}}/v_{t_2}$:

$$v_{t_2} = \frac{v_{60^\circ\text{C}}}{1 - \Delta m v_{60^\circ\text{C}}/V_{\text{IK}}} = \frac{1,013 \cdot 10^{-3}}{1 - 1,14 \cdot 1,013/12} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/кг.}$$

При давлении $100 - 140 \text{ кгс/см}^2$ такой удельный объем соответствует температуре примерно $170 - 180^\circ\text{C}$ (см. приложение 24). С

увеличением уровня воды в КО уменьшается свободный объем КО, вследствие чего растет давление в контуре согласно (3.7.1), где $P_1 = 100$ кгс/см² — давление в контуре в начале разогрева; $V_1 = 70\% V_{КО}$ и $V_2 = 40\% V_{КО}$ — свободный объем в КО до и после разогрева при условии, что с КО не соединены никакие газовые полости; если такие есть, то их объем нужно прибавить к V_1 и V_2 . Таким образом, $P_2 = P_1 V_1 / V_2 = 100 \cdot 70 / 40 = 175$ кгс/см². Чтобы разогреть воду первого контура массой $m_{IK} = V_{IK} / v_{60^\circ C} = 12 / 1,013 = 11,9$ т от температуры $t_1 = 60^\circ C$ до $t_2 = 170^\circ C$ при мощности $N = 1$ МВт, необходимо время τ , которое можно определить из соотношения (3.8.6):

$$\tau = m_{IK} c_p (t_2 - t_1) / 860N = 11,9 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 110 / 860 \cdot 10^3 = 1,5 \text{ ч.}$$

Итак, при $N = 1$ МВт средняя температура теплоносителя от $60^\circ C$ при исходном давлении 100 кгс/см² и уровне в КО $30\% V_{КО}$ примерно через полтора часа поднимется до $170^\circ C$, а давление — до 175 кгс/см². Чем больше свободный объем в КО, тем меньше изменится давление в контуре при том же изменении температуры. Это хорошо видно из следующих соотношений:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 - \Delta V}{V_1} = 1 - \frac{\Delta V}{V_1};$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_1}\right) = P_2 \frac{\Delta V}{V_1} = P_1 \frac{\Delta V}{V_2}; \quad \Delta P \xrightarrow{V \rightarrow \infty} 0.$$

Примечание. При решении задачи для оценки массы воды, которая перейдет из контура в КО, температура воды в КО взята равной $120^\circ C$. В действительности она ближе к значению $\bar{t} = (60 \cdot 0,3 V_{КО} + 170 \cdot 0,3 V_{КО}) / 0,6 V_{КО} = 115^\circ C$. Исходя из этого значения можно решить задачу более точно, но для практической оценки полученной точности вполне достаточно. Кроме того, при решении задачи не учтена теплоотдача от ЯР и трубопроводов первого контура в окружающую среду.

3.7.5. Определить скорость водяного теплоносителя в активной зоне при проходном сечении по теплоносителю $f = 0,5$ м², расходе $G_p = 4000$ т/ч, средней температуре $250^\circ C$, давлении 100 кгс/см² = $9,8$ МПа.

Решение. Из соотношения (3.7.2), используя данные приложения 24, определяем

$$\omega = \frac{G}{3600f\gamma} = \frac{4 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = 2,8 \text{ м/с.}$$

3.7.6. ВВЭР-1000 имеет $N = 3000$ МВт, $N_{эл} = 1000$ МВт (брутто), $N_{собств. нужд} = 47$ МВт, $P_{IK} = 160$ кгс/см², $t_{вх} = 290^\circ C$, $t_{вых} = 322^\circ C$. Определить расход теплоносителя в м³/ч и т/ч, КПД брутто и КПД нетто.

Решение. Исходя из (3.7.3) и приложений 22 и 24, находим $G_{IK} = \frac{860 \cdot 3 \cdot 10^6}{349 - 306} = 60 \cdot 10^6$ кг/ч = 60 т/ч = $60 \cdot v_{t=306^\circ C}^-$ (м³/кг) = $60 \cdot 10^6 \times$

$\times 1,4 \cdot 10^{-3} = 84\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. КПД: $\eta_{\text{брутто}} = 1000/3000 = 33,3\%$; $\eta_{\text{нетто}} = (1000 - 47)/3000 = 31,8\%$.

3.7.7. Реактор ТР работает на стационарной мощности $N_1 = 20\% N_{\text{НОМ}}$. Как с помощью стержня АР увеличить мощность с постоянной скоростью $0,5\%/\text{с}$ до уровня $80\% N_{\text{НОМ}}$?

Решение. При высвобождении ρ мощность увеличивается по экспоненциальному закону (3.3.1) с переменной скоростью

$$dN(\tau)/d\tau = T^{-1}N_0 e^{\tau/T} = 0,7N(\tau)/T_{(2)},$$

обратно пропорциональной периоду и прямо пропорциональной текущей мощности. Чем выше мощность, тем больше скорость ее увеличения при одинаковом высвобождении ρ , т. е. при том же перемещении АР. Чтобы скорость изменения мощности была постоянной, необходимо пропорционально росту мощности увеличивать период, т. е. уменьшать положительную реактивную реактивность (см. рис. 3.3.4).

Таким образом, после подъема АР выше критического положения по мере увеличения мощности нужно опускать АР, уменьшая $+\rho$ (при условии, что ρ изменяется только вследствие изменения положения АР).

В нашем конкретном случае на мощности $N_1 = 20\% N_{\text{НОМ}}$, чтобы обеспечить скорость $dN/d\tau = 0,5\%/\text{с}$, нужно высвободить положительную ρ , при которой согласно (3.3.3) $T = 20/0,5 = 40 \text{ с}$ ($T_{(2)} = 0,7 T = 28 \text{ с}$). Для этого АР со среднего по эффективности критического положения, где он должен находиться в работающем ЯР ($H_{\text{АР}} = 700 \text{ мм}$, см. рис. 3.4.3, кривая 1), необходимо поднять в положение $H_{\text{АР}1} = 550 \text{ мм}$, высвободив $\rho = 0,13\%$, которой соответствует $T = 40 \text{ с}$ ($T_{(2)} = 28 \text{ с}$, см. рис. 3.3.3). Если ρ оставить постоянной, т. е. не изменять положения АР, то мощность будет нарастать по экспоненциальному закону с $T = 40 \text{ с}$ и за время $t = (80 - 20)/0,5 = 120 \text{ с}$, которое соответствует времени увеличения мощности с 20 до $80\% N_{\text{НОМ}}$ с постоянной скоростью $0,5\%/\text{с}$, достигнет значения $N(120 \text{ с}) = N_0 e^{\tau/T} = 20e^{120/40} = 20 \cdot 20,1 \approx 400\% N_{\text{НОМ}}$ (!), что недопустимо. Поэтому, высвободив $\rho_1 = +0,13\%$, ее необходимо непрерывно уменьшать, опуская АР. Например, через 28 с ($T_{(2)}$ при $\rho_1 = +0,13\%$) мощность должна быть не $40\% N_{\text{НОМ}}$ (как при $\rho_1 = +0,13\% = \text{const}$), а только $34\% N_{\text{НОМ}}$ как при $dN/d\tau = 0,5\%/\text{с} = \text{const}$: $N(28 \text{ с}) = 20 + 0,5 \cdot 28 = 34\% N_{\text{НОМ}}$ (рис. 3.7.4) и $T = 34/0,5 = 68 \text{ с}$ ($T_{(2)} = 48 \text{ с}$), которому соответствует $\rho = +0,090$, а положение АР — 560 мм и т. д.

В момент достижения значения $80\% N_{\text{НОМ}}$ скорости $0,5\%/\text{с}$ будет соответствовать $T = 80/0,5 = 160 \text{ с}$ ($T_{(2)} = 112 \text{ с}$), $\rho = +0,046\%$ и $H_{\text{АР}} = 650 \text{ мм}$. На рис. 3.7.4 показано, как нужно перемещать АР, чтобы обеспечить постоянную скорость ($0,5\%/\text{с}$) увеличения мощности с 20 до $80\% N_{\text{НОМ}}$. Сначала нужно поднять АР от критического положения $H_{\text{АР}}^{\text{крит}} = 700 \text{ мм}$ до $H_{\text{АР}} = 400 \text{ мм}$. По мере увеличения мощности АР нужно опускать, так чтобы при мощ-

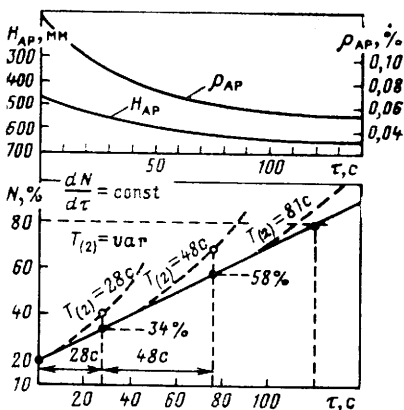


Рис. 3.7.4. К задаче 3.7.7

ности 80 % $N_{\text{ном}}$ он оказался в положении 650 мм. Таким образом, за 120 с (время перехода с 20 до 80 % $N_{\text{ном}}$ со скоростью 0,5 %/с) АР переместится на $650 - 480 = 170$ мм, что соответствует средней скорости опускания $dH/d\tau = 170/120 = 1,4$ мм/с; сначала $\sim 2,5$ мм/с, потом ~ 1 мм/с. При этом необходимо учитывать, что в реальных условиях на изменение ρ , обусловленное перемещением АР, будет влиять тепле-

ратурный, мощностной и другие эффекты, сопровождающие увеличение мощности. Если, например, ЯР имеет отрицательные α_t и α_N (что практически всегда имеет место), то по мере увеличения мощности опускать АР не требуется, а возможно даже придется их поднимать, чтобы поддерживать ρ положительным, равным необходимому для получения данной скорости увеличению мощности значению $+\rho = \Delta\rho_{\text{АР}} + \Delta t\alpha_t - \Delta N\alpha_N$, где $\Delta\rho_{\text{АР}}$, Δt , ΔN , α_t , α_N — соответственно ρ , высвобождаемая подъемом АР, повышение температуры и мощности, температурный и мощностной коэффициенты.

3.7.8. Рассчитать тепловую мощность ЯР, имеющего следующие параметры теплоносителя первого контура: $P_{\text{Iк}} = 120$ кгс/см², $G_{\text{Iк}} = 4000$ м³/ч, $t_{\text{вх}} = 255$ °С, $t_{\text{вых}} = 270$ °С.

Решение. По формуле (3.7.3)

$$N_{\text{I}} = \frac{4000(282,6 - 265,0)}{860 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3}} = 65,6 \cdot 10^3 \text{ кВт} = 65,6 \text{ МВт},$$

где $i_{\text{вых}} = 282,6$ ккал/кг; $i_{\text{вх}} = 265,0$ ккал/кг — энтальпии для соответствующих температур при давлении 120 кгс/см² (см. приложение 22); $v_{\text{вх}} = 1,248 \cdot 10^{-3}$ м³/кг — удельный объем теплоносителя (см. приложение 24) при $t_{\text{вх}} = 255$ °С и $P = 120$ кгс/см² (имеется в виду, что расходомер стоит на входе в ЯР).

3.7.9. Рассчитать тепловую мощность ЯР по параметрам рабочей среды второго контура: $G_{\text{п.в}} = 120$ м³/ч; $t_{\text{п.в}} = 170$ °С; $P_{\text{п.в}} = 30$ кгс/см² = 2,94 МПа; $t_{\text{пар}} = 260$ °С.

Решение. По формуле (3.7.4) находим

$$N_{\text{II}} = \frac{120(689 - 171,9)}{860 \cdot 1,112 \cdot 10^{-3}} = 64,9 \cdot 10^3 \text{ кВт} \approx 65 \text{ МВт}.$$

Энтальпия пара и питательной воды, а также удельный объем воды определены из приложений 23, 22, 24 для соответствующих температур и давлений. Удельный объем взят для питательной воды, а не для пара, так как расход дан для воды.

3.7.10. АЭС с ВВЭР ежегодно не работают: ~ 1000 ч—в связи с частичными перегрузками и периодическим контролем состояния металла оборудования и трубопроводов ЯЭУ; ~ 1000 ч— по причине текущего ремонта и по непредвиденным остановкам. Чему равны КИМ_{год} и $\tau_{эф}^{год}$?

Решение. $\tau_{эф}^{год} = 8760 - (1000 + 1100) = 6660$ ч;

$$\text{КИМ}^{год} = 6660/8760 = 0,76.$$

Примечание. На РБМК время на перегрузку сокращается (благодаря непрерывной перегрузке, без остановки АЭС), но увеличивается время на ежегодный ремонт одноконтурных АЭС, поэтому $\tau_{эф}^{год}$ равно также ~ 6500 ч.

3.7.11. Оптимальный КИМ_{год} для ВВЭР-440 равен $\sim 0,8$. Какому $\tau_{эф}^{год}$ он соответствует?

Решение. Согласно (3.7.6) $\tau_{эф}^{год} = \text{КИМ}^{год} \cdot 8760 = 7000$ ч.

3.7.12. АЭС в течение года (8760 ч) работала в следующем режиме: $N_1 = 80\%$ $N_{ном} - \tau_1 = 900$ ч; $N_2 = 100\%$ $-\tau_2 = 2100$ ч; $N_3 \approx 90\%$ $-\tau_3 = 3000$ ч; $N_4 = 60\%$ $-\tau_4 = 700$ ч. Ремонтные работы продолжались в течение $\tau_{рем} = 1000$ ч и перегрузка $\tau_{пер} = 1060$ ч. Чему равны КИМ, КИМ*, КИВ?

Решение. Согласно (3.7.6) — (3.7.8)

$$\text{КИМ} = (80 \cdot 900 + 100 \cdot 2100 + 90 \cdot 3000 + 60 \cdot 700 + 0 \cdot 2060) / 100 \times$$

$$\times 8760 = 594\,000 / 876\,000 = 0,679 \approx 68\%;$$

$$\text{КИМ}^* = 594\,000 / 100 \cdot (8760 - 2060) = 88,7\%;$$

$$\text{КИВ} = (900 + 2100 + 3000 + 700) / 8760 = 0,765 = 76,5\%;$$

$$\text{КИМ} = \text{КИМ}^* \cdot \text{КИВ} = 0,887 \cdot 0,765 = 0,679 \approx 68\%.$$

3.7.13. Атомное судно при работе ЯР на $N_{ном} = 80$ МВт имеет скорость хода 22 узла, а при работе на мощности 50% $N_{ном}$ 16 узлов. Оценить расход энергозапаса на милю пройденного пути в обоих случаях. Какая дальность плавания обеспечивается на $N_{ном}$ и 50% $N_{ном}$, если кампания равна 800 сут?

Решение. Согласно (3.7.9) расход энергозапаса на милю пройденного пути равен:

при работе на $N_{ном}$ $B_s = 80/22 \approx 3,64$ МВт·ч/миля;

при работе на 50% $N_{ном}$ $B_s = 40/16 = 2,50$ МВт·ч/миля.

Дальность плавания (мили) равна произведению скорости хода (узлы) на время работы ЯР (ч) на данной мощности: $s = vt$. На $N_{ном}$ $s = 22 \cdot 800 \cdot 24 = 4,22 \cdot 10^5$ миль; на 50% $N_{ном}$ (без увеличения энергозапаса за счет уменьшения стационарного отравления) $s = 16 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 24 = 6,14 \cdot 10^5$ миль, т. е. на $1,93 \cdot 10^5$ миль больше, чем при работе на $N_{ном}$ (см. рис. 3.7.3).

3.7.14. Атомное судно, рассмотренное в задаче 3.7.13, прошло 5000 миль при работе ЯР на мощности 50% $N_{ном}$. Какое расстояние можно еще пройти на мощности 50% на сэкономленном эне-

гозапасе по отношению к возможному расходу его при дальности плавания 5000 миль на $N_{\text{ном}}$?

Решение. При работе на мощности 50 % время, затраченное на прохождение 5000 миль, равно $\tau = s/v = 5000/16 = 312$ ч, а израсходованный энергозапас $Q_{\text{к}} = N\tau = 0,5 \cdot 80 \cdot 312 = 12,5 \cdot 10^3$ МВт·ч. Если бы ЯР работал на $N_{\text{ном}}$, то $\tau = 5000/22 = 227$ ч, а $Q_{\text{к}} = 80 \cdot 227 = 18,2 \cdot 10^3$ МВт·ч.

Таким образом, экономия энергозапаса при большей затрате времени, но при работе на мощности 50 % составляет $18,2 \cdot 10^3 - 12,5 \cdot 10^3 = 5,7 \cdot 10^3$ МВт·ч. На мощности 50 % его достаточно для работы в течение $5,7 \cdot 10^3 / (0,5 \cdot 80) = 143$ ч. При скорости 16 узлов атомное судно сможет пройти за это время $16 \cdot 143 = 2288$ миль.

Кроме того, при работе на мощности 50 % энергозапас и время работы увеличатся также вследствие уменьшения стационарного отравления Xe (см. задачу 2.9.7) и мощностного эффекта, если он имеет место в данном ЯР (см. задачу 2.9.17).

Контрольные вопросы и задачи

1. Можно ли при пуске ЯР увеличивать мощность со скоростью, допустимой с точки зрения термических напряжений в активной зоне?

2. Как при изменении мощности ЯР обеспечить постоянную скорость ее изменения и постоянство средней температуры первого контура?

3. ВВР с $V_{\text{ГК}} = 10$ м³ начали разогревать при $P_{\text{ГК}} = 120$ кгс/см² и $\bar{t} = 60$ °С. КО ($V_{\text{КО}} = 3$ м³) заполнены водой на 40 %. Можно ли разогреть теплоноситель первого контура до $\bar{t} = 250$ °С, не дренируя воду первого контура?

4. При каком количестве воды в газовых КО можно производить расхолаживание ЯР от 250 до 150 °С без подпитки первого контура ($V_{\text{ГК}} = 15$ м³, $P_{\text{ГК}} = 100$ кгс/см² = 9,8 МПа)?

5. ЯР имеет $V_{\text{ГК}} = 12$ м³, $V_{\text{КО}} = 4$ м³, $P_{\text{ГК}} = 50$ кгс/см², $\bar{t}_{\text{ГК}} = 100$ °С, а уровень воды в КО — 30 % $V_{\text{КО}}$. Можно ли без дополнительной подпитки первого контура получить $P_{\text{ГК}} = 140$ кгс/см² при разогреве теплоносителя до 250 °?

6. Рассчитать тепловую мощность ЯР, имеющего следующие параметры: $P_{\text{ГК}} = 130$ кгс/см², $G_{\text{ГК}} = 4000$ м³/ч; $t_{\text{вх}} = 260$ °С; $t_{\text{вых}} = 290$ °С.

7. Рассчитать тепловую мощность ЯР по параметрам рабочей среды второго контура: $G_{\text{п.в}} = 130$ м³/ч; $t_{\text{п.в}} = 160$ °С; $P_{\text{пар}} = 32$ кгс/см²; $t_{\text{пар}} = 270$ °С.

8. Можно ли достигнуть КИМ = 1?

9. На какой мощности должен работать судовой ЯР, чтобы судно прошло максимальное расстояние при: а) заданном промежутке времени; б) заданном энергозапасе?

10. С какой скоростью идет атомный ледокол во льдах, если расход энергозапаса при работе двух ЯР на $N = 90$ МВт каждый составляет 24 МВт·ч/миля?

§ 3.8. ОСТАНОВКА И РАСХОЛАЖИВАНИЕ РЕАКТОРА

Остановка реактора — это приведение ЯР в подкритическое состояние для снижения тепловой мощности до уровня, обусловленного спонтанным делением топлива, фотонейтронными реакциями, а также β - и γ -излучением продуктов деления. Остановка бывает *плановой* и *аварийной*. В первом случае в активную зону вводится

поглотитель нейтронов со скоростью, которая обеспечивает допустимую с точки зрения термических напряжений скорость снижения мощности и температуры. Во втором случае мощность снижается со скоростью, необходимой для сохранения активной зоны в сложившейся аварийной ситуации. В обоих случаях глубина погружения поглотителей нейтронов должна обеспечить подкритичность, которая не допустит самопроизвольного выхода ЯР в критическое состояние при высвобождении ρ вследствие снижения мощности, температуры и разотравления.

Скорость снижения тепловыделения в ЯР после введения отрицательной реактивности определяется следующими процессами: делением топлива мгновенными нейтронами; тепловой инерцией материала активной зоны и количеством аккумулированного в нем тепла; делением топлива запаздывающими нейтронами и фотонейтронами (при наличии последних); торможением β - и γ -излучения продуктов деления, накопившихся за время работы ЯР. Спад каждой составляющей происходит с различной скоростью. Мощность от деления мгновенными нейтронами снижается за доли секунды. Соответственно уменьшается $N_{оск.н}$ и γ , т. е. мощность от деления осколков деления ($N_{оск}$), замедления и захвата нейтронов (N_n), поглощения мгновенного γ -излучения (N_γ). В N_0 на рис. 3.8.1 не учтена энергия нейтрино и часть энергии γ -излучения и нейтронов, уносимой ими за пределы ЯР ($\sim 1\%$).

Фактически тепловая мощность снижается медленнее вследствие инерции спада аккумулированного в материалах ЯР тепла. Тепловая инерция зависит от материалов активной зоны и условий теплосъема. Практически ею можно пренебречь через несколько секунд после снижения мощности. Тепловую мощность, обусловленную делением запаздывающими нейтронами, можно не учитывать через 3—5 мин. Значительно дольше продолжается процесс деления фотонейтронами (если они есть). Для ЯР, имеющих в активной зоне D_2O или Be , на которых с большой вероятностью протекает реакция (γ, n) , вклад фотонейтронов составляет $\sim 15\%$ доли запаздывающих нейтронов [2, 3, 24]. Основной составляющей тепловой мощности в любом ЯР через несколько минут после оста-

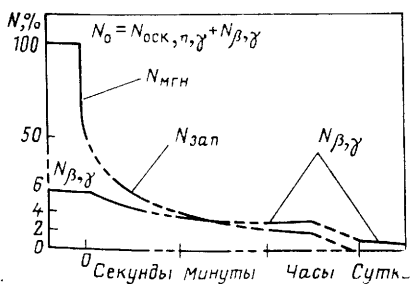


Рис. 3.8.1. Изменение мощности после останова ЯР

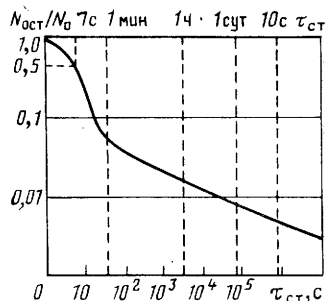


Рис. 3.8.2. Остаточное тепловыделение в активной зоне ВВЭР-440

новки в течение продолжительного времени будет тепловыделение $N_{\beta\gamma}$ вследствие торможения β -, γ -излучения осколков деления и продуктов их распада, которое, собственно, и принято называть *остаточным тепловыделением* после остановки ЯР. На рис. 3.8.2 показано изменение суммарного остаточного тепловыделения после остановки ВВЭР-440.

После введения отрицательной реактивности ЯР становится подкритичным на мгновенных нейтронах на величину $\rho_{\text{мгн}} = \beta_{\text{эф}} + |-\rho|$ и мощность скачком снижается от N_0 до подкритического значения $N(l)$ (3.3.2), уменьшаясь на ΔN^- (3.3.12).

После первоначального скачка на мгновенных нейтронах уменьшение нейтронной мощности происходит пропорционально скорости распада осколков — источников запаздывающих нейтронов:

$$N_{\text{зап}}(\tau) = N_0 \sum_i \frac{\gamma_i \beta_i e^{-\lambda_i \tau}}{\beta_{\text{эф}} + |-\rho|} = \frac{N_0 \gamma}{\beta_{\text{эф}} + |-\rho|} \sum_i \beta_i e^{-\lambda_i \tau}. \quad (3.8.1)$$

В каждый момент мощность согласно § 3.2 определяется подкритичностью и мощностью источника нейтронов, которым в данном случае являются осколки — источники запаздывающих нейтронов. Каждая группа запаздывающих нейтронов (β_i) характеризуется эффективностью γ_i и постоянной распада λ_i (с^{-1}). Наибольший вклад дают короткоживущие нуклиды, наименьший — долгоживущие.

На рис. 3.8.3 представлена суммарная кривая распада шести групп ядер — предшественников запаздывающих нейтронов

$$f_{\beta}(\tau) = \sum_i \beta_i e^{-\lambda_i \tau} = \frac{N(\tau)_{\text{зап}}}{N_0} \frac{\beta_{\text{эф}} + |-\rho|}{\gamma},$$

по которой можно в каждом конкретном случае для различных $|-\rho|$ и γ оценить мощность, обусловленную запаздывающими нейтронами в любой момент после остановки.

Энергия, выделяющаяся в результате полного распада ($\tau \rightarrow \infty$) продуктов одного деления ^{235}U , равна ~ 26 МэВ/дел., из которых ~ 11 МэВ уносит нейтрино, а ~ 15 МэВ в виде тепловой энергии остается в той среде, где находятся продукты деления. Примерно через 10 мин после остановки ЯР $N_{\beta,\gamma}$ составляет 2—3 % N_0 . Для расчета используются формулы, предложенные разными авторами.

Большое распространение получила формула Вигнера и Вей

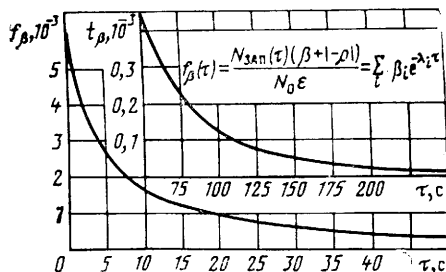


Рис. 3.8.3. Снижение мощности, обусловленной запаздывающими нейтронами, после остановки ЯР

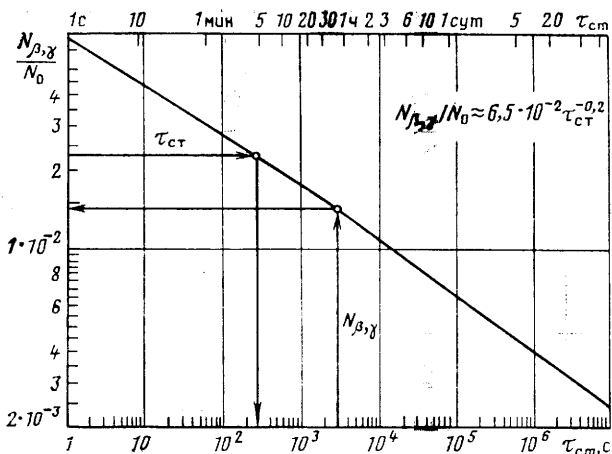


Рис. 3.8.4. График для приближенной оценки $N_{\beta, \gamma}$ после остановки ЯР при $T \gg \tau_{ст}$

$$\left. \begin{aligned} N_{\beta, \gamma} / N_0 &= 6,5 \cdot 10^{-2} [\tau_{ст}^{-0,2} - (\tau_{ст} + T)^{-0,2}]; \\ N_{\beta, \gamma} / N_0 &= 6,5 \cdot 10^{-3} [\tau_{ст}^{-0,2} - (\tau_{ст} + T)^{-0,2}], \end{aligned} \right\} \quad (3.8.2)$$

где $N_{\beta, \gamma}$ — мощность остаточного тепловыделения ЯР через время $\tau_{ст}$ (время стоянки) после остановки; N_0 — мощность ЯР до остановки, на которой он работал в течение времени T . (В первой формуле время стоянки и время работы выражено в секундах, во второй — в сутках, а $N_{\beta, \gamma}$ и N_0 — в одинаковых единицах мощности.)

Когда $\tau_{ст} \ll T$,

$$N_{\beta, \gamma} \approx 6,5 \cdot 10^{-2} N_0 \tau_{ст}^{-0,2} \quad (\tau_{ст} \text{ — в секундах});$$

$$N_{\beta, \gamma} \approx 6,5 \cdot 10^{-3} N_0 \tau_{ст}^{-0,2} \quad (\tau_{ст} \text{ — в сутках}).$$

На рис. 3.8.4 эта зависимость представлена в виде графика, с помощью которого без громоздких вычислений можно решать эксплуатационные задачи, связанные с остаточным тепловыделением.

Несколько большую точность по сравнению с предыдущей дает формула Унтермейера и Вейлса для природного урана с учетом тепловыделения, обусловленного радиоактивным распадом ^{239}U и ^{239}Np , образующихся при поглощении нейтронов в ^{238}U (рис. 3.8.5):

$$\begin{aligned} N_{\beta, \gamma} / N_0 &= 0,1 \{ [(\tau_{ст} + 10)^{-0,2} - (\tau_{ст} + T + 10)^{-0,2}] - 0,87 \times \\ &\times [(\tau_{ст} + 2 \cdot 10^7)^{-0,2} - (\tau_{ст} + T + 2 \cdot 10^7)^{-0,2}] \}. \end{aligned}$$

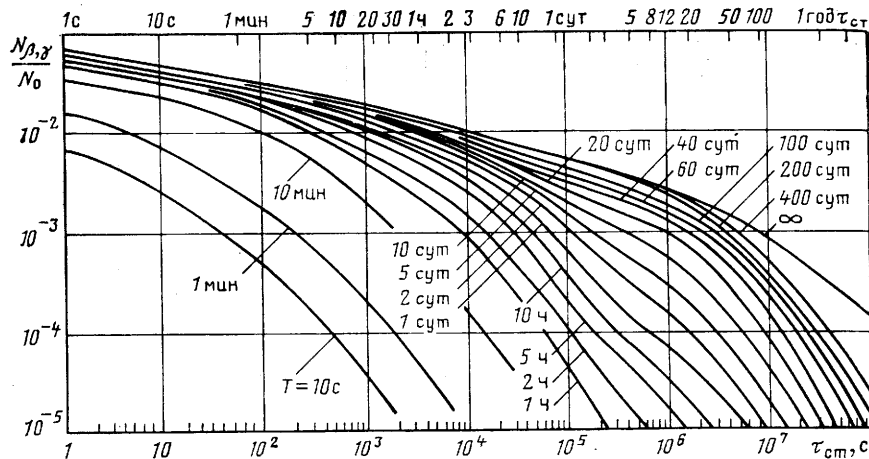


Рис. 3.85. График для определения $N_{\beta, \gamma}$ после остановки ЯР

Эта формула не позволяет получить удовлетворительных результатов при $\tau_{ост} < 20$ с и дает некоторое завышение энерговыделения для $\tau_{ост} > (1 \div 2) \cdot 10^7$ с $\approx (1 \div 2) \cdot 10^2$ сут.

Так как при работе на стационарном уровне $N_{\beta, \gamma}$ составляет $\sim 7\%$ установившейся полной мощности (см. табл. 1.5.1), то для приближенных оценок можно считать, что после остановки ЯР в пределах первой секунды $N_{\beta, \gamma} \approx 0,065 N_0$.

При $1 \text{ с} \leq \tau_{ост} \leq 100 \text{ с}$ некоторые авторы предлагают такую аппроксимационную зависимость:

$$N_{\beta, \gamma} = 0,1 N_0 [(\tau_{ост} + 10)^{-0,2} - 0,030].$$

В первые минуты после остановки ЯР $N_{ост}$, обусловленное запаздывающими нейтронами и β -, γ -излучением продуктов деления, можно оценить по общей формуле:

$$N_{ост} = N_0 \left(\sum_i \frac{\gamma_i \beta_i}{\gamma_i \beta_i + |-\rho|} e^{-\lambda_i \tau_{ост}} + 0,065 \tau_{ост}^{-0,2} \right), \quad (3.8.3)$$

Графическая зависимость $N_{\beta, \gamma} = f(N_0, T, \tau_{ост})$ дает возможность оператору решать следующие практические задачи:

определять $N_{\beta, \gamma}$ в любой момент $\tau_{ост}$ после остановки ЯР, если он работал в течение времени T на мощности N_0 (см. задачи 3.8.3 и др.);

оценивать время стоянки $\tau_{ост}$, по истечении которого после остановки ЯР $N_{\beta, \gamma}$ снизится до необходимого уровня, чтобы перейти на автономную систему расхолаживания (см. задачу 3.8.7 и др.).

В период пусконаладочных работ может появиться необходимость определять максимальный уровень мощности N_0 , на котором можно работать в течение отведенного времени T , или допусти-

мое время работы T на необходимом уровне N_0 , чтобы в том и другом случае по истечении времени стоянки остаточное тепловыделение было не больше $N_{\beta, \gamma}$ (см. задачу 3.8.9 и др.).

Если ЯР до остановки работал на различных уровнях, расчет можно вести исходя из средней мощности $\bar{N} = \sum_i N_i \tau_i / \sum_i \tau_i$, но при этом следует учитывать возможную погрешность в расчете, обусловленную отклонением \bar{N} от мощности N , на которой ЯР работал непосредственно перед остановкой. Дело в том, что основной вклад в $N_{\beta, \gamma}$ дают осколки и продукты их распада, имеющие наибольшую интенсивность излучения, т. е. накопившиеся в последнее время работы ЯР. Таким образом, если средняя мощность окажется больше мощности перед остановкой, то значение рассчитанного $N_{\beta, \gamma}$ по средней мощности будет завышенным, если меньше, — заниженным. Для более точного определения $N_{\beta, \gamma}$ или $\tau_{ст}$ после оценочного расчета по \bar{N} можно уточнить решение для каждого уровня мощности N_i отдельно (задачи 3.8.5 и 3.8.6).

Зависимость (3.8.3) необходима для оценки мощности в течение первых минут после остановки ЯР, что особенно важно для анализа переходного температурного режима в ситуациях, связанных с аварийной остановкой ЯР из-за опасного снижения циркуляции теплоносителя первого контура.

Расход теплоносителя, необходимый для съема $N_{ост}$ (кВт) при температуре на входе и выходе ЯР $t_{вх}$ и $t_{вых}$ ($^{\circ}\text{C}$) и соответствующих энтальпиях $i_{вх}$ и $i_{вых}$ (ккал/кг), определяется по формуле

$$G = 860 N_{ост} / (i_{вых} - i_{вх}) \text{ кг/ч.} \quad (3.8.4)$$

При отсутствии теплосъема и наличии $N_{ост}$ (кВт) скорость разогрева компонентов активной зоны, имеющих массу m_i (кг) и теплоемкость c_{pi} [ккал/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$)],

$$dt/d\tau = 860 N_{ост} / \sum_i m_i c_{pi} \text{ } ^{\circ}\text{C/ч.} \quad (3.8.5)$$

Увеличение температуры среды при этом от значения t_1 ($^{\circ}\text{C}$) до t_2 ($^{\circ}\text{C}$) за время τ (ч) можно определить из соотношения

$$Q = 860 N_{ост} \tau = \bar{m} \bar{c}_p (t_2 - t_1) \text{ ккал,} \quad (3.8.6)$$

где \bar{c}_p — средняя теплоемкость вещества для $\bar{t} = (t_2 + t_1) / 2$ $^{\circ}\text{C}$, ккал/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$).

Количество тепла (энергии), необходимого для испарения m (кг) вещества, имеющего теплоту парообразования r (ккал/кг),

$$Q = 860 N \tau = m r \text{ ккал.} \quad (3.8.7)$$

Скорость испарения соответственно равна

$$dm/d\tau = 860 N / r \text{ кг/ч.} \quad (3.8.8)$$

Задачи с решениями

3.8.1. ЯР работал на $N = 100$ МВт. До какого уровня первоначально снизится мощность при сбросе в активную зону одного,

двух и трех стержней АЗ? Физический вес одного стержня $\rho_{AZ} = 0,006$, интерференция стержней нулевая, $\beta_{эф} = 0,007$.

Решение. Согласно (3.3.2) и (3.3.12) мощность ЯР после отрицательного скачка ρ уменьшится скачком на ΔN^- до уровня $N(I)$ (табл. 3.8.1).

3.8.2. Оценить мощность, обусловленную делением топлива после срабатывания АЗ через 1 с, 10 с, 1 мин, 2 мин, 3 мин, если до остановки ЯР работал на мощности 60 МВт; $\rho_{AZ} = 2\%$; $\beta_{эф} = 0,8\%$.

Решение. Согласно (3.8.1), где $\gamma = \beta_{эф}/\beta = 0,8/0,64 = 1,25$, $N_{зап}(\tau) = 1,25 N_{of} f_{\beta}(\tau) / (0,008 + 0,020) = 2,7 \cdot 10^3 f_{\beta}(\tau)$ МВт.

В табл. 3.8.2 даны значения $N_{зап}(\tau)$ после сброса стержней АЗ в различные моменты времени. Значения $f_{\beta}(\tau)$ определены для соответствующих τ из графика рис. 3.8.3.

Таблица 3.8.2

τ	$f_{\beta}(\tau) \cdot 10^3$	$N_{зап}$		τ	$f_{\beta}(\tau) \cdot 10^3$	$N_{зап}$	
		МВт	%			МВт	%
1 с	5,2	14	23	2 мин	0,08	0,22	0,36
10 с	1,7	4,6	7,7	3 мин	0,03	0,08	0,13
1 мин	0,33	0,9	1,5				

3.8.3. ЯР работал на $N = 100$ МВт в течение 100 сут. Определить $N_{\beta, \gamma}$ через 100 сут после остановки [по формуле (3.8.2) и по графику рис. 3.8.5].

Решение. Подставляя в формулу (3.8.2) данные задачи, находим:

$$N_{\beta, \gamma} = 6,5 \cdot 10^{-3} N_0 [100^{-0,2} - (100 + 100)^{-0,2}] \approx 33 \text{ кВт.}$$

По графику рис. 3.8.5 получаем близкий результат: для $\tau_{ст} = 100$ сут и $T = 100$ сут $N_{\beta, \gamma}/N_0 \approx 4 \cdot 10^{-4}$ и, следовательно, $N_{\beta, \gamma} \approx 40$ кВт.

3.8.4. Реактор ТР работал на $N_{ном}$ в течение 10 сут. Определить $N_{\beta, \gamma}$ через 2 сут после остановки.

Решение. По графику рис. 3.8.5 для $T = 10$ сут определяем при $\tau_{ст} = 2$ сут: $N_{\beta, \gamma}/N_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$, откуда $N_{\beta, \gamma} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^4 = 120$ кВт.

3.8.5. ЯР работал $T_1 = 20$ сут на $N_1 = 50$ МВт, а потом $T_2 = 10$ сут на $N_2 = 80$ МВт. Определить $N_{\beta, \gamma}$ через 2 ч после остановки.

Решение. Если ЯР перед остановкой работал на разных мощностях, то $N_{\beta,\gamma}$ можно оценить по средней мощности, которая в данном случае равна

$$\bar{N} = \frac{\sum N_i T_i}{\sum T_i} = (50 \cdot 20 + 80 \cdot 10) / 30 = 60 \text{ МВт.}$$

По графикам рис. 3.8.5 определяем для $T = T_1 + T_2 = 30$ сут и $\tau_{\text{ст}} = 2$ ч: $N_{\beta,\gamma} / \bar{N} \approx 10^{-2}$, откуда $N_{\beta,\gamma} \approx 10^{-2} \cdot \bar{N} = 600$ кВт.

Такая оценка может существенно отличаться от действительного значения $N_{\beta,\gamma}$, особенно если средняя мощность заметно отличается от уровня мощности, на котором ЯР работал перед остановкой. В данной задаче $\bar{N} = 60 \text{ МВт} < N_2 = 80 \text{ МВт}$, поэтому полученное значение $N_{\beta,\gamma} = 600$ кВт ниже действительного. Это нетрудно проверить, решив задачу более точно. Для этого нужно определить $N_{\beta,\gamma}$ через 2 ч после остановки как сумму $N_{\beta,\gamma}$ от каждой мощности. При этом за время стоянки нужно брать каждый раз сумму действительного времени стоянки и времени работы ЯР на различных уровнях после той мощности, для которой рассчитывается $N_{\beta,\gamma}$.

Определяем N_{β,γ_1} для $N_1 = 50$ МВт, $T_1 = 20$ сут и $\tau_{\text{ст},1} = \tau_{\text{ст}} + T_2 = 10$ сут 2 ч и N_{β,γ_2} для $N_2 = 80$ МВт, $T_2 = 10$ сут и $\tau_{\text{ст}} = 2$ ч. По графику рис. 3.8.5 находим $N_{\beta,\gamma_1} \approx 10^{-3} N_1 = 50$ кВт; $N_{\beta,\gamma_2} = 8 \cdot 10^{-3} N_2 = 640$ кВт; $N_{\beta,\gamma} = N_{\beta,\gamma_1} + N_{\beta,\gamma_2} = 690$ кВт, что, как и следовало ожидать, на 90 кВт выше оценки по средней мощности.

Оценка по средней мощности по приближенной формуле (для $\tau_{\text{ст}} \ll T$) дает завышенное значение $N_{\beta,\gamma}$ (см. рис. 3.8.4): при $\tau_{\text{ст}} = 2$ ч $N_{\beta,\gamma} / \bar{N} \approx 1,2 \cdot 10^{-2}$; $N_{\beta,\gamma} \approx 720$ кВт.

3.8.6. ЯР работал на $N_1 = 40$ МВт $T_1 = 5$ сут, а потом на $N_2 = 100$ МВт $T_2 = 2$ сут. Определить $N_{\beta,\gamma}$ через сутки после остановки. Отличалось бы $N_{\beta,\gamma}$ через сутки после остановки, если бы ЯР сначала работал на мощности 100 МВт $T'_1 = 2$ сут, а потом на мощности 40 МВт $T'_2 = 5$ сут?

Решение. $N_{\beta,\gamma}$, определенное по средней мощности, естественно, будет одинаковым для обоих режимов работы. По графику рис. 3.8.5 для $T = T_1 + T_2 = 7$ сут, $\tau_{\text{ст}} = 1$ сут, $\bar{N} = 57$ МВт определяем $N_{\beta,\gamma} \approx 114$ кВт. Фактически $N_{\beta,\gamma}$ в первом случае больше, чем во втором, так как $40 \text{ МВт} < \bar{N} < 100 \text{ МВт}$.

Определяем по графику рис. 3.8.5 точнее:

1) $T_1 = 5$ сут и $\tau_{\text{ст}1} = \tau_{\text{ст}} + T_2 = 3$ сут; $N_{\beta,\gamma_1} \approx 30$ кВт; $T_2 = 2$ сут и $\tau_{\text{ст}2} = 1$ сут; $N_{\beta,\gamma_2} \approx 120$ кВт. Таким образом, $N_{\beta,\gamma} = N_{\beta,\gamma_1} + N_{\beta,\gamma_2} \approx 150$ кВт;

2) $T'_1 = 2$ сут, $\tau'_{\text{ст}} = \tau_{\text{ст}} + T'_2 = 6$ сут; $N_{\beta,\gamma'_1} \approx 25$ кВт; $T'_2 = 5$ сут, $\tau_{\text{ст}2} = 1$ сут; $N_{\beta,\gamma'_2} \approx 70$ кВт. Таким образом $N_{\beta,\gamma} = N_{\beta,\gamma'_1} + N_{\beta,\gamma'_2} \approx 100$ кВт.

Различие в 50 кВт довольно существенное. Поэтому, делая оценку $N_{\beta,\gamma}$ по средней мощности, необходимо по крайней мере знать, завышен или занижен результат. Если средняя мощность больше мощности, на которой работал ЯР перед остановкой, то результат такого расчета завышен, если меньше, — занижен.

3.8.7. ЯР работал 30 сут на $N=90$ МВт. Через какое время после остановки $N_{\beta,\gamma} \approx 500$ кВт?

Решение. По графикам рис. 3.8.5 для $N_{\beta,\gamma}/N_0 = 5 \cdot 10^2 / (9 \times 10^4) = 5,5 \cdot 10^{-3}$ и $T=30$ сут определяем $\tau_{ст} \approx 7$ ч.

3.8.8. ЯР работал на мощности $N_1=100$ МВт $T_1=1$ сут, а потом на $N_2=50$ МВт $T_2=1$ сут. Через какое время после остановки $N_{\beta,\gamma} \approx 300$ кВт?

Решение. Если исходить из средней мощности $\bar{N}=75$ МВт, то из рис. 3.8.5 для $N_{\beta,\gamma}/\bar{N} = 300 / (75 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-3}$ и $T=T_1+T_2=2$ сут найдем $\tau_{ст}=5,5$ ч. Так как $\bar{N} > N_2$, то, естественно, что полученное время расхолаживания до $N_{\beta,\gamma} = 300$ кВт завышено. Проверим:

для $T_1=1$ сут и $\tau_{ст1} = \tau_{ст} + T_2 = 1,2$ сут $N_{\beta,\gamma_1} \approx 80$ кВт;

для $T_2=1$ сут и $\tau_{ст2} = \tau_{ст} = 5,5$ ч $N_{\beta,\gamma_2} \approx 170$ кВт.

Суммарное тепловыделение равно ~ 250 кВт (< 300 кВт). Это значит, что время расхолаживания до ~ 300 кВт меньше 5,5 ч. Чтобы определить его более точно, можно поступить следующим образом.

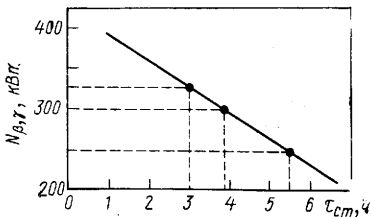
Нужно определить $N_{\beta,\gamma}$ для $\tau_{ст} < 5,5$ ч, например для 3 ч, а потом по двум значениям $N_{\beta,\gamma}$ для двух значений $\tau_{ст}$ построить графическую зависимость $N_{\beta,\gamma} = f(\tau_{ст})$, которую в небольшом интервале можно считать линейной. По этому графику и определим время стоянки, когда $N_{\beta,\gamma} = 300$ кВт. Итак, для $T_1=1$ сут и $\tau_{ст} = T_2 + 3$ ч $\approx 1,1$ сут определяем $N_{\beta,\gamma_1} \approx 80$ кВт; для $T_2=1$ сут и $\tau_{ст2} = 3$ ч $N_{\beta,\gamma_2} \approx 250$ кВт.

Суммарное тепловыделение равно ~ 330 кВт (> 300 кВт). Из построенного графика (рис. 3.8.6) определяем, что $N_{\beta,\gamma}$ при данном режиме работы до остановки будет равна 300 кВт примерно через 4 ч после остановки. В пределах практически необходимой точности в большинстве случаев оценка по средней мощности вполне достаточна.

3.8.9. В течение какого времени ЯР может работать на $N=100$ МВт, чтобы через 24 ч после остановки $N_{\beta,\gamma}$ была не более 200 кВт?

Решение. По графику рис. 3.8.5 для $N_{\beta,\gamma}/N_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ и $\tau_{ст} = 24$ ч определяем: ЯР может работать на мощности 100 МВт не более 6—7 сут.

3.8.10. На какой средней мощности может работать ЯР в течение 2 сут, чтобы через 10 ч после остановки $N_{\beta,\gamma}$ была не более 100 кВт?



Решение. По графикам рис. 3.8.5 для $T=2$ сут и $\tau_{ст}=10$ ч определяем $N_{\beta,\gamma}/\bar{N} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ и $\bar{N} \leq 100 / (2,6 \cdot 10^{-3}) \approx 40$ МВт. При этом необходимо иметь в виду, что при средней мощности 40 МВт возмож-

Рис. 3.8.6. К задаче 3.8.8

на работа в течение некоторого времени на большей мощности. Чтобы $N_{\beta,\gamma}$ через 10 ч после остановки было не более 100 кВт, на мощности больше 40 МВт нужно при необходимости работать не перед остановкой (см. решение задач 3.8.5 и 3.8.6)

3.8.11. ЯР работал в течение 10 сут на $N=100$ МВт. Определить $N_{\text{ост}}$, обусловленную запаздывающими нейтронами и активностью продуктов деления, через 1 и 2 мин после срабатывания АЗ, имеющей $\rho_{\text{АЗ}}=2\%$. Эффективность запаздывающих нейтронов в данном ЯР равна 1,04.

Решение. $N_{\text{ост}}$ через 2 мин определяется двумя составляющими: мощностью, обусловленной делением топлива в подкритическом ЯР, в котором источником нейтронов служат запаздывающие нейтроны, и мощностью от торможения β -, γ -излучения. Задачу можно решить по приближенной формуле (3.8.3), но проще это сделать графически, определяя составляющие по графикам рис. 3.8.2 и 3.8.4 или 3.8.5.

Составляющая от запаздывающих нейтронов быстро уменьшается. Через 1 мин (см. рис. 3.8.2)

$$N_{\text{зап}} = \frac{N_0 \gamma}{\beta_{\text{эф}} + |\lambda - \rho|} \lambda = \frac{100 \cdot 1,04 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}}{1,04 \cdot 0,64 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}} = 1,3 \text{ МВт},$$

и через 2 мин $N_{\text{зап}} \approx 0,3$ МВт.

Вторую составляющую в данном случае (при $\tau_{\text{ст}} \ll T$) можно определить из рис. 3.8.4. Для $T=10$ сут и $\tau_{\text{ст}}=1$ мин $N_{\beta,\gamma} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 3$ МВт. Для $\tau_{\text{ст}}=2$ мин $N_{\beta,\gamma} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 2,5$ МВт.

Таким образом, $N_{\text{ост}}(1 \text{ мин}) = 1,3 + 3 = 4,3$ МВт; $N_{\text{ост}}(2 \text{ мин}) = 0,3 + 2,5 \approx 2,8$ МВт.

3.8.12. ЯР работал на $N=100$ МВт в течение 10 сут. Какой нужно обеспечить расход теплоносителя (воды) через активную зону, чтобы не допустить его кипения через сутки после остановки? При расхолаживании $P_{\text{Ик}}=10$ кгс/см², $t_{\text{вх}}$ в ЯР равна 80 °С.

Решение. Согласно (3.8.4)

$$G = \frac{860 N_{\text{ост}}}{i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}}} = \frac{860 \cdot 220}{170,7 - 80,1} = 2,09 \text{ т/ч} = 2,15 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $N_{\text{ост}} = N_{\beta,\gamma} = 220$ кВт определяем по графику рис. 3.8.5 для $N_0=100$ МВт, $T=10$ сут, $\tau_{\text{ст}}=1$ сут.

Из таблиц приложения 22 определяем энтальпию: для $t_{\text{вх}} = 80$ °С при $P=10$ кгс/см² $i_{\text{вх}}=80,1$ ккал/кг; для $t_{\text{вых}}=169$ °С $i_{\text{вых}}=170,7$ ккал/кг. Чтобы не допустить кипения, температура на выходе из ЯР взята на 10 °С ниже температуры кипения при давлении 10 кгс/см², равной 179 °С. При переводе единиц расхода воды в м³/ч использовано значение удельного объема (см. приложение 24) для $t_{\text{вх}}=80$ °С: $v_{80 \text{ °С}}=1,028$ м³/т. Тем самым предполагается, что расход мер стоит на входе в ЯР. Если расход мер стоит на выходе из ЯР, то необходимо обеспечить расход $G = 2,08 v_{169 \text{ °С}} = 2,08 \cdot 1,114 = 2,32$ м³/ч.

3.8.13. Средняя мощность ЯР за 30 сут работы равна 80 МВт. Через какое время после остановки можно осуществить расхолаживание активной зоны расходом воды $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре на входе 50°C и нормальном давлении в контуре?

Решение. Из формулы (3.8.4), используя данные приложений 22 и 24, определяем

$$N_{\beta,\gamma} = \frac{G(i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}})}{860\sigma} = \frac{2(90 - 50)}{860 \cdot 1,012 \cdot 10^{-3}} = 92 \text{ кВт.}$$

Температуру теплоносителя на выходе принимаем равной 90°C , имея запас до кипения при нормальном давлении 10°C .

По графикам рис. 3.8.5 для $N_{\beta,\gamma}/N_0 = 92/(80 \cdot 10^3) = 1,15 \cdot 10^{-3}$ и $T = 30$ сут находим $\tau_{\text{ст}} \approx 10$ сут. Таким образом, расходом воды $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ при нормальном давлении можно расхолаживать активную зону не ранее чем через 10 сут после остановки.

3.8.14. ЯР работал на $N = 70$ МВт в течение 5 сут. Через 2 сут после остановки при температуре теплоносителя (воды) в реакторе 50°C остановили ГЦН. Давление снизили до атмосферного. Оценить, через какое время нужно снова пустить насос, чтобы не допустить объемного кипения теплоносителя, если объем воды в ЯР 1 м^3 .

Решение. Исходя из соотношения (3.8.6), определяем время, в течение которого вся вода в ЯР нагреется до $90^\circ\text{C} < t_s = 100^\circ\text{C}$:

$$\tau = \frac{\bar{m}c_p(t_2 - t_1)}{860N_{\beta,\gamma}} = \frac{1(\text{м}^3) \cdot 1[\text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})](90 - 50)(^\circ\text{C})}{1,023 \cdot 10^{-3}(\text{м}^3/\text{кг}) \cdot 860 \cdot 70(\text{ккал}/\text{ч})} \approx 40 \text{ мин,}$$

где $N_{\beta,\gamma} = 70$ кВт определена из графика рис. 3.8.5 для $T = 5$ сут; $t_{\text{ст}} = 2$ сут. Удельный объем $\nu = 1,023 \text{ см}^3/\text{г}$ взят для средней температуры $\bar{t} = (90 + 50)/2 = 70^\circ\text{C}$ (см. приложение 24). Полученная оценка времени включения насоса справедлива для случая, когда в контуре теплоносителя затруднена естественная циркуляция, а также при большом остаточном тепловыделении, когда очень быстро происходит нагрев по сравнению с временем установления естественной циркуляции.

В действительности, вследствие нагрева воды в активной зоне установится естественная циркуляция теплоносителя по контуру. В этом случае необходимо учитывать объем воды во всем контуре. Из формулы (3.8.6) следует, что время разогрева прямо пропорционально массе теплоносителя в контуре (теплоотдача от контура в окружающую среду не учитывается). Например, если в данной задаче объем теплоносителя в контуре взять в 10 раз больше объема его в ЯР, то теплоноситель во всем контуре нагреется до 90°C не раньше чем через $390 \text{ мин} = 6,5 \text{ ч}$. Но при этом нужно иметь в виду, что температура в активной зоне всегда будет выше, чем в контуре, и возможно кипение на поверхности твэлов.

Контрольные вопросы и задачи

1. От чего зависит $N_{\text{ост}}$ после остановки ЯР?
2. Можно ли повлиять на скорость снижения $N_{\text{ост}}$?

3. На какой мощности работал ЯР, если после сброса трех стержней АЗ мощность скачком уменьшилась до 20 МВт ($\rho_{AZ1} = 0,005$; интерференция трех стержней АЗ положительная; $k_{и} = +1,05$; $\beta_{эф} = 0,008$)?
4. Какая доля мощности обусловлена запаздывающими нейтронами через 2 мин после остановки ЯР ($\beta_{эф} = 0,8\%$; $\gamma = 1,03$; $\rho = -3\%$)?
5. ЯР работал на $N = 50$ МВт в течение 30 сут. Определить $N_{\beta, \gamma}$ через 10 сут после остановки.
6. Определить $N_{\beta, \gamma}$ через 24 ч после остановки ЯР, работавшего на $N_1 = 100$ МВт 10 сут, а потом, перед остановкой, на $N_2 = 50$ МВт также 10 сут.
7. Оценить, через какое время после остановки ЯР, работавшего в течение 20 сут на $N = 100$ МВт, $N_{\beta, \gamma} = 50$ кВт.
8. ЯР работал 10 сут на $N_1 = 80$ МВт, потом 5 сут на $N_2 = 50$ МВт. Через какое время после остановки $N_{\beta, \gamma} = 100$ кВт?
9. В течение какого времени может работать ЯР на $N = 50$ МВт, чтобы через 10 ч после остановки его можно было перевести в режим расхолаживания по схеме, которая обеспечивает съем 200 кВт мощности?
10. На какой мощности может работать ЯР в течение 30 сут, чтобы $N_{\beta, \gamma}$ через 10 сут была не более 50 кВт?
11. ЯР работал в течение 20 сут на $N = 100$ МВт. Определить $N_{ост}$, обусловленную запаздывающими нейтронами и активностью продуктов деления через 1 мин после срабатывания АЗ, имеющей физический вес $\rho_{AZ} = 2,5\%$ ($\gamma = 1,04$).
12. ЯР работал на $N = 80$ МВт 30 сут. Какой расход воды должен быть через 2 мин после срабатывания АЗ ($\rho_{AZ} = 2,5\%$), чтобы не допустить кипения в активной зоне при $P_{ИК} = 100$ кгс/см² и $t_{вх}$ в ЯР 200 °С?

ГЛАВА 4

БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

§ 4.1. ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА КАК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Ядерный реактор — это один из самых мощных современных источников энергии, в основе работы которого лежат процессы внутриядерных взаимодействий. Обладая существенными преимуществами по сравнению с другими источниками энергии, ЯР имеет специфические особенности, которые требуют очень внимательного к нему отношения. Для безаварийной эксплуатации ЯР необходимо четкое понимание этих особенностей; основные из них сводятся к следующему.

1. ЯР — мощный источник ионизирующего излучения как при работе на мощности, так и после его остановки. Это требует принципиально нового подхода к решению многих вопросов при проектировании и эксплуатации ЯР. Прежде всего необходимы: специальные средства биологической, радиационной и тепловой защиты, контроля радиационной обстановки; средства борьбы с распространением радиоактивных загрязнений в аварийных ситуациях; ди-

станционное управление механизмами, находящимися в местах повышенной радиоактивности; специальные средства съема остаточных тепловыделений после плановой и аварийной остановок — расхолаживание ЯР. Особого внимания в связи с радиоактивностью продуктов деления заслуживает вопрос надежности твэлов (см. § 4.3), регенерации топлива и захоронения радиоактивных отходов.

2. Ядерное топливо обладает колоссальной удельной энергоемкостью, в миллионы раз превышающей энергоемкость органического топлива. Например, загрузке 100 кг ^{235}U в судовом ЯР соответствует ~ 100 тыс. т органического топлива, а загрузке 1 т ^{235}U в ЯР АЭС соответствует ~ 1 млн. т.

3. Большая концентрация энергии в ядерном топливе потенциально позволяет получить мощность в активной зоне значительно больше той, которую можно отвести с помощью теплоносителя. Для ЯР проблема заключается не в том, какую энергию можно в нем получить, а в том, какую энергию можно использовать, оставляя ЯР работоспособным в течение заданной кампании. Это накладывает большие ограничения на многие параметры ЯР, отклонение которых от установленных пределов может привести к выходу из строя активной зоны со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Главное условие обеспечения работоспособности твэлов — соблюдение теплового баланса между тепловыделением и теплосъемом в активной зоне.

4. В ЯР в зоне протекания ЦР всегда находится все загруженное на кампанию топливо. Поэтому вопросу обеспечения управляемой ЦР должно придаваться первостепенное значение.

5. ЯР может стать неуправляемым. Допустимая величина ρ — основного параметра регулирования — имеет небольшое строго ограниченное значение: $\rho < \beta_{\text{эф}}$, при этом даже в управляемом диапазоне изменения ρ приемлемой скорости изменения мощности ЯР соответствует ρ в несколько раз меньше $\beta_{\text{эф}}$ (см. § 4.2). Это требует особого внимания к управлению и прежде всего к пуску ЯР как одному из наиболее ответственных режимов.

6. Реактивность ЯР изменяется не только в результате перемещения органов регулирования, но и вследствие внутренних процессов, сопровождающих работу ЯР (температурный эффект, отравление и др.). Это изменение может значительно (в несколько раз) превышать $\beta_{\text{эф}}$. Поэтому, учитывая жесткие ограничения, накладываемые на значение ρ , при которой мощность изменяется с допустимым периодом, следует очень точно поддерживать эти параметры в заданных пределах при работе на стационарном уровне и особенно в переходных режимах, в том числе после остановки ЯР, когда вследствие отрицательных α_N и α_L , а также из-за распада Xe может произойти самопроизвольный выход ЯР в критическое и надкритическое состояния. Необходимо также перед пуском ЯР рассчитывать критическое положение органов регулирования, учитывать возможность попадания в иодную яму. Нужно

иметь в виду и то, что вследствие температурного эффекта изменение практически всех параметров ЯЭУ (расхода теплоносителя и питательной воды, давления пара, вакуума в конденсаторе турбины и т. п.) влияет на ρ . В связи с этим многие монтажные и ремонтные работы, которые могут привести к изменению ρ , относятся к *потенциально опасным работам* в ядерном отношении (ПОР, ЯОР) и проводят их при тщательном контроле за состоянием ЯР.

7. Следует иметь в виду также такую особенность ЯР на тепловых нейтронах, как наличие большого $\rho_{\text{зап}}$ в конце кампании при выгрузке топлива или в течение кампании при частичной перегрузке. Это объясняется тем, что из всего $\rho_{\text{зап}}$ безвозвратно расходуется только часть, предназначенная для компенсации выгорания, шлакования и стационарного отравления Sm . Остальной $\rho_{\text{зап}}$ необходим для обеспечения работы ЯР на энергетическом уровне (компенсация отравления Xe , отрицательных α_i , α_N и других эффектов). После остановки ЯР $\rho_{\text{зап}}$ высвобождается, и, следовательно, необходимо его компенсировать подвижным или жидким поглотителем, а выгружаемое топливо, содержащее большое количество делящихся нуклидов, должно идти на переработку.

Отмеченные здесь особенности не исчерпывают всего разнообразия свойств ЯР, но именно они в первую очередь определяют требования к эксплуатации ЯЭУ на всех нормальных и аварийных режимах, начиная с первого пуска и кончая перегрузкой активной зоны.

На первый план при этом выходит проблема безопасности ЯЭУ, связанная с возможностью аварийного выделения радиоактивных продуктов деления в таких количествах, которые опасны для окружающего населения и прежде всего для обслуживающего персонала. Говоря о безопасности ЯЭУ в самом широком смысле, подразумевают способность ее не допустить реализации такой потенциальной возможности. Это условие учитывается уже на этапах расчета, при проектировании и конструировании ЯЭУ. После введения ЯЭУ в действие главными условиями ее безопасной работы являются строгое выполнение всех требований инструкции по эксплуатации, высокая профессиональная подготовка операторов, глубокое понимание физико-теплотехнических процессов, сопровождающих работу ЯР во всех режимах и особенно в аварийных. Эксплуатационные требования безопасности предусматривают мероприятия, исключающие возможность превышения допустимых значений параметров установки и выход из строя механизмов, без которых невозможна дальнейшая эксплуатация.

Согласно «Общим положениям обеспечения безопасности» *безопасность* атомных станций (АС) — это качество, исключающее техническими средствами и организационными мероприятиями превышение установленных доз по внутреннему и внешнему облучению персонала и населения и нормативов по содержанию радиоактивных продуктов в окружающей среде.

Техническая безопасность АС — достигаемое техническими средствами и организационными мерами качество АС, характеризующее прочностью оборудования и трубопроводов, повреждения которых могут привести к нарушению отвода тепла от активной зоны ЯР, а также качество, характеризующее способностью удерживать в герметичной зоне АС выделившиеся при указанных повреждениях радиоактивные вещества.

Особо необходимо выделить специфические требования по: 1) ядерной безопасности ЯР; 2) радиационной безопасности и 3) теплотехнической надежности активной зоны.

Ядерная безопасность подразумевает исключение возможности возникновения *ядерной аварии* (см. § 4.2).

Требования *радиационной безопасности* сводятся к обеспечению нормальной радиационной обстановки для работы обслуживающего персонала и для окружающей среды в любых условиях эксплуатации (см. § 4.4).

Обеспечение *теплотехнической надежности* активной зоны предполагает создание таких условий эксплуатации, чтобы активная зона выполняла свои функции в течение гарантированной кампании и исключалась возможность появления в теплоносителе недопустимых количеств радиоактивных продуктов деления во всех режимах работы ЯР, в том числе аварийных (см. § 4.3). Нарушение теплового баланса между тепловыделением и теплоотводом от ТВЭЛов в последнее время также относят к ядерно-опасным ситуациям.

Контрольные вопросы

1. Каковы специфические особенности ЯР?
2. Чем обеспечивается безопасность ЯЭУ?
3. Как взаимосвязаны ЯБР и РБ?

§ 4.2. ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РЕАКТОРА

Ядерная безопасность — это совокупность свойств ЯР, состоящая из технических средств, организационных мер и обученности (квалификации) эксплуатационного персонала, исключающих возможность отказа систем и оборудования или ошибки персонала, в результате которых может произойти ядерная авария.

Ядерная авария — это авария, связанная с повреждением ТВЭЛов или с потенциально опасным облучением людей, вызванная потерей контроля и управления ЦР деления ядер топлива или образованием критической массы при перегрузке, транспортировке, хранении ТВЭЛов, монтажных и ремонтных работах. Поскольку одним из последствий ядерной аварии может быть повреждение ТВЭЛов, последнее время причиной ее возникновения считают также нарушения теплоотвода от активной зоны (см. § 4.3).

Основные требования по обеспечению ядерной безопасности на период эксплуатации ЯР можно сформулировать так:

не допускать разгона ЯР на мгновенных нейтронах, т. е. обеспечить выполнение неравенства $\rho < \beta_{эф}$;

в любых условиях иметь возможность быстрого надежного гашения (прекращения) цепной реакции;
 исключить самопроизвольный выход ЯР в критическое состояние после его остановки;
 иметь надежную систему теплоотвода от твэлов в случае нарушения теплового баланса.

Ядерная безопасность обеспечивается:

нейтронно-физическими свойствами ЯР, обладающими эффектом самогашения ЦР при неконтролируемом и неуправляемом ее развитии;

качеством исполнительных органов СУЗ, способных своевременно предотвратить развитие аварийной ситуации;

наличием аварийных систем охлаждения активной зоны; строгим выполнением всех требований эксплуатационных инструкций и порядка проведения ЯОР;

высокой квалификацией и дисциплиной обслуживающего персонала, знающего физику процессов в ЯР и взаимосвязь параметров ЯЭУ, способного принять грамотное решение в любых нестандартных ситуациях;

своевременным проведением НФИ и ТТИ.

Степень безопасности ЯР определяется его поведением после того, как он станет надкритичным и пойдет в разгон без какого-либо искусственного ограничения мощности. Хотя в ЯР всегда предусмотрены специальные защитные устройства, следует, однако, ориентироваться на худший случай, т. е. учитывать возможность отказа и конечную скорость действия этих устройств.

В ЯР не может быть *атомного взрыва* (типа взрыва атомной бомбы с присущими ему факторами: ударной волной, световым и проникающим излучением и радиоактивным заражением), так как прежде чем выделится достаточное для атомного взрыва количество энергии, ЯР сам приведет себя в подкритическое состояние вследствие нарушения критической геометрии активной зоны (вытеснения воды-замедлителя из активной зоны, расправления твэлов и др.). Тем не менее при определенных условиях в ЯР может выделиться огромное количество энергии, достаточное для быстрого испарения некоторых компонентов активной зоны, что может стать причиной разрыва контура и выброса радиоактивных материалов. При больших разрушениях такую аварию можно классифицировать как *тепловой взрыв* ЯР.

При надкритичности ЯР на мгновенных нейтронах мощность изменяется по экспоненциальному закону (3.3.10). Суммарное энерговыделение и полное ядерное излучение в ЯР за время τ с момента скачкообразного увеличения ρ при отсутствии отрицательной обратной связи

$$Q = \int_0^{\tau} N(\tau) d\tau = \int_0^{\tau} N_0 e^{\tau/T} d\tau = N_0 T (e^{\tau/T} - 1) = T [N(\tau) - N_0] = \frac{l}{\delta K} [N(\tau) - N_0].$$

При $\rho > \beta_{\text{эф}} N(\tau) \gg N_0$ и, следовательно,

$$Q \approx TN(\tau) = T e^{\tau/T} N_0 \approx \frac{l}{\rho} N_0 e^{\tau/T}. \quad (4.2.1)$$

Это значит, что полное энерговыделение за время τ увеличения мощности равно такому количеству энергии, которое выделилось бы за время одного периода при работе на постоянной мощности, равной мощности в рассматриваемый момент.

Количество выделившейся энергии за время τ зависит от исходной мощности в момент увеличения ρ и особенно сильно — от высвобожденной реактивности и среднего времени жизни поколения нейтронов.

Основными механизмами самогашения (отрицательная обратная связь) в различных типах ЯР могут быть: мощностной, температурный (плотностный), паровой коэффициенты реактивности, повышения температуры нейтронного газа, тепловое расширение активной зоны и др.

Одним из основных условий устойчивой работы ЯР является отрицательный ТКР в области рабочих температур (см. § 2.8)

$$\alpha_t = \pm \Delta\rho_t / \mp \Delta t < 0,$$

благодаря которому даже при выходе из строя системы АР обеспечивается *саморегулирование*, т. е. способность ЯР изменять мощность в соответствии с уровнем ее потребления. При этом для обеспечения ядерной безопасности прежде всего должно выполняться условие для мощностного коэффициента, надежно ограничивающее мощность в аварийных ситуациях с ЯР:

$$\alpha_N = \pm \Delta\rho_N / \mp \Delta N < 0.$$

В то же время большой α_N ограничивает возможности саморегулирования ЯЭУ (см. § 2.8).

В каждом конкретном ЯР развитие ЦР, максимальный скачок мощности и давления, энерговыделение и продолжительность выбега этих параметров будут существенно различаться. Решающую роль в этом играют эффекты самогашения, которые тормозят нарастание мощности, уменьшая первоначальный скачок $\rho_{\text{мгн}}$, а следовательно, и скорость увеличения мощности. Например, в ЯР с большим отрицательным ТКР (α_t) при скачке ρ на мгновенных нейтронах ($\rho_{\text{мгн}}$) максимальный выбег мощности можно оценить по формуле (по порядку величины)

$$\Delta N^{\text{макс}} \approx \frac{(c_p m)_{\text{а.з}} \rho_{\text{мгн}}^2}{2 |\alpha_t| l} \approx \frac{(c_p m)_{\text{а.з}} l}{2 |\alpha_t| T^2} \text{Вт}. \quad (4.2.2)$$

Максимальное увеличение температуры элементов активной зоны

$$\Delta t^{\text{макс}} \approx 2\rho_{\text{мгн}} / |\alpha_t| \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.2.3)$$

Выделившаяся при выбеге энергия

$$E \approx (c_p m)_{a.z} \Delta t^{\max} \approx \frac{2 (c_p m)_{a.z} \rho_{\text{МГН}}}{|\alpha_t|} \text{ Дж.} \quad (4.2.4)$$

Продолжительность выбега мощности

$$\tau_{\text{выб}} \approx \frac{E}{\Delta N^{\max}} = 4 \frac{l}{\rho_{\text{МГН}}} = 4T_{\text{МГН}} \text{ с,} \quad (4.2.5)$$

где c_p — удельная теплоемкость активной зоны [Дж/(кг·°С)], имеющей массу m (кг); l — время жизни мгновенных нейтронов, с; $T_{\text{МГН}} \approx l/\rho_{\text{МГН}}$ — период ЯР на мгновенных нейтронах, с.

В ЯР на быстрых нейтронах вследствие значительно более короткого $l_{\text{МГН}}$ ($\sim 10^{-8}$ с) при $\rho > \beta$ пики мощностей и давлений могут быть значительно выше, чем в ЯР на тепловых нейтронах. Больше того, ЯР на быстрых нейтронах содержит так много делящегося материала, что при удалении теплоносителя и заполнении образовавшихся пустот расплавившимся топливом может получиться несколько критических масс и начнется ЦР. Анализ безопасности ЯР на быстрых нейтронах с $N_{\text{ном}} = 100$ МВт предсказывает для подобной ситуации возможный полный выход энергии $\sim 6 \cdot 10^8$ кал, что эквивалентно взрыву 600 кг обычного взрывчатого вещества [2]. Самый сильный ограничивающий фактор в такого рода авариях — мощностной коэффициент реактивности, обусловленный эффектом Доплера. При высоком обогащении топлива, т. е. низкой концентрации ^{238}U , отрицательный эффект Доплера незначителен или же отсутствует полностью. В таком ЯР ρ начнет уменьшаться только после выделения энергии, достаточной для расширения материала активной зоны. Чем меньше l , тем больше скачок мощности и больше выделится энергии до начала действия отрицательной обратной связи.

Органы регулирования и аварийной защиты должны удовлетворять необходимым требованиям как по физическому весу, так и по скорости изменения ρ . Количество автономных групп стержней АЗ со своим приводом должно быть не менее двух. Физический вес всех стержней АЗ должен перекрывать первоначальный скачок ρ после остановки ЯР и быть больше $\beta_{\text{эф}}$:

$$\beta_{\text{эф}} < |\rho_{\text{АЗ}}| > |\alpha_N N + \alpha_t \Delta t| ,$$

где α_N — мощностной коэффициент реактивности, 1/МВт; α_t — ТКР, 1/°С; N — мощность ЯР до остановки, МВт; Δt — быстрое снижение температуры активной зоны сразу после остановки ЯР, °С.

Чтобы исключить возможность сделать ЯР надкритичным на мгновенных нейтронах, физический вес всех стержней АЗ, имеющих один привод, должен быть меньше $\beta_{\text{эф}}$ или же скорость их подъема должна быть строго ограниченной [см. (4.2.9)]. Эффективность действия АЗ в значительной степени определяется временем погружения их в активную зону. Обычно оно составляет 0,2—0,5 с.

Аварийная защита ЯР должна обеспечивать автоматическое быстрое и надежное гашение ЦР при: 1) достижении аварийной

уставки по мощности и по скорости нарастания мощности (или реактивности); 2) исчезновении электропитания СУЗ; 3) неисправности или нерабочем состоянии любых двух из трех каналов защиты по уровню или скорости нарастания мощности; 4) появлении аварийных технологических сигналов, требующих остановки ЯР; 5) нажатии кнопок АЗ.

Количество автономных стержней АР должно быть не менее двух. Физический вес АР, имеющих один привод, должен удовлетворять условию

$$2\rho(T_{\text{доп}}) < \rho_{\text{АР}} < \beta_{\text{эф}},$$

где $\rho(T_{\text{доп}})$ — реактивность, соответствующая выбранному допустимому периоду [например, $T_{\text{доп}} = 30$ с, $\rho(30 \text{ с}) \approx 0,15\%$]. Удвоенное значение берется исходя из того, что АР находится в положении, относительно которого он сможет изменять ρ в обе стороны. Для компенсации температурных колебаний ρ , равных $\pm \Delta t_{\text{п}} \alpha_t$ (где $\Delta t_{\text{п}}$ — погрешность поддержания заданной средней температуры в переходных режимах и α_t — ТКР), необходимо выполнение условия для одной группы АР $\rho_{\text{АР}} > 2\alpha_t \Delta t_{\text{п}}$. Обычно $\Delta t_{\text{п}} \approx \pm 5^\circ\text{C}$. В саморегулируемом ЯР необходимость в АР отпадает.

КС должны быть разделены на несколько автономных групп так, чтобы при выходе из строя одной из них остальных было достаточно для компенсации ρ , высвобождающейся после остановки ЯР за время, в течение которого могут быть приведены в действие резервные системы компенсации (например, ввод в контур жидкого поглотителя нейтронов).

Чтобы иметь возможность в любых ситуациях прекратить ЦР и исключить самопроизвольный пуск ЯР после плановой или аварийной остановки, необходимо иметь вне активной зоны поглотители нейтронов, физический вес ($\rho_{\text{погл}}$) которых был бы не меньше ρ , которая может высвободиться вследствие физических процессов, сопровождающих остановку ЯР.

После остановки ЯР и в течение всего времени стоянки должно выполняться условие

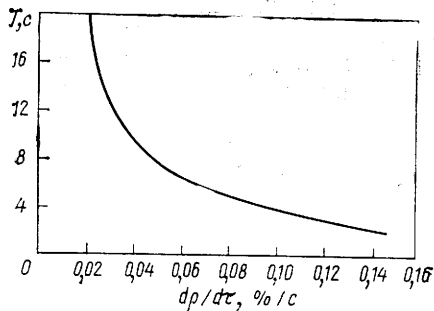
$$|\rho_{\text{погл}}| > |\alpha_N N + \alpha_t \Delta t + \rho_{\text{Xe, Sm, Pu}}(\tau)|,$$

где $\rho_{\text{погл}}$ — эффективность всех введенных после остановки поглотителей; α_N и α_t — мощностной и температурный коэффициенты реактивности, 1/МВт и 1/°С; N — мощность ЯР до остановки, МВт; Δt — изменение температуры теплоносителя после остановки, °С; $\rho_{\text{Xe, Sm, Pu}}$ — изменение $\rho_{\text{зап}}$ после остановки вследствие изменения концентрации Xe, Sm и Pu.

Подъем поглотителей, физический вес которых больше $\beta_{\text{эф}}$, можно производить шагами, причем ρ , высвобождаемая одним шагом, должна удовлетворять требованию $\rho_{\text{ш}} < \beta_{\text{эф}}$. Следовательно, предельно допустимый шаг при дифференциальной эффективности поглотителя $(d\rho/dH)_{\text{макс}}$ вылбирается из условия

$$h_{\text{пред}} < \beta_{\text{эф}} / \left(\frac{d\rho}{dH} \right)_{\text{макс}} \quad \text{мм.} \quad (4.2.6)$$

Рис. 4.2.1. Период ЯР в момент перехода через критическое состояние в зависимости от скорости высвобождения ρ



Более жесткое требование, обеспечивающее выполнение условия $\rho < \beta_{эф}$, заключается в ограничении ρ и скорости ее высвобождения до значений, при которых период не может оказаться меньше заданного. Обоснование значения макси-

мального периода во многом субъективно. Здесь играет роль как надежность работы системы АР и АЗ, так и реакция оператора, его способность быстро принять правильное решение по управлению ЯР при увеличении мощности с малым периодом. Можно, например, установить ограничение, чтобы при пуске ЯР период удвоения был не менее 20 с, которому соответствует надкритичность примерно +0,15 %. В этом случае рабочий шаг перемещения поглотителя в положении H , где дифференциальная эффективность равна $(d\rho/dH)_H$, должен быть не более

$$h_{\text{раб}} = 0,15 \cdot 10^{-2} / \left(\frac{d\rho}{dH} \right)_H \text{ мм.} \quad (4.2.7)$$

Скорость высвобождения ρ при пуске ЯР может быть выбрана исходя из $T_{\text{доп}}$ в момент перехода через критическое состояние и прежде всего в момент выхода на МКУ. На рис. 4.2.1 дана зависимость T от скорости увеличения ρ при переходе ЯР через критическое состояние. Характер кривой несколько зависит от времени жизни поколения нейтронов, но в первом приближении она справедлива для различных ЯР. Как видно из рисунка, T в момент критичности тем меньше, чем больше скорость высвобождения ρ . Период будет больше 10 с только при $dp/d\tau < 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/c} \approx 0,08 \beta_{эф} \text{ 1/c}$. Таким образом, условием допустимой скорости высвобождения ρ в области ожидаемого перехода через критическое состояние может быть

$$dp/d\tau < 0,08 \beta_{эф} \text{ 1/c,} \quad (4.2.8)$$

при этом суммарная высвобождаемая положительная реактивность к моменту выхода на МКУ не должна превышать значения, соответствующего $T_{\text{доп}}$ при пуске ЯР. В конкретных условиях, выбирая скорость увеличения ρ , можно вывести ЯР в надкритическое состояние с любым наперед заданным периодом. Итак, если поглотитель имеет в области ожидаемого выхода в надкритическое состояние дифференциальную эффективность $d\rho/dH$, то скорость его подъема должна удовлетворять условию

$$\frac{dH}{d\tau} < \frac{dp}{d\tau} / \frac{d\rho}{dH} = 0,08 \beta_{эф} / \frac{d\rho}{dH} \frac{\text{мм}}{\text{с}}. \quad (4.2.9)$$

При этом нужно иметь в виду, что если выбранный из этого условия период является нормальным при пуске и изменении мощности на малых уровнях, то на большой мощности, где скорость ее изменения ограничена термическими напряжениями в материалах активной зоны и корпуса ЯР, период должен быть значительно больше и удовлетворять условию допустимой скорости изменения мощности (см. § 3.6):

$$T \geq N(\tau) \left/ \left(\frac{dN}{d\tau} \right)_{\text{доп}} \right. \quad (4.2.10)$$

Примечание. При пуске ЯР скорость изменения мощности, допустимая с точки зрения теплотехнической надежности, недопустима по требованиям ЯБР. Например, чтобы получить $dN/d\tau \approx 0,1\% N_{\text{ном}}/с$ при $N \approx 10^{-3}\% N_{\text{ном}}$, нужно согласно (3.3.3) разгонять ЯР с $T \approx 10^{-2}$ с, что может соответствовать надкритичности на мгновенных нейтронах (см. табл. 3.3.1).

Нижним пределом скорости изменения ρ при подъеме КС вверх является максимальная скорость падения ρ при входе в иодную яму (см. рис. 2.5.6), а при опускании КС вниз — максимальная скорость высвобождения ρ при разотравлении ЯР после выхода на мощность в момент максимума иодной ямы (см. задачу 2.5.19).

Одно из условий безопасного пуска ЯР — правильный выбор программы подъема поглотителей, особенно в области ожидаемого (3.5.1) критического состояния. Погрешность $\Delta_{\text{КС}}$ определения $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$, обусловленная пределами точности используемых для расчета экспериментально полученных физических характеристик ЯР, а также возможной погрешностью вычислений, имеет знак «+» или «-»: $\pm \Delta_{\text{КС}}$. Более опасно завышение критического положения. Поэтому, чтобы при пуске ЯР исключить возможность перехода через критическое состояние раньше ожидаемого положения КС, поправку необходимо брать со знаком плюс (при условии, что отсчет положения КС ведется от их верхнего положения в активной зоне), т. е. занижать ожидаемое критическое положение КС, по отношению к которому будет составляться программа пуска ЯР (см. § 3.4 и 3.5). Поправку можно взять равной $\sim 0,5 \beta_{\text{эф}}$ в единицах ρ , что в пересчете на миллиметры хода КС составляет

$$\Delta_{\text{КС}} = 0,5 \beta_{\text{эф}} / (d\rho_{\text{КС}}/dH) \text{ мм}, \quad (4.2.11)$$

где $d\rho_{\text{КС}}/dH$ — эффективность 1 мм перемещения КС в области рассчитанного $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$. Если расчетное $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ было завышено по положению, то ЯР станет критичным раньше ожидаемого — при положении КС $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} + \Delta_{\text{КС}}$, если занижено, — позже, при положении $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} - \Delta_{\text{КС}}$. Если же в последнем случае ЯР не будет выведен на МКУ, то это должно насторожить оператора. Предельно допустимое превышение подъема КС более $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ должно удовлетворять условию

$$\Delta_{\text{КС}}^{\text{пред}} < \beta_{\text{эф}} / (d\rho_{\text{КС}}/dH)_{\text{НКрит}}; H_{\text{КС}}^{\text{пред}} \geq H_{\text{КС}}^{\text{крит}} - \Delta_{\text{КС}}^{\text{пред}} \quad (4.2.12)$$

Примечание. Во всех случаях, связанных с высвобождением ρ , нельзя допускать, чтобы положительная реактивность достигала предельного значения для запаздывающих нейтронов ($\rho = \beta_{эф}$). Запас до предельного значения в зависимости от надежности систем АР и АЗ должен составлять 10—30 %. Условие $\rho < \beta_{эф}$ для большей безопасности лучше брать таким: $\rho < 0,8\beta_{эф}$.

Для ВВЭР интервал неточности определения критического состояния по положению РК и концентрации H_3BO_3 называют *пусковым интервалом* ($\Delta\rho_{п.и}$), в пределах которого в любой момент ЯР может стать критичным. Если расчет проводится по отношению к точно известным $C_{H_3BO_3}^*$ и $H_{РК}^*$ при предыдущем пуске и малом изменении $\Delta\rho$ (3.5.2), берут $\Delta\rho_{п.и} \approx 0,3 \div 0,75$ %. Если пускают ЯР после перегрузки или при большом изменении $\Delta\rho$ за счет ρ_x и ρ_t , то $\Delta\rho_{п.и} \approx 1,5$ %. Эту реактивность оператор переводит в сантиметры, перемещая РК, если $C_{H_3BO_3}^{кр.расч} \geq C_{H_3BO_3}^{текущ}$ (см. § 3.5) или в массовую концентрацию $C_{H_3BO_3}$, если $C_{H_3BO_3}^{кр.расч} < C_{H_3BO_3}^{текущ}$. Во втором случае пусковой интервал начинается при уменьшении массовой концентрации до

$$C_{H_3BO_3}^{п.и} = C_{H_3BO_3}^{кр.расч} + \Delta\rho_{п.и} / \alpha_{H_3BO_3} = C_{H_3BO_3}^{кр.расч} + 5,72\Delta\rho_{п.и} / \alpha_{B}. \quad (4.2.13)$$

Уменьшать концентрацию H_3BO_3 лучше на фильтре (замкнутый цикл), а можно также путем водообмена (см. § 3.4).

Состояние ЯР и степень приближения его к критическому состоянию трудно оценить при непрерывном высвобождении ρ , имеющем место при уменьшении $C_{H_3BO_3}$ (г/кг H_2O). Поэтому практикуют *комбинированный* пуск ВВЭР, позволяющий давать скачкообразные изменения ρ для определения состояния активной зоны. Для этого перед выводом H_3BO_3 одна из всех поднятых на ВКВ РК опускается вниз до положения $H_{РК}$, соответствующего введению $-\rho \approx -(1 \div 1,5)$ %. Затем осуществляется вывод H_3BO_3 до значения $C_{H_3BO_3}^{кр.расч} + \frac{(1 \div 1,5)\%}{\alpha_{H_3BO_3}}$, после чего производится дискретный пуск подъемом РК по принятой программе (см. § 3.6) до выхода на МКУ.

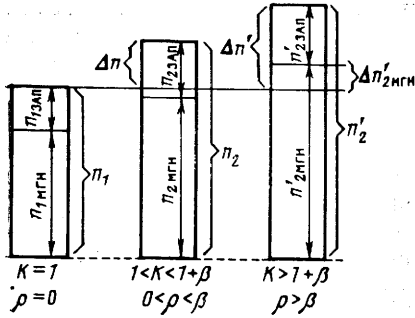
Требования, условия и правила обеспечения ядерной безопасности атомных установок в зависимости от их назначения устанавливаются Правилами ядерной безопасности соответственно для АЭС [16], судовых установок, исследовательских ЯР и т. д.

Задачи с решениями

4.2.1. При каком значении ρ скорость протекания ЦР определяется временем запаздывания запаздывающих нейтронов?

Решение. Мощность растет со скоростью, определяемой временем запаздывания запаздывающих нейтронов, когда прирост количества делений после увеличения $K_{эф}$ происходит только за счет деления запаздывающими нейтронами. Нужно создать такую

Рис. 4.2.2. К задаче 4.2.1



надкритичность, чтобы прибавка нейтронов в новом поколении не превышала доли запаздывающих нейтронов в этом поколении или, иначе говоря, доля мгновенных нейтронов в новом поколении не превышала количества всех нейтронов в предыдущем поколении.

Условие выполнения этих требований можно получить исходя из следующих рассуждений: если при $K_{эф} = 1$ число нейтронов, вызывающих деление в каждом поколении, было $n_1 = n_{1MGN} + n_{1ZAP} = n_1(1 - \beta_{эф}) + n_1\beta_{эф}$, то после увеличения $K_{эф}$ число нейтронов в новом поколении $n_2 = n_{2MGN} + n_{2ZAP} = n_2(1 - \beta_{эф}) + n_2\beta_{эф}$, причем $n_2 > n_1$ на $\Delta n = n_2 - n_1 = K_{эф}n_1 - n_1 = \delta K_{эф}n_1$. Сформулированные выше требования можно записать так: $\Delta n < n_{2ZAP} = n_2\beta_{эф}$ и $n_{2MGN} = n_2(1 - \beta_{эф}) < n_1$. Из первого неравенства получаем $\Delta n/n_2 < \beta_{эф}$, а так как $\Delta n/n_2 = \rho$ (см. § 1.4), то это равноценно условию $\rho < \beta_{эф}$. Из второго неравенства получаем аналогичный вывод: $n_2/n_1 = K_{эф} < 1/(1 - \beta_{эф})$, а так как $K_{эф} = 1/(1 - \rho)$, то $\rho < \beta_{эф}$. На рис. 4.2.2 для наглядности схематично показаны случаи изменения количества нейтронов после очередного деления при $0 \leq \rho < \beta$ и $\rho > \beta$. Для гарантии безопасности обычно ставят более жесткое условие: $\rho < 0,8 \beta_{эф}$.

4.2.2. Оценить полное энерговыделение за 1 с после скачкообразного увеличения ρ от критического состояния ЯР на величину $+2\beta_{эф} \approx +1,4\%$ при $N_0 = 100$ Вт и $l = 10^{-4}$ с.

Решение. При $\rho = +2\beta_{эф}$ ЯР станет надкритичным на мгновенных нейтронах на величину

$$\rho_{MGN} = \rho - \beta_{эф} = 2\beta_{эф} - \beta_{эф} = \beta_{эф}$$

и мощность будет расти на мгновенных нейтронах с периодом $T \approx l/\rho_{MGN} = 10^{-4}/(7 \cdot 10^{-3}) = 0,014$ с (3.3.9). Через 0,1 с выделившаяся энергия будет равна согласно (4.2.1)

$$Q(0,1 \text{ с}) = 10^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot e^7 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с},$$

но уже через 1 с в связи с экспоненциальным законом нарастания мощности $Q(1 \text{ с}) = 10^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot e^{70} \approx 10^{30}$ Вт·с $\approx 10^{20}$ МВт·ч. Прежде чем выделится такое количество энергии, ЯР приведет себя в подкритическое состояние благодаря самогасящим эффектам.

4.2.3. ВВР имеет тепловую мощность 500 МВт, загрузку UO_2 $m_{UO_2} = 25$ т, $\alpha_t = -10^{-4}$ 1/°C; $l = 5 \cdot 10^{-5}$ с, усредненную удельную теплоемкость активной зоны $c_p \approx 2,5 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°C). Оценить максимальный выбег мощности и температуры, время выбега и выделившуюся энергию при скачке ρ от критического состояния на $+4\beta_{эф}$.

Решение. Скачок ρ на мгновенных нейтронах равен $\rho_{\text{мгн}} = \rho - \beta_{\text{эф}} = 3\beta_{\text{эф}} \approx +2\%$.

Согласно (4.2.2) — (4.2.5)

$$\Delta N_{\text{макс}} \approx \frac{2,5 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^3 (2 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-5}} = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Вт} = 5 \cdot 10^3 N_{\text{ном}};$$

$$\Delta t_{\text{макс}} \approx \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{10^{-4}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \tau_{\text{выб}} = 4 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-2}} \approx 0,01 \text{ с};$$

$$E = 2,5 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^2 = 2,5 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 25 \text{ МДж.}$$

4.2.4. Оценить области допустимых значений отрицательного ТКР с точки зрения поведения ЯР при возникновении аварийных ситуаций.

Решение. Безопасность ЯЭУ обеспечивается, с одной стороны, устойчивостью ЯР, т. е. отрицательным α_t , а с другой — надежностью системы АР. Для обеспечения ядерной безопасности существует область оптимальных значений отрицательного α_t .

Во всех аварийных ситуациях, связанных с быстрым увеличением Φ (мощности ЯР), чем больше отрицательный α_t , тем меньше масштабы аварии. На рис. 4.2.3 (кривая 1) показан качественный характер зависимости допустимой скорости увеличения ρ , при которой авария не будет иметь серьезных последствий благодаря влиянию α_t , от значения этого коэффициента [24]. С увеличением Φ (мощности) растет средняя температура, что приводит к уменьшению ρ , а следовательно, и мощности. Чем больше отрицательный α_t , тем большая скорость аварийного высвобождения ρ может быть скомпенсирована противодействием отрицательного α_t .

В аварийных ситуациях, сопровождающихся понижением температуры в активной зоне, в противоположность рассмотренному выше чем больше отрицательный α_t , тем больше возможные масштабы аварии. На рис. 4.2.3 (кривая 2) дана качественная зависимость допустимой скорости понижения температуры, т. е. допустимой скорости высвобождения ρ , от α_t . Чем больше отрицательный α_t , тем меньше допустимая скорость понижения температуры.

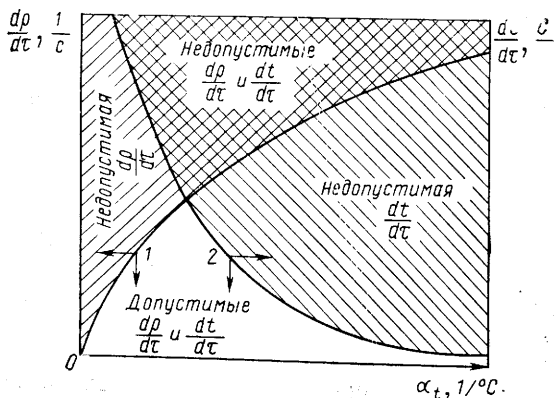


Рис. 4.2.3. К задаче 4.2.4

Размещая эти две кривые на одном графике, видим, что имеется наиболее выгодная область значений α_i , при которых допустимая скорость изменения ρ максимальна и обеспечивается наибольшая безопасность в случае возникновения аварийных ситуаций в любом режиме работы ЯР.

4.2.5. Каким должен быть физический вес стержней АЗ при различном количестве автономных групп КС?

Решение. Исходя из основного назначения стержней АЗ — быстрого прекращения ЦР и удержания ЯР в подкритическом состоянии — ρ_{AZ} должен быть не меньше $\rho_{зап}$, который высвобождается сразу же после остановки ЯР и обусловлен, как правило, температурным и мощностным коэффициентами реактивности. Например, для реактора ТР согласно сказанному выше необходимо, чтобы $|\rho_{AZ}| \geq \rho_i^{макс} = 0,03 = 3\%$. Такое требование было бы необходимым, если бы остальные поглотители нейтронов, т. е. все КС (АР ввиду их малого физического веса можно не учитывать), были объединены в одну группу. В том случае, когда выйдет из строя двигатель этой группы или невозможно будет опустить КС в активную зону по другой аварийной причине, быстро высвобождающаяся ρ после остановки ЯР должна быть скомпенсирована стержнями АЗ. Для компенсации разотравления в таком случае необходимо иметь аварийную систему ввода, например, жидкого поглотителя. Если же КС разбиты на несколько групп, то, учитывая вероятность выхода из строя одной из этих групп, можно поставить условие, чтобы все поглотители — стержни АЗ и КС, за исключением одной наиболее эффективной группы КС, могли скомпенсировать максимальную быстро высвобождающуюся реактивность

$$|\rho_{AZ}| + |\rho_{\Sigma}| - |\rho_{КС}^{гр}| > |\rho_i^{макс}|.$$

При таком подходе к выбору физического веса стержней АЗ может оказаться, что он будет очень малым, и даже можно обойтись без них. Но это не так. Нужно еще учитывать требования, ограничивающие минимальный физический вес стержней АЗ: а) компенсацию скачкообразного высвобождения ρ_N и $\Delta\rho_i$ из-за снижения мощности и падения средней температуры до температуры входа теплоносителя первого контура (см. рис. 3.7.1) и б) необходимость быстрого снижения мощности до уровня, при котором может быть обеспечен нормальный теплосъем с активной зоны резервными источниками циркуляции теплоносителя при аварийной остановке ГЦН (см. задачу 4.3.7).

4.2.6. ЯР на тепловых нейтронах имеет следующие характеристики: объем I контура (воды) $V_{IK} = 70 \text{ м}^3$; объем воды в активной зоне $V_{вод} = 1,4 \text{ м}^3$; высота активной зоны $H = 1,8 \text{ м}$; диаметр $D = 2 \text{ м}$; загрузка по ^{235}U $m_{U-235} = 75 \text{ кг}$; топливо — природный уран; коэффициент использования тепловых нейтронов $\theta = 0,8$.

Для обеспечения подкритичности после остановки ЯР в случае невозможности скомпенсировать высвобождающуюся ρ штатными органами компенсации используется система аварийного введения

в активную зону H_3BO_3 ($\sigma_a^B = 7,5 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$). Оценить, сколько нужно ввести в I контур 10%-ного раствора H_3BO_3 , чтобы скомпенсировать $\rho = 0,01 = 1 \%$.

Решение. Уменьшение ρ при введении в активную зону бора определяется соотношениями (2.4.1) и (2.4.2), откуда концентрация бора, уменьшающая ρ на величину ρ_B ,

$$N_B = -\rho_B (\Sigma_a \bar{\Phi} V)_U / \theta (\sigma_a \bar{\Phi} V)_B.$$

Здесь V_B — объем воды в активной зоне, где находится В ($V_B = V_{\text{вод}}$); $\bar{\Phi}_B$ — плотность потока нейтронов в теплоносителе. Для гетерогенного ВВР на тепловых нейтронах $\bar{\Phi}_B$ в теплоносителе-замедлителе больше, чем в топливе: ($\bar{\Phi}_U < \bar{\Phi}_{\text{вод}} = \bar{\Phi}_B$), но для упрощения оценки примем $\bar{\Phi}_U / \bar{\Phi}_B = 1$. Такое предположение идет в запас расчета. Для оценки макроскопического сечения топлива $\Sigma_a^{\text{топ}} = (\sigma_a N)_{U-235} + (\sigma_a N)_{U-238}$ считаем активную зону гомогенизированной, с равномерным распределением урана и воды в объеме активной зоны $V = \pi R^2 H = \pi \cdot 1^2 \cdot 1,8 \text{ м}^3 = 5,6 \text{ м}^3$. Концентрацию ^{235}U и ^{238}U определим согласно (1.3.2):

$$N_{U-235} = \frac{m_{U-235}}{V} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} = \frac{75}{5,6 \cdot 10^6} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} = 0,34 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

$$N_{U-238} = \frac{10,6 \cdot 10^6}{5,6 \cdot 10^6} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{238} = 48 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

При загрузке 75 кг ^{235}U масса ^{238}U в природном уране составляет $m_{U-238} = m_{U-235} (1-x)/x = 10,6 \text{ т}$, где $x = 0,007$ — доля ^{235}U в природном уране. Таким образом, макроскопическое сечение топлива $\Sigma_U = 695 \cdot 10^{-24} \cdot 0,34 \cdot 10^{20} + 2,75 \cdot 10^{-24} \cdot 48 \cdot 10^{20} = 0,037 \text{ см}^{-1}$.

Итак, для компенсации $\rho = 1 \%$ ($\rho_B = -0,01$) необходимо иметь в активной зоне

$$N_B = -\rho_B \frac{\Sigma_a^U V}{\theta \sigma_a^B V_{\text{вод}}} = \frac{0,01 \cdot 0,037 \cdot 5,6 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 750 \cdot 10^{-24} \cdot 1,4 \cdot 10^6} = 2,5 \cdot 10^{18} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Для обеспечения такой концентрации В в активной зоне необходимо, чтобы такая же концентрация его была во всем контуре. Исходя из соотношения (1.3.2)

$$N_B = \gamma_B \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{A_B} = \frac{m_B}{V_K} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{11},$$

определим массу необходимого количества бора:

$$m_B = N_B \frac{11 V_K}{6,02 \cdot 10^{23}} = \frac{25 \cdot 10^{18} \cdot 11 \cdot 70 \cdot 10^6}{6,02 \cdot 10^{23}} \approx 3,2 \text{ кг}.$$

Масса борной кислоты $m_{\text{H}_3\text{BO}_3}$, содержащей m_B граммов бора, определится из соотношения масс грамм-молекул бора $^{11}_5\text{B}$ (10,812 г) и H_3BO_3 (61,8319 г):

$$\frac{m_{\text{H}_3\text{BO}_3}}{m_B} = \frac{61,83}{10,81}; \quad m_{\text{H}_3\text{BO}_3} = 5,72 m_B = 5,72 \cdot 3,2 = 18 \text{ кг}.$$

Масса 10%-ного раствора H_3BO_3 в воде соответственно равна $m_{10\%H_3BO_3} = m_{H_3BO_3} / 0,1 = 18/0,1 = 180$ кг. Таким образом, для компенсации $\rho = +0,01$ в рассматриваемом ЯР необходимо ввести в первый контур ~ 180 кг 10%-ного раствора H_3BO_3 .

4.2.7. Определить поправку $\Delta_{КС}$ в критическое положение КС и $\Delta_{КС}^{пред}$ при пуске реактора ТР, если $H_{КС}^{крит} = 500, 1000$ и 1200 мм по глубине погружения ($\beta_{эф} = 0,8$ %).

Решение. Из рис. 3.4.1 находим $d\rho_{\Sigma} / dH$ в положении КС 500, 1000 и 1200 мм:

$$(d\rho_{\Sigma}/dH)_{500} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1};$$

$$(d\rho_{\Sigma}/dH)_{1000} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1}$$

$$(d\rho_{\Sigma}/dH)_{1200} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1}.$$

Согласно (4.2.11) определяем поправку для каждого случая:

$$\Delta_{КС(500)} = 0,5\beta_{эф} / (0,6 \cdot 10^{-2}) = 67 \text{ мм}; \quad \Delta_{КС(1000)} = 14 \text{ мм};$$

$$\Delta_{КС(1200)} = 20 \text{ мм}.$$

Таким образом, при расчете программы подъема КС необходимо исходить из возможности выхода в критическое состояние в первом случае при $H_{КС} = 567$ мм, во втором — при $H_{КС} = 1014$ мм и в третьем — при $H_{КС} = 1220$ мм.

Предельно допустимое значение подъема КС выше расчетного критического при условии недопущения высвобождения $+\rho = 0,8\beta_{эф}$ [см. примечание к (4.2.12)] в каждом случае составляет

$$\Delta_{КС(100)}^{пред} = 0,8 \cdot 0,8 / (d\rho_{\Sigma}/dH)_{500} = 0,64 / 0,6 \cdot 10^{-2} = 106 \text{ мм};$$

$$\Delta_{КС(1000)}^{пред} = 22 \text{ мм}; \quad \Delta_{КС(1200)}^{пред} = 32 \text{ мм}.$$

Как и следовало ожидать, чем больше $d\rho_{\Sigma}/dH$, тем меньше допустимый (безопасный) подъем КС выше расчетного значения $H_{КС}^{крит}$:

$$H_{КС(500)}^{крит} = 394 \text{ мм}; \quad H_{КС(1000)}^{крит} = 978 \text{ мм}; \quad H_{КС(1200)}^{крит} = 1168 \text{ мм}.$$

Если же и в этом положении КС, т. е. при $H_{КС}^{пред} = (H_{КС}^{крит} - \Delta_{КС}^{пред})$, ЯР не будет выведен на МКУ, дальнейший подъем КС необходимо прекратить и выяснить причину (проверить расчет $H_{КС}^{крит}$, проверить ПА и т. д.), предварительно обеспечив надежную подкритичность ЯР опусканием поглотителей.

4.2.8. Оператор рассчитал для ВВЭР-440 $H_{РК}^{крит.расч} = 180$ см. Пуск производится при $t_{ГК} = 270$ °С через 15 мин после срабатывания АЗ на $N_{ном}$. Определить нижнюю границу пускового интервала, если расчет $H_{РК}^{крит}$ произведен по отношению $H^*_{РК}$ на момент срабатывания АЗ.

Решение. Так как $\Delta\rho$ (3.5.2) изменилось только из-за ρ_t и ρ_N , то можно взять $\Delta\rho_{п.и} = 0,3\%$. По интегральной характеристике РК (рис. 3.4.4) находим, что при подъеме РК в положение 180 см он высвобождает $\Delta\rho_{КР} (180 \text{ см}) = 1,6\%$. Следовательно, пусковой интервал начинается в положении РК, где он высвободит $(1,6 - 0,3) = 1,3\%$, т. е. при $H_{РК}^{п.и} (1,3) = 140 \text{ см}$.

4.2.9. Оператор рассчитал для ВВЭР-440 критическую массовую концентрацию H_3BO_3 $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{\text{крит. расч}} = 2,2 \text{ г/кг H}_2\text{O}$. Пуск производится при температуре 100°C через 8 ч после остановки на основе известной $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^*$ при предыдущем пуске из холодного разотравленного состояния. В момент пуска $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{\text{текущ}} = 3,5 \text{ г/кг H}_2\text{O}$ и $\alpha_B = 0,099 \text{ кг H}_2\text{O/гВ}$. Определить начало пускового интервала массовой концентрации H_3BO_3 .

Решение. За время между пусками $\Delta\rho$ (3.5.2) существенно изменилось за счет ρ_{Xe} и ρ_t . Поэтому берем $\Delta\rho_{п.и} = 1\% = 0,01$. Поскольку $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{\text{крит. расч}} < C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{\text{тек}}$, начало пускового интервала рассчитываем по формуле (4.2.13):

$$C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{п.и} = 2,2 + 5,72 \cdot 0,01 / 0,099 = 2,77 \text{ г/кг H}_2\text{O}.$$

4.2.10. Какие органы регулирования необходимо опустить в активную зону и на какую глубину после остановки реактора ТР, чтобы исключить самопроизвольный выход его в надкритический режим?

Решение. Вследствие того что после остановки ЯР происходит расхолаживание, а через некоторое время, после иодной ямы, уменьшение концентрации Xe, высвобождается значительный зап. Чтобы удержать ЯР в подкритическом состоянии, в активную зону необходимо ввести поглотители, физический вес которых был бы больше суммарной реактивности, высвобождающейся за счет указанных выше процессов:

$$|\Delta\rho_{\text{АЗ, АР, КС}}| > |\Delta\rho_t^{\text{макс}}| + |\Delta\rho_{\text{Xe}}^{\text{макс}}|,$$

где $\Delta\rho_t^{\text{макс}}$ — максимальная ρ , высвобождающаяся при расхолаживании от рабочей температуры до температуры, которой соответствует максимальное увеличение ρ (для реактора ТР $|\Delta\rho_t^{\text{макс}}| = 3\%$); $\Delta\rho_{\text{Xe}}$ — отравление Xe в момент остановки ЯР. Если ЯР до остановки работал на стационарной мощности не менее 40 ч, то $\Delta\rho_{\text{Xe}} = \rho_0 \text{Xe}$. В худшем случае, когда ЯР был выведен на мощность в момент максимума иодной ямы и вскоре после пуска снова был остановлен, $\Delta\rho_{\text{Xe}} = \rho_0 \text{Xe} + \rho_{\text{и.я}}$, где $\rho_{\text{и.я}}$ — глубина иодной ямы в момент остановки. Для реактора ТР $\Delta\rho_{\text{Xe}} = -4 - 5 = -9\%$. Следовательно, $|\Delta\rho_t| + |\Delta\rho_{\text{Xe}}| \leq 12\%$.

Если КС опустить настолько, чтобы они вместе со стержнями АЗ компенсировали 12%, то ЯР будет подкритичен, но вывести его в надкритическое состояние (пустить) с допустимым периодом невозможно, так как уже после подъема стержней АЗ мощность будет нарастать с малым периодом (поскольку обычно $\rho_{\text{АЗ}} >$

$> 0,1 \%$). Таким образом, для удержания ЯР в подкритическом состоянии и обеспечения нормального пуска после остановки необходимо опустить КС настолько, чтобы выполнялось условие $|\Delta \rho_{\text{КС}}| > |\Delta \rho_{\text{I}}^{\text{макс}}| + |\Delta \rho_{\text{Xe}}^{\text{макс}}| = 12 \%$. Если, например, в момент остановки $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 400$ мм, то их необходимо опустить не менее чем до глубины 1200 мм (см. рис. 3.4.2).

4.2.11. Реактор ТР отработал 50% $Q_{\text{ном}}$. На сколько нужно опустить КС после остановки, чтобы обеспечить нормальный очередной пуск ЯР?

Решение. Как было показано в задаче 4.2.10, в остановленном ЯР КС должны находиться в таком положении, чтобы после подъема стержней АЗ и АР ЯР оставался в подкритическом состоянии. Для реактора ТР в начале кампании в холодном разотравленном состоянии $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм (см. задачу 3.4.4). Если взять запас на подкритичность $0,5 \%$, то в начале кампании перемещение КС вниз можно ограничить положением 1240 мм (см. рис. 3.4.2): $\rho_{\Sigma}(1240) - \rho_{\Sigma}(1200) = 0,5 \%$.

Примечание. Двигатель, перемещающий стержень, во избежание механических повреждений приводных механизмов должен останавливаться раньше, чем стержни достигнут упора в крайнем положении.

После отработки 50% $Q_{\text{ном}}$, что составляет 160 000 МВт·ч, $\rho_{\text{зап}}$ высвободится на $\Delta \rho_{\text{К}}^+ = +1,0 \%$ (см. рис. 2.9.2). Следовательно, критическое положение КС при прочих равных условиях станет ниже по сравнению с $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ в начале кампании на 70 мм (см. рис. 3.4.2). Отсюда следует, что крайнее нижнее положение КС в остановленном ЯР с $\rho_{\text{под}} = 0,5 \%$ должно быть ниже, чем в начале кампании, на величину, соответствующую увеличению $\Delta \rho_{\text{ВП}}^+ = +1,0 \%$. Если в начале кампании это было 1240 мм, то после отработки 50% $Q_{\text{ном}}$ уставка на прекращение погружения КС вниз должна быть в положении 1300 мм.

Если в ЯР кривая энерговыработки имеет положительный выбег ρ , то крайнее нижнее положение КС уже в начале кампании лучше выбрать так, чтобы они перекрывали высвобождающийся $\Delta \rho_{\text{ВП}}^+$. После перехода через максимум $\Delta \rho_{\text{ВП}}^+$ по мере уменьшения $\rho_{\text{зап}}$ можно поднимать НКВ, чтобы сократить время очередного пуска ЯР, затрачиваемое на программный подъем КС в критическое положение.

4.2.12. На какую предельно допустимую глубину можно опустить стержни КС в процессе кампании при работе реактора ТР на мощности?

Решение. При работе ЯР на стационарной мощности после установления стационарного отравления Xe и Sm $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ будет изменяться в основном только в связи с изменением $\rho_{\text{зап}}$ вследствие выгорания и шлакования топлива и выгорания ВП. При наличии положительного выбега ρ КС необходимо опускать вниз. Физический вес КС рассчитывается таким образом, чтобы его было до-

статочно для компенсации $\rho_{\text{зап}}$ нескомпенсированного ВП и всех положительных эффектов, сопровождающих работу ЯР.

Для реактора ТР, имеющего в начале кампании $\rho_{\text{зап}}^{\text{оп}} = 12,5\%$ и физический вес КС $\rho_{\Sigma} = 15\%$, максимально допустимое увеличение $\rho_{\text{зап}}^{\text{оп}}$ вследствие $\Delta\rho_{\text{ВП}}^{\pm}$ не должно превышать (с учетом обеспечения $\rho_{\text{под}} = 0,5\%$ при поднятых стержнях АЗ и АР) $\Delta\rho^{\pm} = 15 - 12,5 - 0,5 = 2,0\%$ (см. рис. 3.4.2), при этом в холодном разотравленном ЯР $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = H_{\text{КС}}(14,5) = 1350$ мм. При работе ЯР на стационарной мощности практически всегда можно скомпенсировать $\Delta\rho_{\text{ВП}}^{\pm}$, если $\Delta\rho_{\text{ВП}}^{\pm} \leq |\rho_{0Xe}| + |\bar{\rho}_i|$. Но в случае плановой или вынужденной остановки нечем будет компенсировать высвобождающийся $\rho_{\text{зап}}$ вследствие разотравления и расхолаживания ЯР. Таким образом, эксплуатация ЯР с непредвиденно большим $\Delta\rho_{\text{ВП}}^{\pm}$ возможна до тех пор, пока КС находятся выше положения, при опускании от которого они могут скомпенсировать высвобождающийся $\rho_{\text{зап}}$ вследствие разотравления и расхолаживания ЯР.

Максимально допустимый непредвиденный $\Delta\rho_{\text{ВП}}^{\pm}$ для реактора ТР равен $(15 - 12,5) = 2,5\%$. Но в этом случае подкритичность в холодном разотравленном состоянии будет создаваться только стержнями АЗ и АР. При работе на $N_{\text{ном}} H_{\text{КС}}^{\text{крит}} (15\% - \rho_i - \rho_{0Xe}) = H_{\text{КС}}(8\%) = 1000$ мм и поэтому, если даже $\rho_{\text{ВП}}^{\pm} > 2,5\%$, КС еще могут скомпенсировать $\Delta\rho^{\pm} = \rho_{\text{КС}}(1400) - \rho_{\text{КС}}(1000) = 7\%$ (см. рис. 3.4.2), но после остановки без применения аварийных средств компенсации ρ (например, жидкого поглотителя нейтронов) удержать ЯР в подкритическом состоянии будет невозможно.

4.2.13. Реактор ТР работал более 2 сут на $N_{\text{ном}}$ в середине кампании. Сработала аварийная защита и стержни АЗ, АР и КС стали опускаться каждый со своей скоростью в активную зону. Какие меры может предпринять оператор, чтобы с минимально возможным перерывом по времени снова вывести ЯР на мощность?

Решение. Такая постановка вопроса возможна только в том случае, если оператор уверен, что защита сработала по причине ложной аварийной ситуации. Тогда, чтобы ускорить последующий пуск ЯР, желательно не опускать КС в крайнее нижнее положение, так как последующий подъем их по программе пуска займет много времени, особенно в том случае, когда МКУ соответствует надкритическому состоянию ЯР, т. е. когда переходу через критическое состояние соответствует мощность, значение которой меньше МКУ.

На каком уровне можно остановить движение КС? Минимальная глубина опускания КС определяется той реактивностью, которая может высвободиться до момента очередного выхода в критическое состояние. Она обусловлена температурным эффектом, а в последующем и разотравлением. При этом нужно иметь в виду, что если высвободившуюся ρ могут скомпенсировать только стерж-

ни АЗ и АР (без опускания КС), то КС тем не менее нужно опустить, так как в противном случае при попытке пустить ЯР мощность начнет расти во время подъема стержней АЗ, что с точки зрения ядерной безопасности недопустимо.

Температура теплоносителя после срабатывания АЗ быстро снизится до $t_{вх}$ в активную зону. Дальнейшее снижение температуры можно остановить, если прекратить подачу воды второго контура в ПГ. Предположим (с большим запасом), что температура снизится до $\sim 150^\circ\text{C}$, при этом высвободится $\Delta\rho_{зап} \approx 2\%$ (см. рис. 2.8.1), который скомпенсируют стержни АЗ ($\beta_{рАЗ} = 0,006 \times 3 = 0,018 = 1,8\%$) вместе со стержнями АР, один из которых находился в среднем рабочем положении, а второй — в верхнем резервном ($1,5 \rho_{АР} = 0,75\%$). Но, как было показано в задаче 4.2.10, стержнями КС также необходимо скомпенсировать эту реактивность. Если они находятся в области линейной части интегральной характеристики (см. рис. 3.4.2), то их достаточно опустить на 70 мм ($3 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 2\%$). Глубина опускания КС зависит от их эффективности в месте расположения в момент срабатывания АЗ. Например, из крайнего верхнего положения для компенсации $\Delta\rho_{зап} \approx 2\%$ их необходимо опустить на 480 мм.

Итак, остановив КС, оператор после предварительной оценки $N_{КС}^{крит}$ может начать подъем стержней АЗ, АР и КС по принятой для данного ЯР программе пуска. Если контроль за потоком нейтронов не потерян, то время пуска значительно сокращается, так как оператор, высвобождая ρ , следит за скоростью увеличения потока нейтронов (мощности) и может вывести ЯР на необходимую мощность с любым (большим периодом). При пуске нужно внимательно следить, чтобы температура не уменьшалась ниже того значения, относительно которого выбрана глубина опускания КС. Если эту температуру удерживать по какой-либо причине не удастся, то необходимо до подъема стержней АЗ опустить КС настолько, чтобы полностью скомпенсировать высвобождающийся $\rho_{зап}$ при снижении температуры до значения, которое уверенно можно удерживать постоянным.

Мы рассмотрели возможное увеличение ρ после остановки ЯР только за счет температурного эффекта. Это вполне оправдано, так как в подавляющем большинстве случаев после остановки или снижения мощности сначала имеет место иодная яма и только после нее начинается высвобождение $\rho_{зап}$ вследствие разотравления по отношению к моменту остановки. Если за это время ЯР нельзя вывести на мощность, то остановка действительно связана с аварийной ситуацией и КС необходимо опустить на НКВ для данного момента кампании (см. задачу 4.2.11). Но в некоторых случаях, когда срабатывание АЗ по причине, не связанной с аварийной ситуацией, произойдет после пуска ЯР в момент иодной ямы на восходящем ее участке, сразу же после остановки начнется высвобождение ρ как за счет температурного эффекта, так и вследствие разотравления. Из рис. 2.5.2 видно, что максимальная скорость высвобождения ρ при выходе из иодной ямы для $N_{ном}$ со-

ставляет $\sim 0,3-0,4$ %/ч. Следовательно, КС нужно опустить не на 70 мм, а, например, на 80 мм ($\Delta H = 0,4/3 \cdot 10^{-2} = 7,5$ мм), но по истечении ~ 1 ч, если ЯР не будет выведен в критическое состояние, опустить их в положение, соответствующее компенсации полного высвобождающегося $\rho_{\text{зап}}$.

4.2.14. Реактор ТР работает на $N_{\text{ном}}$ в течение 5 сут. При срабатывании АЗ стержни КС из положения 800 мм после опускания на 100 мм были остановлены. При каких условиях и через какое время ЯР может самопроизвольно выйти на мощность?

Решение. После опускания в активную зону трех стержней АЗ ($3\rho_{\text{АЗ}} = 0,6\% \cdot 3 = 1,8\%$), одного резервного и одного рабочего АР ($1,5\rho_{\text{АР}} = 0,75\%$), а также КС на 100 мм [$\Delta\rho_{\text{КС}} = \rho_{\text{КС}}(900\text{ мм}) - \rho_{\text{КС}}(800\text{ мм}) = 2\%$] $\rho_{\text{под}} = 4,55\%$. ЯР может самопроизвольно выйти в надкритическое состояние, если в результате расхолаживания и разотравления высвободится $\rho_{\text{зап}} > 4,55\%$. После полного расхолаживания $\rho_{\text{под}} = 4,55 - |\rho_t| = 4,55 - 3,0 = 1,55\%$. Разотравление начнется после иодной ямы. Когда оно составит $+1,55\%$ по отношению к моменту остановки, ЯР станет критичным. Как видно из кривой для $N_{\text{ном}}$ на рис. 2.5.2, это произойдет через 35 ч после остановки. Практически температуру можно поддерживать выше 20°C , благодаря чему время безопасной стоянки увеличивается.

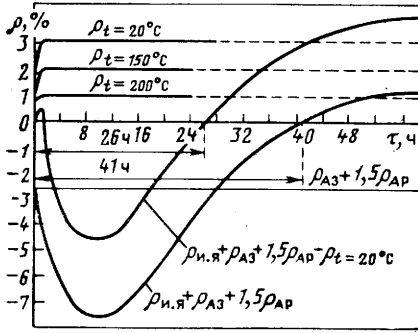
ЯР остается подкритичным после полного разотравления и расхолаживания, если опустить КС до положения ~ 1000 мм, что вместе со стержнями АР и АЗ создает $\rho_{\text{под}} \approx 7\% = |\rho_{\text{Хс}}| + |\rho_t^{\text{макс}}|$. Чтобы пустить ЯР из такого состояния с допустимым периодом и чтобы он не стал надкритичным еще при подъеме стержней АЗ (см. задачу 4.2.10), необходимо предварительно опустить КС, чтобы они без АЗ и АР обеспечили $\rho_{\text{под}} \approx 7\%$, т. е. в положение 1100 мм.

4.2.15. Сколько КС в реакторе ТР можно объединить в одну группу на один привод, чтобы обеспечить условия ядерной безопасности после срабатывания АЗ, если одна из групп КС не опустится в активную зону?

Решение. Реактор ТР имеет 10 КС. Предполагается, что все они, во-первых, имеют одинаковый физический вес и, во-вторых, между ними отсутствует интерференция. В реальных условиях эти предположения не совсем справедливы, и необходимо пользоваться экспериментально полученными характеристиками КС и значениями физических весов каждого стержня и отдельных групп при различных вариантах взаимного расположения их в активной зоне.

При выборе количества групп КС с независимыми приводами необходимо исходить из того, что при выходе из строя одной группы (при нахождении ее в верхнем положении активной зоны) оставшихся КС должно быть достаточно для компенсации высвобождающейся реактивности. После остановки ЯР, работавшего длительное время на мощности, начинается высвобождение $\rho_{\text{зап}}$ благодаря ТЭР и уменьшение его вследствие иодной ямы. Погру-

Рис. 4.2.4. К задаче 4.2.15



жение в активную зону всех стержней АЗ и АР создает подкритичность $\rho_{\text{под}} = 1,8 + 0,75 = 2,55 \%$. Если все КС остались в том же положении, что и в момент останова, то ЯР может самопроизвольно выйти на мощность уже при снижении температуры ниже 100°C (см. рис. 2.8.1), когда $\Delta\rho^+_t > 2,55 \%$. Время, когда это

может произойти, зависит от скоростей расхолаживания и нестационарного отравления. На рис. 4.2.4 представлены зависимости изменения ρ после останова реактора ТР, работавшего на $N_{\text{ном}}$ более 2 сут. В активную зону опущены стержни АЗ и АР. За счет температурного эффекта ρ увеличивается. Рассмотрен случай очень быстрого снижения температуры теплоносителя до $200, 150$ и 20°C . Иодная яма уменьшает $\rho_{\text{зап}}$. Из рассмотрения суммарных кривых видно, что если скорость высвобождения $\rho_{\text{зап}}$ за счет ТЭР больше скорости «погружения» в иодную яму, то при снижении температуры ниже $\sim 100^\circ\text{C}$ ρ может стать положительной и мощность ЯР начнет расти. Если же температура снижается не ниже чем до 100°C , пока $\Delta\rho^+_t < 2,55 \%$, или очень медленно ($|\rho_t/dt| < |\rho_{\text{Xe}}/dt|/1/c$), то время, когда может произойти самопроизвольный пуск ЯР, зависит от глубины и длительности иодной ямы, т. е. от режима работы до останова. Итак, для обеспечения надежной подкритичности после останова ЯР при имеющемся физическом весе стержней АЗ нельзя обойтись без опускания КС. Если все они подключены на один привод, то в случае невозможности их опускания необходимо иметь систему введения жидкого поглотителя в активную зону. Время, по истечении которого его нужно ввести, зависит от мощности до останова и времени работы на этой мощности, если оно меньше 2 сут. Количество поглотителя определяется реактивностью, которую необходимо скомпенсировать, типом поглотителя, объемом теплоносителя и т. п. (см. задачу 4.2.6). В данном случае при 20°C $\rho > 0$ станет сразу же после останова и потом через ~ 26 ч, а при 250°C — через ~ 41 ч (см. рис. 4.2.4).

Чтобы уменьшить вероятность такой ситуации и даже исключить ее полностью, необходимо иметь несколько независимых групп КС. Если, например, все КС разделить на две группы с физическим весом каждой $0,5\rho_{\Sigma} = 7,5 \%$ (без учета интерференции!), то опускания одной группы будет достаточно (даже без стержней АЗ и АР), чтобы скомпенсировать высвобождающийся $\rho_{\text{зап}}$ после расхолаживания и разотравления: $|\rho_{\text{Хе}}| + |\rho_t| = 7 \% < | -7,5 |$.

Если аварийная ситуация возникает после пуска в максимальной иодной яме, то может высвободиться $\rho^+ = |\rho_{\text{Л.Я}} + \rho_{\text{ОХ}} + \rho_{\text{Г}}| = 12\%$, что окажется больше физического веса всех поглотителей без одной группы КС: $0,5\rho_{\Sigma} + \rho_{\text{АЗ}} + 1,5\rho_{\text{АР}} = 10,05\%$. Разделение КС на большее число независимых групп увеличивает надежность системы компенсации. Так, при наличии четырех групп КС ($\rho_{\Sigma}/4 = -3,7\%$) физический вес всех поглотителей без одного, наиболее эффективного, будет достаточным для удержания ЯР в подкритическом состоянии после расхолаживания и разотравления: $3 \cdot 3,7\% + 2,55\% = 13,8\% > \rho^+ = 12\%$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Возможен ли ядерный взрыв в ЯР?
2. Чем опасна неточность в расчете $N_{\text{КС}}^{\text{крит}}$? Какие ошибки и неточности наиболее опасны?
3. В чем опасность заклинивания отдельных стержней КС, АР, АЗ?
4. Определить поправку $\Delta_{\text{КС}}$ в $N_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ при пуске ЯР в условиях, указанных в задаче 3.5.3 при $\beta_{\text{эф}} = 0,8\%$.
5. Какие особенности ЯР обуславливают требования ЯБР? Каковы эти требования на период эксплуатации и чем они обеспечиваются? Что такое ПОР (ЯОР)?
6. Реактор ТР выработал 55% $Q_{\text{ном}}$. В каком положении КС будут компенсировать оставшийся $\rho_{\text{зап}}$ в холодном разотравленном состоянии?
7. Какой максимально возможный положительный выбег ρ могли бы компенсировать КС с интегральной характеристикой, представленной на рис. 3.4.2 и $N_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1200$ мм в холодном разотравленном состоянии при физическом пуске?
8. Реактор ТР выведен на мощность в момент максимальной иодной ямы для $N_{\text{ном}}$. Через 10 мин сработала АЗ. КС опустились с 600 до 900 мм и остановились. Определить: а) в течение какого времени нет опасности самопроизвольного пуска ЯР; б) до какого положения необходимо опустить КС, чтобы обеспечить надежную подкритичность при длительной стоянке ЯР и безопасный очередной пуск?
9. Реактор ТР из разотравленного состояния выведен на $N_{\text{ном}}$. Через 1 ч работы сработала АЗ, а все КС остались в исходном положении. Насколько опасна такая аварийная ситуация?
10. Исходя из требований ПБЯ—04—74 [16], определить: а) допустимую скорость подъема стержней АР, имеющих интегральную характеристику, как на рис. 3.4.3; б) допустимый шаг подъема всех КС, имеющих интегральную характеристику, как на рис. 3.4.2.
11. Каким должен быть физический вес АЗ с точки зрения недопущения развития аварийной ситуации после остановки ГЦН?

§ 4.3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Теплотехническая надежность активной зоны — это ее способность сохранять работоспособность в течение кампании ядерного топлива.

Работоспособность активной зоны практически обеспечивается надежностью твэлов — наиболее ответственных конструктивных узлов ЯР. В твэлах происходит деление ядер топлива и выделение энергии в виде тепла; они находятся в условиях высокой температуры, подвержены воздействию механических и термических нагрузок, мощных потоков ионизирующего излучения. Твэл работоспособен, если он в течение расчетной кампании герметичен в необходимых пределах и его геометрические размеры и форма не изменяются настолько, чтобы заметным образом ухудшить внешнее охлаждение и распределение температуры внутри твэла.

Герметичность оболочки твэла может нарушаться как вследствие исчерпания ресурса ее работоспособности при нормальных рабочих параметрах, так и досрочно в результате ухудшения условий эксплуатации или при наличии исходных дефектов при их изготовлении.

Ресурс работоспособности твэлов определяется: качеством материала топливной композиции и оболочки; формой твэла и качеством его изготовления; характером химического взаимодействия материала оболочки с теплоносителем, топливной композицией и прослойкой (если она есть); скоростью изменения структуры топлива вследствие выгорания делящихся нуклидов, накопления продуктов деления и ионизирующего воздействия излучений; скоростью изменения структуры оболочки твэла под действием облучения и усталостью материала при возрастании внутреннего давления и переменных термических и механических нагрузках; напряженностью температурного режима работы активной зоны.

Основными причинами разгерметизации твэлов являются: твердое распухание сердечника твэла из-за большего, чем у делящегося материала, объема, занимаемого осколками деления; повышения внутреннего давления газообразных продуктов деления, выходящих из сердечника; химическое взаимодействие материала оболочки с теплоносителем; аварийные отклонения от нормальных условий теплообмена.

Задача увеличения ресурса работоспособности твэлов решается прежде всего при проектировании и конструировании, в технологическом процессе изготовления твэлов, а также при выборе допустимых режимов работы ЯР.

В течение кампании работоспособность твэлов обеспечивается созданием таких условий, которые исключали бы эксплуатационные причины разгерметизации твэлов и повышение активности теплоносителя выше установленной нормы.

Нельзя допускать перегрева твэлов из-за непредвиденного возрастания мощности ЯР, изменения распределения энерговыделения в активной зоне, ухудшения охлаждения твэлов, отклонения от норм химического состава теплоносителя. Для этого оператору необходимо:

строго поддерживать в пределах допустимой скорости изменения мощности и температуры при пуске, разогреве, на энергетическом уровне, при остановке и во время расхолаживания ЯР;

соблюдать температурный режим активной зоны (допустимые температуры на входе и выходе ЯР, в ТК);

ограничивать мощность при возникновении перекосов энерговыделения, обусловленных непредвиденным расположением КР, ксеноновыми волнами и др.;

не допускать разбаланса между энерговыделением и теплоотъемом при изменении циркуляции теплоносителя;

обеспечивать нормальный режим расхолаживания после плановых и аварийных остановок ЯР;

контролировать и восстанавливать нормальный химический состав теплоносителя;

проводить контрольные ТТИ и ТТП в период эксплуатации с целью проверки соответствия температур расчетным значениям и достоверности показаний приборов контроля тепловых параметров.

Нужно четко представлять, что результат нарушения этих требований, как правило, не проявляется сразу, непосредственно в момент нарушения, но безусловно способствует ухудшению состояния твэлов и появлению активности, причем это может произойти неожиданно, при отсутствии видимых причин в данный момент.

Поскольку негерметичные твэлы опасны прежде всего как источники активности теплоносителя и радиоактивного фона в обслуживаемых помещениях, в различных ЯР в зависимости от их характеристик, расположения и надежности биологической защиты, конструкции контуров и степени автоматизации обслуживания момент ограничения мощности или прекращения работы и перегрузки ТК соответствует различной степени разгерметизации твэлов, когда условия дальнейшей эксплуатации становятся затруднительными и опасными для обслуживающего персонала и окружающей среды. Например, для ВВЭР и РБМК проектный предел повреждения твэлов для нормальной эксплуатации, определяющий устанавливаемый уровень активности теплоносителя первого контура, по количеству и величине дефектов твэлов составляет 1 % твэлов с дефектами типа газовой неплотности и 0,1 % твэлов, для которых имеет место прямой контакт теплоносителя и ядерного топлива.

Главное условие надежной работы активной зоны в течение кампании — поддержание полного баланса между:

а) мощностью N , выделяющейся в топливе (1.5.1), которая создает тепловой поток с поверхности S (m^2) твэлов

$$q = N \text{ (Вт)} / S, \text{ Вт}/m^2; \quad q = 860 N \text{ (кВт)} / S \text{ ккал}/(m^2 \cdot \text{ч}); \quad (4.3.1)$$

б) мощностью, переходящей от твэлов к теплоносителю,

$$N = \alpha S (t_{\text{твэл}} - t_{\text{H}_2\text{O}}) \text{ ккал}/\text{ч},$$

в) мощностью, отводимой теплоносителем из активной зоны,

$$N \text{ (ккал}/\text{ч}) = 860 N \text{ (кВт)} = G_{\text{ГК}} [(c_p t)_{\text{вых}} - (c_p t)_{\text{вх}}],$$

где α — коэффициент теплоотдачи от поверхности твэла, имеющего температуру $t_{\text{твэл}}$ ($^{\circ}\text{C}$), к теплоносителю с температурой $t_{\text{H}_2\text{O}}$

(°С), ккал/(м²·ч·°С); c_p — теплоемкость теплоносителя при температуре входа $t_{вх}$ (°С) и выхода $t_{вых}$ (°С) из ЯР, ккал/(кг·°С); $G_{ЯР}$ — расход теплоносителя первого контура [см. (3.7.2)], кг/ч.

В единицах СИ

$$N \text{ (Вт)} = q \left(\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2} \right) \cdot S \text{ (м}^2\text{)} = \alpha \left(\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}} \right) \Delta t \text{ (К)} S \text{ (м}^2\text{)} = G_{ЯР} \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right) \Delta i \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Отклонение N , t , G , P и других параметров первого и второго контуров от заданных для данного режима работы влечет за собой нарушение теплового баланса в активной зоне, что может привести к очень серьезным последствиям. Особенно опасны кризисы теплообмена первого и второго рода.

При больших мощностях на наиболее энергонапряженных участках ТК температура оболочки твэлов может достигать температуры насыщения теплоносителя при данном давлении и превышать ее. В этих местах начинается поверхностное *пузырьковое* кипение при недогреве общего потока теплоносителя до кипения. В настоящее время пузырьковое кипение допускается во многих ЯР, оно интенсифицирует теплосъем и не вызывает особых опасений, хотя на границах участка с пузырьковым кипением будет наблюдаться неустойчивый режим, сопровождаемый колебаниями температуры поверхности твэлов и, следовательно, колебаниями термических напряжений.

В случае поверхностного кипения опасность представляет увеличение теплового потока (мощности), когда в недогретой до кипения воде скорость образования пузырьков на поверхности твэла превысит скорость их удаления и образуется устойчивая паровая пленка, имеющая низкий коэффициент теплопередачи. Наступает так называемый *кризис первого рода*: тепловой поток достигает критического значения, при котором на поверхности твэлов образуется паровая пленка, (пленочное кипение), температура твэла резко возрастает — он начинает плавиться. Критический тепловой поток $q_{кр}$ сложным образом зависит от скорости, давления и температуры теплоносителя, формы и размеров теплоотдающей поверхности. Это весьма сложное теплофизическое явление пока не имеет общего аналитического решения, но для различных конкретных случаев получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать $q_{кр}$ в определенной области температур. Например, для стержневых цилиндрических твэлов при давлении 14—20 МПа, недогреве до кипения $\Delta t_s = (10 \div 100)$ °С и скорости теплоносителя $\omega = 1,5 \div 7$ м/с

$$q_{кр} = 35\,400 (\omega \gamma)^{0,5} \Delta t_n^{0,33} \left(\frac{v'}{v'' - v'} \right) \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)}, \quad (4.3.2)$$

где v'' , v' — удельные объемы пара и воды при температуре насыщения, м³/кг; ω и γ — см. в (3.7.2). Чтобы не допустить пленочного кипения, необходимо так организовать теплосъем, чтобы в самом напряженном твэле существовал запас по критической теп-

ловой нагрузке:

$$n = q_{\text{кр}}/q_{\text{макс}} = q_{\text{кр}}/k_p \bar{q} > 1,$$

где k_p — см. § 1.5; \bar{q} — средний тепловой поток (4.3.1), ккал/(м²·ч).

В активной зоне современных энергетических ЯР на быстрых нейтронах тепловые потоки с поверхности твэлов достигают $2,5 \times 10^6$ Вт/м² ($\sim 2 \cdot 10^6$ ккал/(м²·ч)] и выше; для тепловых ЯР они примерно в 2 раза меньше.

Кризис второго рода может возникнуть и при малых тепловых потоках, но при наличии объемного кипения, что возможно, например, в случае снижения давления в контуре, уменьшении расхода теплоносителя. При омывании твэла паровойной средой с большим паросодержанием теплоотдача от поверхности осуществляется через жидкую пристеночную пленку. В момент достижения определенного (граничного) паросодержания жидкая пленка начинает высыхать, а температура поверхности твэла расти, достигая недопустимых значений. Чтобы исключить кризис второго рода, необходимо прежде всего не допускать объемного кипения теплоносителя и граничного паросодержания в активной зоне.

Температура оболочки твэлов может быть выше расчетной при наличии перетечек теплоносителя в активной зоне мимо основного тракта циркуляции. Зная расход теплоносителя по контуру G_p , т. е. через ЯР, и замеряя соответственно температуру на входе в ЯР $t_{\text{вх}}$, на выходе из активной зоны $t_{\text{вых.а.з}}$ и на выходе из ЯР $t_{\text{вых}}$, из уравнений теплового баланса

$$\left. \begin{aligned} 860N &= G_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}); \\ 860N &= G_{\text{а.з}} (t_{\text{вых.а.з}} - t_{\text{вх}}) = (G_p - G_{\text{пер}}) (t_{\text{вых.а.з}} - t_{\text{вх}}) \end{aligned} \right\}$$

можно оценить перетечки теплоносителя мимо активной зоны

$$G_{\text{пер}} = G_p - G_{\text{а.з}} = G_p (t_{\text{вых.а.з}} - t_{\text{вх}}) / (t_{\text{вых.а.з}} - t_{\text{вх}}). \quad (4.3.3)$$

Из этих же уравнений, зная $K_{\text{п}} = G_{\text{пер}}/G_p$, можно оценить температуру на выходе из активной зоны

$$t_{\text{вых.а.з}} = (t_{\text{вых}} - K_{\text{п}} t_{\text{вх}}) / (1 - K_{\text{п}}) \quad (4.3.4)$$

и температуру входа, при которой будет выдержан заданный разбаланс температур на выходе из ЯР и активной зоны,

$$t_{\text{вх}} = [t_{\text{вых}} - (1 - K_{\text{п}}) t_{\text{вых.а.з}}] / K_{\text{п}}.$$

Температура теплоносителя на выходе из ЯР при известных других параметрах соответственно равна

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вых.а.з}} (1 - K_{\text{п}}) + K_{\text{п}} t_{\text{вх}} = t_{\text{вых.а.з}} - K_{\text{п}} (t_{\text{вых.а.з}} - t_{\text{вх}}).$$

Для более точного расчета необходимо записать уравнения теплового баланса для всех участков, на которых происходят перетечки, а также учесть проходные сечения и гидравлические сопротивления в местах перетечек.

Во всех случаях несоответствия теплосъема и энерговыделения происходит изменение температуры всех конструкционных компонентов твэла: оболочки, прослойки, топлива.

Перепад температуры между теплоносителем и поверхностью твэла при коэффициенте теплоотдачи α [ккал/(м²·ч·°С)] или Дж/(м²·с·К)] и тепловом потоке q [ккал/(м²·ч) или Дж/см²]

$$\Delta t_{\alpha} = q/\alpha \text{ } ^{\circ}\text{С.} \quad (4.3.5)$$

Перепад температуры на стенке толщиной δ (м) с коэффициентом теплопроводности λ [ккал/(м·ч·°С)] при тепловом потоке q [ккал/(м²·ч)]

$$\Delta t_{\delta} = q\delta/\lambda \text{ } ^{\circ}\text{С.} \quad (4.3.6)$$

Перепад температуры в цилиндрическом стержне топлива диаметром d (м) с коэффициентом теплопроводности λ [ккал/(м²·ч·°С)] и внутренним источником тепла, создающим тепловой поток q [ккал/(м²·ч)],

$$\Delta t = qd/(4\lambda) \text{ } ^{\circ}\text{С.} \quad (4.3.7)$$

Задачи с решениями

4.3.1. Реактор ТР работает на мощности 50% $N_{\text{ном}}$. Какими должны быть температуры теплоносителя на входе и выходе ЯР при номинальном расходе теплоносителя и 60% $G_{\text{ном}}$?

Решение. Согласно статическим характеристикам ЯР (см. рис. 3.7.1) определяем: 1) при $G_{\text{ном}}$ $t_{\text{вх}}=240^{\circ}\text{С}$; $t_{\text{вых}}=260^{\circ}\text{С}$, $\Delta t=20^{\circ}\text{С}$; 2) при $G=60\%$ $G_{\text{ном}}$ $t_{\text{вх}}=233^{\circ}\text{С}$, $t_{\text{вых}}=267^{\circ}\text{С}$, $\Delta t=34^{\circ}\text{С}$.

4.3.2. Оценить среднюю и максимальную поверхностную плотность теплового потока твэла ЯР с $N_{\text{ном}}=100$ МВт, имеющего в активной зоне 5000 твэлов диаметром 13 мм и высотой 1,5 м. Коэффициенты неравномерности энерговыделения равны $k_r=1,4$ и $k_z=1,7$.

Решение. Средняя мощность одного твэла

$$\bar{N}_{\text{твэл}} = \bar{N}/n_{\text{твэл}} = 100 \cdot 10^3 / 5000 = 20 \text{ кВт} = 20 \text{ Дж/с} = 17,2 \cdot 10^3 \text{ ккал/ч,}$$

а средняя поверхностная плотность теплового потока (4.3.1)

$$\bar{q} = \frac{860 \bar{N}_{\text{твэл}}}{S_{\text{твэл}}} = \frac{860 \cdot 20}{\pi \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5} = 0,28 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} = 325 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

При $k_r=1,4$ мощность максимально напряженного твэла

$$N_{\text{твэл}}^{\text{макс}} = k_r \bar{N}_{\text{твэл}} = 20 \cdot 1,4 = 28 \text{ кВт,}$$

а максимальная плотность теплового потока с этого твэла

$$\begin{aligned} q_{\text{макс}} &= 860 N_{\text{твэл}}^{\text{макс}} k_z / S_{\text{твэл}} = 860 \bar{N}_{\text{твэл}} k_r k_z / S_{\text{твэл}} = 860 \bar{N} k_r k_z / S_{\text{а.з}} = \\ &= \bar{q} k_r k_z = 0,28 \cdot 10^6 \cdot 1,4 \cdot 1,7 = 0,67 \cdot 10^6 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)} = 779 \text{ кВт/м}^2. \end{aligned}$$

4.3.3. Оценить $q_{кр}$ в ЯР с водяным теплоносителем, имеющим следующие параметры: $P_{ик}=140$ кгс/см²; $\bar{t}_T=250$ °С; $t_{вых}=270$ °С; $\omega=3$ м/с.

Решение. Согласно (4.3.2) определяем

$$q_{крит} = 35400(3 \cdot 0,8 \cdot 10^3)^{0,5} \cdot 65^{0,33} \left(\frac{0,012}{0,012 - 0,0016} \right)^{-1,8} = 17,5 \cdot 10^5 \cdot 3,95 \times \\ \times 0,78 = 5,4 \cdot 10^6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 6,28 \text{ МВт}/\text{м}^2,$$

где $\gamma_{H_2O} = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность теплоносителя при $\bar{t} = 250$ °С (см. приложение 24); $\Delta t_{ц} = t_s - t_{вых} = 335 - 270 = 65$ °С; $v'' = 0,012$ м³/кг; $v' = 0,0016$ м³/кг — удельный объем пара и кипящей воды при $\bar{t}_s = 335$ °С и $P = 140$ кгс/см² (см. приложение 21).

4.3.4. Оценить температуру в центре цилиндрического твэла из UO₂, имеющего диаметр по UO₂ $d=11$ мм, толщину стальной оболочки $\delta_{об}=0,9$ мм, прослойку из гелия между топливом и оболочкой $\delta_{гг}=0,1$ мм. В месте максимального энерговыделения $q_{макс}=0,7 \cdot 10^6$ ккал/(м²·ч); температура теплоносителя $t_T=260$ °С; коэффициент теплоотдачи $\alpha=30000$ ккал/(м²·ч·°С); коэффициенты теплопроводности: $\lambda_{об}=15$ ккал/(м²·ч·°С), $\lambda_{пр}=0,3$ ккал/(м²·ч·°С), $\lambda_{UO_2}=2,5$ ккал/(м²·ч·°С).

Решение. Температуру в центре твэла можно оценить как сумму перепадов температур между теплоносителем и оболочкой Δt_α , на оболочке $\Delta t_{об}$, прослойке $\Delta t_{пр}$ и твэле Δt :

$$t_{ц} = t_T + \Delta t_\alpha + \Delta t_{об} + \Delta t_{пр} + \Delta t.$$

Согласно (4.3.5) — (4.3.7) получим:

$$\Delta t_\alpha = q_{макс}/\alpha = 0,7 \cdot 10^6/0,3 \cdot 10^5 = 23 \text{ °С};$$

$$\Delta t_{об} = q_{макс} \delta_{об}/\lambda_{об} = 0,7 \cdot 10^6 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}/15 = 42 \text{ °С};$$

$$\Delta t_{пр} = q_{макс} \delta_{пр}/\lambda_{пр} = 0,7 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}/0,3 = 230 \text{ °С};$$

$$\Delta t = q_{макс} d/4\lambda_{UO_2} = 0,7 \cdot 10^6 \cdot 11 \cdot 10^{-3}/4 \cdot 2,5 = 770 \text{ °С};$$

$$t_{ц} = 260 + 23 + 42 + 230 + 770 = 1325 \text{ °С}.$$

4.3.5. Оценить перетечки теплоносителя мимо ТК в активной зоне, если на входе в ЯР $t_{вх}=278$ °С, на выходе из активной зоны (из ТК) $t_{вых.а.з.}=278$ °С, а на выходе из ЯР $t_{вых}=275$ °С.

Решение. При работе на мощности N из-за перетечек теплоносителя его температура на выходе из ЯР ниже, чем непосредственно на выходе из активной зоны. Из (4.3.3) находим

$$G_{пер} = G_p (278 - 275)/(278 - 250) = 3G_p/28 = 0,107G_p \approx 11 \% G_p.$$

4.3.6. Перетечки теплоносителя мимо ТК в активной зоне составляют примерно 20 % общего расхода через ЯР. На сколько температура теплоносителя на выходе из ТК может превышать температуру на выходе из ЯР, которая равна 280 °С при $t_{вх}=260$ °С?

Решение. По формуле (4.3.4) находим

$$t_{вых.а.з.} = (280 - 0,2 \cdot 260)/0,8 = 285 \text{ °С}.$$

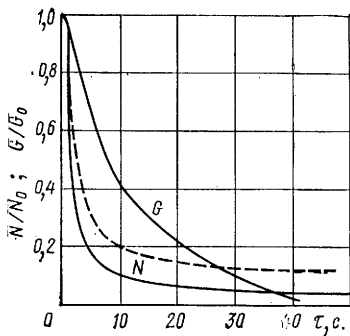


Рис. 4.3.1. К задаче 4.3.8

4.3.7. Физический вес четырех стержней АЗ равен 2,4 %. Какой расход теплоносителя G через ЯР должен обеспечить всегда действующий резервный насос, чтобы исключить вскипание теплоносителя в активной зоне при остановке ГЦН и заклинивании в верхнем положении одного стержня АЗ?

Решение. При введении в активную зону трех стержней АЗ с физическим весом $3 \cdot 0,006 = 0,018 = 1,8 \%$ мощность скачком уменьшится при $\beta_{эф} = 0,7 \%$ от $N_{ном}$ до (3.3.2):

$$N(t) = N_{ном} = \frac{\beta_{эф}}{\beta_{эф} + |\rho_{АЗ}|} = 0,28 N_{ном} = 28 \% N_{ном}.$$

Если спад циркуляции после остановки насоса происходит быстрее, чем снижение мощности за счет запаздывающих нейтронов (3.8.1) сразу же после скачка мощности, то для обеспечения нормального теплосъема производительность резервного насоса должна быть не менее 28 % $G_{ном}$ ГЦН.

4.3.8. На рис. 4.3.1. дан график изменения мощности ЯР N и расхода теплоносителя G после сброса стержней АЗ по сигналу потери питания ГЦН. Определить: 1) чему равен физический вес сброшенных стержней АЗ; 2) как изменялась бы мощность при падении половины стержней АЗ; 3) через какое время должны подключаться резервные насосы в обоих случаях, чтобы не допустить кипения теплоносителя?

Решение. 1. Подставляя в соотношение (3.3.13) величину $N(t) \approx 15 \% N_{ном}$ из графика (рис. 4.3.1), получаем

$$|-\rho| = \rho_{АЗ} = 0,7(1 - 100/15) \approx 4 \%.^*$$

2. Из соотношения (3.3.2) для $\rho = -2 \%$ определяем $N(t) = 100 \cdot 0,7 / (0,7 + 2) \approx 25 \% N_{ном}$ и согласно (3.3.12) $\Delta N \approx 75 \% N_{ном}$.

3. Как видно из кривых на рис. 4.3.1, резервные насосы должны включаться не позже ~ 35 с при $\rho_{АЗ} = 4 \%$ и ~ 25 с при $\rho_{АЗ} = 2 \%$ (см. пункт на рис. 4.3.1).

4.3.9. Оценить, с какой примерно скоростью будет расти температура внутри твэла, извлеченного из активной зоны через 1 мес после остановки ЯР, который до этого работал на средней мощности 60 МВт в течение 2 мес? Количество твэлов в активной зоне 5000 шт., каждый твэл содержит 1500 г UO_2 .

Решение. По графикам остаточного тепловыделения (см. рис. 3.8.5) для $T = 60$ сут, $\tau_{ст} = 30$ сут определяем $N_{\beta, \gamma} / 60 \approx 90 \cdot 10^{-4}$, откуда $N_{\beta, \gamma} \approx 54$ кВт. Мощность одного твэла равна $N_{\beta, \gamma}^{твэл} = N_{\beta, \gamma} / 5000 = 54 / (5 \cdot 10^3) \approx 11$ Вт = 9,5 ккал/ч. Удельная мощность

(на единицу массы UO_2) равна

$$q_{\beta,\gamma}^{\text{ТВЭЛ}} = N_{\beta,\gamma}^{\text{ТВЭЛ}} / m_{\text{UO}_2}^{\text{ТВЭЛ}} = 9,5/1,5 = 6,3 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{ч}) = 7,3 \text{ Вт}/\text{кг}.$$

Исходя из формулы (3.8.5) определяем скорость разогрева:

$$dt/dx = 860N/mc_p = q_{\beta,\gamma}^{\text{ТВЭЛ}}/c_p = 6,3/0,56 = 11 \text{ }^\circ\text{C}/\text{ч},$$

где $c_p = 0,56 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ — теплоемкость UO_2 . В данной оценке не учитывается теплоотдача через оболочку в окружающую среду.

4.3.10. Средняя мощность ЯР за 100 сут работы равна 60 МВт. Через 10 сут после остановки при температуре теплоносителя $50 \text{ }^\circ\text{C}$ из активной зоны извлечен один из 5000 твэлов с сердечником из UO_2 , площадь поверхности теплоотдачи которого равна 700 см^2 . Оценить, через какое время стальная оболочка твэла массой $0,7 \text{ кг}$ нагреется на воздухе до температуры плавления.

Решение. По графикам остаточных тепловыделений (см. рис. 3.8.5) для $T = 100 \text{ сут}$, $\tau_{\text{ст}} = 10 \text{ сут}$ находим $N_{\beta,\gamma}/60 \approx 2,1 \cdot 10^{-3}$, откуда $N_{\beta,\gamma} \approx 130 \text{ кВт} = 110 \cdot 10^3 \text{ ккал}/\text{ч}$. На один твэл приходится $N_{\beta,\gamma}^{\text{ТВЭЛ}} = 110 \cdot 10^3 / 5 \cdot 10^3 = 22 \text{ ккал}/\text{ч} = 25,6 \text{ Вт}$.

После подъема твэла из теплоносителя это тепло будет расходоваться на повышение температуры сердечника [$c_p^{\text{UO}_2} = 0,56 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$] и стальной оболочки [$c_{p,\text{об}} = 0,11 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$]. Часть тепла будет израсходована на испарение водяной пленки на поверхности твэла после достижения температуры $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Принимая толщину пленки равной $0,1 \text{ мм}$, при площади поверхности твэла 700 см^2 определяем массу воды: $m_{\text{H}_2\text{O}} = 700 \cdot 0,1 \cdot 10^{-1} \cdot 1 = 7 \text{ г} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Таким образом:

а) для разогрева стальной оболочки массой $0,7 \text{ кг}$ с 50 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ согласно (3.8.6) необходимо затратить энергию

$$Q_1 = mc_{p,\text{об}}\Delta t = 0,7 \cdot 0,11 \cdot 50 = 3,8 \text{ ккал} = 15,9 \text{ кДж};$$

б) для подогрева 7 г воды до $100 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_2 = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 50 = 0,35 \text{ ккал} = 1,5 \text{ кДж};$$

в) для испарения 7 г воды при теплоте парообразования $r = 540 \text{ ккал}/\text{кг}$ согласно (3.8.7)

$$Q_3 = mr = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 540 = 3,8 \text{ ккал} = 15,9 \text{ кДж}.$$

Итого $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \approx 8 \text{ ккал} = 33 \text{ кДж}$. При $N_{\beta,\gamma} = 22 \text{ ккал}/\text{ч}$ находим, что время, через которое испарится вода после подъема твэла из активной зоны, равно (3.8.6)

$$\tau_1 = Q/N_{\beta,\gamma} = 8/22 = 0,36 \text{ ч} = 22 \text{ мин}.$$

После этого все тепло будет идти на разогрев твэла (сердечника из UO_2 и стальной оболочки) со скоростью, которую можно оценить исходя из соотношения (3.8.5):

$$\frac{dt}{dx} = \frac{N_{\beta,\gamma}^{\text{ТВЭЛ}}}{(mc_p)_{\text{UO}_2} + (mc_p)_{\text{об}}} = \frac{22}{1,5 \cdot 0,56 + 0,7 \cdot 0,11} = 24 \text{ }^\circ\text{C}/\text{ч}.$$

Пренебрегая утечкой тепла в окружающую среду, можно оценить минимальное время, когда температура оболочки твэла после испарения воды достигнет температуры плавления $t_{пл}=1400^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{пл} = (t_{пл} - t_0) / \frac{dt}{d\tau} = (1400 - 100)/24 \approx 6 \text{ ч.}$$

Температуру в центре твэла можно оценить по формулам (4.3.5)–(4.3.7) (см. задачу 4.3.4).

4.3.11. В течение 10 сут ЯР работал на мощности $N=100$ МВт. Произошла разгерметизация контура теплоносителя. Вода в активной зоне выкипает. Какое количество воды с температурой 50°C необходимо подавать в активную зону, чтобы снимать тепловыделение через 1 мин, 2 мин, 1 ч, 1 сут после остановки ЯР?

Решение. В течение первых минут тепловыделение будет определяться запаздывающими нейтронами и активностью продуктов деления. Из задачи 3.8.11 возьмем $N_{ост}$ (1 мин) $\approx 4,3$ МВт; $N_{ост}$ (2 мин) $\approx 2,8$ МВт. Через 1 ч и, тем более 1 сут, тепловыделение будет определяться в основном торможением β -, γ -излучения продуктов деления. Из графика на рис. 3.8.5 находим для $N_0=100$ МВт и $T=10$ сут: $N_{\beta,\gamma}$ (1 ч) ≈ 1 МВт; $N_{\beta,\gamma}$ (1 сут) $\approx 0,2$ МВт. При кипении воды энергия затрачивается в основном на парообразование ($r=539$ ккал/кг, см. приложение 21). Согласно формулам (3.8.7) и (3.8.8), чтобы компенсировать убыль воды вследствие испарения, учитывая затраты энергии на ее подогрев от 50 до 100°C , необходимо обеспечить расход: G (1 мин) $= 860 N_{\beta,\gamma}$ (1 мин) / $(\Delta t + r) = 860 \cdot 4,3 \cdot 10^3 / (50 + 539) \approx 6,3$ т/ч; G (2 мин) $= 860 \cdot 2,8 \cdot 10^3 / 589 \approx 4,1$ т/ч; G (1 ч) $\approx 1,5$ т/ч; G (1 сут) $\approx 0,5$ т/ч. Энергию на подогрев воды от 50 до 100°C при большом энерговыделении можно не учитывать, так как она незначительна по сравнению с энергией, расходуемой на парообразование, и идет в запас расчета. Действительно, при $G=6$ т/ч для подогрева воды на $\Delta t=100-50=50^{\circ}\text{C}$ необходима мощность $N = G\Delta t/860 \approx 6 \cdot 10^3 \cdot 50/860 = 0,35$ МВт, что меньше 10 % энерговыделения через 1 мин.

Контрольные вопросы и задачи

1. Каковы режимы кипения возможны и какие допустимы в активной зоне ВВР?

2. При изменении каких параметров ЯР возможно вскипание теплоносителя в активной зоне и как оно повлияет на работоспособность твэлов?

3. Как изменится в первое время уровень в КО реактора ТР, если после срабатывания АЗ восстановить прежнюю мощность и среднюю температуру теплоносителя, не производя подпитку и дренирование первого контура?

§ 4.4. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Радиационная безопасность (РБ) — это совокупность технических средств и организационных мероприятий, исключающих возможность нарушения пределов безопасной эксплуатации ЯР, при

которых происходит выход радиоактивных продуктов или ионизирующего излучения за предусмотренные границы в количествах, превышающих установленные для нормальной эксплуатации. Вопросы РБ тесно связаны с ядерной безопасностью, так как ядерная авария разрушает барьеры РБ или снижает их эффективность по удержанию продуктов деления.

Первичным источником ионизирующих излучений в ЯР является ядерное топливо, при делении которого образуются мгновенные нейтроны, γ -излучение и осколки деления с продуктами их распада, излучающими β -частицы, γ -кванты и запаздывающие нейтроны. После длительной работы ЯР в топливе образуется ~ 600 новых ядер — осколков деления и продуктов их распада с $A=72 \div 161$. Удельная активность достигает $\sim 10^5 - 10^6$ Ки/кг, через год после выгрузки она снижается до $\sim 10^3 - 10^4$ Ки/кг, а через 3 года — еще на порядок, но остается очень высокой. Из продуктов деления наибольшую радиационную опасность для внешней среды представляют *инертные радиоактивные газы* — ИРГ (изотопы криптона и ксенона), изотопы иода (прежде всего ^{131}I), стронция (^{89}Sr и ^{90}Sr), цезия (^{134}Cs , ^{137}Cs) и др.

В результате ядерных реакций в материалах, облучаемых *первичным* излучением (топливе, замедлителе, теплоносителе, конструкционных материалах, защите и др.), возникает *вторичное* излучение: нейтроны, γ -кванты, β -частицы, протоны и др., которое в свою очередь можно считать первичным для последующих ядерных реакций. Заметный вклад из вторичных излучений дает *захватное* γ -излучение, образующееся в результате поглощения нейтронов (радиационного захвата), и *активационное* γ -излучение, сопровождающее распад искусственных радиоактивных ядер, образовавшихся в результате поглощения нейтронов.

В активной зоне образуется ~ 60 тяжелых ($A=231 \div 257$) нуклидов, из которых наиболее активны изотопы плутония ($^{238}\text{Pu} - ^{243}\text{Pu}$), америция (^{241}Am) и кюрия (^{242}Cu , ^{244}Cu).

Собственная активность воды ($\sim 10^{-1}$ Ки/кг) определяется активацией ядер кислорода (см. приложение 17). Продукты коррозии металла дают удельную активность $\sim 10^{-4}$ Ки/кг по короткоживущим радионуклидам (^{64}Cu , ^{26}Mn , ^{187}W и др.) и $\sim 10^{-5}$ Ки/кг по долгоживущим (^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{54}Mn , ^{65}Zr , ^{58}Co , ^{60}Co). γ -Излучение долгоживущих продуктов, отложившихся на внутренних поверхностях контуров, вносит основной вклад в мощность дозы после останковки ЯР.

Поток нейтронов в единице объема активной зоны ЯР, работающего на мощности N (кВт),

$$q_n = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \nu_f N}{V} = 7,9 \cdot 10^{13} \frac{N}{V} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}},$$

где $\nu_f = 2,54$ — среднее число нейтронов, приходящихся на одно деление урана; V — объем активной зоны, см^3 ; $3,1 \cdot 10^{13}$ дел/с — количество делений, соответствующее 1 кВт.

Плотность потока нейтронов с поверхности S (см^2) сферической активной зоны, имеющей вероятность утечки нейтронов $(1-p) = (K_\infty - 1)/K_\infty$ при $K_{эф} = 1$ (1.4.3), можно оценить по формуле

$$\Phi = 3,1 \cdot 10^{13} N_{\nu_f} (K_\infty - 1) / SK_\infty \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Утечка нейтронов из активной зоны в основном обусловлена наличием в спектре деления нейтронов с высокой энергией ($E > 2$ МэВ), которые составляют около 40 % всех нейтронов (см. приложение 13). Вылетают главным образом нейтроны, образующиеся на расстоянии не более одной длины свободного пробега от границы активной зоны.

Поток γ -излучения в единице объема активной зоны при работе ЯР на мощности N (кВт)

$$q_\gamma = 3,1 \cdot 10^{13} n_\gamma \frac{N}{V} \frac{\gamma\text{-квант}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}},$$

где n_γ — число γ -квантов данной энергетической группы на одно деление (см. приложение 14).

Плотность потока частиц на расстоянии R (см) от источника, размеры которого малы по сравнению с R , излучающего n частиц в 1 с равномерно во всех направлениях,

$$\Phi = n/4\pi R^2 \text{ част}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Все вещества под действием облучения становятся радиоактивными. Количество образующихся радиоактивных ядер N_2 в единице объема за время t (с) в веществе с первоначальным числом ядер N_1 , облучаемом потоком нейтронов плотностью Φ [нейтр/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$],

$$N_2 = \Phi \Sigma_{a1} t = \Phi \sigma_{a1} N_1 t \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{A} \Phi \sigma_{a1} t \frac{\text{ядер}}{\text{г}},$$

а объемная активность этих ядер

$$A_{V_2} = \lambda_2 N_2 \text{ Бк}/\text{см}^3,$$

где $\Sigma_{a1} = \sigma_{a1}$ (см^2) N_1 (см^{-3}) — макроскопическое сечение активации облучаемого вещества с массовым числом A_1 , см^{-1} ; λ_2 — постоянная распада образующихся ядер, с^{-1} .

Так как одновременно с образованием ядер N_2 происходит их распад, то количество этих ядер в единице объема в момент времени t

$$N_2(t) = \frac{\Phi \Sigma_{a1}}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \text{ см}^{-3},$$

а их активность

$$A_{V_2}(t) = \lambda_2 N_2(t) = \Phi \Sigma_{a1} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \text{ Бк}/\text{см}^3.$$

При длительном по сравнению с периодом полураспада времени облучения ($t \gg T_2 = 0,693/\lambda_2$) активность достигает равновесного значения

$$A_{V_2} = \Phi \Sigma_{a1} \text{ Бк/см}^3.$$

Для постоянно циркулирующего теплоносителя активность, вызываемая нейтронами, достигает равновесного значения в зависимости от времени нахождения теплоносителя в ЯР t_p (с) и времени обращения его в контуре t_{ii} (с):

$$A_{V_2} = \Phi \Sigma_{a1} \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_p}}{1 - e^{-\lambda_2 t_{ii}}} \text{ Бк/см}^3.$$

Активность при смешении двух сред, имеющих соответственно объемы V_1 и V_2 (м^3) и объемные активности A_{V1} и A_{V2} (Ки/м^3), получаем из соотношения $A_V (V_1 + V_2) = A_{V1} V_1 + A_{V2} V_2$ равной

$$A_V = (A_{V1} V_1 + A_{V2} V_2) / (V_1 + V_2) \text{ Ки/м}^3. \quad (4.4.1)$$

При сообщении объемов двух сред с различной активностью по изменению удельной активности одной среды можно оценить скорость перемешивания сред (например, течь теплоносителя из одного контура в другой). Исходя из соотношения $A_V (V_2 + \Delta V) = A_{V1} \Delta V + A_{V2} V_2$, получаем

$$G = \frac{\Delta V}{t} = \frac{V_2}{t} \frac{A_{V2} - A_{V1}}{A_{V1} - A_{V2}} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.4.2)$$

где A_{V1} и A_{V2} (Ки/м^3) — объемные активности (1.2.8) по данному нуклиду первой и второй сред, имеющих V_1 и V_2 (м^3); A_V — объемная активность второй среды через время t (ч), за которое в нее поступит активное вещество первой среды в объеме ΔV ; A — см. (1.2.6).

В дозиметрии ионизирующих излучений используются следующие понятия, определения и единицы измерения.

Поглощенная доза излучения D (доза излучения) — это отнесенная к единице массы облучаемого вещества поглощенная энергия ионизирующего излучения. Единицей поглощенной дозы является единица *джоуль на килограмм* (Дж/кг), получившая в системе СИ название *грей* (Гр). Значение поглощенной дозы зависит от вида излучения, его энергетического состава, состава облучаемого вещества и условий облучения. Поглощенная доза накапливается в поле излучения. Скорость накопления (приращения) дозы называется *мощностью поглощенной дозы* излучения (мощностью дозы):

$$P = dD/dt.$$

Единица измерения мощности дозы в СИ — *грей в секунду* (Гр/с).

Доза, полученная за время t , равна $D = \int_0^t P dt$. Мощность дозы уменьшается во времени от значения P_0 ($t=0$) по экспоненциальному закону с периодом полураспада данного нуклида: $P(t) =$

$= P_0 e^{-\lambda t}$. Доза, полученная за время t ,

$$D = P_0 \int_0^t e^{-\lambda t} dt = (P_0/\lambda)(1 - e^{-\lambda t}) = (P_0/\lambda)(1 - 2^{-t/T}).$$

Если рассматриваемый промежуток времени значительно меньше периода полураспада радиоактивного нуклида ($t \ll T$), то

$$D = P_0 t \text{ и } P = P_0 = D/t. \quad (4.4.3)$$

В практике и научной литературе широко распространена внесистемная единица поглощенной дозы *рад* (100 эрг поглощенной энергии на 1 г облученного вещества): 1 рад = 10^{-2} Гр. Соответственно внесистемная единица для мощности поглощенной дозы — *рад в секунду*: 1 рад/с = 10^{-2} Гр/с; 1 Гр/с = 100 рад/с.

Экспозиционная доза $D_{\text{экс}}$ является мерой ионизирующего действия фотонного (рентгеновского и гамма) излучения в воздухе. Единица измерения $D_{\text{экс}}$ в СИ — кулон на килограмм (Кл/кг), равна экспозиционной дозе фотонного излучения, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в сухом атмосферном воздухе массой 1 кг производит ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл.

В практике и научной литературе распространена внесистемная единица экспозиционной дозы *рентген* (Р): 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно); 1 Кл/кг = $3,88 \cdot 10^3$ Р (приближенно).

Рентген — это доза рентгеновского или γ -излучения, которая в 1 см³ воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°C производит ионизацию, соответствующую одной электростатической единице заряда каждого знака ($2,08 \times 10^9$ пар ионов). При дозе 1 Р в 1 см³ воздуха поглощается 87 эрг энергии, а в 1 г биологической ткани — 93—95 эрг. Эта единица применяется для γ -излучения с энергией фотонов не выше 3 МэВ.

Скорость приращения экспозиционной дозы в поле ионизирующего излучения характеризуют мощностью экспозиционной дозы $P_{\text{экс}}$ (кулон на килограмм в секунду):

$$P_{\text{экс}} = dD_{\text{экс}}/dt \text{ Кл/(кг} \cdot \text{с)}.$$

Примечание: Принципиальной необходимости в понятии экспозиционной дозы нет, и в ближайшие годы она выйдет из употребления. Но пока дозиметрические приборы отградуированы в рентгенах и рентгенах в секунду, решение практических задач удобно производить в этих единицах.

Для целей радиационной защиты широкое распространение получила *эквивалентная доза* $D_{\text{экр}}$, являющаяся мерой неблагоприятных последствий при облучении живого организма, живой ткани или органа излучением произвольного состава и определяемая как произведение

$$D_{\text{экр}} = KD,$$

где D — поглощенная доза излучения в живой ткани, для которой определяется $D_{\text{экр}}$; K — коэффициент качества излучения, кото-

рый показывает, во сколько раз отличаются неблагоприятные биологические последствия облучения человека различными видами излучения от последствий облучения γ -излучением. Он используется только для целей радиационной безопасности при дозах не более 25 бэр. Для рентгеновского, γ -излучения и электронов $K=1$; для тепловых нейтронов $K=3$; для быстрых нейтронов, протонов и одиночных заряженных частиц с массой покоя более 1 а. е. м. $K=10$; для α -частиц, многозарядных частиц неизвестной энергии и заряда $K=20$.

Единица измерения $D_{\text{экв}}$ — джоуль на килограмм (Дж/кг), получившая название *зиверт* (Зв): 1 Зв = 1 Дж/кг. До введения СИ единицей измерения $D_{\text{экв}}$ был *бэр* — такое количество энергии, поглощенной в 1 г ткани, при котором наблюдается тот же биологический эффект, что и при поглощенной дозе излучения в 1 рад рентгеновского или γ -излучения.

Мощность эквивалентной дозы $P_{\text{экв}} = dD_{\text{экв}}/dt$, Зв/с. В табл. 4.4.1 даны соотношения между единицами измерения активности, дозы и мощности дозы в СИ и внесистемными единицами.

Таблица 4.4.1

Измеряемая величина	Единица СИ	Внесистемная единица	Связь между единицами
Активность A	Беккерель (Бк)	Кюри (Ки)	1 Бк = 1 расп/с = $2,703 \times 10^{-11}$ Ки 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с = $3,7 \times 10^{10}$ Бк
Поглощенная доза D	Грей (Гр)	Рад (рад)	1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад 1 рад = 100 эрг/г = 10^{-2} Дж/кг = 10^{-2} Гр
Мощность поглощенной дозы P	Грей в секунду (Гр/с)	Рад в секунду (рад/с)	1 Гр/с = 1 Дж/(кг·с) = 100 рад/с 1 рад/с = 10^{-2} Дж/(кг·с) = 10^{-2} Гр/с
Эквивалентная доза (доза), $D_{\text{экв}}$	Зиверт (Зв)	Бэр (бэр)	1 Зв = (1/К) Гр = (1/К) \times (Дж/кг) = (100/К) рад = 100 бэр 1 бэр = (1/К) рад = $(10^{-2}/К)$ Дж/кг = $(10^{-2})/К$ Гр = 10^{-2} Зв
Мощность эквивалентной дозы $P_{\text{экв}}$	Зиверт в секунду (Зв/с)	Бэр в секунду (бэр/с)	1 Зв/с = 100 бэр/с 1 бэр/с = 10^{-2} Зв/с
Экспозиционная доза $D_{\text{эксп}}$	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Кл/кг = $3,88 \cdot 10^3$ Р 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы $P_{\text{эксп}}$	Кулон на килограмм в секунду Кл/(кг·с)	Рентген в секунду (Р/с)	1 Кл/(кг·с) = $3,88 \cdot 10^3$ Р/с 1 Р/с = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/(кг·с)

В СССР условия облучения человека на предприятиях и в учреждениях, где возможны производство, обработка, применение, переработка и т. п. естественных и искусственных радиоактивных

веществ, регламентированы «Нормами радиационной безопасности НРБ—76», устанавливающими систему дозовых пределов и правила их применения. Они предусматривают следующие основные принципы радиационной безопасности: не превышение установленного основного дозового предела; исключение всякого необоснованного облучения; снижение дозы излучения до возможного низкого уровня.

Для лиц, постоянно или временно работающих непосредственно с источниками ионизирующих излучений, основными дозовыми пределами являются:

а) *предельно допустимая доза* (ПДД) — наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которая при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами;

б) *предельно допустимое годовое поступление* (ПДП) — такое поступление радиоактивных веществ в организм в течение года, которое за 50 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную 1 ПДД. Отличия для различных категорий лиц и разных органов человека рассмотрены в НРБ—76.

Для лиц, подвергающихся профессиональному внешнему облучению, установлена ПДД всех видов излучения 5 бэр в год. Для распределения дозовой нагрузки равномерно в течение года желательно, чтобы ПДД за квартал составляла не более 1,25 бэр, за месяц — 0,4 бэр (400 мбэр), за неделю — 0,1 бэр (100 мбэр).

Для оценки биологического воздействия γ -излучения ($E_\gamma < < 3$ МэВ) на живой организм используют ПДД, равную 100 мР \approx 100 мбэр в неделю и допустимую мощность дозы (ДМД), равную 2,8 мР/ч.

Внутреннее облучение зависит от поступления радионуклидов в организм через органы дыхания и пищеварения. Связь между *среднегодовой допустимой концентрацией* (СДК) радиоактивных нуклидов в воздухе и ПДП определяется следующим соотношением:

$$\text{ПДП (мкКи/год)} = 10^{-6} \text{ СДК (Ки/л)} \cdot Q \text{ (л/год)}, \quad (4.4.4)$$

где $Q = 2,5 \cdot 10^6$ л/год — годовой объем воздуха, потребляемого профессиональным работником. СДК для различных радионуклидов даны в [11].

Дозовые пределы, установленные НРБ—76, не учитывают дозу, которую получает каждый человек в естественных условиях жизни. Для населения СССР суммарная средняя индивидуальная эффективная эквивалентная доза в год приближается к 400 мбэр. Вклад в эту дозу дают: 1) \sim 100 мбэр от естественного радиационного фона облучения, состоящего из космического нейтронного и γ -излучения (\sim 30 мбэр), γ -излучения воздуха и почвы (\sim 32 мбэр) и многочисленных источников внутреннего облучения от пищи, воды и воздуха (\sim 37 мбэр); 2) \sim 155 мбэр от техногенно повышенного фона строительных материалов, применяемых

в домостроении, минеральных удобрений и радиоактивных выбросов угольных ТЭС; 3) $\sim 2,5$ мбэр от глобальных выпадений, обусловленных испытаниями ядерного оружия; 4) ~ 150 мбэр от облучения в медицинских целях. Вклад от ядерной энергетики в облучение населения совершенно незначителен [$\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мбэр на 3 Гвт (эл)] и практически необнаружим. Доза, получаемая населением вследствие работы угольных ТЭС, в несколько раз выше, чем от АЭС такой же мощности.

Мощность дозы $P_{\text{эКВ}}$ (бэр/ч) и количество часов t пребывания за неделю в данной зоне активности должны удовлетворять требованию, чтобы полученная доза не превышала $100 \text{ мбэр} = 0,1 \text{ бэр}$:

$$P_{\text{эКВ}} t \leq \text{ПДД} = 0,1 \text{ бэр} = 100 \text{ мбэр}.$$

Из этого соотношения и на основании его можно определить:

а) предельно допустимую мощность дозы (ДМД) при времени пребывания t часов в неделю в зоне активности

$$\text{ДМД} = P_{\text{доп}} = 100/t \text{ мбэр/ч}; \quad (4.4.5)$$

б) предельно допустимое время пребывания за неделю в зоне активности с известной мощностью дозы P (мбэр/ч)

$$t_{\text{доп}} = 100/P \text{ ч}.$$

Радиационное воздействие радионуклидов благородных газов (аргона, криптона, ксенона), присутствующих в воздухе помещения, определяется не внутренним облучением, а внешним β - и γ -излучением. В зависимости от объема помещения, где проводятся работы, установлены допустимые концентрации (ДК) этих газов.

Внешнее облучение потоком частиц (фотонов) регламентируется максимально допустимым флюенсом (интегральным потоком) частиц (фотонов) $F_{\text{доп}}$, создающим максимальную эквивалентную ПДД $D_{\text{эКВ}} = 5 \text{ бэр/год}$. В СССР для большей части персонала установлена 36-часовая рабочая неделя и 4—6-недельный отпуск, т. е. $1700 \text{ рабочих часов} = 10^5 \text{ мин} = 6,12 \cdot 10^6 \text{ с}$. Допустимые плотности потоков (ДПП) при t рабочих часов

$$\text{ДПП} = F_{\text{доп}} / (\text{нейтр/см}^2) / 3600t \text{ (ч) част (фотон)/(см}^2 \cdot \text{с)}. \quad (4.4.6)$$

В табл. 4.4.2 приведены дозовые характеристики для некоторых видов излучения: максимально допустимый флюенс $F_{\text{доп}}$, ДПП (2000 ч) и ДПП (1700 ч). Для любого времени t работы в год ДПП (t) можно пересчитать по формуле

$$\text{ДПП}(t) = \text{ДПП}(2000) \cdot 2000/t = \text{ДПП}(1700) \cdot 1700/t.$$

В реальных условиях работы на ядерно-технических установках действуют смешанные потоки излучений и концентрации радионуклидов. Для смеси радионуклидов с известным процентным составом ДК последние в воздухе или воде рассчитывают по формуле

$$\text{ДК} = 1 / \sum_j p_j / \text{ДК}_j \text{ Бк/м}^3 \text{ (Ки/л)},$$

Таблица 4.4.2

Вид излучения	Энергия излучения, МэВ	$F_{\text{доп}}$, част/см ²	ДПП, част/(см ² ·с)	
			$t_{\text{раб}}=2000$ ч/год	$t_{\text{раб}}=1700$ ч/год
γ-излучение	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^9$	280	330
	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	22 000	26 000
	1	$1,0 \cdot 10^{10}$	1400	1650
	5	$3,1 \cdot 10^9$	430	510
	100	$2,5 \cdot 10^8$	35	41
Нейтроны	Тепловые	$5,0 \cdot 10^9$	700	820
	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^9$	430	510
	1	$1,3 \cdot 10^9$	19	25
Протоны	2	$3,0 \cdot 10^4$	0,004	0,005

где DK_j — допустимая концентрация j -го радионуклида, Бк/м³ (Ки/л); p_j — доля активности смеси, обусловленная j -м нуклидом, $\sum_j p_j = 1$.

При неизвестном составе смеси радионуклидов, поступающих с воздухом через органы дыхания, $DK = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³ = $4 \cdot 10^{-16}$ Ки/л. ДПП для немонотонических источников при внешнем облучении можно рассчитать по аналогичной формуле

$$\text{ДПП} = 1 / \sum_j p_j / \text{ДПП}_j \text{ част}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}), \quad (4.4.7)$$

где ДПП_j — допустимая плотность потока для частиц j -й энергии; p_j — доля испускаемых частиц j -й энергии в общем потоке; $\sum_j p_j = 1$.

При комбинированном воздействии облучения эквивалентными дозами $D_{\text{экв}}$ i -го вида внешнего облучения и внутреннем поступлении радионуклидов с концентрацией K_j сумма доз должна быть не больше одной:

$$\sum_i (D_{\text{экв}} / \text{ПДД}) + \sum_j (K_j / DK_j) = n \leq 1, \quad (4.4.8)$$

где ПДД — предельно допустимая годовая доза внешнего облучения; DK_j — допустимая концентрация j -го радионуклида в воде или воздухе.

Если сумма доз $n > 1$, то допустимое время $t_{\text{доп}}$ пребывания в поле излучения при $t_{\text{нед}}$ -часовой рабочей неделе должно быть

$$t_{\text{доп}} = t_{\text{нед}} / n \text{ ч.} \quad (4.4.9)$$

Мощность дозы, создаваемой точечным источником γ-излучения активностью A (мКи), на расстоянии R (см)

$$P = K_\gamma A / R^2 \text{ Р/ч},$$

где K_γ — гамма-постоянная рассматриваемого нуклида, численно равная мощности дозы (Р/ч), создаваемой точечным источником активностью 1 мКи на расстоянии 1 см. Например, для ²²⁶Ra $K_\gamma = 8,4$; для ⁶⁰Co $K_\gamma = 13,6$.

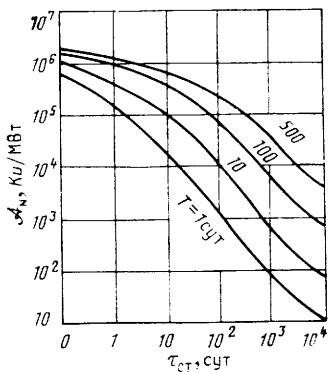


Рис. 4.4.1 Зависимость активности выгруженного из ЯР топлива от времени работы ЯР и времени после его остановки

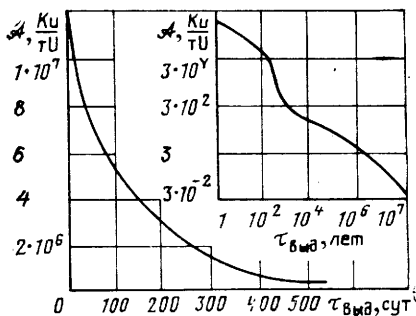


Рис. 4.4.2. Зависимость активности топлива от времени выдержки после выгрузки из ВВР

Мощность дозы от обработанного топлива, имеющего активность A (Ки), можно приблизительно оценить по формуле [10]

$$P \approx 6,5 E A R^2 \text{ Р/ч,}$$

где E — энергия излучения, МэВ. Если предположить, что активная зона не имеет защиты и γ -кванты с $E < 1$ МэВ поглощаются в покрытии твэлов, то минимальное значение мощности дозы составит

$$P_{\text{мин}} \approx 6,5 A / R^2 \text{ Р/ч.}$$

Используя зависимость активности облученного топлива на единицу мощности A_N (Ки/МВт) от времени работы ЯР T (сут) и времени стоянки $t_{\text{ст}}$ (сут) (рис. 4.4.1 [10]), по последней формуле можно оценить мощность дозы излучения на различных расстояниях от выгруженной незащищенной активной зоны.

Доза облучения, полученная при ремонте радиоактивного оборудования за время t (ч), может быть оценена с большей или меньшей точностью соответственно по формулам

$$D = K_V \frac{E A}{R^2} t \text{ Р; } D_{\text{мин}} \approx 6,5 \frac{A}{R^2} t \text{ Р.}$$

На рис. 4.4.2 дана примерная зависимость активности слабообогащенного топлива с глубиной выгорания $\sim 30\,000 \text{ МВт} \times \text{сут/т U}$ от времени выдержки после выгрузки из ВВР.

Активность, возникающая в морской воде за кормой движущегося атомного судна [20],

$$A \approx 0,27 \cdot 10^{-10} L_{\text{отс}} \frac{I_n}{N} \frac{N}{v} \sum_i \frac{\Sigma_a^i}{\Sigma} \lambda_i \text{ Ки,}$$

где Σ_a^i — макроскопическое сечение активации i -го нуклида, содержащегося в морской воде (см. приложение 18), см⁻¹; Σ — полное макроскопическое сечение поглощения нейтронов забортной водой, см⁻¹; I_n — поток нейтронов на корпусе судна, нейтр/с; $L_{отс}$ — длина излучающего отсека, м; λ_i — постоянная распада i -го нуклида, с⁻¹; N — мощность ЯР; v — скорость судна, м/с.

Величина N/v представляет собой расход энергозапаса ЯР на единицу пройденного пути. Эта величина имеет минимум при экономической скорости хода судна (см. рис. 3.7.3). Следовательно, при движении с экономической скоростью активация забортной воды наименьшая.

Вследствие перемешивания воды в кильватерной струе можно считать, что радиоактивный след за кормой по всему сечению кильватерной струи равномерный. В таком случае объемная активность следа

$$A_v = \sum_i A_i / V_c \text{ Ки/м}^3,$$

где $V_c = L_{отс} S_c$ — объем кильватерной струи (м³), имеющей площадь поперечного сечения S_c (м²).

Наибольшая активация морской воды наблюдается при стоянке судна с работающим ЯР. В случае длительной стоянки наступает равновесная активность

$$A_0 \approx 0,27 \cdot 10^{-10} \Phi \sum_i (\Sigma_a^i / \Sigma) \text{ Ки.}$$

Задачи с решениями

4.4.1. 0,5 м³ воды с $A_{v1} = 10^{-4}$ Ки/л смешали с 50 м³ воды ($A_{v2} = 10^{-8}$ Ки/л). Чему станет равна объемная активность воды?

Решение. Согласно (4.4.1) $A_v = (10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \times 10^3) / (50,5 \cdot 10^3) = 10^{-6}$ Ки/л = $3,7 \cdot 10^4$ Бк/л.

4.4.2. Активность теплоносителя первого контура ЯР $A_{v1} = 10^{-3}$ Ки/л. Оценить течь (м³/ч) воды первого контура во второй через ПГ, если $A_{v,ПК}$ при $V_{ПК} = 10$ м³ в течение 30 мин увеличилась с 10^{-5} до 10^{-4} Ки/л.

Решение. Согласно (4.4.2)

$$G_{Г \rightarrow ПК} = \frac{10}{0,5} \frac{10^{-4} - 10^{-5}}{10^{-3} - 10^{-4}} = 2 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

4.4.3. Сколько рентген составляет доза γ -излучения 1 рад для тела человека?

Решение. Дозе в 1 рад соответствует 100 эрг поглощенной энергии на 1 г биологической ткани, а дозе в 1 Р — 95 эрг/г. Следовательно, дозе γ -излучения в 1 рад соответствует $100/95 = 1,05 \approx 1$ Р $\approx 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг ≈ 1 бэр.

4.4.4. Доза, поглощенная в биологической ткани при облучении ее тепловыми нейтронами, составляет 0,5 рад. Какой дозе γ -облучения это соответствует по биологическому воздействию?

Решение. Для тепловых нейтронов $K=3$. Следовательно,

поглощенной дозе тепловых нейтронов 0,5 рад соответствует $D_{\text{экв}} = KD = 3 \cdot 0,5 \text{ рад} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Гр} \approx 1,5 \text{ бэр}$ γ -излучения.

4.4.5. Определить дозу облучения за 4 ч работы при мощности дозы 0,5 мкР/с.

Решение. Согласно (4.4.3) $D = Pt = 0,5 \cdot 4 \cdot 3600 = 7,2 \text{ мР} \approx 7,2 \text{ мбэр}$.

4.4.6. Какую в среднем дозу облучения получит человек за 70 лет жизни, не имея по работе непосредственного отношения к ионизирующему излучению?

Решение. В соответствии со среднегодовой эффективной эквивалентной дозой для территории СССР, равной $\sim 400 \text{ мбэр}$, находим $D_{70} = 400 \cdot 70 = 28 \text{ бэр}$ (т. е. 5,6 годовой ПДД), при этом от естественного фона $\sim 100 \cdot 70 = 7 \text{ бэр}$, от техногенного $\sim 155 \times 70 \approx 11 \text{ бэр}$, от глобальных выпадений — менее 0,5 бэр, от медицинских исследований $\sim 10,5 \text{ бэр}$.

4.4.7. Определить предельно допустимую мощность дозы и плотность γ -излучения ($E_{\gamma} = 5 \text{ кэВ}$) при работе 40 и 36 ч в неделю.

Решение. Согласно (4.4.5), чтобы доза за неделю не превышала предельно допустимой, равной 100 мР, предельно допустимая мощность дозы при 40-часовой рабочей неделе должна быть $P_{\text{доп}} \leq 100/40 = 2,5 \text{ мР/ч} = 0,7 \text{ мкР/с}$, а при 36-часовой рабочей неделе $P_{\text{доп}} = 100/36 = 2,8 \text{ мР/ч} = 0,8 \text{ мкР/с}$. Чтобы определить ДПП, воспользуемся табл. 4.4.2, где при 36-часовой рабочей неделе для потока γ -излучения с энергией 5 кэВ ДПП = 330 γ -квантов/(см²·с).

4.4.8. Плотность потока нейтронов с энергией 0,05 МэВ равна $2 \cdot 10^4 \text{ нейтр/(см}^2 \cdot \text{с)}$. Какую дозу получит рабочий за 36-часовую рабочую неделю? Сколько часов в неделю можно работать в таких условиях, чтобы не превысить недельную ПДД?

Решение. Если взять 50 рабочих недель в году, то максимально допустимый недельный флюенс равен $F_{\text{доп}}^{\text{нед}} = 1,6 \cdot 10^{11}/50 = 3,2 \cdot 10^9 \text{ нейтр/см}^2$, где $1,6 \cdot 10^{11} \text{ нейтр/см}^2$ — годовой флюенс для нейтронов данной энергии (см. табл. 4.4.2). Для 36-часовой рабочей недели согласно (4.4.6) ДПП = $3,2 \cdot 10^9 / (36 \cdot 3600) = 2,47 \times 10^3 \text{ нейтр/(см}^2 \cdot \text{с)}$. Это больше потока в данных условиях в 1,23 раза, поэтому работать можно в течение $36 \cdot 1,23 \approx 44 \text{ ч}$. Тот же результат можно получить из условия $\Phi t_{\text{доп}} = F_{\text{доп}}$: $t_{\text{доп}} = 3,2 \cdot 10^9 / (2 \cdot 10^4 \cdot 3600) \approx 44 \text{ ч}$.

4.4.9. Для выполнения операции в зоне повышенной γ -активности необходимо 5 мин. При какой мощности дозы можно выполнить эту операцию, чтобы не превысить суточную дозу исходя из шестидневной рабочей недели?

Решение. Исходя из недельной дозы 100 мР (100 мбэр) определяем дозу за один день шестидневной рабочей недели: $100/6 = 16,7 \text{ мР}$. Следовательно, чтобы за 5 мин не превысить суточную дозу, работу можно выполнять только при мощности дозы (4.4.3)

$$P \leq 16,7/5 = 3,34 \text{ мР/мин} = 200 \text{ мР/ч} = 56 \text{ мкР/с} \approx 3,34 \text{ мбэр/мин} = 200 \text{ мбэр/ч}.$$

Задачу можно решить исходя из ДПП (см. табл. 4.4.2), но для этого надо знать энергетический спектр γ -излучения.

4.4.10. Мощность дозы γ -излучения составляет 6 мР/ч. В течение какого времени можно работать в этой зоне, чтобы не превысить суточную ПДД при пятидневной рабочей неделе?

Решение. Исходя из недельной ПДД γ -облучения, равной 100 мР, определяем суточную дозу: $100/5=20$ мР. При мощности дозы 6 мР/ч на рабочем месте допустимое время работы в сутки (4.4.3) $t=D/P=20/6\approx 3,3$ ч.

4.4.11. Для ликвидации неисправности в зоне повышенного β -излучения необходимо 30 мин. При какой плотности потока излучения это может выполнить один человек, чтобы полученная им доза не превысила предельно допустимую за сутки, при 36-часовой шестидневной рабочей неделе?

Решение. Для β -излучения с граничной энергией спектра $E_{\beta} < 1$ МэВ максимальный флюенс, создающий эквивалентную дозу 30 бэр (допустимую при облучении кожи [11]), равен $4,8 \cdot 10^8$ част/см². ДПП при 1700 рабочих часах в году (36-часовая неделя и 4—6-недельный отпуск, 46—48 рабочих недель) равна $4,8 \cdot 10^8 / (1,7 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3) = 78$ β -част/(см²·с); за 1 сут (6 рабочих часов) она обуславливает флюенс $78 \cdot 6 \cdot 3600 \approx 1,7 \cdot 10^6$ β -част/см². Чтобы не превысить его за 0,5 ч = 1800 с, плотность потока должна быть не более $1,7 \cdot 10^6 / (1,8 \cdot 10^3) = 950$ β -част/(см²·с).

4.4.12. В зоне выполнения работы плотность потока промежуточных нейтронов ($E_n \approx 5$ кэВ) равна 10^3 нейтр/(см²·с). В течение какого времени можно работать в этой зоне, чтобы не превысить суточную дозу облучения при шестидневной рабочей неделе?

Решение. Исходя из максимального флюенса нейтронов данной энергии, $F = 3,1 \cdot 10^9$ нейтр/см² (см. табл. 4.4.2), определяем суточный флюенс при 1700 рабочих часах в году:

$$F_{\text{доп}} = 3,1 \cdot 10^9 \cdot 6 / 1,7 \cdot 10^3 \approx 10^7 \text{ нейтр/см}^2.$$

При $\Phi = 10^3$ нейтр/(см²·с) допустимое время работы в течение рабочего дня равно, таким образом,

$$t_{\text{доп}} = F_{\text{доп}} / \Phi = 10^7 / (10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3) \approx 2,8 \text{ ч.}$$

4.4.13. В смешанном спектре плотность потока нейтронов составляет: тепловых — 400 нейтр/(см²·с), промежуточных (5 кэВ) — 150 нейтр/(см²·с), быстрых (1 МэВ) — 10 нейтр/(см²·с). Можно ли работать в данных условиях 36 ч в неделю? Сколько часов в неделю можно работать, чтобы полученная доза не превышала предельно допустимую? Определить ДПП спектра для 36-часовой рабочей недели.

Решение. Согласно табл. 4.4.2 ДПП для этих групп нейтронов соответственно равна 820, 510 и 25 нейтр/(см²·с). Количество ДПП излучения равно (4.4.8)

$$n = 400/820 + 150/510 + 10/25 = 1,18 > 1.$$

Это значит, что работать в таких условиях 36 ч в неделю нельзя.

Допустимое время работы в данном случае согласно (4.4.9) равно $t_{\text{доп}} = t/n = 36/1,18 = 30,5$ ч.

ДПП при данном спектре для 36-часовой рабочей недели согласно (4.4.7) и данным табл. 4.4.2 равна

$$\text{ДПП} = 1/(0,714/820 + 0,268/510 + 0,018/25) = 470 \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

где $p_{\text{т}} = \Phi_{\text{т}}/\Phi_{\Sigma} = 400/560 = 0,714$; $p_{\text{пр}} = 150/560 = 0,268$; $p_{\text{б}} = 10/560 = 0,018$; $\Phi_{\Sigma} = (4 + 1,5 + 0,1) \cdot 10^2 = 560$ нейтр/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

4.4.14. Определить предельно допустимое годовое поступление (ПДП) при работе в помещении с неизвестным составом радионуклидов.

Решение. Согласно (4.4.4) при $Q = 2,5/10^6$ л/год и $\text{СДК} = 4 \cdot 10^{-16}$ Ки/л [11]

$$\text{ПДП} = 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-16} \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 10^{-15} \text{ Ки/год}.$$

4.4.15. Чему равна предельно допустимая мощность дозы (ДМД) внешнего облучения для 36-часовой рабочей недели?

Решение. Согласно (4.4.5) $\text{ДМД} = 100/36 = 2,8$ мБэр/ч.

4.4.16. Оценить минимальную мощность дозы γ -излучения на расстоянии 10 и 100 м от активной зоны, выгруженной из ЯР, работавшего в течение $T = 500$ сут на мощности $N = 100$ МВт и стоявшего до перегрузки $\tau_{\text{ст}} = 10$ сут.

Решение. Из графика рис. 4.4.1 находим удельную активность топлива для $T = 500$ сут и $\tau_{\text{ст}} = 10$ сут равной $6/10^5$ Ки/МВт. Таким образом, для всей зоны $\mathcal{A} = 6 \cdot 10^5 \cdot 100 = 6 \cdot 10^7$ Ки. Согласно (4.4.10)

$$P_{\text{мин}} (10 \text{ м}) \approx 6,5 \cdot 6 \cdot 10^{10}/10^5 \approx 10^5 \text{ Р/ч};$$

$$P_{\text{мин}} (100 \text{ м}) \approx 4 \cdot 10^3 \text{ Р/ч}.$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем отличается бэр от рада? В каком случае 1 бэр = 1 рад?
2. Как по нарастанию активности воды второго контура определить скорость аварийного поступления радиоактивной воды первого контура во второй?
3. От чего зависит наведенная активность материалов, находящихся в зоне облучения?
4. От чего зависит допустимое время пребывания человека в радиационно-опасной зоне?
5. Чем определяется активность выгружаемых твэлов при перегрузке активной зоны?
6. Какова будет активность воздуха, если чистый зал объемом 10^4 м^3 сообщить с помещением объемом 100 м^3 с объемной активностью воздуха $5 \cdot 10^{-11}$ Ки/л = 1,85 Бк/л?
7. Ро- и Ра-источники нейтронов имеют активность 1 Ки каждый. Определить Φ нейтронов и γ -квантов на расстоянии 1 м от источника.
8. Оценить средний удельный поток нейтронов деления и γ -излучения в ЯР с активной зоной объемом 3 м^3 , работающем на мощности 100 МВт.

9. Мощность дозы γ -излучения в месте проведения работ $P_\gamma = 2,0$ мР/ч. Какую дозу получит рабочий за 36-часовую рабочую неделю? Сколько часов в день можно работать в таких условиях при 5-дневной рабочей неделе?

10. Сколько человек поочередно в течение рабочего дня должны выполнять работу в зоне с $P_\gamma = 10$ мР/ч, чтобы каждый из них не получил больше ПДД исходя из 36-часовой рабочей недели?

11. Активная зона ЯР выгружена после работы в течение 500 сут на мощности 70 МВт. Оценить, на каком расстоянии от незащищенной активной зоны через 10 сут после выгрузки $P_\gamma \approx 600$ Р/ч и в течение какого времени доза в 600 Р будет получена на расстоянии 100 и 30 м?

ГЛАВА 5

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА

§ 5.1. НЕОБХОДИМОСТЬ И ОБЪЕМ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Безопасный пуск и последующая эксплуатация ЯР возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик со строго определенной точностью, удовлетворяющей требованиям ЯБР и ТТН активной зоны. Расчет ЯР не позволяет пока получить необходимую точность для безопасного первого пуска и точно предсказать изменение характеристик в процессе эксплуатации. Поэтому при загрузке топлива в ЯР (при физическом пуске) и периодически в течение кампании определяют и уточняют основные нейтронно-физические и теплотехнические характеристики активной зоны. Это делают высококвалифицированные специалисты-физики по разработанным методикам строго в соответствии с утвержденными инструкциями. Инженеры управления (операторы) ЯЭУ непосредственно участвуют в измерениях и должны знать, чем вызвана необходимость таких измерений, как они проводятся, к чему может привести погрешность в определении характеристик и какие из них требуют уточнения в течение кампании в первую очередь.

Физический пуск реактора — это достижение критического состояния в период загрузки штатных ТК и выполнение необходимых измерений для определения и уточнения основных характеристик активной зоны и органов регулирования.

При физическом пуске определяют: 1) критическое число ТК при отсутствии и наличии поглотителей в активной зоне; 2) физический вес, интегральную и дифференциальную характеристики органов регулирования, интерференцию стержней; 3) критическое положение органов компенсации $\rho_{зап}$; 4) коэффициенты реактивности различных компонентов активной зоны; 5) $\rho_{зап}$ реактора; 6) подкритичность ЯР при полностью введенных поглотителях нейтронов.

Определение этих характеристик производится на мощности, при которой разогревом теплоносителя за счет энергии деления ядер можно пренебречь. Этот этап называется *холодным физическим пуском*.

Для измерения температурного и мощностного эффектов, а также эффективности органов регулирования в горячем состоянии проводится разогрев ЯР (*горячий физический пуск*). Отличие в скорости разогрева ЯР от постороннего источника и собственным теплом дает возможность провести оценочную калибровку приборов измерения мощности по нейтронному потоку.

Следующий этап — *энергетический пуск* — вывод ЯР на уровень мощности, достаточный для пуска турбины и проведения необходимых экспериментов при поэтапном подъеме мощности. В процессе первого энергетического пуска определяют: 1) распределение Φ в активной зоне; 2) тепловую мощность по параметрам первого и второго контуров и соответствие ее нейтронной мощности; 3) отравление ЯР; 4) мощность излучений за пределами биологической защиты и другие характеристики в зависимости от типа ЯР и в соответствии с программой [16, 21].

В течение кампании необходимо уточнять изменяющиеся в процессе работы характеристики: 1) эффективность органов регулирования; 2) ход кривой энерговыработки и оставшийся энергозапас; 3) ТЭР; 4) отравление реактора Хе; 5) распределение энерговыделения в активной зоне и другие в зависимости от типа ЯР.

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем обусловлена необходимость проведения НФИ?
2. Что такое физический и энергетический пуски ЯР?
3. Какие НФИ проводятся при физическом пуске и какие в течение кампании?
4. Зачем нужны холодный и горячий физические пуски ЯР?
5. Какие нейтронно-физические характеристики ЯР изменяются в течение кампании и почему?

§ 5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ

Критическая загрузка ЯР — это минимальное количество делящегося нуклида, которое при выбранной геометрии расположения его в активной зоне обеспечивает протекание ЦР на стационарном уровне ($K_{эф} = 1$, $\rho = 0$). Критическая загрузка зависит от формы, размеров и состава компонентов активной зоны, композиции топлива, типа замедлителя, конструктивных материалов и др.

Единственный способ контроля приближения $K_{эф}$ к единице — измерение подкритического потока. Соотношение (3.2.5), записанное в виде

$$1/N_{\text{под}} = (1 - K_{эф})/N_{\text{ист}} = \delta K_{эф}/N_{\text{ист}} = f(n_{\text{ТК}})$$

и представленное в виде графической зависимости обратной величины подкритического потока (в делениях N шкалы прибора)

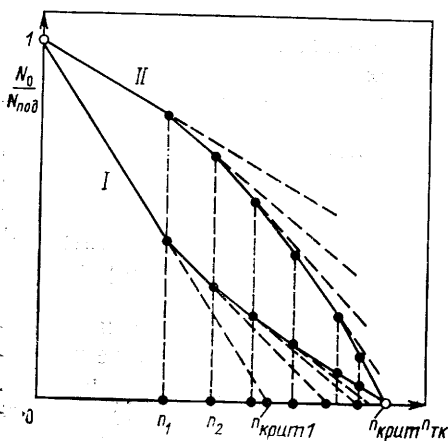


Рис. 5.2.1. Пусковые кривые (кривые обратного счета)

от числа загружаемых ТК ($n_{ТК}$), позволяет безопасно с необходимой точностью определить критическую загрузку раньше, чем ЯР станет критическим. Методика определения критической загрузки (вариант) может быть следующей [21].

В ЯР, заполненный водой-замедлителем, вводят источник нейтронов мощностью $\sim 10^6$ нейтр/с и детектор нейтронов.

Взаимное расположение их должно быть таким, чтобы при отсутствии топлива детектор регистрировал минимальный поток нейтронов от источника ($N_0 = N_{ист}$), а при загрузке топлива рождающиеся от деления урана нейтроны попадали на детектор. Далее загружают первую партию ТК в количестве n_1 шт., не превышающем $1/3$ расчетного критического числа ТК, измеряют плотность потока нейтронов N_1 (в делениях шкалы прибора) и строят пусковую кривую — кривую обратного счета (рис. 5.2.1). По двум точкам с координатами $(0, N_0/N_{ист} = 1)$ и $(n_1, N_0/N_1 < 1)$ прямую экстраполируют до пересечения ее с осью абсцисс в точке с координатами $(n_{крит1}, 0)$, которой соответствует первое приближенное значение критической загрузки ($N_0/N_{крит1} = 0, K_{эф} = 1$).

В следующей партии ТК берут не более половины оставшихся до критической загрузки по полученной первой оценке: $0,5 (n_{крит1} - n_1)$, в каждой последующей порции — не более четверти оставшихся исходя из последней оценки: $0,25 (n_{крит i} - \sum_i n_i)$.

При достижении коэффициента умножения $M = 1/(1 - K_{эф}) = 20 \div 30$, т. е. $K_{эф} = 0,96 \div 0,97$, загрузку ведут по одному каналу, причем скорость его погружения должна удовлетворять требованию допустимой скорости введения положительной реактивности (4.2.9). Чем ближе ЯР к критическому состоянию, тем точнее экстраполяция соответствует истинному значению критической загрузки.

В зависимости от взаимного расположения детектора, источника нейтронов и ТК кривая обратного счета может иметь вогнутый (см. рис. 5.2.1, кривая I) или выпуклый (кривая II) вид. В первом случае постоянная составляющая потока нейтронов от источника мала по сравнению с потоком, обусловленным размножением нейтронов. Во втором случае постоянная составляющая от источника велика. Экстраполяция по выпуклой кривой, особенно на начальном участке, дает критическое число ТК, существенно превышающее истинное. Поэтому необходимо так располагать источник

и детектор, чтобы при отсутствии топлива последний давал минимальные показания (кривая I).

Примечание. Если исходя из конструкции ЯР место установки источника нейтронов удалено от активной зоны, то требуются весьма мощные источники с интенсивностью $\sim 10^{11}$ нейтр/с, которую могут обеспечить только активизируемые, например сурьмяно-бериллиевые, источники нейтронов.

При приближении к критическому состоянию, когда эффективность каждого следующего ТК $\rho_{\text{ТК}}$ практически не изменяется, критическое число ТК можно оценить аналитически, используя зависимость для подкритического потока (3.2.5), на основании которой можно записать после i -й и $(i+1)$ -й загрузки

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{N_{\text{ист}}}{\rho_{\text{под}, i+1}} \bigg/ \frac{N_{\text{ист}}}{\rho_{\text{под}, i}} = \frac{\rho_{\text{под}, i+1} + (n_{\text{ТК}, i+1} - n_{\text{ТК}, i}) \rho_{\text{ТК}}}{\rho_{\text{под}, i+1}}$$

Отсюда оставшаяся подкритичность после очередной догрузки $\Delta n_{\text{ТК}} = (n_{\text{ТК}, i+1} - n_{\text{ТК}, i})$ шт. ТК

$$\rho_{\text{под}, i+1} = \rho_{\text{ТК}} \Delta n_{\text{ТК}} N_i / (N_{i+1} - N_i),$$

а критическое число ТК

$$n_{\text{крит}} \approx n_{\text{ТК}, i+1} + \rho_{\text{под}, i+1} / \rho_{\text{ТК}} = n_{\text{ТК}, i+1} + \Delta n_{\text{ТК}} N_i / (N_{i+1} - N_i). \quad (5.2.1)$$

Если догрузка ведется по одному ТК, что обычно и делается при приближении к критическому состоянию, то $\Delta n = 1$ и

$$n_{\text{крит}} \approx n_{\text{ТК}, i+1} + N_i / (N_{i+1} - N_i).$$

После набора критической массы последующая загрузка ТК проводится только после опускания в активную зону на необходимую глубину поглотителей нейтронов (см § 5.4).

Рассмотренный метод используется также для определения в подкритическом состоянии ЯР критического положения органов компенсации и регулирования, для чего строят кривую обратного счета в зависимости от положения поглотителя в активной зоне (см. задачи 5.2.3 и 5.2.4).

Задачи с решениями

5.2.1. При загрузке активной зоны ЯР получили зависимость между числом загруженных ТК ($n_{\text{ТК}}$) и показаниями двух при-

Таблица 5.2.1

$n_{\text{ТК}}$	0	40	60	70	80	90	100	110	120	130	140	145
N_1	1,3	2,5	3,3	3,7	4,3	5,2	6,5	8,1	10,8	16,2	32,5	65,0
N_2	7,7	8,7	9,7	10,5	11,5	12,8	14,8	17,9	23,3	35,0	69,8	128,3

боров контроля плотности потока нейтронов (N_1 и N_2) от двух детекторов, расположенных в различных местах активной зоны и отражателя (табл. 5.2.1).

Оценить критическое число ТК. Какой детектор лучше расположен?

Решение. Составим таблицу обратных величин (N_0/N_1 , N_0/N_2) для каждого измерения плотности потока (табл. 5.2.2) и построим пусковые кривые (рис. 5.2.2).

Т а б л и ц а 5.2.2

$n_{\text{ТК}}$	0	40	60	70	80	90	100	110	120	130	140	145
N_0/N_1	1	0,52	0,39	0,35	0,30	0,25	0,20	0,16	0,12	0,08	0,04	0,02
N_0/N_2	1	0,88	0,79	0,73	0,67	0,60	0,52	0,43	0,33	0,22	0,11	0,06

Анализируя ход построенных пусковых кривых, можно сделать следующие выводы: критическое число ТК равно 150; лучше расположен первый детектор, так как его пусковая кривая дает возможность уже при загрузке примерно 100 ТК довольно точно оценить критическую загрузку; по второй кривой это можно сделать только при загрузке 140—145 каналов. Экстраполяция по первой кривой после каждой догрузки дает заниженное значение критической загрузки, а по второй кривой всегда завышает по сравнению с истинным критическое число ТК, что опасно с точки зрения ЯБР.

Используя аналитическую зависимость (5.2.1) и данные замеров (см. табл. 5.2.1), соответствующие вогнутой кривой, получаем: после загрузки 100 ТК $n_{\text{крит}} \approx 100 + 10 \cdot 5,2 / (6,5 - 5,2) \approx 140$; после загрузки 130 ТК $n_{\text{крит}} \approx 150$, т. е. приближение к критической загрузке осуществляется с безопасной стороны.

Для выпуклой кривой получаем: после загрузки 60 ТК ($\Delta n_{\text{ТК}} = 10$) $n_{\text{крит}} \approx 60 + 20 \cdot 8,7 / (9,7 - 8,7) \approx 234$; после загрузки 80 ТК ($\Delta n_{\text{ТК}} = 20$) $n_{\text{крит}} \approx 80 + 10 \cdot 10,5 / (11,5 - 10,5) \approx 185$; после загрузки 100 ТК $n_{\text{крит}} \approx 164$; после загрузки 120 ТК $n_{\text{крит}} \approx 153$ и только после загрузки 140 ТК $n_{\text{крит}} \approx 140 + 10 \cdot 35,0 / (69,8 - 35,0) \approx 150$ ТК. Оценка по выпуклой кривой, как и следовало ожидать, в начале загрузки существенно превышает истинное значение $n_{\text{крит}}$, что недопустимо с точки зрения ЯБР.

5.2.2. С какой предельно допустимой скоростью можно опускать в активную зону ТК длиной 1500 мм, имеющий физический вес $\rho_{\text{ТК}} = 0,005$?

Решение. Согласно требованию (4.2.9) скорость опускания ТК не должна превышать (без учета неравномерности Φ)

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d\rho}{dt} / \frac{d\rho}{dH} \leq \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{-2} \cdot 1500}{5 \cdot 10^{-3}} \approx 100 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

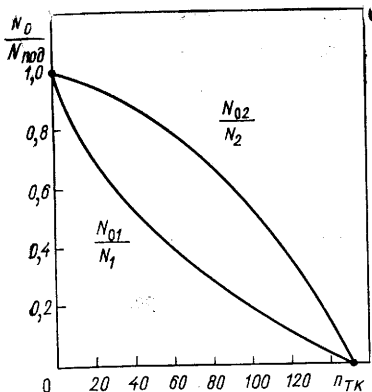


Рис. 5.2.2. К задаче 5.2.1

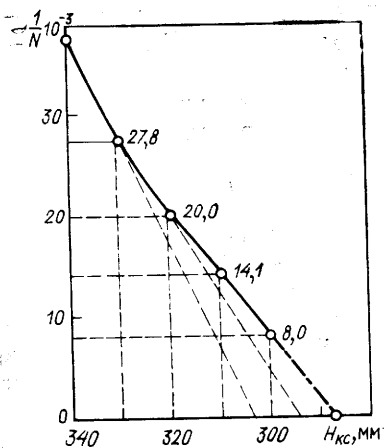


Рис. 5.2.3. К задаче 5.2.3

5.2.3. Определить критическое положение КС, при подъеме которого в подкритическом ЯР получена зависимость изменения $\Phi_{\text{под}}$ (в делениях шкалы прибора) от положения КС (отсчет от низа активной зоны), представленная в табл. 5.2.3.

Таблица 5.2.3

$H_{\text{КС}}, \text{ мм}$	340	330	320	310	300
$\Phi_{\text{под}}, \text{ дел}$	25,5	36	50	71	125

Решение. Определив обратные величины показаний прибора (соответственно $1/25,5 = 39,2 \cdot 10^{-3}$; $27,8 \cdot 10^{-3}$; $20 \cdot 10^{-3}$; $14,1 \cdot 10^{-3}$; $1/125 = 8 \cdot 10^{-3}$) и построив кривую обратного счета (рис. 5.2.3), найдем методом экстраполяции кривой до пересечения ее с осью абсцисс $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 287 \text{ мм}$.

При наличии внутреннего источника нейтронов в ЯР этот метод определения критического состояния достаточно прост, точен и безопасен. Другой способ определения критического состояния (по периоду разгона) рассмотрен ниже (см. § 5.3).

5.2.4. Решите задачу 3.4.2 методом построения кривой обратного счета.

Решение. Чем больше точек изменения $\Phi_{\text{под}}$, тем точнее результат. Если ЯР близок к критическому состоянию, то достаточно

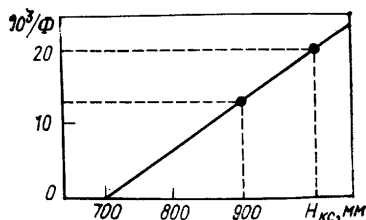


Рис. 5.2.4. К задаче 5.2.4

двух измерений: для $H_{КС1} = 1000$ мм $1/\Phi_{\text{под}1} = 1/50 = 0,020$ и для $H_{КС2} = 900$ мм $1/\Phi_{\text{под}2} = 1/75 = 0,013$. Построив прямую по полученным двум точкам (рис. 5.2.4), определим для $1/\Phi = 0$ $H_{КС}^{\text{крит}} = 700$ мм по глубине погружения, что совпадает с полученным результатом в задаче 3.4.2.

Контрольные вопросы и задачи

1. Какую роль играет место расположения детектора по отношению к источнику нейтронов при физическом пуске?
2. Можно ли безопасно определить критическое число ТК, если при загрузке строить зависимость $\Phi_{\text{под}}$ от количества загруженных ТК?
3. В чем недостаток выпуклой кривой обратного счета при определении критической загрузки по сравнению с вогнутой?
4. Оценить графически и по формуле (5.8.1) критическое число ТК, если при загрузке получена зависимость $\Phi_{\text{под}}$ (в делениях шкалы) от количества загруженных ТК ($n_{\text{ТК}}$) (табл. 5.2.4).

Таблица 5.2.4

$n_{\text{ТК}}$, шт.	100	200	400	600	700	800
$\Phi_{\text{под}}$, дел.	16	19	29	42	50	67

Таблица 5.2.5

$H_{КС}$, мм	450	440	430	420
$\Phi_{\text{под}}$, дел.	8	11,8	16,7	33,4

5. Каким может быть физический вес ТК, чтобы его можно было вводить в активную зону высотой 1000 мм со скоростью 100 мм/с?

6. Определить $H_{КС}^{\text{крит}}$, используя полученную зависимость (в делениях шкалы прибора) от положения КС в активной зоне (табл. 5.2.5).

§ 5.3. ГРАДУИРОВКА ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРОМ

Градуировка — это измерение эффективности органа регулирования в функции его положения, т. е. определение изменения ρ при перемещении его на единицу длины по всей высоте активной зоны.

Взвешивание — это измерение физического веса органа управления.

В зависимости от условий и требований к точности измерений используются различные способы градуировки: 1) по периоду разгона ЯР; 2) методом сравнения (компенсации); 3) в подкритическом состоянии ЯР; 4) по скачку плотности нейтронов и др.

В период пуска ЯР и во время физических экспериментов можно использовать *реактиметр* — специальный прибор для измерения реактивности (ПИР), позволяющий измерять текущее значение ρ в подкритическом и надкритическом состояниях в широких пределах ($\sim 2 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} - 20 \beta_{\text{эф}}$ [1]). ПИР существенно сокращает время проведения измерений и значительно облегчает обработку результатов.

Метод разгона реактора

Градуировка по периоду разгона основана на использовании связи периода T и ρ в формуле обратных часов (3.3.5) при увеличении мощности в надкритическом состоянии по экспоненциальному закону (3.3.1). Критический ЯР с помощью градуируемого стержня переводят в надкритическое состояние путем подъема стержня на допустимую (по предварительной расчетной оценке) величину ΔH . Используя секундомер, записывают время достижения таких значений мощности (в делениях шкалы ПА), которые отличаются от одного из предыдущих в 2 раза, например 10, 15, 20, 25, 30, 40, ..., где $20/10=30/15=40/20=50/25=\dots=2$. Время между этими измерениями равно $T_{(2)}$, по которому из табл. 3.3.1 и 3.3.2 определяют $\Delta\rho$, соответствующее подъему поглотителя на величину ΔH в данном положении активной зоны. Эффективность 1 мм перемещения поглотителя в данном диапазоне перемещения равна $\Delta\rho/\Delta H$.

Высвобожденную ρ можно найти также из графика, построив зависимость мощности от времени в полулогарифмическом масштабе (см. задачу 5.3.1):

$$\ln [N(t)/N_0] = t/T. \quad (5.3.1)$$

Это уравнение прямой, где $1/T$ — тангенс угла наклона прямой к оси времени:

$$1/T = \operatorname{tg} \alpha; \quad T = 1/\operatorname{tg} \alpha. \quad (5.3.2)$$

При такой методике измерения $\Delta\rho/\Delta H$ неизбежна ошибка, обусловленная неточностью фиксации критического состояния ЯР перед подъемом поглотителя. Исключить ошибку можно градуировкой по двум периодам: большому ($T_{(2)_1} \approx 80 \div 100$ с) и малому ($T_{(2)_2} \approx 20 \div 30$ с). Сначала градуируемый стержень устанавливают в положение H_1 , при котором мощность увеличивается с большим периодом $T_{(2)_1}$. Ему соответствует надкритичность ρ_1 . После отклонения стрелки измерителя потока на всю шкалу в активную зону опускают находящийся до этого в крайнем верхнем положении стержень (например, АР), чтобы ЯР стал подкритичен и стрелка прибора переместилась в начало шкалы. Градуируемый стержень поднимают в положение H_2 , которому соответствовал бы (по предварительной расчетной оценке) $T_{(2)_2} \sim 20 \div 30$ с. Поднимают АР в исходное (верхнее) положение и измеряют $T_{(2)_2}$, а по нему из таблицы находят ρ_2 . На основании полученных значений ρ_1 и ρ_2 определяют изменение $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, соответствующее перемещению градуируемого стержня на величину $\Delta H = H_2 - H_1$, и дифференциальную эффективность в положении $(H_1 + H_2)/2$:

$$\left(\frac{d\rho}{dH} \right)_{(H_1+H_2)/2} = \frac{\Delta\rho}{\Delta H} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{H_2 - H_1} \frac{1}{\text{мм}}. \quad (5.3.3)$$

Эти измерения дают также возможность точно определить положение градуируемого стержня, соответствующее критическому

состоянию ЯР. Дело в том, что в небольшом интервале перемещения зависимость ρ от положения стержня можно считать линейной. Это позволяет по двум отсчетам ρ для различных положений стержня построить зависимость $\rho = f(H)$ (см. рис. 5.3.2). Проведя через две точки прямую до пересечения ее с осью абсцисс, определим положение стержня $H_{\text{крит}}$, при котором $\rho = 0$. Это и есть критическое положение стержня. Тангенс угла наклона прямой даст значение дифференциальной эффективности в данной точке: $\Delta\rho/\Delta H = \text{tg } \alpha$. Чтобы исключить при измерениях переходный процесс с неустановившимся периодом, необходимо делать выдержку между окончанием перемещения поглотителя и началом измерений. Выдержка, равная 1—2 периодам, достаточна для измерений с погрешностью 2—3 % в практическом диапазоне изменения периода (5—100 с).

Градуировка по периоду — основной способ, который позволяет определить дифференциальную и интегральную характеристики поглотителя в абсолютных единицах ρ . Недостатки этого метода: 1) невозможность в результате одного измерения определять большую реактивность ($\rho < \sim 0,002$; $T > \sim 15$ с); 2) значительная затрата времени на одно измерение и тем более на определение полного физического веса тяжелого поглотителя; 3) потенциальная опасность измерений, поскольку они проводятся в надкритическом состоянии.

Задачи с решениями

5.3.1. После перемещения АР из критического положения в надкритическое на 100 мм получена следующая зависимость (табл. 5.3.1) изменения показаний прибора мощности во времени:

Таблица 5.3.1

N , дел.	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
t , с	0	38	78	100	119	132	141	155	161	167	172

1. Определить $d\rho_{\text{АР}}/dH$ на данном участке перемещения ($\beta_{\text{эф}} = 0,007$): а) по периоду разгона, б) графически.

2. Как воспользоваться набором из пяти секундомеров для непосредственного получения пяти значений $T_{(2)}$ при подобных измерениях?

Решение. 1, а. Определим $T_{(2)}$ как разность между отсчетами времени, соответствующими мощностям, отличающимся в 2 раза по табл. 5.3.2. Первый результат не учитываем, так как он характеризует неустановившийся период после высвобождения ρ . Усредняя остальные значения $T_{(2)}$, получаем

$$\bar{T}_{(2)} = \frac{1}{i} \sum_i T_{(2)_i} = \frac{40 + 41 + 41 + 42 + 40}{5} = 40,8 \text{ с.}$$

Таблица 5.3.2

N_2/N_1	10/5	20/10	40/20	60/30	80/40	100/50
$T_{(2)}, c$	38	40	41	41	42	40

По графику рис. 3.3.2 определяем ρ , соответствующее $T_{(2)} \approx 41$ с: $\rho = 0,14$ дол. = $0,14 \beta_{эф} = 9,8 \cdot 10^{-4} = 0,098$ %.

Таким образом, в данном диапазоне перемещения АР

$$d\rho_{АР}/dH = \rho/\Delta H = 9,8 \cdot 10^{-4}/100 = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мм.}$$

1, б. Чтобы построить график зависимости (5.3.1), рассчитаем для измеренных значений $N(t)$ и t величины $N(t)/N_0$ и $\ln[N(t)/N_0]$ (табл. 5.3.3):

Таблица 5.3.3

t, c	0	38	78	100	119	132	141	161	172
$N(t)$	5	10	20	30	40	50	60	80	100
$N(t)/N_0$	1	2	4	6	8	10	12	14	20
$\ln[N(t)/N_0]$	0	0,693	1,386	1,792	2,08	и т. д.	—	—	—

Из графика рис. 5.3.1 найдем $T = 1/\text{tg } \alpha = t/\ln[N(t)/N_0] \approx 59$ с; $T_{(2)} = 0,693 T \approx 41$ с. Из рис. 3.3.2 имеем $\rho = 0,098$ % и, следовательно, $d\rho_{АР}/dH = 9,8 \cdot 10^{-4}/100 = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1}$.

2. Для измерения $T_{(2)}$ удобно воспользоваться набором из нескольких секундомеров. Включая последовательно каждый из пяти секундомеров при прохождении стрелки прибора измерения мощности через деления 25, 30, 35, 40, 45 и выключая потом их в той же последовательности при дальнейшем достижении мощности соответственно 50, 60, 70, 80, 90 делений, получим на каждом секундомере значение $T_{(2)}$.

5.3.2. При $H_{КС} = 560$ мм в реакторе ТР мощность увеличивается с $T_{(2)} = 80$ с, а при $H_{КС} = 540$ мм — с $T_{(2)} = 40$ с. Определить $d\rho_{КС}/dH$ в данном интервале перемещения и критическое положение одного КС ($\beta_{эф} = 0,007$).

Решение. По графику рис. 3.3.2 определяем значения ρ , соответствующие измеренным $T_{(2)} = 80$ и 40 с: $\rho_1 = 0,08 \beta_{эф}$ и $\rho_2 = 0,15 \beta_{эф}$. Таким образом, в диапазоне перемещения $540 \rightarrow 560$ мм, т. е. для $H_{КС} = 0,5(540 + 560) = 550$ мм, согласно (5.3.3)

$$\left(\frac{d\rho_{КС}}{dH} \right)_{550} = \frac{\Delta\rho}{\Delta H} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{H_1 - H_2} = \frac{0,07}{20} \beta_{эф} = 2,45 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{мм}}.$$

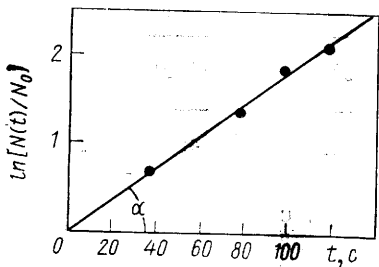


Рис. 5.3.1. К задаче 5.3.1

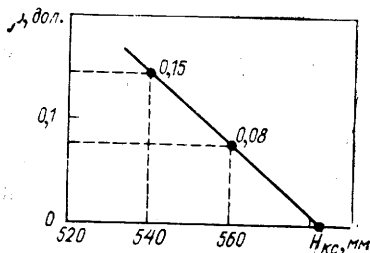


Рис. 5.3.2. К задаче 5.3.2

Непосредственно по наблюдению $T_{(2)}$ и доведению его до ∞ при опускании КС определить с достаточной степенью точности положение КС, соответствующее критическому, практически невозможно. Это связано с тем, что при наличии источника нейтронов при $K_{эф}=1$ ($\rho=0$) Φ растет по линейному закону (3.2.10). Если же добиться такого состояния, когда Φ будет стационарным, то этому положению КС будет соответствовать неизвестная подкритичность (см. рис. 3.6.1).

Чтобы уменьшить влияние источника нейтронов, строим графическую зависимость ρ от положения КС по нескольким, минимум двум, измерениям периода для надкритического состояния, близкого к критическому. На рис. 5.3.2 приведена такая зависимость, построенная по двум измерениям $T_{(2)}$ для положений КС 540 и 560 мм. Пересечение прямой с осью абсцисс дает положение КС, соответствующее значению $\rho=0$. Точность такого метода определения $H_{KC}^{крит}$ достаточно высокая на небольшом участке перемещения КС, где $d\rho_{KC}/dH = \text{const}$. В данном случае $H_{KC}^{крит} \approx 582$ мм.

Градуировка по периоду разгона в ЯР с большим источником нейтронов

В ЯР с большим внутренним источником нейтронов (спонтанное деление, фотонейтронные реакции на Be или D_2O и др.) последний оказывает существенное влияние на точность градуировки по периоду. В этом случае непосредственно измеряемый по скорости увеличения мощности период не соответствует тому значению T , которое входит в формулу (3.3.5). Надкритичность, полученная по измеренному периоду, будет завышенной, так как наличие источника нейтронов увеличивает скорость роста мощности. Расхождение особенно существенно на малых уровнях мощности, когда поток от источника сравним с общим потоком нейтронов в ЯР (см. задачу 3.2.10). Производить градуировки на большой мощности, когда действием источника можно пренебречь, нельзя, так как на скорость изменения мощности будут влиять мощностной, температурный и другие эффекты, изменяющие ρ , высвобожденную поглотителем.

Исключить влияние источника нейтронов на точность градуировки можно следующим образом. Преобразуем формулу (3.3.14) к такому виду:

$$\ln y(t) = \ln \frac{N(t) + N_{\text{под}}}{N_0 + N_{\text{под}}} = \frac{1}{T} t. \quad (5.3.4)$$

Для построения графика этой зависимости, позволяющего найти истинные значения T и ρ , соответствующие данному перемещению поглотителя, необходимо определить $N_{\text{под}}$, N_0 и получить зависимость $N(t) = f(t)$.

Измерения этих величин можно проводить в такой последовательности.

1. Определяют критическое положение градуируемого стержня методом построения кривой обратного счета (см. § 5.2) при подъеме его из подкритического состояния. С помощью других стержней добиваются, чтобы $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ градуируемого стержня оказалось в линейной части его характеристики.

2. Зная $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ стержня, опускают его на ΔH мм ниже критического положения. Через некоторое время в ЯР установится $N_{\text{под}} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под}}$, соответствующая подкритичности $\rho_{\text{под}} = |-\Delta\rho|$, пока точно не известной, но согласно предварительной оценке эффективности стержня не превышающей 0,001.

3. После измерения $N_{\text{под}}$ поднимают стержень на величину $2\Delta H$, делая ЯР надкритичным на $+\Delta\rho$, и определяют зависимость $N(t)$, учитывающую нарастание мощности при наличии источника нейтронов. При $\rho=0$ фиксируют величину N_0 . Строят график полулогарифмической зависимости (5.3.4), из которого определяют T (5.3.2), а по нему — истинное значение $\Delta\rho$, соответствующее перемещению ΔH .

Задача с решением

5.3.3. Критическое положение градуируемого стержня $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 700$ мм (определено методом построения кривой обратного счета). При $H_{\text{КС}} = 710$ мм $N_{\text{под}} = 40$ дел. После подъема стержня в положение 690 мм получили следующую зависимость (табл. 5.3.4) изменения потока нейтронов во времени в надкритическом ЯР:

Т а б л и ц а 5.3.4

$N(t)$, дел.	45	50	60	70	80	90	100
t , с	0	4	15	25	33	40	46

Определить $d\rho_{\text{КС}}/dH$ при $H_{\text{КС}} = 695$ мм.

Решение. Для построения полулогарифмической зависимости (5.3.3) вычисляем значения $\ln y(t)$, используя данные изме-

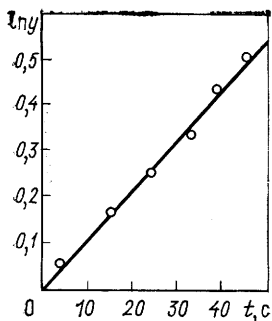


Рис. 5.3.3. К задаче 5.3.3

рений: $N_{\text{под}}=40$, $N_0=45$, $N(t)$ — из табл. 5.3.4. Результаты сведены в табл. 5.3.5.

Построив график (рис. 5.3.3), определяем

$$1/T = \operatorname{tg} \alpha = \ln y(t)/t = 1,08 \cdot 10^{-2},$$

откуда $T=92,5$ с и $T_{(2)}=0,7 T=65$ с.

Как и следовало ожидать, если $T_{(2)}$ определить непосредственно из данных измерения (см. табл. 5.3.4), он получится значительно меньше: от 45 до 90 дел, увеличение произошло за 40 с, от 50 до 100 дел. — за 42 с. Наличие источника существенно увеличивает скорость нарастания мощности.

Таблица 5.3.5

$t, \text{ с}$	0	4	15	25	33	40	46
$N(t)$	45	50	60	70	80	90	100
$y(t)$	1	1,06	1,18	1,29	1,41	1,53	1,65
$\ln y(t)$	0	0,058	0,167	0,256	0,348	0,430	0,506

Из рис. 3.32 находим для $T_{(2)}=65$ с $\rho=0,1$ $\beta_{\text{эф}}=0,07\%$ (при $\beta_{\text{эф}}=0,7\%$). Таким образом, $d\rho_{\text{КК}}/dH=7 \cdot 10^{-4}/10=7 \cdot 10^{-5}$ 1/мм.

Градуировка в подкритическом реакторе

Рассмотренный выше способ градуировки в ЯР с источником нейтронов большой мощности позволяет с достаточной точностью определить эффективность регулятора в абсолютных единицах ρ на небольшом участке его перемещения. Измерение полной эффективности в таком ЯР можно производить в подкритическом состоянии, используя зависимость (3.2.5). Результат измерения получается в относительных единицах, но потом, зная дифференциальную эффективность в абсолютных единицах на отдельном участке перемещения регулятора, переводят относительные единицы в абсолютные по всей высоте перемещения. Градуировку в подкритическом ЯР можно производить следующим образом.

Градулируемый регулятор устанавливают, например, в крайнее верхнее положение, при этом ЯР должен быть подкритичен при надежно контролируемой подкритической мощности (3.2.5)

$$N_{\text{под}} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под}}$$

После погружения поглотителя на ΔH_1 мощность уменьшится до уровня

$$N_{\text{под } 1} = N_{\text{ист}}/\rho_{\text{под } 1} = N_{\text{ист}}/(\rho_{\text{под}} + \delta\rho_1).$$

Изменение ρ на величину $\delta\rho_1$, соответствующее перемещению поглотителя на ΔH_1 , равно

$$\delta\rho_1 = \rho_{\text{под } 1} - \rho_{\text{под}} = N_{\text{ист}}(N_{\text{под}} - N_{\text{под } 1})/N_{\text{под}}N_{\text{под } 1}.$$

Перемещая регулятор шагами ΔH_i до необходимого нижнего положения и определяя каждый раз

$$\delta\rho_i = N_{\text{ист}}(P_{\text{под}, i-1} - N_{\text{под}, i})/N_{\text{под}, i-1}N_{\text{под}, i}, \quad (5.3.5)$$

получают набор $\delta\rho_i$ и ΔH_i с точностью до неизвестной постоянной величины $N_{\text{ист}}$. Это позволяет построить зависимость эффективности поглотителя (в относительных единицах) от положения его в активной зоне. Зная дифференциальную эффективность данного поглотителя на небольшом участке (см. задачу 5.3.3), переводят относительные единицы в абсолютные во всем интервале перемещения.

Достоинства рассмотренного метода — безопасность (измерения проводятся в подкритическом состоянии ЯР) и возможность градуировки тяжелых поглотителей. Недостатки — невозможность градуировки непосредственно в абсолютных единицах ρ и большая затрата времени (3.2.6) перед каждым измерением $N_{\text{под}, i}$, особенно при глубокой подкритичности.

Задача с решением

5.3.4. При положении градуируемого стержня в крайнем верхнем положении ЯР подкритичен. Прибор контроля мощности показывает 100 дел. шкалы. Для построения интегральной характеристики произведена градуировка в подкритическом ЯР. Стержень последовательно опускали на глубину ΔH (мм) и измеряли мощность в делениях шкалы прибора (табл. 5.3.6).

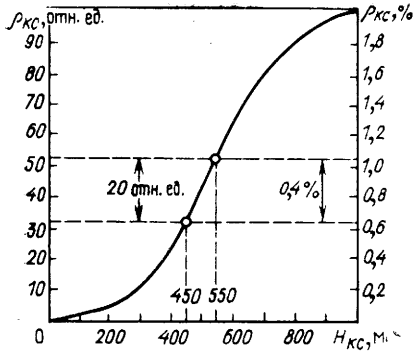
Таблица 5.3.6.

H , мм	0	200	300	400	500	600	700	800	1000
ΔH , мм	0	200	100	100	100	100	100	100	200
N , дел.	100	67	44	30,5	19	14,2	11,2	10,1	9,1

Построить интегральную характеристику и определить физический вес стержня в абсолютных единицах ρ , если $(\delta\rho/\delta H)_{500} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/мм (измерена по периоду).

Решение. Исходя из (5.3.5), определяем для каждого перемещения $\delta\rho/N_{\text{ист}} = (N_1 - N_2)/N_1N_2$ и суммарное значение $\delta\rho/N_{\text{ист}}$ для каждого положения стержня (табл. 5.3.7, рис. 5.3.4).

Рис. 5.3.4. К задаче 5.3.4



Используя значение $(\partial\rho/\partial H)_{500} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/мм и учитывая линейность характеристики на участке около $H = 500$ мм, определяем, что интервалу перемещения стержня на участке от 450 до 550 мм соответствует $52 - 32 = 20$ отн. ед. реактивности, а 1 мм перемещения — $20/100 = 0,2$ отн. ед. Таким образом, 1 отн. ед. соответствует $4 \cdot 10^{-3}/0,2 = 2 \cdot 10^{-4}$ абс. ед., а полный

физический вес стержня равен $\rho_{кс} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 100,2 \approx 2,0 \%$. Теперь не представляет труда отградуировать ось ординат в абсолютных единицах ρ (правая ось ординат на рис. 5.3.4).

Таблица 5.3.7

ΔH , мм	0	200	300	400	500	600	700	800	1000
$(N_1 - N_2)/N_1 N_2$	0	4,9	7,8	10	20	17,8	19	9,7	11
$\sum_i (\delta\rho_i/N_{ист})$	0	4,9	12,7	22,7	42,7	60,5	79,5	89,2	100,2

Метод сравнения (компенсации)

Этот метод дает возможность градуировать любой регулятор путем сравнения его эффективности с эффективностью эталонного отградуированного в абсолютных единицах ρ стержня. Одним стержнем ρ высвобождается или уменьшается (безопаснее второй вариант), а другим это изменение компенсируется.

Измеряя перемещения градуируемого ΔH и эталонного ΔH_0 стержней и определяя по интегральной характеристике эталонного стержня эффективность $\Delta\rho_0$, соответствующую перемещению ΔH_0 , находим эффективность градуируемого стержня при перемещении его на величину ΔH в данном положении активной зоны:

$$(\Delta\rho/\Delta H) \Delta H = (\Delta\rho_0/\Delta H_0) \Delta H_0; \quad \Delta\rho = \Delta\rho_0. \quad (5.3.6)$$

Градуировку можно производить в критическом и подкритическом ЯР, но во втором случае трудно добиться одного и того же значения потока нейтронов (мощности) до и после перемещения стержней. Поэтому лучше градуировку проводить в критическом ЯР, при этом для исключения ошибки в определении критического состояния до и после перемещения стержней критическое положение эталонного стержня лучше определять по двум периодам (см. за-

дачу 5.3.2). Измерения можно также производить, определяя надкритичность для двух положений градуируемого и эталонного стержней (см. задачу 5.3.6).

Метод сравнения дает возможность в результате одного перемещения найти физический вес любого стержня, не превышающего физический вес эталонного. Недостаток метода — интерференция стержней. Поэтому необходимо, чтобы градуируемый и эталонный стержни находились на расстоянии, практически исключающем взаимное влияние. Обычно методом сравнения определяют физический вес стержней АР и АЗ, используя в качестве эталонного поглотителя стержни КС.

Задачи с решениями

5.3.5. Реактор ТР находится в критическом состоянии $H_{КС}^{крит} = 1000$ мм; АР находится в крайнем верхнем положении. Определить физический вес АР, используя характеристики КС (см. рис. 3.4.1 и 3.4.2), если после погружения АР в крайнее нижнее положение ЯР остается в критическом состоянии при подъеме КС в положение 830 мм.

Примечание. Критичность ЯР определяется по двум периодам в ЯР с малым источником нейтронов или по кривой юбратного счета в ЯР с внутренним источником нейтронов большой интенсивности.

Решение. Согласно (5.3.6) $\rho_{АР} = \Delta\rho_{КС} = \delta_{КС}(1000) - \rho_{КС}(830) = 0,8 - 0,4 = 0,4$ %.

5.3.6. При положении АР вне активной зоны, а КС — 600 мм по глубине погружения $T_1 = 50$ с. После погружения АР на 450 мм в активную зону и подъема всех КС в положение 590 мм $T_2 = 30$ с. Определить физический вес погруженной части АР ($\beta_{эф} = 0,007$).

Решение. При небольшом перемещении КС определение $\Delta\rho_{КС}$ по интегральной характеристике будет неточным. Поэтому воспользуемся дифференциальной характеристикой КС на рис. 3.4.1. Для положения $0,5(600 + 590) = 595$ мм в неискаженном поле, $d\rho_{\Sigma}/dH = 2,7 \cdot 10^{-4}$ 1/мм, находим суммарную эффективность, соответствующую подъему КС на 10 мм:

$$\Delta\rho_{\Sigma} = (d\rho_{\Sigma}/dH) \Delta H_{КС} = 0,27 \text{ \%}.$$

При большом перемещении КС $\Delta\rho_{\Sigma}$ нужно определять непосредственно по интегральной характеристике (см. задачу 5.3.5).

Если бы в обоих положениях КС мощность изменялась с одинаковым периодом, то полученное значение $\Delta\rho_{\Sigma}$ как раз и соответствовало бы физическому весу погруженной части АР. Но в данном случае при положении КС 590 мм ЯР имеет большую надкритичность по сравнению с положением 600 мм на $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 0,16 - 0,11 = 0,05$ %, где ρ_2 и ρ_1 соответствуют T_2 и T_1 (см. рис. 3.3.3). Таким образом, физический вес погруженной части АР на глубину 450 мм равен $\Delta\rho_{АР} = \Delta\rho_{\Sigma} - \Delta\rho = 0,27 - 0,05$ % = 0,22 %.

Использование двух надкритических состояний для определения физического веса исключает необходимость определения исходного критического положения, как в задаче 5.3.5. При подобных измерениях необходимо использовать характеристики КС, соответствующие распределению потока нейтронов в момент измерения.

Метод скачка плотности нейтронов

Метод скачка плотности нейтронов основан на том, что при скачкообразном уменьшении $K_{эф}(\rho)$ мощность, обусловленная делением топлива мгновенными нейтронами, скачком уменьшается с уровня N_1 до N_2 на величину ΔN^- (3.3.12). Измеряя мощность ЯР до и после введения отрицательной реактивности, можно определить эффективность поглотителя (3.3.13) в единицах $\beta_{эф}$ (дол):

$$\rho_{\text{погл}} = -\rho = \beta_{эф} (N_1 - N_2)/N_2; \quad \rho_{\text{погл}}/\beta_{эф} = N_1/N_2 - 1. \quad (5.3.7)$$

Чем быстрее вводится градуируемый стержень, тем точнее фиксируется мощность N_2 после скачка на мгновенных нейтронах и точнее результат измерения ρ . Очевидно также, что чем больше физический вес поглотителя, тем больше скачок мощности и меньше относительная погрешность измерения ΔN , а следовательно, выше точность измерения ρ . Определение мощности после сброса стержня наиболее точно можно сделать по осциллограмме. Обычно этот метод используется при взвешивании стержней АЗ, для которых нужно знать не характер дифференциальной и интегральной характеристик, а только полный физический вес.

Рассмотренный метод дает возможность оперативно, безопасно, в абсолютных единицах ρ или в долях $\beta_{эф}$ оценить физический вес быстро перемещающихся поглотителей. Однако он не применим для градуировки медленно перемещающихся поглотителей и построения дифференциальной и интегральной характеристик.

Задачи с решениями

5.3.7. Какой физический вес имеют сброшенные в активную зону стержни АЗ, если мощность скачком уменьшилась с 80 до 15 % $N_{\text{ном}}$?

Решение. Уменьшение ρ , равное в данном случае физическому весу введенных в активную зону стержней, согласно (5.3.7) равно

$$\rho_{\text{АЗ}} = \beta_{эф} (N_1 - N_2)/N_2 = 4,3\beta_{эф}.$$

5.3.8. ЯР находится в критическом состоянии. Пусковой прибор показывает $N_1 = 130$ дел. шкалы измерения мощности. После сброса одного из шести стержней АЗ мощность скачком уменьшилась до уровня $N_2 = 85$ дел., а при сбросе всех стержней одновременно уменьшается с N_1 до $N_2 = 30$ дел. Оценить физический вес АЗ, интерференцию стержней и ее знак.

Решение. Согласно (5.3.7) физический вес одного стержня при $\beta_{эф} = 0,7\%$ равен $\rho_{АЗ1} = 0,7(130-85)/85 = 0,37\%$; сумма физических весов шести стержней (т. е. без учета интерференции) составляет $\sum_{i=1}^6 \rho_{АЗ, i} = 6 \cdot 0,37\% = 2,22\%$. Суммарный физический вес шести одновременно сброшенных стержней равен $\beta_{\Sigma} = 0,7(130-30)/30 = 2,34\%$. Таким образом, интерференция положительная, коэффициент интерференции (3.4.4) $k_{и} = 2,34/2,22 = 1,05$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Почему измерение дифференциальной эффективности стержня по одному замеру T менее точно, чем по двум (большому и малому T)?

2. Как по замерам ρ в надкритическом состоянии ЯР точно определить $H_{КС}^{крит}$?

3. Почему первые замеры периода после вывода ЯР в надкритическое состояние отличаются от последующих и в какую сторону?

4. Один КС реактора ТР из $H_{КС}^{крит} = 600$ мм подняли на 50 мм и получили следующую зависимость изменения мощности во времени:

N , дел.	20	30	40	50	60	70	80	90	100
t , с	0	30	49	66	80	91	100	108	115

Определить $d\rho_{КС}/dH$ в данном интервале перемещения.

5. ЯР надкритичен, $T_1 = 30$ с, а после погружения КС на 100 мм $T_2 = 90$ с. Определить $d\rho_{КС}/dH$ ($\beta_{эф} = 0,008$).

6. Как влияет внутренний источник нейтронов на точность градуировки по периоду разгона?

7. Можно ли исключить влияние источника нейтронов на точность градуировки по периоду разгона, производя измерения на большой мощности?

8. Каковы недостатки градуировки стержня по периоду разгона в ЯР с большим внутренним источником нейтронов?

9. Как точнее и безопаснее градуировать стержень в подкритическом ЯР: поднимая его вверх или опуская вниз?

10. Каковы достоинства и недостатки градуировки: а) в подкритическом ЯР; б) методом сравнения?

11. Реактор ТР критичен, $H_{КС1}^{крит} = 1020$ мм. После сброса одной группы АЗ $H_{КС2}^{крит} = 1000$ мм. Чему равен физический вес стержня АЗ?

12. При погружении стержней КС в реакторе ТР, работающем в режиме автоматического регулирования, из положения 810 мм в положение 825 мм, стержни АР переместились из крайнего нижнего в крайнее верхнее положение. Чему равен их физический вес?

13. Каковы достоинства и недостатки определения физического веса методом скачка плотности нейтронов?

14. ЯР выведен на МКУ. После сброса АЗ мощность скачком уменьшилась со 100 до 26 дел. шкалы. Чему равен физический вес АЗ?

15. Чему равен физический вес одного из шести стержней АЗ при поднятых пяти стержнях, если суммарный вес их всех равен 2,5 %, а коэффициент интерференции $k_{\text{и}}=1,09$?

16. Какой должен быть $\rho_{\text{АЗ}}$, чтобы после падения АЗ в активную зону мощность скачком уменьшилась от $N_{\text{ном}}$ до 20 % $N_{\text{ном}}$?

§ 5.4. ПОСТРОЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Дифференциальная характеристика представляет собой графическую зависимость эффективности 1 мм перемещения поглотителя от его положения по высоте активной зоны (см. § 3.4). Методика ее экспериментального построения может быть различной и зависит в основном от физического веса поглотителя.

Дифференциальную характеристику легкого поглотителя, физический вес которого $\rho_{\text{погл}} < \rho_{\text{эф}}$, удобно строить следующим образом.

1. Если $\rho \leq 0,002$ ($T_{(2)} > 15$ с): а) градуируемый стержень устанавливается в крайнее нижнее положение; б) с помощью других поглотителей делают ЯР критическим; в) один из стержней-поглотителей, находящийся в крайнем верхнем положении (назовем его вспомогательным), опускают в активную зону на глубину, превышающую по эффективности физический вес градуируемого стержня; г) поднимают градуируемый стержень на ΔH_1 мм, что составляет примерно 0,1 полного хода этого стержня; при этом благодаря опущенному вспомогательному стержню ЯР остается подкритичным и стрелка прибора контроля мощности находится в начале шкалы; д) поднимают вспомогательный стержень в крайнее верхнее положение; е) определяют период $T_{(2)}$; ж) опускают вспомогательный стержень, т. е. глушат ЯР; з) по таблице связи $T_{(2)}$ и ρ определяют ρ_1 и вычисляют $d\rho/dH = \rho_1/\Delta H$ на высоте $\Delta H_1/2$.

Для получения следующей точки характеристики поднимают градуируемый стержень еще на высоту ΔH_2 , в рассмотренной выше последовательности определяют ρ_2 и соответственно $d\rho/dH = (\rho_2 - \rho_1)/\Delta H_2$ для положения $(\Delta H_1 + \Delta H_2/2)$ и т. д. до полного подъема градуируемого стержня в верхнее положение.

2. Если $\rho \geq 0,002$ ($T_{(2)} < 15$ с), то после подъема градуируемого стержня на высоту, при которой ρ соответствует минимально допустимому периоду, необходимо с помощью других поглотителей сделать ЯР критическим и продолжать определение $d\rho/dH$ описанным выше способом.

Полученные значения $d\rho/dH$ для различных положений стержня дают возможность построить зависимость дифференциальной эффективности стержня от положения его в активной зоне $d\rho/dH = f(H)$.

Дифференциальную характеристику одного КС большой эффективности или нескольких КС, перемещаемых одновременно, рассмотренным выше способом построить нельзя. Характеристи-

ка, построенная как сумма характеристик отдельных стержней, также будет отличаться от реальной в связи с их интерференцией. Наиболее точно дифференциальную характеристику всех КС можно построить в процессе загрузки активной зоны. Последовательность измерений может быть следующей: а) после набора критического числа ТК (см. § 5.2) в активную зону опускают все находившиеся до этого в крайнем верхнем положении КС на глубину ΔH_1 , внося отрицательную ρ , которая по расчетным оценкам должна превышать положительную ρ , вносимую очередной порцией загружаемых ТК; б) загружают в активную зону рассчитанную порцию ТК; в) поднимают все КС до получения периода $T_{(2)_1} \approx 80$ с и измеряют его с помощью набора секундомеров или табличным способом (см. задачу 5.3.2); г) опускают какой-нибудь легкий поглотитель (вспомогательный, например АР или АЗ) в активную зону, чтобы вернуть стрелку прибора измерения мощности в исходное положение; д) поднимают все КС в положение H_2 , чтобы ЯР после подъема вспомогательного стержня разогнался с периодом $T_{(2)_2} \sim 30$ с; е) определяют этот период и опускают все КС в исходное положение до измерения; ж) по таблице связи ρ и T находят ρ_1 и ρ_2 ; з) рассчитывают $d\rho/dH = (\rho_2 - \rho_1)/(H_2 - H_1)$ в положении $(H_1 + H_2)/2$. Аналогичным образом получают следующую точку дифференциальной характеристики вплоть до полной загрузки ТК. Дальнейшие измерения производят в подкритическом ЯР (см. задачу 5.3.4).

Полученная при загрузке активной зоны дифференциальная характеристика имеет неодинаковую точность по высоте. Наибольшая точность будет в области критического положения при полной загрузке ТК. Все остальные измерения получены при частичной загрузке ТК. Особенно неточна характеристика для верхнего положения, где количество ТК значительно отличалось. По этой причине, а также в связи с изменением изотопного состава активной зоны в процессе кампании необходимо уточнять характеристику (см. § 5.9).

При погружении однородного стержня в активную зону, когда центр его проходит через максимум нейтронного потока, изменение ρ меняет знак. Эта точка называется *точкой опрокидывания* $H_{т.о}$ (рис. 5.4.1). При симметричном распределении нейтронов по высоте точка опрокидывания соответствует положению стержня, когда центр его совпадает с центром активной зоны. Особенно это нужно иметь в виду, если длина стержня меньше высоты активной зоны. Такие стержни обычно используют в больших активных зонах для компенсации ксеноновых волн (см. § 1.5). Если стержни предназначены для компенсации $\rho_{зап}$, то перемещать их ниже точки опрокидывания

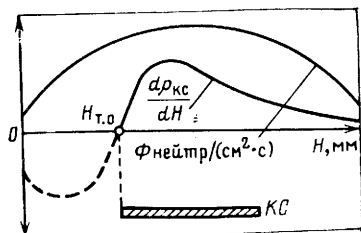


Рис. 5.4.1. Дифференциальная характеристика короткого стержня (с точкой опрокидывания)

вания нельзя. Для этого устанавливают специальные электрические и механические ограничители, чтобы исключить возможность высвобождения ρ при непредвиденном погружении стержня ниже точки опрокидывания (например, при падении стержня в активную зону).

✓ *Интегральная характеристика* представляет собой графическую зависимость суммарной эффективности погруженной части поглотителя от его положения по высоте активной зоны. Для тяжелых поглотителей интегральная характеристика (3.4.3) рассчитывается на основании экспериментально полученной дифференциальной характеристики. Поскольку последнюю трудно представить в виде интегрируемой функции, обычно интеграл берут приближенным методом, например по формуле трапеций, или же по мере построения дифференциальной характеристики производится суммирование эффективностей 1 мм перемещения на всех интервалах измерения. Удобно обе характеристики строить на одном графике, каждую в своем масштабе.

Интегральную характеристику легкого стержня можно построить непосредственно, измеряя период в различных его положениях по мере подъема из критического положения, при этом используется вспомогательный стержень, с помощью которого ЯР после каждого замера приводится в подкритическое состояние, чтобы сделать очередной подъем градуируемого стержня и вернуть стрелку прибора измерения потока в исходное (нулевое) положение.

Безопасно и быстро интегральную кривую легкого стержня можно получить методом сравнения (компенсации) с отградуированным тяжелым поглотителем.

Задачи с решениями

5.4.1. Исходное состояние: градуируемый стержень АР находится в крайнем нижнем положении (1000 мм). Стержни АЗ взведены. ЯР подкритичен. Построить дифференциальную характеристику АР методом разгона.

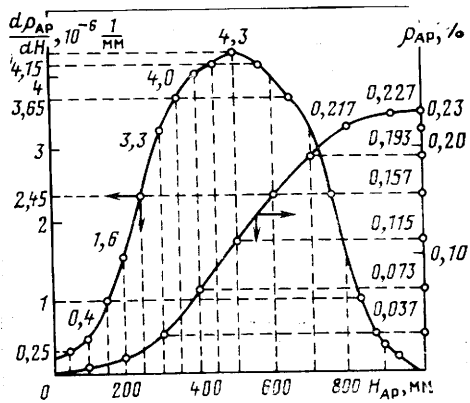
Решение. Поднимая стержни КС, выводят ЯР в критическое состояние (см. задачу 5.3.2). Поднимают стержень АР на $\Delta H =$

Таблица 5.4.1

H_{AP} , мм	1000	900	800	700	600	500	500	400	300	200	100	0
$T_{(2)}$, с	∞	2500	480	145	64	35	∞	130	59	41	36	35
ρ_0 , 10^{-2} %	0	0,23	1,14	3,37	6,68	10,4	0	3,77	7,1	9,3	10,2	10,4
ρ_1 , 10^{-2} %	0	0,25	1,25	3,70	7,35	11,5	0	4,15	7,8	10,2	11,3	11,5

Рис. 5.4.2. К задаче 5.4.2

= 100 мм и определяют $T_{(2)}$ (см. задачу 5.3.1). После измерения $T_{(2)}$ делают ЯР подкритичным, опуская, например, одну группу (стержень) АЗ; поднимают АР еще на 100 мм, поднимают АЗ, измеряют $T_{(2)}$ и т. д. до получения $T_{(2)} \approx 30 \div 20$ с. В этом положении АР ($H_{АР} = 500$ мм, $T_{(2)} = 36$ с) ЯР приводят в критическое состояние с помощью КС



($T_{(2)} = \infty$) и продолжают подъем АР с шагом 100 мм, измеряя $T_{(2)}$. Результаты измерений $T_{(2)}$ и соответствующие им значения ρ (из табл. 3.3.2 при $\gamma = 1,1$; $\rho = \gamma \rho_0$) сведены в табл. 5.4.1. Для определения $d\rho/dH$ в различных положениях АР определяют изменение ρ при каждом перемещении АР на 100 мм и находят соответствующие значения $\Delta\rho/\Delta H$ (табл. 5.4.2).

Таблица 5.4.2

$H_{АР} = \frac{H_i + H_{i+1}}{2}, \text{мм}$	950	850	750	650	550	450	350	250	150	50
$\Delta\rho_{АР} = [\rho(H_{i+1}) - \rho(H_i)], 10^{-2}$	0,25	1,0	2,45	3,65	4,15	4,15	3,65	2,45	1,0	0,25
$\Delta\rho/\Delta H, 10^{-4} \%/мм$	0,25	1,0	2,45	3,65	4,15	4,15	3,65	2,45	1,0	0,25

5.4.2. На рис. 5.4.2 представлена дифференциальная характеристика стержня АР. Построить интегральную характеристику.

Решение. Поскольку дифференциальную кривую нельзя описать интегрируемой функцией, воспользуемся одним из численных методов интегрирования — методом трапеций. Разделим полный ход перемещения АР на 10 интервалов $\Delta H = 100$ мм. (Чем больше количество интервалов, тем точнее результат.) Подставим значения дифференциальной эффективности $y_i = d\rho_{АР}(H_i)/dH$ для каждой границы интервалов в формулу трапеций:

$$\rho_{АР} = \int_0^{1000} \frac{d\rho_{АР}(H)}{dH} dH \approx \frac{y_0 + y_1}{2} \Delta H + \frac{y_1 + y_2}{2} \Delta H + \dots$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{y_9 + y_{10}}{2} \Delta H = \left(\frac{0,1 + 0,4}{2} + \frac{0,4 + 1,6}{2} + \frac{1,6 + 3,3}{2} + \right. \\
& + \frac{3,3 + 4,0}{2} + \frac{4,0 + 4,3}{2} + \frac{4,3 + 4,0}{2} + \frac{4,0 + 3,3}{2} + \\
& \left. + \frac{3,3 + 1,6}{2} + \frac{1,6 + 0,4}{2} + \frac{0,4 + 0,1}{2} \right) 10^{-2} \% = (0,25 + 1,0 + \\
& + 2,45 + 3,65 + 4,15 + 4,15 + 3,65 + 2,45 + 1,0 + 0,25) 10^{-2} = 0,23 \%.
\end{aligned}$$

Суммируя последовательно эффективности АР на каждом очередном участке погружения и откладывая эти значения на графике (см. рис. 5.4.2, масштаб на правой оси ординат), получим интегральную характеристику АР, имеющего физический вес 0,23 %. Можно строить интегральную характеристику непосредственно на основании измерений, полученных при определении дифференциальной эффективности АР в различных его положениях в активной зоне [$\rho_{АР} = 11,5 \cdot 10^{-2} + 11,5 \cdot 10^{-2} = 23 \cdot 10^{-2} = 0,23 \%$ (см. табл. 5.4.1)].

Контрольные вопросы и задачи

1. Как построить дифференциальную характеристику легкого и тяжелого поглотителей?
2. Чем опасно перемещение поглотителя ниже «точки опрокидывания»?
3. Как с помощью откалиброванного КС построить интегральную характеристику АР методом сравнения?
4. Построить интегральную характеристику одного КС реактора ТР, используя его дифференциальную характеристику (см. рис. 3.4.1).

§ 5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО И МОЩНОСТНОГО ЭФФЕКТОВ И КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ

После полной загрузки ЯР исследуют его поведение в условиях разогрева и изменения мощности, когда переходным процессам сопутствует изменение ρ , обусловленное изменением температуры теплоносителя-замедлителя и топлива, давления в контуре, отравления Хе и др. Полностью разделить эти эффекты невозможно. При изменении мощности уравнение баланса для ρ можно записать так:

$$\frac{\partial \rho}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P + \Delta \rho_{\text{Хе}}(\tau) + \dots = \Delta \rho_{\text{КС}},$$

где ΔN , Δt , ΔP — изменения мощности, температуры и давления в ЯР; $\partial \rho / \partial N$, $\partial \rho / \partial t$, $\partial \rho / \partial P$ — соответствующие коэффициенты реактивности; $\Delta \rho_{\text{Хе}}$ — изменение отравления Хе; $\Delta \rho_{\text{КС}}$ — суммарное изменение ρ , скомпенсированное перемещением КС. В зависимости от типа ЯР возможны и другие компоненты изменения ρ . Необходимо знать каждый из этих эффектов и коэффициентов отдельно. Точные измерения коэффициентов реактивности проводят

по специальным методикам специалисты-физики, но инженер управления ЯР должен уметь хотя бы приближенно в процессе эксплуатации оценивать и уточнять их значения.

Определение или уточнение ТЭР, т. е. зависимости ρ от средней температуры теплоносителя, можно производить в реакторе ВВР следующим образом.

Вывести ЯР на МКУ при температуре 20—40°C. Чтобы исключить влияние ядерного (мощностного) эффекта, разогрев теплоносителя-замедлителя необходимо производить паром от постороннего источника или работающими ГЦН за счет превращения потерь энергии в гидравлической части ГЦН в тепловую энергию (см. § 3.7).

Если позволяют условия, разогрев можно производить паром от другого ЯР или от ТЭЦ, пропуская пар через ПГ данного ЯР. Изменение ρ , которое будет происходить при повышении температуры теплоносителя, необходимо компенсировать перемещением отградуированного КС, записывая его критическое положение, соответствующее различным значениям температуры первого контура. Имея табличную зависимость $H_{КС}^{крит} = f(t_{1к})$ и используя интегральную (а при малых изменениях положения КС — дифференциальную) характеристику КС, строят кривую температурного эффекта $\rho_t = f(t_{1к})$. При этом необходимо учитывать влияние температуры на физический вес КС, для чего во время разогрева при различных температурах методом разгона определяют дифференциальную эффективность КС и используют эти данные при построении кривой температурного эффекта.

В процессе разогрева следует также по возможности исключить колебания теплотехнических параметров первого контура (расхода, давления и др.). Если же такие изменения есть, обязательно следует учитывать их влияние на ρ при построении графика. Особенно существенное влияние на характер температурного эффекта может оказывать выгорающий поглотитель, находящийся в теплоносителе, например борная кислота. Для учета этого эффекта необходимо производить специальные измерения [25].

ТКР (2.8.1) определяют по кривой температурного эффекта в небольших интервалах изменения температуры Δt , где зависимость ρ от температуры можно считать линейной.

Оператору удобно пользоваться кривой ТЭР при разогреве ЯР теплом ядерной реакции, поскольку в естественных условиях эксплуатации разогрев производится за счет собственной мощности ЯР. В этом случае ТЭР будет включать также мощностной эффект для соответствующей мощности.

Мощностной эффект реактивности измеряют при быстром переходе с одного уровня мощности на другой и поддержании остальных параметров ЯР постоянными. Изменение ρ , обусловленное изменением мощности, компенсируют отградуированным поглотителем, например АР, по дифференциальной характеристике которого и определяют $\Delta\rho_{АР}$. На долю мощностного эффекта

приходится

$$\Delta \rho_N = \Delta \rho_{AP} - \sum_i \Delta \rho_i,$$

где $\Delta \rho_i$ — сопутствующие изменения ρ вследствие температурного эффекта, барометрического, отравления Хе и др. Если время переходного процесса составляет несколько минут (менее 3—4 мин), то нестационарным отравлением Хе можно пренебречь.

На всех уровнях измерения ρ_N , начиная с физического пуска и кончая $N_{ном}$, определяют мощностной коэффициент реактивности (2.8.2).

Задачи с решениями

5.5.1. При разогреве ЯР теплом от постороннего источника получили зависимость (табл. 5.5.1) $H_{КС}^{крнт}$ от температуры теплоносителя в диапазоне 20—250 °С. Построить кривые ТЭР и ТКР.

Решение. Используя дифференциальную характеристику (см. рис. 3.4.1), определяем изменение ρ , соответствующее перемещению КС по мере разогрева ЯР. При $H_{КС} = 1000$ мм $d\rho_{\Sigma}/dH = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/мм. Следовательно, опускание КС в положение 1004,3 мм соответствует компенсации $\Delta \rho = +3 \cdot 10^{-4} \cdot (1004,3 - 1000) = +13 \cdot 10^{-4} = +0,13$ % и т. д. (табл. 5.5.2).

ТКР вычисляем как среднюю величину для интервалов температуры с примерно линейной зависимостью (табл. 5.5.3): $\alpha_{t=40^\circ\text{C}} = 0,13 / (30 - 20) = 0,013$ %/°С = $1,3 \cdot 10^{-4}$ 1/°С и т. д.

На рис. 5.5.1 представлены полученные кривые ρ_t и α_t .

5.5.2. ЯР с керамическим ядерным топливом выведен на мощность 1 %, разогрет до рабочей температуры. После увеличения мощности с $T_{(2)} = 60$ с до уровня 4 % $N_{ном}$ при той же средней температуре стержень АР (см. рис. 3.4.3) переместился с 800 до 1000 мм. Оценить α_N .

Решение. Поскольку средняя температура после увеличения мощности осталась постоянной, а время перехода составляет всего 2 мин ($N/N_0 = 4/1 = 2^{120/60}$), влиянием ТЭР и отравлением Хе можно пренебречь. Следовательно,

изменение ρ , скомпенсированное перемещением АР, полностью обусловлено мощностным эффектом при изменении мощности на $\Delta N = 4 - 1 = 3$ %. По характеристике АР определяем $\Delta \rho = -|\Delta \rho_{AP}| = -|0,27 - 0,14| = -0,13$ % = $-13 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, $d\rho_N/dN \approx -13 \cdot 10^{-4} / 3$ % = $-4,4 \cdot 10^{-4}$ 1/% $N_{ном}$.

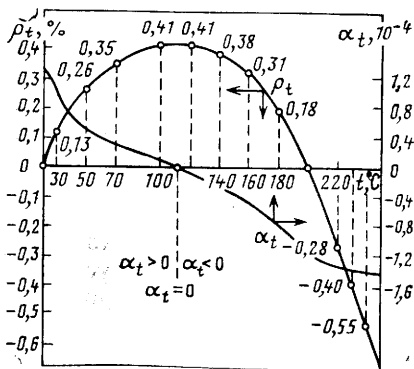


Рис. 5.5.1. К задаче 5.5.1

Таблица 5.5.1

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	50	70	100	120	140	160	180	200	220	250
$H_{\text{КС}}^{\text{КРДП}}, \text{мм}$	1000	1004,3	1008,6	1011,0	1013,7	1013,7	1012,7	1010,3	1006,0	1000	993,0	975,0

Таблица 5.5.2

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	50	70	100	120	140	160	180	200	220	250
$\Delta p, \%$	0	0,13	0,26	0,35	0,41	0,41	0,38	0,31	0,18	0	-0,28	-0,70

Таблица 5.5.3

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	20—30	30—50	50—70	70—100	100—120	120—140	140—160	160—180	180—200	200—250
$\alpha_t, 1/^\circ\text{C}$	1,3	0,65	0,45	0,20	0	0,15	0,35	0,65	0,9	1,4

Контрольные вопросы и задачи

1. Чем обусловлена необходимость экспериментального измерения ρ_t , ρ_N , α_t и α_N в начале кампании и уточнения их в процессе эксплуатации?
2. Может ли ЯР иметь $\alpha_t < 0$ в рабочей точке при $\rho_t > 0$?
3. На сколько будет отличаться величина ρ_t в рабочей точке при разогреве ЯР теплом от работающих ГЦН и теплом ядерной реакции на мощности 5 % $N_{\text{ном}}$, если $\alpha_N = -4 \cdot 10^{-4} 1/\% N_{\text{ном}}$?
4. При снижении мощности ЯР со 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$ $\rho_{\text{зап}}$ из-за ρ_N увеличился на 0,004. Чему равен α_N в данном диапазоне изменения мощности?

§ 5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА КСЕНОНОМ

Для уточнения расчетных кривых стационарного ($\rho_{\text{Хе}}$) и нестационарного ($\rho_{\text{и.я}}$) отравления (см. § 2.4, 2.5) достаточно экспериментально построить две-три кривые установления $\rho_{\text{Хе}}$ (например, для $N_0 = 20, 50, 100 \%$), одну-две кривые $\rho_{\text{и.я}}$ при снижении мощности и после остановки. Не представляет труда также построить кривую $\rho_{\text{Хе}}$ при увеличении мощности. Сравнивая полученные кривые с расчетными для выбранных уровней и изменений мощности, методом экстраполяции вносят поправки в расчетные кривые для всех остальных мощностей и вариантов переходов.

Стационарное отравление Хе и скорость его установления можно проверить следующим образом. В исходном состоянии ЯР находится на МКУ, теплоноситель разогрет до рабочей температуры. Записывают все параметры ЯР и прежде всего критическое положение КС, которые будут использованы для измерения. Выводят ЯР на необходимую мощность и работают в стационарном режиме в течение 40—50 ч — до установления равновесной концентрации I и Хе. Изменение ρ компенсируют перемещением КС и через каждый час записывают их положение. Полученная зависимость $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = f(\tau)$ и дифференциальная характеристика КС дают возможность построить зависимость изменения ρ во времени для данной мощности. При этом необходимо внести поправку на мощностной, температурный и другие эффекты, обусловленные изменением этих параметров:

$$\rho_{\text{Хе}}(\tau) = \int_{H_2}^{H_1} \frac{d\rho_{\text{КС}}}{dz} dH - \frac{d\rho_N}{dN} \Delta N(\tau) - \dots$$

Методика определения иодной ямы при переходе с одной мощности на другую аналогична определению стационарного отравления. ЯР, проработавший на стационарном уровне N_1 40—50 ч, быстро переводят на уровень N_2 и поддерживают в критическом состоянии перемещением КС, положение которых записывают через определенные промежутки времени в течение 30—40 ч. Используя дифференциальную характеристику КС, строят кривую нестационарного отравления.

Для определения иодной ямы после остановки ЯР мощность снижают до МКУ и поддерживают на этом уровне с помощью КС до полного разотравления. В тот момент, когда КС после перемещения вверх снова возвращаются в исходное на момент остановки положение (с поправкой на температурный и мощностной эффекты), заканчивается иодная яма. Дальнейшее опускание КС компенсирует разотравление ЯР, равное стационарному отравлению Хе для мощности, на которой ЯР работал до остановки. Определяя отравление Хе, необходимо через фиксированные интервалы времени методом разгона измерять дифференциальную эффективность КС, чтобы при построении кривых отравления Хе учесть зависимость эффективности КС от отравления.

Задача с решением

5.6.1. ЯР на тепловых нейтронах (типа ТР, но имеющий $\alpha_N = -1,25 \cdot 10^{-4} 1/\% = \text{const}$) работает в течение 4 сут на мощности 80 % при $\bar{t} = 250^\circ\text{C}$ (см. рис. 2.8.1, кривая IV), $H_{\text{КС},0}^{\text{крит}} = 1000$ мм (см. рис. 3.4.1 и 3.4.2). Для определения $\rho_{\text{и.я}}$ после остановки с 80 % $N_{\text{ном}}$ и проверки $\rho_{\text{оХе}}$ для 80 % $N_{\text{ном}}$ мощность снизили за 6 мин до МКУ, температуру — до 100°C (через 0,1 ч — до 200°C , через 1 ч — до 100°C) и поддерживали эти параметры в течение 62 ч, компенсируя изменение ρ перемещением КС.

Построить кривую иодной ямы, определить ее глубину и длительность, а также $\rho_{\text{оХе}}$, используя полученную зависимость (табл. 5.6.1) изменения $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ во времени.

Таблица 5.6.1

$\tau, \text{ч}$	0	0,1	1	2	4	6	8	10	12
$H_{\text{КС}}^{\text{крит}}, \text{мм}$	920	1000	1020	980	940	920	913	913	920
$\tau, \text{ч}$	16	20	24	28	32	40	48	54	62
$H_{\text{КС}}^{\text{крит}}, \text{мм}$	940	980	1010	1050	1110	1140	1180	1220	1240

Решение. Используя интегральную, а при малых $\Delta H_{\text{КС}} = H_{\text{КС}}^{\text{крит}}(\tau) - H_{\text{КС},0}^{\text{крит}}$ дифференциальную эффективность КС для каждого критического положения, полученного при измерении, определяем изменение ρ во времени по отношению к моменту остановки ЯР: $\Delta \rho_{\Sigma}(H_{\text{КС}}^{\text{крит}}) - \rho_{\Sigma}(H_{\text{КС},0}^{\text{крит}})$ (см. рис. 3.4.2) или $\Delta \rho_{\Sigma} = d\rho_{\Sigma}/dH(H_{\text{КС}}^{\text{крит}} - H_{\text{КС},0}^{\text{крит}})$ (см. рис. 3.4.1). Это изменение происходит вследствие мощностного и температурного эффектов, нестационарного отравления Хе и Sm: $\Delta \rho_{\Sigma} = +\Delta \rho_N + \Delta \rho_t \mp \Delta \rho_{\text{Хе}} - \Delta \rho_{\text{Sm}}$ (табл. 5.6.2).

Таблица 5.6.2

$\tau, \text{ ч}$	0,1	1	2	4	6	8	10	12	
$\Delta H_i, \text{ мм}$	80	100	60	20	0	-7	-7	0	
$\Delta \rho_{\Sigma}, \%$	2,0	2,5	1,5	0,5	0	-0,2	-0,2	0	
$\Delta \rho_N, \%$	1,0	1,0	1,0	3,5					
$\Delta \rho_t, \%$	1,0	2,5	2,5						
$\Delta \rho_{\text{Xe}, \text{ Sm}}, \%$	0	-1,0	-2,0	-3,0	-3,5	-3,65	-3,65	-3,5	
$\tau, \text{ ч}$	16	20	24	28	32	40	48	54	62
$\Delta H_i, \text{ мм}$	20	60	90	130	190	220	260	300	320
$\Delta \rho_{\Sigma}, \%$	0,65	1,35	2,3	3,2	4,6	5,4	6,1	6,7	7,0
$\Delta \rho_N, \%$	3,5								
$\Delta \rho_t, \%$									
$\Delta \rho_{\text{Xe}, \text{ Sm}}, \%$	-2,8	-2,2	-1,3	-0,4	1,1	0,9	2,7	3,4	3,5

Вычитая из $\Delta \rho_{\Sigma}$ температурный и мощностной эффекты, получаем зависимость изменения отравления Xe во времени после остановки ЯР. Отравление Sm к концу измерения, т. е. примерно через один период полураспада Pm ($\tau_{\text{Pm}} = 62 \text{ ч}$; $T_{\text{Pm}} = 53 \text{ ч}$), достигает всего $\Delta \rho_{\text{Sm}} \approx 0,5 \rho_{\text{п.п}}^{80\%} = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2 \%$, и его при построении иодной ямы ($\sim 30 \text{ ч}$) можно не учитывать, а при оценке стационарного отравления Xe отравление Sm надо учесть, прибавив $0,2 \%$ к полученному в табл. 5.6.2 и на графике рис. 5.6.1 результату $+\Delta \rho_{\text{Xe}, \text{ Sm}}$, так как прометиевый провал

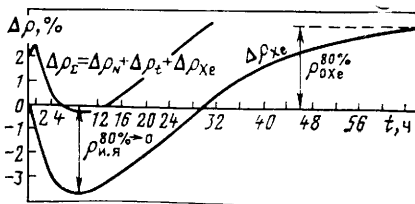


Рис. 5.6.1. К задаче 5.6.1

помогает стержням КС компенсировать разотравление Хе. Построив график нестационарного отравления Хе (см. рис. 5.6.1), определим:

максимальную глубину иодной ямы при остановке с $80\% N_{\text{ном}}$
 $\rho_{\text{и.я}}^{80\%} = -3,65\%$;

время наступления максимального отравления $\tau(\rho_{\text{и.я}}^{\text{макс}}) \approx 9$ ч;

максимальную длительность иодной ямы $\tau_{\text{и.я}}^{\text{макс}} \approx 30$ ч;

время полного разотравления $\tau_{\text{разотр}} \approx 60$ ч;

стационарное отравление на мощности 80%

$$\rho_{0\text{Хе}}^{80\%} = -3,5\% + \rho_{\text{п.п}}(60 \text{ ч}) \approx -3,5\% - 0,2\% = -3,7\%.$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Какие эффекты влияют на точность определения $\rho_{\text{оХе}}$, если измерения проводить: а) после выхода ЯР на стационарную мощность и б) после остановки ЯР во время разотравления?

2. Реактор ТР выведен на МКУ, разогрет до $\bar{t}=250^\circ\text{C}$, $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1150$ мм. Мощность увеличили до $60\% N_{\text{ном}}$ ($\alpha_N \sim 0$) и получили следующую зависимость изменения $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ во времени:

τ , ч	0	1	2	3	5	10	15	20	25	30	35
$H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$, мм	1150	1142	1132	1124	1106	1079	1060	1052	1046	1043	1040

Построить кривую установления стационарного отравления Хе для мощности $60\% N_{\text{ном}}$.

§ 5.7. УТОЧНЕНИЕ КРИВОЙ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ

К концу кампании при небольшом оставшемся $\rho_{\text{зап}}$ (а если кривая энерговыработки имеет сложный характер, то в любой момент кампании) для оценки оставшегося энергозапаса необходимо точно знать характер хода кривой энерговыработки (температура выгорания). Расчетная кривая может существенно отличаться от действительной, причем проверить ее экспериментально, не выработав энергозапаса, невозможно. Только по мере энерговыработки, измеряя изменение $\rho_{\text{зап}}$, можно определить истинное поведение кривой и путем экстраполяции прогнозировать дальнейший ее ход. К концу кампании, когда ВП остается мало, кривая энерговыработки зависит только от скорости выгорания топлива, и линейная экстраполяция на этом участке вполне допустима для оценки темпа выгорания.

Изменение $\rho_{\text{зап}}$ лучше всего определять по изменению в течение кампании критического положения КС при пуске ЯР в холодном разотравленном состоянии: $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = f(Q_R)$. Используя уточ-

ненные на данный момент кампании дифференциальную и интегральную характеристики КС, строят кривую энерговыработки $\rho_K = f(Q_K)$ (см. рис. 2.9.1, 2.9.2). Если в ЯР используется борное регулирование [25], $\rho_{\text{зап}}$, скомпенсированный жидким поглотителем, определяется отдельно.

Задачи с решениями

5.7.1. В холодном разотравленном реакторе ТР к концу кампании $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1010$ мм. После энерговыработки 30 000 МВт·ч при прочих равных условиях $H_{\text{КС}}^{\text{крит}} = 1000$ мм. Определить темп выгорания и оценить оставшийся энергозапас ЯР, если на энерговыработку осталось $\Delta\rho_K = 0,4\%$.

Решение. Темп выгорания на рассматриваемом участке

$$q_p = \Delta\rho / \Delta Q_K = 3 \cdot 10^{-3} / (3 \cdot 10^4) = 10^{-7} \text{ 1/(МВт}\cdot\text{ч)},$$

где $\Delta\rho = \rho_{\Sigma}(1010) - \rho_{\Sigma}(1000) = (d\rho/dH)_{1005}(1010 - 1000) \approx 3 \times 10^{-4} \cdot 10 \approx 3 \cdot 10^{-3}$ — изменение $\rho_{\text{зап}}$, скомпенсированное перемещением КС (см. рис. 3.4.1), за время энерговыработки $\Delta Q_K = 30\,000$ МВт·ч. Оставшийся энергозапас согласно (2.9.3) равен $\Delta Q_{\text{ост}} = 0,4/10^{-5} = 40 \cdot 10^3$ МВт·ч.

5.7.2. ВВЭР 3 сут работает на $N_{\text{ном}} = 1375$ МВт, $H_{\text{РК}}^{\text{крит}} = 125$ см. Через 10 сут $H_{\text{РК}}^{\text{крит}} = 160$ см, а $C_{\text{Н,во}}$ не изменилась. Определить q_p .

Решение. Из рис. 3.4.4 находим

$$\Delta\rho_{\text{зап}} = \Delta\rho_{\text{РК}} = \rho_{\text{РК}}(160) - \rho_{\text{РК}}(125) = 1,4 - 1,1 = 0,3\%.$$

Следовательно, при $\Delta Q_K = 10 \cdot 24 \cdot 1375 = 33 \cdot 10^4$ МВт·ч

$$q_p = 0,3\% / 10 \text{ эф. сут} = 0,03\% / \text{эф.сут} = 0,03 / 33 \cdot 10^4 = \\ = 0,91 \cdot 10^{-7} \% / (\text{МВт}\cdot\text{ч}).$$

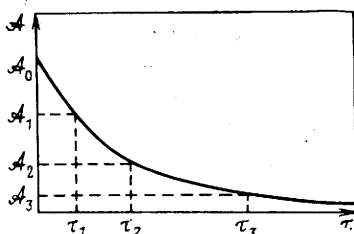
Контрольные вопросы

1. В каких случаях в ЯР без ВП и с ВП q_p может иметь одинаковое значение в различные моменты кампании?
2. Какие эффекты наиболее сильно влияют на ход кривой энерговыработки и в какие периоды кампании это влияние наибольшее?
3. Как построить кривую энерговыработки, используя записи $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$ в различные моменты кампании для различных мощностей и средних температур теплоносителя?

§ 5.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Распределение энерговыделения определяют несколькими методами, в большей или меньшей степени пригодными для разных типов ЯР. Для ЯР на тепловых нейтронах наибольшее распространение получил *активационный метод*. Суть его заключается в следующем: для измерения распределения по высоте активной зоны в одну из гильз АР или АЗ вводится проволока (образец) из материала, хорошо активируемого нейтронами, производящими деление топлива. Можно активировать фольгу, закрепленную через

Рис. 5.8.1. Изменение активности монитора во времени



определенные интервалы на стержне. Выводят ЯР на МКУ. После облучения в течение нескольких минут проволоку извлекают и выдерживают несколько часов, чтобы распались короткоживущие радиоактивные нуклиды, период полураспада которых сравним с временем последующего измерения активности образца по всей высоте. В специальном устройстве измеряют β - или γ -активность по длине проволоки и строят кривую распределения плотности потока нейтронов по высоте.

Активность $A_0(z)$, приведенная к одному моменту времени, т. е. с поправкой на распад в процессе измерения, равна

$$A_0(z) = A_i(z) e^{\lambda t},$$

где $A_i(z)$ — активность участка проволоки с координатой z , измеренная в момент времени t_i после начала измерений; λ — постоянная распада облученного нуклида.

Поправку на распад во время измерения удобно определять экспериментально, используя *монитор* — небольшой образец из того же материала, облучаемый и извлекаемый вместе с проволокой. Наряду с измерениями активности участков проволоки периодически определяется активность монитора и строится кривая изменения его активности во времени (рис. 5.8.1). Умножая измеренную активность проволоки $A_i(z)$ на $A_m(0)/A_m(t)$, получаем $A_0(z)$, отнесенную к началу измерений.

Распределение по радиусу активной зоны можно определять, измеряя интегральную активность идентичных образцов, активируемых в течение одинакового времени на различных расстояниях по радиусу активной зоны.

Недостатки метода активации: сложность организации и продолжительное время измерений, несоответствие полученного распределения активности распределению энерговыделения, так как практически невозможно подобрать образец, сечение активации которого зависит от энергии нейтронов так же, как сечение деления топлива. Последнее обстоятельство требует специальных пересчетов, выполняемых, как правило, на ЭВМ.

Более оперативно можно измерить распределение плотности потока нейтронов в активной зоне с помощью *ионизационной камеры* (ИК) или *счетчика нейтронов*, перемещая их по высоте и размещая на различных расстояниях по радиусу активной зоны в специальных измерительных каналах или гильзах органов регулирования. Недостатки метода: плохая разрешающая способность по высоте при больших размерах ИК и счетчиков и, как и в первом случае, необходимость пересчета распределения плотности потока нейтронов в распределение энерговыделения.

Карту распределения нейтронов по высоте можно получить исходя из *дифференциальной характеристики АР* (легкого поглотителя, не искажающего распределение при погружении в активную зону), используя тот факт, что эффективность стержня при перемещении по высоте изменяется пропорционально квадрату плотности потока нейтронов в месте расположения стержня.

Непосредственно энерговыделение можно измерять *камерой деления*, стенки которой покрыты слоем топлива такого же состава, какое используется в ЯР.

Очень хорошие результаты дает *метод измерения активности* твэлов, извлеченных из активной зоны работавшего ЯР.

Степень жесткости спектра нейтронов оценивают: 1) относительным целым числом делений в надтепловой области (см. задачу 5.8.2); 2) *медианной энергией*, выше и ниже которой происходит 50 % делений (применяется в основном к быстрым и промежуточным ЯР); 3) числом ядер замедлителя, приходящихся на одно ядро делящегося нуклида (например, для водорода при $N_H/N_U \approx 200 \div 500$ устанавливается чисто тепловой спектр, при 50—100 — надтепловой; при менее 20 — промежуточный); 4) *кадмиевым отношением* R_{Cd} , которое представляет собой отношение количества нейтронов, полученных от деления топлива нейтронами всех энергий, к количеству нейтронов, полученных от деления топлива только нейтронами с энергией выше кадмиевой границы поглощения (0,4 эВ), т. е. всеми нейтронами, за исключением тепловых. Чем больше кадмиевое отношение, тем ближе ЯР к теплового. Например, при $R_{Cd} = 1$ в ЯР тепловых нейтронов нет, а при $R_{Cd} > 5$ на долю тепловых нейтронов приходится более 80 %. Измерение R_{Cd} производится методом активации двух одинаковых образцов, активирующихся нейтронами всех энергий, одного — без экрана, второго — в том же месте с кадмиевым экраном.

Современные большие ЯР, для которых характерна динамическая неравномерность (типа ксеноновых волн), должны иметь специальную систему для постоянного контроля энерговыделения в активной зоне. Расположенные в активной зоне детекторы дают возможность с помощью специальной системы фиксировать ухудшение распределения энерговыделения и своевременно предупредить разрушение наиболее энергонапряженных твэлов. В малогабаритных ЯР (типа транспортных) изменение распределения энерговыделения в течение кампании происходит медленно и требует только периодического уточнения.

Изменение распределения плотности потока нейтронов в месте расположения ИК сказывается на точности показаний приборов. Поэтому требуется периодическая *юстировка* камер, т. е. корректировка их расположения с целью приведения в соответствие показаний приборов и действительной тепловой мощности ЯР.

Задачи с решениями

5.8.1. Определить k_2 нейтронного потока по экспериментальной кривой 1 (см. рис. 1.5.2).

Решение. Согласно (1.5.3)

$$k_z = \frac{\Phi_{0z}}{\Phi(z)} = \Phi_{0z} / \frac{1}{H} \int_0^H \Phi(z) dz,$$

где $\Phi(z)$ — распределение плотности потока по высоте на данный момент кампании. Так как кривую $\Phi(z)$, представленную на рис. 1.5.2, практически очень трудно описать аналитически, интеграл обычно берут приближенным методом (по формуле трапеций или Симпсона). Воспользуемся формулой трапеций. Разобьем кривую 1 по высоте на пять участков (чем больше участков, тем точнее результат) размером $\Delta H = 34$ мм и подставим в формулу трапеций значения потоков Φ_i (в относительных единицах) для границ каждого участка:

$$\begin{aligned} \frac{1}{H} \int_0^H \Phi(H) dH &= \frac{1}{H} \left(\frac{\Phi_0 + \Phi_1}{2} \Delta H + \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2} \Delta H + \dots \right. \\ &\dots + \left. \frac{\Phi_4 + \Phi_5}{2} \Delta H \right) = \frac{\Delta H}{2H} (\Phi_0 + 2\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 + 2\Phi_4 + \Phi_5) = \\ &= \frac{34}{2 \cdot 170} (0,70 + 2 \cdot 0,98 + 2 \cdot 0,90 + 2 \cdot 0,49 + 2 \cdot 0,27 + 0,15) = \\ &= 34 \cdot 6,13 / (2 \cdot 170) = 0,61. \end{aligned}$$

Таким образом, $k_z = \Phi_{0z} / \bar{\Phi} = 1/0,61 = 1,64$.

5.8.2. Оценить жесткость спектра в размножающей среде, имеющей $\Phi_6 / \Phi_T = 0,8$, $\bar{\sigma}^T_{f_i} \approx 5 \cdot 10^{-22}$ см², $\bar{\sigma}^6_{f_i} \approx 2 \cdot 10^{-23}$ см².

Решение. Судить о доле быстрых нейтронов в спектре по плотности потока нейтронов нельзя, так как соотношение $\Phi_6 \sim \Phi_T$ может быть справедливым даже при $n_6 \ll n_T$ в связи с тем, что $v_6 \gg v_T$ (см. задачу 1.4.4). Лучшей характеристикой является отношение

$$\Phi_6 \sigma^6_f / (\Phi_T \sigma^T_f + \Phi_6 \sigma^6_f) = \sigma^6_f / (\sigma^T_f + 0,8 \sigma^6_f) = 20/516 = 0,039 \sim 4 \%.$$

Спектр нейтронов довольно мягкий: всего 4 % делений производят быстрые нейтроны.

Контрольные вопросы и задачи

1. Какой способ измерения распределения энерговыделения в активной зоне наиболее точен?
2. Каковы основные причины изменения распределения энерговыделения по активной зоне в течение кампании?
3. Определить k_r , используя экспериментальные кривые, представленные на рис. 1.5.1.

§ 5.9. УТОЧНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Большинство физических характеристик ЯР измеряется с помощью отградуированных поглотителей нейтронов. Поэтому всякое уточнение характеристик в течение кампании предполагает прежде всего уточнение дифференциальных и интегральных эффективностей органов регулирования. Легкие поглотители (типа АР) можно проверить в любой момент кампании одним из рассмотренных выше методов (см. § 5.3), перемещая их на полный рабочий ход. Тяжелые компенсирующие органы, например КС, которые, как правило, используют для измерения других эффектов, можно проверить только на небольшом, строго ограниченном участке перемещения. Тем не менее это дает возможность уточнить полный ход дифференциальной и интегральной характеристик. Для этого необходимо в данном положении КС измерить методом разгона $d\rho_{КС}/dH$ и сравнить ее с полученной в начале кампании $(d\rho_{КС}/dH)_0$, т. е. определить коэффициент утяжеления

$$K_y = \left(\frac{d\rho_{КС}}{dH} \right)_\tau / \left(\frac{d\rho_{КС}}{dH} \right)_0,$$

который позволяет путем экстраполяции построить уточненную дифференциальную, а по ней и интегральную характеристики на данный момент кампании τ :

$$\left(\frac{d\rho_{КС}}{dH} \right)_{H_i}^\tau = K_y \left(\frac{d\rho_{КС}}{dH} \right)_{H_i}^0; \quad \rho_{КС}(H)_\tau = K_y \rho_{КС}(H)_0.$$

Диапазон перемещения КС для проверки его эффективности в данный момент кампании можно увеличить, производя измерения, например, в отравленном ЯР после его остановки или увеличивая концентрацию жидкого ВП в теплоносителе (если он используется). Но при этом результаты измерений нужно откорректировать, учитывая зависимость эффективности данного поглотителя от отравления Хе или от концентрации ВП. Использовать другие поглотители для перекомпенсации нежелательно вследствие интерференции.

Уточненная интегральная характеристика всех КС позволяет определить оставшийся $\rho_{зап}$ ЯР, проверить методом сравнения физические веса легких поглотителей. Если они уже уточнены методом разгона, это дает возможность проверить точность определения K_y . Температурный, мощностной и другие эффекты уточняют по рассмотренным выше методикам (см. § 5.5—5.7). Периодически необходимо также уточнять рабочее положение АР, которое смещается в связи с изменением распределения нейтронов и деформаций интегральной характеристики. На практике не представляет труда установить АР в среднее по эффективности положение на данный момент кампании. Для этого необходимо при работе ЯР на стационарной мощности включить АР в режим автоматического регулирования и опустить (поднять) КС, находящийся-

ся на линейном участке своей характеристики, до положения $H_{КС1}$, при котором АР займет крайнее верхнее (нижнее) положение. После этого поднять (опустить) КС до положения $H_{КС2}$, при котором АР займет другое крайнее положение. Если переместить теперь КС от положения $H_{КС2}$ в сторону $H_{КС1}$ на отрезок 0,5 ($H_{КС2} - H_{КС1}$), то стержень АР автоматически установится в среднее по эффективности положение, от которого он в любую сторону сможет изменить ρ на 0,5 $\rho_{АР}$.

Задача с решением

5.9.1. К концу кампании дифференциальная эффективность 10 КС в положении 800 мм (см. рис. 3.4.1) равна $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1}$. Чему равен на данный момент кампании оставшийся $\rho_{зап}$ при $H_{КС}^{крит} = 700 \text{ мм}$? Какую подкритичность создают КС при полном погружении в активную зону?

Решение. По графику рис. 3.4.1 для 10 КС находим $(d\rho_{\Sigma}/dH)_0 = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1}$. Таким образом, $K_y = 2,3 \cdot 10^{-4} / (1,9 \times 10^{-4}) = 1,21$. По графику рис. 3.4.2 определяем при $H_{КС}^{крит} = 700 \text{ мм}$ $(\Delta\rho_{зап})_0 = 2,1 \%$ и полный физический вес КС $\rho_{\Sigma_0} = 15 \%$. Следовательно, на данный момент кампании $(\Delta\rho_{зап})_{\tau} = 1,21 \cdot 2,1 = 2,5 \%$ и $\rho_{под} = K_y \rho_{\Sigma_0} - (\Delta\rho_{зап})_{\tau} = 1,22 \cdot 15 - 2,5 = 18,2 - 2,5 = 15,7 \%$.

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена необходимость уточнения физических характеристик ЯР в течение кампании?
2. Что такое коэффициент утяжеления КС?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 Некоторые единицы измерения в СИ и их связь с единицами других систем

Величина	Единица измерения в СИ	Соотношения между единицами
Длина	м	$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см}$; $1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$
Скорость	м/с	$1 \text{ м/с} = 10^2 \text{ см/с} = 3,6 \text{ км/ч}$; $1 \text{ см/с} = 10^{-2} \text{ м/с} = 0,036 \text{ км/ч}$
Сила	Н	$1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$ (см. прилож. 2)
Работа, энергия	Дж	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ (см. прилож. 3 и 4)
Мощность	Вт	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ (см. прилож. 5)
Температура	К	$T \text{ К} = 273,15 + t \text{ }^\circ\text{C}$; $t \text{ }^\circ\text{C} = T \text{ К} - 273,15$
Плотность	кг/м ³	$1 \text{ кг/м}^3 = 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $1 \text{ г/см}^3 = 10^3 \text{ кг/м}^3$
Давление	Па	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ (см. прилож. 6)
Расход жидкости	кг/с	$1 \text{ кг/с} = 3,6 \text{ т/ч}$; $1 \text{ т/ч} = 0,28 \text{ кг/с}$
Тепловой поток	Вт	$1 \text{ Вт} = 0,860 \text{ ккал/ч}$; $1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$
Поверхностная плотность теплового потока	Вт/м ²	$1 \text{ Вт/м}^2 = 0,860 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)}$; $1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)} = 1,163 \text{ Вт/м}^2$
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	$1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; $1 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 4,186 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$
Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи	Вт/(м ² ·К)	$1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} = 0,860 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; $1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 1,163 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	$1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} = 0,860 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$ (см. прилож. 7)
Удельная энтальпия	Дж/кг	$1 \text{ Дж/кг} = 0,239 \text{ кал/кг}$; $1 \text{ ккал/кг} = 4,19 \text{ кДж/кг}$
Плотность нейтронов	нейтр/м ³	$1 \text{ нейтр/м}^3 = 10^{-6} \text{ нейтр/см}^3$; $1 \text{ нейтр/см}^3 = 10^6 \text{ нейтр/м}^3$
Плотность потока нейтронов	нейтр/(м ² ·с)	$1 \text{ нейтр/(м}^2 \cdot \text{с)} = 10^{-4} \text{ нейтр/(см}^2 \cdot \text{с)}$; $1 \text{ нейтр/(см}^2 \cdot \text{с)} = 10^4 \text{ нейтр/(м}^2 \cdot \text{с)}$
Интенсивность излучения	Вт/м ²	$1 \text{ Вт/м}^2 = 6,25 \cdot 10^8 \text{ МэВ/(см}^2 \cdot \text{с)}$; $1 \text{ МэВ/(см}^2 \cdot \text{с)} = 1,60 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^2$

В основу СИ положены семь основных (метр — м, килограмм — кг, секунда — с, ампер — А, кельвин — К, кандела — кд, моль), две дополнительные (радиан — рад, стерадиан — стер) и 27 производных единиц.

СИ разбивается на ряд подсистем: МКС (м, кг, с) — для механических величин, МКСА (м, кг, с, А) — для электрических и магнитных величин, МКСГ (м, кг, с, К) — для тепловых величин и МСК (м, с, кд) — для световых величин.

Единицы силы

Единица измерения	Н	дин	кгс	гс
Н	1	10^5	0,102	102
дин	10^{-5}	1	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
кгс	9,81	$9,81 \cdot 10^5$	1	10^3
гс	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	1

Приложение 3

Единицы энергии, количества теплоты, работы

Единица измерения	Дж	эВ	кВт·ч	кгс·м	ккал	Б. Т. Е.
Дж	1	$6,242 \cdot 10^{19}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,102	$23,9 \cdot 10^{-5}$	$9,48 \cdot 10^{-4}$
эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$	1	$4,44 \cdot 10^{-26}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$	$3,8 \cdot 10^{-23}$	$1,5 \cdot 10^{-22}$
кВт·ч	$3,6 \cdot 10^6$	$2,25 \cdot 10^{25}$	1	$3,67 \cdot 10^5$	860	$3,41 \cdot 10^3$
кгс·м	9,81	$6,12 \cdot 10^{19}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	1	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$9,28 \cdot 10^{-3}$
ккал	$4,19 \cdot 10^3$	$2,61 \cdot 10^{22}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	427	1	3,969
Б. Т. Е.	1055	$6,58 \cdot 10^{21}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	107,6	0,252	1

Примечание. 1 мвт·ч=3,6 МДж (точно)= $3,6 \cdot 10^{13}$ эрг=367 098 кгс·м= $224,71 \times 10^{23}$ эВ=859,845 ккал;

1 ккал=4186,8 Дж (точно)=426,935 кгс·м= $2,6147 \cdot 10^{22}$ эВ= $1,163 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч;

1 кгс·м=9,80665 Дж (точно)= $2,72407 \cdot 10^{-6}$ кВт= $2,34228$ кал;

1 эВ= $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж= $4,4502 \cdot 10^{-6}$ кВт·ч;

1 Q=1,055 · 10²¹ Дж=2,52 · 10¹⁷ ккал=2,93 · 10¹⁴ кВт·ч=36 · 10⁹ т у. т.;

1 т у. т.=7000 ккал=29,3 МДж= $27,8 \cdot 10^{-12}$ Q.

Единицы массы и энергии

Единица измерения	эрг	Дж	эВ	а. е. м.	г
эрг	1	10^{-7}	$6,24 \cdot 10^{11}$	$6,71 \cdot 10^3$	$1,11 \cdot 10^{-21}$
Дж	10^7	1	$6,24 \cdot 10^{18}$	$6,71 \cdot 10^9$	$1,11 \cdot 10^{-14}$
эВ	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,602 \cdot 10^{-19}$	1	$1,074 \cdot 10^{-9}$	$1,78 \cdot 10^{-33}$
а. е. м.	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$931,12 \cdot 10^6$	1	$1,66 \cdot 10^{-24}$
г	$8,987 \cdot 10^{20}$	$8,987 \cdot 10^{13}$	$5,609 \cdot 10^{32}$	$6,02 \cdot 10^{23}$	1

Единицы мощности

Единица измерения	эрг/с	Вт (Дж/с)	МэВ/с	кгс·м/с	л. с.	ккал/ч
эрг/с	1	10^{-7}	$6,25 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-10}$	$8,61 \cdot 10^{-8}$
Вт (Дж/с)	10^7	1	$6,25 \cdot 10^{12}$	0,102	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,861
МэВ/с	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$	1	$1,63 \cdot 10^{-14}$	$2,176 \cdot 10^{-16}$	$13,77 \cdot 10^{-14}$
кгс·м/с	$9,81 \cdot 10^7$	9,81	$61,4 \cdot 10^{12}$	1	$1,33 \cdot 10^{-2}$	8,45
л. с.	$7,36 \cdot 10^9$	736	$4,6 \cdot 10^{15}$	75	1	633
ккал/ч	$1,16 \cdot 10^7$	1,16	$7,26 \cdot 10^{12}$	0,118	$1,58 \cdot 10^{-3}$	1

Примечание. 1 Вт = 0,101972 кгс·м/с = $1,3596 \cdot 10^{-3}$ л. с. = 0,238846 ккал/с;
 1 кгс·м/с = 9,80665 Вт (точно);
 1 л. с. = 735,499 Вт = 75 кгс·м/с = 270 000 кгс·м/ч;
 1 ккал/с = 4,1868 Вт (точно) = 0,0426935 кгс·м/с.

Приложение 6

Единицы давления

Единица измерения	Па (Н/м ²)	бар	ат (техн.), кгс/см ²	атм (физ.)
Па	1	10 ⁻⁵	1,02 · 10 ⁻⁵	0,987 · 10 ⁻⁵
бар	10 ⁵	1	1,02	0,987
ат (техн.), кгс/см ²	9,81 · 10 ⁴	0,981	1	0,968
атм (физ.)	1,013 · 10 ⁵	1,013	1,033	1
мм вод. ст., кгс/см ²	9,81	9,81 · 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9,68 · 10 ⁻⁵
мм рт. ст	133,3	1,33 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ⁻³	1,31 · 10 ⁻³
фунт/фут ²	47,87	47,87 · 10 ⁻⁵	4,88 · 10 ⁻⁴	4,72 · 10 ⁻⁴
фунт/дюйм ²	68,9 · 10 ³	0,069	0,070	0,068

Единица измерения	мм вод. ст., кгс/см ²	мм рт. ст.	фунт/фут ²	фунт/дюйм ²
Па	0,102	7,5 · 10 ⁻³	21 · 10 ⁻³	14,5 · 10 ⁻⁵
бар	1,02 · 10 ⁴	750	21 · 10 ³	14,5
ат (техн.), кгс/см ²	10 ⁴	736	2048	14,22
атм (физ.)	1,033 · 10 ⁴	760	2177	14,7
мм вод. ст., кгс/см ²	1	7,36 · 10 ⁻²	0,205	1,4 · 10 ⁻³
мм рт. ст	13,6	1	2,785	19,3 · 10 ⁻³
фунт/фут ²	4,88	0,359	1	6,94 · 10 ⁻³
фунт/дюйм ²	703	51,71	144	1

Приложение 7

Единицы теплопроводности

Единица измерения	Вт/(м·°С)	ккал/(м·ч·°С)	кал/(см·с·°С)	Б. Т. Е./ /(фут·ч·°F)
Вт/(м·°С)	1	0,860	2,39 · 10 ⁻³	0,578
ккал/(м·ч·°С)	1,163	1	2,78 · 10 ⁻³	0,672
кал/(см·с·°С)	418,6	360	1	241,9
Б. Т. Е./ (фут·ч·°F)	1,73	1,48	4,13 · 10 ⁻³	1

Приложение 8

Константы деления для тепловой энергии

Нуклид	$\sigma_a, 10^{-24} \text{ см}^2$	$\sigma_f, 10^{-24} \text{ см}^2$	$\alpha = \sigma_v / \sigma_f$	ν	$\nu_{эф}$
²³⁵ U	683	582	0,174	2,54	2,08
²³⁹ Pu	1028	742	0,39	3,02	2,08
²³³ U	578	525	0,10	2,62	2,31
Природный уран	7,68	4,18	—	—	1,34

Примечание. Сечение деления ²³⁵U быстрыми нейтронами равно ~ 2,75 · 10⁻²⁴ см².

Параметр $\alpha = \sigma_f / \sigma_{\text{ш}}$ как функция энергии нейтронов (приближенные значения)

Нуклид	Энергия, кэВ							
	25·10 ⁻⁶	0,1	1	10	30	100	250	900
²³³ ₉₂ U	0,12	0,12	—	—	0,15	0,05	0,04	Очень малая
²³⁵ ₉₂ U	0,17	0,52	0,48	0,35	0,35	0,13	0,12	0,08
²³⁹ ₉₄ Pu	0,42	0,72	0,60	0,43	0,45	0,18	—	—

Приложение 10

Сечение захвата ($2\bar{\sigma}_{\text{ш}}$) шлаков одного ядра ²³⁵U (приближенные значения)

Параметр	Энергия, эВ				
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
$2\bar{\sigma}_{\text{ш}}, 10^{-24} \text{ см}^2$	15,4	2,8	0,49	0,11	0,09
$\bar{\sigma}_f (^{235}\text{U}), 10^{-24} \text{ см}^2$	23	8,5	3,8	1,7	1,3
$\bar{\sigma}_f / 2\bar{\sigma}_{\text{ш}}$	1,5	3,0	7,8	15,5	14,4

Примечание. Для тепловой энергии $\sigma_f (^{235}\text{U}) = 582 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, $[2\bar{\sigma}_{\text{ш}} = 50 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ (без ¹³⁵Xe) и $2\bar{\sigma}_{\text{ш}} = 40 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ (без ¹³⁵Xe и ¹⁴⁹Sm); $\sigma_f / 2\bar{\sigma}_{\text{ш}} = 11,6$ (без ¹³⁵Xe) и $14,5$ (без ¹³⁵Xe и ¹⁴⁹Sm).

Массы некоторых нуклидов (атомов)

Приложение 11

Изотоп	Масса, а. е. м.	Изотоп	Масса, а. е. м.	Изотоп	Масса, а. е. м.
¹ ₀ n	1,00866	¹³ ₆ C	13,00335	⁴⁰ ₂₀ Ca	39,96259
¹ ₁ p	1,00727	¹³ ₇ N	13,00574	⁵⁹ ₂₇ Co	58,93319
¹ ₁ H	1,00782	¹⁴ ₇ N	14,00324	⁸⁹ ₃₉ Y	88,90543
² ₁ H (² D)	2,01410	¹⁵ ₇ N	15,00010	¹¹³ ₄₈ Cd	112,90461
³ ₁ H (³ T)	3,01605	¹⁶ ₇ N	16,00609	¹⁴⁴ ₆₀ Nd	143,90990
³ ₂ He	3,01603	¹⁷ ₇ N	17,00845	²⁰⁰ ₈₀ Hg	199,96834
⁴ ₂ He	4,00260	¹⁶ ₈ O	15,99491	²³² ₉₀ Th	232,03821
⁶ ₃ Li	6,01512	¹⁷ ₈ O	16,99913	²³³ ₉₂ U	233,03950
⁷ ₃ Li	7,01600	¹⁸ ₈ O	17,99916	²³⁵ ₉₂ U	235,04393
⁸ ₄ Be	8,00531	¹⁹ ₈ O	19,00357	²³⁶ ₉₂ U	236,04573
⁹ ₄ Be	9,01218	²⁷ ₁₃ Al	26,98153	²³⁸ ₉₂ U	238,05076
¹² ₆ C	12,00000	²⁸ ₁₄ Si	27,97693	²³⁹ ₉₄ Pu	239,05216

Характеристика запаздывающих нейтронов

Номер группы	T, с	τ, с	E _n , кэВ	Выход запаздывающих нейтронов на деление, 10 ⁻²				
				²³³ U	²³⁵ U	²³⁹ Pu	²³² Th	²³⁸ U
1	54—56	78—81	250	0,06	0,05	0,02	0,17	0,05
2	21—23	30—33	560	0,20	0,35	0,18	0,74	0,56
3	5—6	7,2—8,7	430	0,17	0,31	0,13	0,77	0,67
4	1,9—2,3	2,7—3,3	620	0,18	0,62	0,20	2,21	1,60
5	0,5—0,6	0,7—0,9	420	0,03	0,18	0,05	0,85	0,93
6	0,17—0,27	0,25—0,39		0,02	0,07	0,03	0,21	0,31
Полное число запаздывающих нейтронов на одно деление, 10 ⁻²				0,66	1,58	0,61	4,95	4,12
Доля запаздывающих нейтронов β, %				0,26	0,64	0,21	2,2	1,57

Приложение 13

Спектр нейтронов, возникающих при делении ядра ²³⁵U

Номер группы	Энергетический интервал, МэВ	Средняя энергия, МэВ	Относительное число нейтронов в группе	Номер группы	Энергетический интервал, МэВ	Средняя энергия, МэВ	Относительное число нейтронов в группе
1	0—1	0,5	0,3082	1	0—2	1	0,6028
2	1—2	1,5	0,2946	2	2—4	3	0,2886
3	2—3	2,5	0,1848	3	4—6	5	0,0825
4	3—4	3,5	0,1038	4	6—8	7	0,0204
5	4—6	5,0	0,0825	5	>8	>8	0,0057
6	6—8	7,0	0,0204	Итого			1,0000
7	8—10	9,0	0,0045	1	0—4	2	0,8914
8	>10	>10	0,0012	2	>4	>4	0,1086
Итого			1,0000	Итого			1,0000

Приложение 14

Спектр γ-излучения, возникающего при делении ядра ²³⁵U

Номер группы	Энергетический интервал, МэВ	Средняя энергия γ-кванта, МэВ	Число γ-квантов на одно деление ν _{γi}	Полная энергия на одно деление, МэВ
1	0—2	1	9,31	9,31
2	2—4	3	0,75	2,25

Номер группы	Энергетический интервал, МэВ	Средняя энергия γ -кванта, МэВ	Число γ -квантов на одно деление γ_i	Полная энергия на одно деление, МэВ
3	4—6	5	0,099	0,495
4	6—8	7	0,0154	0,1078
5	8—10	9	0,0029	0,0241
Итого			10,1773	12,2
1	0—10	2,5	5	12,5

Приложение 15

Захватное γ -излучение для некоторых элементов

Элемент	σ_{γ} , 10^{-24} см ²		Число γ -квантов, испускаемых в указанном интервале энергий на 100 захватов с энергией				Максимальная энергия γ -квантов, МэВ
	на тепловых нейтронах	на надтепловых нейтронах	1—3 МэВ	3—5 МэВ	5—7 МэВ	>7 МэВ	
Водород	0,33	—	100	0	0	0	2,23
Бериллий	0,009	—	0	54	73	0	6,81
Углерод	0,0033	—	0	100	0	0	4,95
Железо	2,43	2,1	87	23	25	38	10,16
Хром	2,0	1,9	62	12	23	39	9,72
Никель	4,8	3,2	63	23	34	62	8,99
Марганец	12,6	11,7	151	50	34	17	9,72
Титан	5,8	3,8	176	24	78	1	9,39
Свинец	0,17	0,10	0	0	7	93	7,38

Приложение 16

Активация воздуха вблизи реактора

Активирующий элемент	Объемное содержание в воздухе, %	Реакция активации	Сечение реакции, 10^{-24} см ²	Период полураспада	Энергия, МэВ (вид излучения)
Аргон	0,94	$^{40}_{18}\text{Ar}(n, \gamma) ^{41}_{18}\text{Ar}$	0,53	109 мин	1,2—2,5 (β) 1,37 (γ)
Кислород	20,99	На быстрых нейтронах $^{16}_8\text{O}(n, p) ^{16}_7\text{N}$	$16 \cdot 10^{-6}$	7,35 с	3,8—10,5 (β) 6,05—7,1 (γ)
		На тепловых нейтронах $^{18}_8\text{O}(n, \gamma) ^{19}_8\text{O}$	$21 \cdot 10^{-5}$	29,4 с	2,9—4,5 (β) 1,2 (γ)
Азот	78,03	$^{15}_7\text{N}(n, \gamma) ^{16}_7\text{N}$	$24 \cdot 10^{-3}$	7,35 с	3,8—10,5 (β) 6,05—7,1 (γ)
Неон	0,0012	$^{22}_{10}\text{Ne}(n, \gamma) ^{23}_{10}\text{Ne}$	$4 \cdot 10^{-5}$	40 с	1,2—4,2 (β) 1,4 (γ)

Активирующийся элемент	Реакция активации	Распространенность исходного нуклида, %	Сечение реакции, 10^{-24} см ²	Период полураспада	Энергия, МэВ (вид излучения)
Кислород	$^{16}_8\text{O}(n, p)^{16}_7\text{N}$	99,76	$1,9 \cdot 10^{-5}$	7,35 с	3,3—10,5 (β) 6,1—7,1 (γ)
	$^{17}_8\text{O}(n, p)^{17}_7\text{N}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	4,14 с	3,7 (β)
	$^{18}_8\text{O}(n, \gamma)^{18}_8\text{O}$	0,204	$0,21 \cdot 10^{-3}$	29,4 с	3,2—4,6 (β); 0,2—1,3 (γ)
Аргон	$^{40}_{18}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}_{18}\text{Ar}$	99,60	0,53	109 мин	1,2—2,5 (β); 1,3 (γ)
Натрий	$^{23}_{11}\text{Na}(n, \gamma)^{24}_{11}\text{Na}$	100	0,536	14,97 ч	1,39 (β); 1,4—2,8 (γ)
Магний	$^{26}_{12}\text{Mg}(n, \gamma)^{27}_{12}\text{Mg}$	11,29	0,027	9,45 мин	1,6—1,7 (β); 0,8—1,0 (γ)
Кальций	$^{44}_{20}\text{Ca}(n, \gamma)^{45}_{20}\text{Ca}$	2,06	0,67	164 сут	0,25 (β)
	$^{46}_{20}\text{Ca}(n, \gamma)^{47}_{20}\text{Ca}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,25	4,7 сут	0,6—1,9 (β); 0,4—3,1 (γ)
	$^{48}_{20}\text{Ca}(n, \gamma)^{49}_{20}\text{Ca}$	0,185	1,10	8,8 мин	0,4—0,9 (β); 4,0—4,7 (γ)

Характеристика основных нуклидов, определяющих активацию морского юды

Активирующийся элемент	Реакция активации	Содержание исходного изотопа в природной смеси, %	$N_{\text{Я}}^i, \text{м}^{-3}$	$\sigma_a^i, 10^{-24}$ см ²	$\Sigma_a^i = \sigma_a^i N_{\text{Я}}^i, \text{м}^{-1}$	Постоянная распада $\lambda_i, \text{с}^{-1}$	Энергия и выход γ-квантов, МэВ (% на распад)
Натрий	$^{23}_{11}\text{Na}(n, \gamma)^{24}_{11}\text{Na}$	100	$2,77 \cdot 10^{26}$	0,536	$148 \cdot 10^{-4}$	$12,86 \cdot 10^{-6}$	2,75 (100)
Хлор	$^{37}_{17}\text{Cl}(n, \gamma)^{38}_{17}\text{Cl}$	24,6	$0,805 \cdot 10^{26}$	0,56	$45 \cdot 10^{-4}$	$309,8 \cdot 10^{-6}$	2,16 (47,0) 1,60 (31,0)

Примечание. Для морской воды $\Sigma = \Sigma_a^{H_2O} + \Sigma_a^N + \Sigma_a^{Cl} = 2 \cdot 2 + 14,8 \cdot 10^{-8} + 4,5 \cdot 10^{-3} \approx 2,22 \text{ м}^{-1}$.

290 Периоды полураспада некоторых радиоактивных нуклидов а) β-распад (α-распад)

Нуклид	Период полураспада	Нуклид	Период полураспада	Нуклид	Период полураспада
$^{11}_6\text{C}$	20,5 мин	$^{56}_{25}\text{Mn}$	2,58 ч	$^{135}_{54}\text{Xe}$	9,2 ч
$^{14}_6\text{C}$	55,7 года	$^{60}_{27}\text{Co}$	5,27 года	$^{140}_{56}\text{Ba}$	12,8 сут
$^{16}_7\text{N}$	7,35 с	$^{65}_{30}\text{Zr}$	250 сут	$^{149}_{61}\text{Pm}$	53 ч
$^{16}_8\text{O}$	29,4 с	$^{89}_{38}\text{Sr}$	51 сут	$^{166}_{66}\text{Dy}$	80,2 ч
$^{24}_{11}\text{Na}$	15,06 ч	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28 лет	$^{203}_{80}\text{Hg}$	47,9 сут
$^{38}_{17}\text{Cl}$	37,3 мин	$^{108}_{47}\text{Ag}$	2,3 мин	$^{210}_{83}\text{Bi}$	4,97 сут
$^{41}_{18}\text{Ar}$	1,82 ч	$^{116}_{49}\text{In}$	13 с	$^{210}_{84}\text{Po}$	138,4 сут (α)
$^{40}_{19}\text{K}$	1,28·10 ⁹ лет	$^{135}_{53}\text{I}$	6,7 ч	$^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 лет (α)

б) спонтанное деление и α-распад

Нуклид	Скорость деления, дел/(г·с)	Период полураспада α-распада	Нуклид	Скорость деления, дел/(г·с)	Период полураспада α-распада
$^{232}_{90}\text{Th}$	4,08·10 ⁻⁵	1,39·10 ¹⁰ лет	$^{240}_{94}\text{Pu}$	4,6·10 ²	6580 лет
$^{233}_{92}\text{U}$	<1,90·10 ⁻⁴	1,62·10 ⁵ лет	$^{240}_{96}\text{Cm}$	2,9·10 ⁷	26,8 сут
$^{234}_{92}\text{U}$	3,54·10 ⁻³	2,48·10 ⁵ лет	$^{244}_{96}\text{Cm}$	3,89·10 ⁵	18 лет
$^{235}_{92}\text{U}$	3,13·10 ⁻⁴	7,13·10 ⁸ лет	$^{246}_{98}\text{Cf}$	2,56·10 ¹⁰	1,5 сут
$^{238}_{92}\text{U}$	6,96·10 ⁻³	4,51·10 ⁹ лет	$^{248}_{98}\text{Cf}$	7,63·10 ⁹	225 сут
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,01·10 ⁻²	2,4·10 ⁴ лет	$^{252}_{98}\text{Cf}$	7,97·10 ¹¹	2,2 года

Характеристика (α , n)-источников

Источник	Выход, нейтр/с	Период полураспада	Число γ -квантов на один нейтрон	Энергия α -частиц, МэВ
Ra-Be	1,7 · 10 ⁷	1620 лет	~ 10 ⁴	4,6—7,6
Rn-Be	1,5 · 10 ⁷	138 сут	1	5,4
Po-Be	3 · 10 ⁶	24 400 лет	—	5,29
Pu-Be	1,7 · 10 ⁶	1620 лет	—	4,6—7,6
Ra-B	6,8 · 10 ⁵	138 сут	—	5,2
Po-B	9 · 10 ⁵			

Приложение 21

Некоторые параметры воды и пара при температуре насыщения для различного давления.

Параметры критического состояния: $t_{кр}=374,15^\circ\text{C}$; $P_{кр}=225,65 \text{ кгс/см}^2$; $v_{кр}=0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}$; $t_{кр}=501,5 \text{ ккал/кг}$

P , кгс/см ²	t_s , °C	v' , 10 ⁻³ м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	t' , ккал/кг	t'' , ккал/кг	r , ккал/кг	P , кгс/см ²	t_s , °C	v' , 10 ⁻³ м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	t' , ккал/кг	t'' , ккал/кг	r , ккал/кг
0,01	6,7	1,0	131,6	7,0	600	593	120	323,1	1,5	14,6	354	643	289
0,1	45,5	1,0	14,9	45	617	571	140	335,1	1,6	11,8	373	632	259
1,0	99,1	1,0	1,7	99	639	539	160	345,7	1,7	9,6	391	619	227
10	179,0	1,1	0,2	181	663	482	180	355,4	1,8	7,8	410	602	192
50	262,7	1,3	0,04	274	668	393	200	364,0	2,0	6,2	431	581	150
100	309,5	1,4	0,018	334	652	317	220	372,1	2,4	4,4	462	542	80

Обозначения: P —давление; t_s —температура насыщения при данном давлении; v' , v'' —удельный объем кипящей воды и сухого насыщенного пара; t' , t'' —энтальпия кипящей воды и сухого насыщенного пара; r —скрытая теплота парообразования.

29 Зависимость энтальпии воды от температуры и давления

°C	Энтальпия воды (ккал/кг) при давлении P (кгс/см ²), равном										
	1,0	10	50	100	120	140	150	160	180	200	220
0	0,0	0,2	1,2	2,4	2,9	3,3	3,6	3,8	4,3	4,7	5,2
10	10,1	10,3	11,2	12,3	12,7	13,2	13,4	13,6	14,1	14,6	15,0
20	20,1	20,3	21,1	22,2	22,7	23,1	23,3	23,5	24,0	24,4	24,8
40	40,0	40,2	41,0	42,1	42,5	42,9	43,1	43,3	43,7	44,1	44,5
60	60,0	60,1	60,9	61,9	62,3	62,7	62,9	63,1	63,5	63,8	64,2
80	80,0	80,1	80,9	81,8	82,2	82,5	82,7	82,9	83,3	83,7	84,0
100	639,2	100,2	100,9	101,8	102,1	102,5	102,7	102,9	103,2	103,6	103,9
120		120,4	121,1	121,9	122,2	122,6	122,7	122,9	123,2	123,6	123,9
140		140,7	141,4	142,1	142,4	142,8	142,2	143,1	143,3	143,7	144,0
160		161,3	161,8	162,5	162,8	163,1	163,9	163,4	163,6	163,9	164,2
180		663,8	182,6	183,2	183,5	183,7	183,8	183,9	184,2	184,4	184,7
200			203,8	204,3	204,5	204,7	204,8	204,9	205,1	205,3	205,4
220			225,5	225,8	225,9	226,1	226,1	226,2	226,3	226,5	226,6
240			247,3	247,9	248,0	248,0	248,0	248,1	248,2	248,2	248,3
260			271,1	270,9	270,8	270,8	270,8	270,7	270,8	270,7	270,7
280				294,9	294,6	294,5	294,4	294,4	294,2	294,0	293,9
300				320,7	320,1	319,5	319,3	319,1	318,7	318,4	318,0
320					348,8	347,5	346,9	346,4	345,5	344,7	344,2
340							380,8	379,4	376,9	375,0	373,5
350							647,6	630,0	396,5	393,1	390,1

$$1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 239 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$$

Зависимость энтальпии пара от температуры и давления

Энтальпия пара (ккал/кг) при давлении P (кгс/см²), равном

$t, ^\circ\text{C}$	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
220	682	680	677	674	672	672				
224	684	682	679	677	675	675				
228	687	684	682	680	678	676	672			
230	688	686	683	681	678	676	673	670	671	
234	690	688	685	684	681	679	676	673	674	671
238	692	690	688	686	683	681	679	676	675	672
240	694	691	689	687	685	681	680	678	678	675
244	695	694	691	689	687	685	683	681	681	678
248	697	696	694	692	689	688	686	685	682	680
250	699	697	695	693	691	689	687	685	682	680
254	701	699	697	695	693	691	689	687	685	682
258	703	701	700	698	696	694	692	690	688	685
260	704	702	701	699	697	695	693	691	689	687
264	706	705	703	701	699	697	695	694	692	689
268	708	707	705	704	702	700	698	696	694	692
270	709	708	706	705	703	701	699	698	696	694
274	712	710	708	707	705	704	701	700	698	696
278	714	712	711	709	708	706	704	703	701	699
280	715	713	712	710	709	707	705	704	702	700
284	717	716	715	713	712	709	708	707	705	703
288	719	718	716	715	713	712	710	709	707	705
290	720	719	717	716	715	713	711	710	708	707
294	722	721	720	719	718	715	714	713	711	709
298	724	723	722	720	719	718	716	715	713	712
300	725	724	723	721	720	719	717	716	714	713
310	731	729	728	727	726	724	723	722	720	719
320	736	735	734	732	731	730	729	727	726	725

Зависимость удельного объема воды от температуры и давления

t, °C	Удельный объем воды (см³/г) при давлении P (кгс/см²), равном									
	1,0	5,0	10	50	100	120	140	180	200	220
0	1,0002	0,9999	0,9997	0,9977	0,9952	0,9943	0,9933	0,9914	0,9905	0,9896
10	1,0003	1,0001	0,9999	0,9981	0,9958	0,9949	0,9940	0,9922	0,9914	0,9905
20	1,0018	1,0016	1,0014	0,9997	0,9975	0,9966	0,9958	0,9941	0,9933	0,9924
40	1,0079	1,0077	1,0075	1,0058	1,0036	1,0028	1,0019	1,0003	0,9995	0,9986
60	1,0170	1,0168	1,0166	1,0148	1,0126	1,0117	1,0109	1,0092	1,0083	1,0075
80	1,0289	1,0287	1,0285	1,0266	1,0243	1,0234	1,0225	1,0207	1,0198	1,0190
100	1,0430	1,0433	1,0430	1,0409	1,0384	1,0375	1,0365	1,0347	1,0337	1,0328
120	1,0599	1,0601	1,0599	1,0577	1,0550	1,0540	1,0529	1,0508	1,0498	1,0488
140	1,0794	1,0797	1,0794	1,0770	1,0740	1,0728	1,0717	1,0694	1,0682	1,0671
160	1,1018	391,7	1,1018	1,0990	1,0957	1,0943	1,0930	1,0905	1,0892	1,0879
180	198,7		198,7	1,1243	1,1203	1,1188	1,1172	1,1143	1,1128	1,1113
200				1,1532	1,1485	1,1466	1,1448	1,1412	1,1395	1,1379
220				1,1868	1,1810	1,1788	1,1766	1,1722	1,1701	1,1680
240				1,2266	1,2192	1,2163	1,2136	1,2082	1,2055	1,2029
260				1,2751	1,2650	1,2613	1,2576	1,2506	1,2472	1,2439
280				1,3222	1,3118	1,3169	1,3118	1,3023	1,2977	1,2933
300				1,3979	1,3897	1,3897	1,3820	1,3678	1,3612	1,3549
320				1,495	1,481	1,481	1,457	1,446	1,446	1,436
340							12,53	1,596	1,573	1,554
360							8,62	1,841	1,841	1,768

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Таблица значений функций e^{-x} и e^x

x	e^{-x}	e^x	x	e^{-x}	e^x	x	e^{-x}	e^x	x	e^{-x}	e^x
0,01	0,990	1,010	0,3	0,741	1,35	1,4	0,247	4,06	2,5	0,082	12,2
0,02	0,980	1,020	0,4	0,670	1,49	1,5	0,223	4,48	3,0	0,050	20,1
0,03	0,970	1,030	0,5	0,607	1,65	1,6	0,202	4,95	3,5	0,030	33,1
0,04	0,961	1,041	0,6	0,549	1,82	1,7	0,183	5,47	4,0	0,018	54,6
0,05	0,951	1,051	0,7	0,497	2,01	1,8	0,165	6,05	5,0	$6,7 \cdot 10^{-3}$	149
0,06	0,942	1,062	0,8	0,449	2,23	1,9	0,150	6,69	6,0	$2,5 \cdot 10^{-3}$	403
0,07	0,932	1,072	0,9	0,407	2,46	2,0	0,135	7,39	7,0	$9,1 \cdot 10^{-4}$	1096
0,08	0,923	1,083	1,0	0,368	2,72	2,1	0,123	8,17	8,0	$3,4 \cdot 10^{-4}$	2980
0,09	0,914	1,09	1,1	0,333	3,00	2,2	0,111	9,03	9,0	$1,2 \cdot 10^{-4}$	8100
0,1	0,905	1,11	1,2	0,301	3,32	2,3	0,100	9,97	10,0	$4,5 \cdot 10^{-5}$	22 000
0,2	0,818	1,22	1,3	0,273	3,67	2,4	0,091	11,0			

Примечание. Промежуточные значения можно определить так: $e^x = e^{x_1 \pm x_2} = e^{x_1} \times e^{\pm x_2}$.

Таблица значений функций 2^x и 2^{-x}

x	2^x	2^{-x}	x	2^x	2^{-x}	x	2^x	2^{-x}
0,01	1,007	0,993	1,25	2,378	0,418	2,8	6,94	0,144
0,02	1,014	0,986	1,35	2,549	0,392	2,9	7,46	0,134
0,04	1,028	0,973	1,45	2,732	0,366	3,0	8,00	0,125
0,06	1,043	0,959	1,55	2,928	0,341	4,0	16,0	0,063
0,08	1,057	0,946	1,65	3,138	0,319	5,0	32,0	0,031
0,10	1,072	0,933	1,75	3,364	0,297	6,0	64,0	0,016
0,20	1,149	0,870	1,85	3,605	0,278	7,0	128,0	$7,8 \cdot 10^{-3}$
0,30	1,231	0,812	1,95	3,864	0,259	8,0	256,0	$3,9 \cdot 10^{-3}$
0,40	1,319	0,758	2,0	4,00	0,250	9,0	512,0	$1,9 \cdot 10^{-3}$
0,50	1,414	0,707	2,1	4,29	0,233	10,0	1024	$9,7 \cdot 10^{-4}$
0,60	1,516	0,660	2,2	4,61	0,270	15,0	$3,3 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
0,70	1,625	0,615	2,3	4,93	0,203	20,0	$1,0 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^{-7}$
0,80	1,741	0,574	2,4	5,26	0,190	30,0	$1,0 \cdot 10^9$	$9,3 \cdot 10^{-10}$
1,00	2,000	0,500	2,6	6,06	0,165	100,0	$1,2 \cdot 10^{30}$	$7,9 \cdot 10^{-31}$
1,15	2,219	0,450	2,7	6,49	0,154			

Примечание. Промежуточные значения можно определить так: $2^x = 2^{x_1 \pm x_2} = 2^{x_1} \times 2^{\pm x_2}$.

Некоторые константы атомной физики

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Скорость света в вакууме	c	м/с	$2,998 \cdot 10^8$

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Постоянная Авогадро	N_A	ядер/(г·атом) молекул/моль	$6,022 \cdot 10^{23}$
Постоянная Планка	h	Дж·с	$6,626 \cdot 10^{-34}$
		эВ·с	$4,13 \cdot 10^{-15}$
Постоянная Больцмана	k	Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
		эВ/К	$8,63 \cdot 10^{-5}$
Заряд электрона	q_e	Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$
		CGSE ед.	$4,8 \cdot 10^{-10}$
Масса покоя электрона	m_e	кг	$9,1 \cdot 10^{-31}$
		а. е. м.	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	МэВ	0,511
Масса покоя протона	m_p	кг	$1,6726 \cdot 10^{-27}$
		а. е. м.	1,007276
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	МэВ	938,28
Масса покоя нейтрона	m_n	кг	$1,6749 \cdot 10^{-27}$
		а. е. м.	1,008665
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	МэВ	939,57
Атомная единица массы	а. е. м.	кг	$1,66056 \cdot 10^{-27}$
		а. е. м.	1,00000

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Энергетический эквивалент	а. е. м.	МэВ	931,50
Масса атома углерода ^{12}C (стандарт)	$m_{^{12}\text{C}}$	а. е. м.	12,000000

Приложение 28

Связь между единицами измерения некоторых величин

Время: 1 год = 365,26 сут = 8766 ч = $5,26 \cdot 10^5$ мин = $3,156 \cdot 10^7$ с; 1 с = $1,667 \times 10^{-2}$ мин = $2,778 \cdot 10^{-4}$ ч = $1,158 \cdot 10^{-5}$ сут = $3,169 \cdot 10^{-8}$ года.
 Длина: 1 м = 100 см = 3,28 фут = 39,37 дюйм = 1,09 ярд = $5,4 \cdot 10^{-4}$ мор. миля;
 1 дюйм = 2,54 см = 0,0254 м = 0,0833 фут = $2,77 \cdot 10^{-2}$ ярд = $1,37 \cdot 10^{-5}$ мор. миля.
 Объем: $1 \cdot \text{м}^3 = 10^6 \text{ см}^3 = 10^3 \text{ л} = 35,314 \text{ фут}^3 = 6,102 \cdot 10^4 \text{ дюйм}^3 = 1,308 \text{ ярд}^3$;
 1 баррель (нефтяной) = 158,988 л; 1 галлон = 3,785 л.
 Плотность: $1 \text{ кг/м}^3 = 10^{-3} \text{ г/см}^3 = 1 \text{ г/л} = 0,0624 \text{ фунт/фут}^3$.

Приложение 29

Кратные и дольные единицы СИ

Наименование	Обозначение	Значение	Наименование	Обозначение	Значение
дека	да	10^1	деци	д	10^{-1}
гекто	г	10^2	санти	с	10^{-2}
кило	к	10^3	милли	м	10^{-3}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
гига	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
тера	Т	10^{12}	пико	п	10^{-12}
пета	П	10^{15}	фемто	ф	10^{-15}
экса	Э	10^{18}	атто	а	10^{-18}

Приложение 30

Параметр	Условное обозначение	Единица измерения	Значение для ЯР		
			ТР	ВВЭР-440	
Номинальная мощность	$N_{\text{ном}}$	МВт %	80	1375	
			100	100	
Номинальная кампания	T	ч	4000		
Номинальный энергозапас	$Q_{\text{ном}}$	МВт·ч	320 000		
Давление в первом контуре	$P_{\text{Iк}}$	кгс/см ² МПа	100	125	
			9,81	12,26	
Температура кипения при $P_{\text{Iк}}$	t_s	°С	309,5	326,3	
Температура теплоносителя:	t	°С	230	268	
			на входе в ЯР	270	302
			на входе из ЯР	270	302
			средняя	250	285

Параметр	Условное обозначение	Единица измерения	Значение для ЯР	
			ТР	ВВЭР-440
Расход теплоносителя в первом контуре	$G_{\text{Iк}}$	т/ч м ³ /ч	1500 1870	29 300 39 000
Коэффициент неравномерности: по радиусу в активной зоне по высоте по объему	k_r	—	1,18	
	k_z	—	1,27	
	k_V	—	1,50	
Уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ вследствие: стационарного отравления ^{149}Sm прометиевого провала стационарного отравления ^{135}Xe иодной ямы	$\rho_{0\text{Sm}}$	%	-0,7	-0,82
	$\rho_{\text{п.п}}$	%	-0,5	
	$\rho_{0\text{Xe}}$	%	-4,0	-4,0
	$\rho_{\text{и.я}}$	%	-5,0	
Потеря $\rho_{\text{зап}}$ на компенсацию $\rho_{0\text{Xe}}$ + + $\rho_{\text{и.я}}$ + ρ_t	ρ_t	%	-3,0	См. рис. 2.8.2
		%	12,0	
Резервный $\rho_{\text{зап}}$	$\rho_{\text{рез}}$	%	0,5	
Оперативный $\rho_{\text{зап}}$ в начале кампании в холодном разотравленном ЯР	$\rho_{\text{зап}}^{0.\text{п}}$	%	12,5	
Температурный коэффициент при $t = 250^\circ\text{C}$	α_t	1/°C	$-2,5 \times 10^{-4}$	
Физический вес КС: одного десяти	$\rho_{\text{КС}}$	%	1,5	
	ρ_{Σ}	%	15	
Физический вес стержня АР	$\rho_{\text{АР}}$	%	0,5	
Физический вес стержней АЗ: одного трех	$\rho_{\text{АЗ 1}}$	%	0,6	см. табл. 3.4.1 и рис. 3.4.4
	$\rho_{\text{АЗ}}$	%	1,8	
Плотность потока нейтронов	$\Phi_{\text{ном}}$	нейтр см ² ·с	$4 \cdot 10^{13}$	

ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

§ 1.1

1. $M_{\text{H}_2\text{O}} \approx 3 \cdot 10^{-23}$ г ≈ 18 а. е. м.; $M_{\text{UO}_2} \approx 45 \cdot 10^{-23}$ г ≈ 270 а. е. м.; $V_{\text{H}_2\text{O}} \approx 3 \cdot 10^{-23}$ см³ ($R_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1,9 \cdot 10^{-8}$ см); $V_{\text{UO}_2} \approx 4,4 \cdot 10^{-23}$ см³ ($R_{\text{UO}_2} \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ см). 2. $V_{\text{U}}/V_{\text{H}} \approx 235$ ($R_{\text{U}}/R_{\text{H}} \approx 6$). 3. $\sim 2 \cdot 10^9$ см/с. 4. $\sim 10^{11}$ ккал (кДж), что соответствует сжиганию $\sim 10^4$ т. у. т.; обратно пропорционально массам: $E_n \approx 14$ МэВ, $E_{\text{He}} \approx 3,5$ МэВ. 5. ~ 35 г. 6. Примерно: а) 10^{-2} кВт·ч; б) $25 \cdot 10^3$ кВт·ч ($\sim 2,5$ т у. т.); в) $15 \cdot 10^4$ кВт·ч (~ 10 т у. т.); г) $25 \cdot 10^6$ кВт·ч (~ 3000 т у. т.). 7. ~ 1 кг. 8. См. рис. 1.1.1. 9. При делении $\sim 1\%$, при синтезе $\sim 20\%$.

§ 1.2.

1. $\sim 0,35$ Ки; ~ 80 мг. 2. $\sim 5,5 \cdot 10^9$ м³. 3. 25 дел/(г·ч); $44 \cdot 10^6$ α-расп/(г·ч).

§ 1.3

1. Ядерная — 0,24 %; массовая — 3,2 %. 2. Для графита: $\lambda_s = 2,6$ см; $\lambda_a = 33$ м; $\lambda_{tr} = 2,75$ см; $L = 55$ см.

§ 1.4

1. На 0,3 %. 2. При $K_{эф} = 1,001\rho \approx \delta K_{эф} = 0,001$. 3. Для $E_n = 0,025$ эВ и 2 МэВ, соответственно: $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-8}$ см и $2 \cdot 10^{-12}$ см; $v = 2,18 \cdot 10^5$ и $1,96 \cdot 10^9$ см/с; $t = 18,4$ и $23,2 \cdot 10^9$ с. 4. ~ 14 см. 5. Для Ве: 44; 87. 6. ~ 2 см. 7. ~ 146 кэВ. 8. $V_{с.отр.}/V_{без отр.} = 0,10/0,21 \approx 0,5$. 9. 1,0526. 11. $\Phi_\sigma > \Phi_T$ и $F_\sigma > F_T$, так как $v_\sigma > v_T$.

§ 1.5

1. См. табл. 1.5.1. 3. В первом случае причина — утечка нейтронов, во втором — самоблокировка потока нейтронов, формирующегося вне твэлов (ТК). 6. 1 г ²³⁵U — $\sim 1,5$ т; 1 г U — ~ 10 кг. 7. $5,3 \cdot 10^{12}$ ядер/с. 8. 3т. 9. МВт.

§ 2.1

2. 1 г $\equiv 0,81$ МВт·сут.; 1 % выгорания $\equiv 0,01$ т/1 т $\equiv 8,1 \cdot 10^3$ МВт·сут/т $\approx 8,1 \cdot 10^4$ МВт·сут/т. 3. 3,5 %. 4. При $E_f = 200$ МэВ: 20 кг и 0,8 кг. 5. 26×10^3 МВт·сут/т. 6. $\sim 10^3$ т. 7. $q_{m,18} \approx 0,51$ г/миля $= 0,27$ г/км; $q_{m,8} \approx 1,15$ г/миля $= 0,62$ г/км.

§ 2.2

1. При большом КВ стремится к равновесному значению, при малом КВ — увеличивается пропорционально энерговыработке. 2. См. задачу 2.1.2. 3. $\sim 28\%$. 4. 1 кг. 5. $\sim 0,45\%$ ²³⁵U и $\sim 0,08\%$ ²³⁹Pu.

§ 2.3

2. В среднем для шлаков не влияет.

§ 2.4

1. Отравление Хе достигает стационарного значения для данной мощности, а шлакование увеличивается пропорционально энерговыработке. 2. См.

задачу 2.4.3. 3. См. (2.4.9) и рис. 2.4.5. 4. См. (2.4.6). 5. 0,5%. 6. См. рис. 2.4.8. 7. $N_{\text{ном}}$ в течение ~ 14 ч; на $N < N_{\text{ном}}$ — больше. 8. $\sim 3,5\%$.

§ 2.5

1. См. рис. 2.5.1. 2. См. рис. 2.5.9. 3. Может, если ЯР до остановки работал менее 30 ч. 4. Можно, но при этом возможна вынужденная стоянка. 5. См. рис. 2.5.1, а. 6. См. задачи 2.5.17 и 2.5.18. 7. 6,2%. 8. 0,7%. 9. $\sim 4,5\%$. 10. $> 25\%$ $N_{\text{ном}}$. 11. Можно. 12. а) $\geq 3,7\%$ в момент остановки, б) $\geq 5,5\%$. 13. $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. 14. $t_{\text{д.ст}} \approx 1$ ч; $t_{\text{в.ст}} \approx 20$ ч. 15. Нельзя. Можно только на 2,5 ч или же на 12 ч (см. рис. 2.5.8, а).

§ 2.6

1. Отравление Sm достигает стационарного уровня, не зависящего от мощности ЯР, а шлакование увеличивается пропорционально энерговыработке. 2. Так как прибыль и убыль Sm зависит только от Φ . 3. $\sim 0,53\%$. 4. ~ 30 сут.

§ 2.7

1. Не влияет. 2. Не может (см. задачи 2.7.10 и 2.7.11). 3. При увеличении $N\rho_{0\text{sm}}$ временно уменьшается, при уменьшении N — временно увеличивается, но потом стабилизируется на стационарном для данного ЯР уровне. Для Xe отравление $\rho_{0\text{xe}}$ после изменения N будет зависеть от уровня мощности после ее изменения. 4. Не давит. 5. $\rho_{\text{п.п}} \approx -0,38\%$; $\rho_{\text{sm}} \approx 1,06\%$. 6. 53 ч. 7. См. рис. 2.7.1. 8. ~ 3 сут. 9. См. задачу 2.7.6. 10. Возможен пуск в течение: а) 0,5 ч после остановки и в интервале 55—135 ч; б) первого часа и в любое время через 43 ч (см. рис. 2.7.11).

§ 2.8

1. См. задачу 2.8.2. 2. См. задачи 2.8.8 и 2.8.9. 3. См. задачу 2.8.9. 4. Больше на 3,5%. 5. а) IV; III; б) III; I. 6. $\sim 0,4\%$. 7. До 50°C $d\rho/d\tau \approx +2,5\%/ч$. 8. $\sim 0,5\%/ч$. 9. Минимально возможную с точки зрения выхода на энергетический уровень мощности. 10. Можно (см. задачу 2.8.8). 11. Благодаря отрицательному паровому коэффициенту реактивности. 12. Понижается температура топлива. 13. $\Delta\rho_{\text{зап}} = \Delta\rho_N = 1,03\%$; $\Delta Q_N \approx 34$ эф. сут; $\Delta t \approx 68$ сут.

§ 2.9

1. Соотношением скоростей выгорания топлива и ВП. 2. Большой ρ^+ нечем компенсировать, а большой ρ^- уменьшает кампанию. 3. $11,4 \cdot 10^5$ МВт·ч. 4. ЯР с кривой энерговыработки 4. 5. $2 \cdot 10^4$ МВт·ч. 6. ~ 280 сут. не расхода $\Delta\rho_{\text{зап}}$ на подную яму и резервный. 7. ~ 70 сут. 8. Для ТЭР-II $\Delta Q_N = 14 \times 10^3$ МВт·ч на $N < N_{\text{ном}}$. 9. 30 ч. 10. а) ~ 8300 ч, б) ~ 2500 ч. 11. $< 70\%$ $N_{\text{ном}}$. 12. 10,8%. 13. Через ~ 28 ч при $\bar{t} = 250^\circ\text{C}$ на $N \approx 60\%$ $N_{\text{ном}}$. 14. а) $< 85\%$, б) $< 50\%$, в) $> 35\%$.

§ 3.1

1. Потому что закон изменения мощности экспоненциальный. 2. Чем меньше l , тем чаще происходит смена поколений нейтронов.

§ 3.2

1. См. задачи 3.2.10, 3.2.11 и 3.6.4. 2. См. рис. 3.2.2. 3. См. (3.2.9) и задачи 3.2.6 и 3.2.7. 4. $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ нейтр/см³. 5. ~ 1 мкВт; $\rho_{\text{под}} \approx 10^{-14}$. 6. $4 \cdot 10^{-3}$. 7. $2,5 \cdot 10^{-3}$.

§ 3.3

2. Основная причина: большая утечка мгновенных нейтронов за время замедления, так как энергия нейтронов в момент рождения $E_{\text{зап}} \approx 0,5$ МэВ $< E_{\text{мгн}} \approx 2$ МэВ. 3. ЯР а) управляемый, б) неуправляемый. 4. См. задачу 4.2.1 и рис. 4.2.2. 5. $T = 58$ с, $T_{(2)} = 40$ с. 7. а) В течение первой секунды, б) в течение первой минуты. 8. $\sim 0,17 \beta_{\text{эф}}$; ~ 30 с. 9. $\sim 17\%$ $N_{\text{ном}}$. 10. $\sim 0,6\%/с$. 11. 6,7 мин. 12. 36 с. 13. $0,0654 = 6,54\% = 9,34 \beta_{\text{эф}} = 9,34$ долл. = 2617 о.ч.

§ 3.4

2. $\Delta R_{\text{зад}}$ на выгорание и шлакование. 3. См. задачу 3.4.8. 4. В районе 600 мм шаг в 3,7 раза больше. 5. 470 мм. 6. ~ 950 мм. 7. 0,055 %/с. 8. 1,4 мм/с. 9. $> 0,24$ %. 10. $3,3 \cdot 10^{-3}$ мм/МВт·ч. 11. ~ 20 сут. 12. ~ 80 сут. 13. ≤ 90 % $N_{\text{ном}}$.

§ 3.5

1. а) 900 мм; б) 1200 мм. 2. ~ 900 мм. 3. а) 810 мм; б) 1040 мм; в) 1200 мм. 4. 920 мм.

§ 3.6

1. См. рис. 3.6.1. 2. См. задачу 3.6.4. 3. См. задачу 3.6.6. 5. Опустить КС на 35 мм, поднять стержни АЗ, АР, потом КС до $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$. 6. ~ 25 с. 7. ~ 15 с. 8. Через 1 ч ЯР контролируется в подкритическом состоянии; через 1 сут — $T_{(2)} \approx 20$ с. 9. $\sim 1,5$ мин.

§ 3.7

1. Нельзя, см. (4.2.10). 2. См. задачу 3.7.7 и рис. 3.7.1. 3. Нельзя, см. задачу 3.7.1. 4. > 2 м³, см. задачу 3.7.2. 5. Можно, см. задачу 3.7.4. 6. 125 МВт. 7. 73 МВт. 8. Нельзя. 9. а) На максимальной, б) на экономической. 10. 7,6 узла.

§ 3.8

1. См. рис. 3.8.1. 2. Нельзя. 3. ~ 60 МВт. 4. $\sim 0,08$ % $N_{\text{Б,У}}$. 5. ~ 50 кВт. 6. ~ 220 кВт. 7. ~ 30 сут. 8. ~ 5 сут. 9. ~ 8 сут. 10. ~ 40 МВт. 11. ~ 3 МВт. 12. ~ 20 т/ч.

§ 4.2

4. 1) $\Delta_{\text{КС}} = 50$ мм, $\Delta_{\text{КС}}^{\text{пред}} = 100$ мм. 2) $\Delta_{\text{КС}} = 25$ мм, $\Delta_{\text{КС}}^{\text{пред}} = 50$ мм. 6. 1240 мм. 7. $\leq +2,5$ %. 8. а) При $\bar{t} > 100$ °С в течение ~ 15 ч; б) 1250 мм. 9. При $\bar{t} \approx 100$ °С ЯР станет надкритичным. 10. а) < 80 мм/с, б) 7 мм. 11. См. задачу 4.3.7.

§ 4.3

3. Временно увеличится, так как после восстановления мощности часть воды в КО придет из контура с более высокой температурой.

§ 4.4

1. 1 бэр = 1 рад при $K=1$. 2. См. задачу 4.4.2. 5. См. рис. 4.4.1. 6. $5 \cdot 10^{-13}$ Ки/л. 7. Для Ra—Be: $\Phi_n \approx 135$ нейтр/(см²·с). $\Phi_\gamma \approx 1,35 \cdot 10^6$ γ -квант/(см²·с). 8. $\sim 2,6 \cdot 10^{12}$ нейтр/(см³·с); $\sim 10^{13}$ γ -квант/(см³·с). 9. 10 ч. 10. Не менее 4 чел. 11. а) ~ 200 м; б) ~ 15 мин; в) ~ 1 мин.

§ 5.2

1. См. рис. 5.5.2. 2. Нельзя. 3. См. задачу 5.2.1. 4. 1100 ТК. 5. 0,35 %. 6. 410 мм.

§ 5.3

1. По двум замерам исключается неточность в определении $H_{\text{КС}}^{\text{крит}}$. 2. См. задачу 5.3.2. 3. Переходной процесс на мгновенных нейтронах уменьшает T . 4. $3 \cdot 10^{-5}$ 1/мм. 5. 10^{-5} 1/мм. 6. См. задачу 5.3.3. 7. Влияние источника уменьшается, но появляется влияние температуры и Хе. 8. См. задачу 5.3.3. 9. Безопаснее опускать, но в этом случае люфт может внести ошибку в измерения. 11. 0,6 %. 12. 0,3 %. 14. 2 %. 15 — 0,38 %. 16. 4 $\beta_{\text{эф}}$.

§ 5.4

1. См. задачу 5.4.1. 2. См. рис. 5.4.1. 4. См. задачу 5.4.2.

§ 5.5

2. Может (см. рис. 2.8.1, кривая 1). 3. На 0,2 %. 4. $-2 \cdot 10^{-4}$ 1/% $N_{\text{ном}}$.

§ 5.6

1. а) Отравление Sm, выгорание U и ВП; б) прометиевый провал.
2. См. задачу 5.6.1.

§ 5.7

1. См. рис. 2.9.1.

§ 5.8

2. См. § 1.5. 3. 1,3 (кривая 1); 1,1 (кривая 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аборина И. Н.** Физические исследования реакторов ВВЭР. М.: Атомиздат, 1978.
2. **Белл Д., Глессон С.** Теория ядерных реакторов: Пер. с англ./Под ред. В. Н. Артамкина. М.: Атомиздат, 1974.
3. **Вайнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ./Под ред. Я. В. Шевелева. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
4. **Владимиров В. И.** Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1981.
5. **Воронин Л. М.** Особенности эксплуатации и ремонта АЭС. М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Галанин А. Д.** Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. **Ганев И. Х.** Физика и расчет реактора. М.: Энергоиздат, 1981.
8. **Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В.** Ядерно-физические константы. М.: Госатомиздат, 1963.
9. **Климов А. Н.** Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 1971.
10. **Крауч Х. Ф.** Ядерные корабельные силовые установки: Пер. с англ./Под ред. И. А. Стенбока. М.: Госатомиздат, 1961.
11. **Машкович В. П.** Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1982.
12. **Меррей Р. А.** Введение в ядерную технику: Пер. с англ./Под ред. П. Е. Степанова. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
13. **Нормы радиационной безопасности (НРБ—76).** М.: Атомиздат, 1978.
14. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций... (ОПБ—82).** М., 1982.
15. **Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов;** Под ред. Г. А. Батя. М.: Энергоиздат, 1982.
16. **Правила ядерной безопасности атомных электростанций ПБЯ—04—74.** М.: Атомиздат, 1976.
17. **Рудик А. П.** Физические основы ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1979.
18. **Саркисов А. А., Пучков В. Н.** Физика переходных процессов в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1983.
19. **Сидоренко В. А.** Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М.: Атомиздат, 1977.
20. **Соигин М. Ф., Гусев А. Б., Лабинский Ю. В., Солнцев Н. В.** Судовые ядерные реакторы. Л.: Судостроение, 1967.
21. **Судовые ядерные энергетические установки/А. М. Головизнин, В. А. Кузнецов, Б. Г. Пологих, Н. С. Хлопкин и др.;** Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Атомиздат, 1976.
22. **Физика промежуточных реакторов:** Пер. с англ./Под ред. И. А. Стенбока. М.: Госатомиздат, 1961.
23. **Цыканов В. А., Давыдов Е. Ф.** Радиационная стойкость твэлов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977.
24. **Шульц М.** Регулирование энергетических ядерных реакторов: Пер. с англ./Под ред. Д. И. Воскобойникова. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
25. **Эксплуатационные режимы ВВЭР/Ф. Я. Овчинников, Л. И. Голубев, В. Д. Добрынин и др.;** М.: Атомиздат, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные сокращения	6
Глава 1. Ядерный реактор как источник энергии и ионизирующего излучения	7
§ 1.1. Атом. Атомное ядро. Атомная энергия	7
§ 1.2. Радиоактивность	14
§ 1.3. Ядерные реакции	20
§ 1.4. Цепная реакция. Коэффициент размножения. Реактивность	25
§ 1.5. Ядерный реактор. Энерговыведение в активной зоне	32
Глава 2. Физические процессы, сопровождающие работу ядерного реактора	42
§ 2.1. Выгорание ядерного топлива	42
§ 2.2. Воспроизводство ядерного топлива	50
§ 2.3. Шлакование ядерного топлива	55
§ 2.4. Стационарное отравление ксеноном	58
§ 2.5. Нестационарное отравление ксеноном	68
§ 2.6. Стационарное отравление самарием	90
§ 2.7. Нестационарное отравление самарием	94
§ 2.8. Температурный эффект реактивности	105
§ 2.9. Кампания реактора	114
Глава 3. Управление ядерным реактором	126
§ 3.1. Параметры, определяющие мощность реактора и скорость ее изменения	126
§ 3.2. Подкритическое и критическое состояние реактора	128
§ 3.3. Надкритическое состояние реактора	138
§ 3.4. Органы регулирования реактора	148
§ 3.5. Расчет критического положения КС	161
§ 3.6. Пуск ядерного реактора	167
§ 3.7. Разогрев ядерного реактора и работа на энергетическом уровне мощности	177
§ 3.8. Остановка и расхолаживание реактора	190
Глава 4. Безопасность ядерного реактора	201
§ 4.1. Особенности ядерного реактора как источника энергии	201
§ 4.2. Ядерная безопасность реактора	204
§ 4.3. Теплотехническая надежность активной зоны	223
§ 4.4. Радиационная безопасность	232
Глава 5. Нейтронно-физические измерения в процессе эксплуатации реактора	246
§ 5.1. Необходимость и объем нейтронно-физических измерений	246
§ 5.2. Определение критической загрузки	247
§ 5.3. Градуировка органов управления реактором	252
§ 5.4. Построение дифференциальной и интегральной характеристик	264
§ 5.5. Определение температурного и мощностного эффектов и коэффициентов реактивности	268
§ 5.6. Определение отравления реактора ксеноном	272
§ 5.7. Уточнение кривой энергосвыработки	275
§ 5.8. Определение распределения энерговыведения	276
§ 5.9. Уточнение физических характеристик органов регулирования	280
Приложения	282
Ответы на контрольные вопросы и задачи	299
Список литературы	303