

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К. Б. Матузаев, Г. Я. Мерзликин, В. В. Шаповаленко

РАСЧЁТ НАЧАЛЬНОГО ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ ВВЭР

Учебное пособие

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.311.256:621.039.56(075.8)
ББК 31.4я73
М 348

Рецензенты:

А. А. Скидан – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы контроля и управления атомных станций» **Т. Г. Зацаринная** - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Системы контроля и управления атомных станций»

М348 Матузаев К. Б. Расчёт начального запаса реактивности ВВЭР : учебное пособие / К. Б. Матузаев, Г. Я. Мерзликин, В. В. Шаповаленко. — Севастополь : Издательство СевГУ, 2021. — 28 с.: ил.

В учебном пособии изложена методика расчета начального запаса реактивности ядерных энергетических установок с реакторами ВВЭР-1000.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», направления подготовки «Ядерная энергетика и теплофизика», а также может быть использовано студентами других специальностей.

УДК 621.311.256:621.039.56(075.8)
ББК 31.4я73

Рассмотрено и утверждено на заседании ученого совета Института ядерной энергии и промышленности, протокол № 7 от 31 марта 2021 г.

АЛГОРИТМ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА

Общим запасом реактивности реактора называется, как известно, величина положительной реактивности, создаваемая за счёт загрузки в активную зону реактора *сверхкритического* количества ядерного топлива и компенсируемая путём одновременного введения в активную зону всех видов *компенсирующих поглотителей* (подвижные поглотители, выгорающие поглотители и жидкие поглотители). Иными словами, общий запас реактивности – есть не что иное, как величина положительной реактивности, которая *могла бы быть высвобождена* при *мысленном* удалении из активной зоны критического реактора всех находящихся в ней компенсирующих поглотителей. На этом представлении и строится методика расчёта начального запаса реактивности реактора типа ВВЭР: следует подсчитать ту величину положительной реактивности, которой *мог бы* обладать реактор при отсутствии в его активной зоне всех подвижных поглотителей (кластеров системы управления и защиты), стержней с выгорающими поглотителями и при нулевой концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура (то есть, считая, что теплоноситель – чистая дистиллированная вода).

Поскольку начальный запас реактивности по смыслу своему и есть величина реактивности, а величина реактивности (по определению) равна

$$\rho = (k_{\infty} - 1) / k_{\infty} = 1 - 1/k_{\infty},$$

то для её нахождения необходимо рассчитать величину эффективного коэффициента размножения (k_{∞}) реактора для вышеуказанных условий (трубы кластеров и трубы для размещения стержней с выгорающими поглотителями в его тепловыделяющих сборках (ТВС) – пусты, активная зона заполнена чистым дистиллятом, без добавок в него борной кислоты).

Величина эффективного коэффициента размножения в диффузионно-возрастном приближении, как известно, представляет собой произведение шести сомножителей

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon \phi \ p_3 \ p_T,$$

называемых (по порядку следования):

- среднее число нейтронов деления, приходящееся на каждый поглощаемый делющимися тепловыми нейтронами нуклидами топлива тепловой нейтрон (η), часто называемое также эффективным выходом нейтронов деления;
- коэффициент размножения на быстрых нейтронах (ε);
- вероятность избежания резонансного захвата (ϕ);
- коэффициент использования тепловых нейтронов (ϕ);
- вероятность избежания утечки замедляющихся (p_3) нейтронов;
- вероятность избежания утечки тепловых (p_T) нейтронов в процессе их диффузии.

Каждая из упомянутых величин является сложной функцией многих переменных, но все они в первую очередь определяются комбинацией величин *эффективных макроскопических сечений* – поглощения (σ_a), рассеяния (σ_s), Σ транспортных (Σ_{tr}) – для материалов, из которых состоит активная зона ВВЭР.

Следовательно, для расчёта шести сомножителей эффективного коэффициента размножения необходимо *предварительно* рассчитать величины эффективных макросечений всех материалов активной зоны.

Но любое макросечение даже простого материала находится как произведение соответствующего эффективного *микроскопического сечения* составляющих его ядер на величину ядерной концентрации этих ядер:

$$\Sigma = \sigma I,$$

поэтому для расчёта эффективных макросечений материалов необходимо предварительно найти величины соответствующих микросечений и ядерные концентрации. И если величины микросечений рассеяния и транспортных микросечений всех компонентов в тепловой области энергий нейтронов от величины кинетической энергии нейтронов (а, значит, и от температуры в активной зоне) практически не зависят, то величины эффективных микросечений поглощения для любых компонентов существенно зависят от энергии нейтронов. Они находятся по формуле

$$\sigma_a = \sigma \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293}{T_n}} g_a^i(T_n),$$

где σ_{a0} – стандартное микросечение поглощения рассматриваемого сорта ядер;

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2} \approx$$

0.886 – коэффициент усреднения сечения по энергетическому спектру

тепловых нейтронов – спектру Максвелла; $\sqrt{\frac{293}{T_n}}$ – корректирующий множи-

тель, учитывающий подвижку максимума спектра тепловых нейтронов в область более высоких энергий при возрастании температуры среды (а, значит, и температуры нейтронов T_n); $g_a^i(T_n)$ – фактор Весткотта – корректирующий множитель, учитывающий отклонение реальной температурной зависимости микросечения поглощения ядер от температурной зависимости, рассчитанной при условии, что скоростная зависимость величины сечения тепловых нейтронов подчинена идеальному закону « $1/v$ », свойственному подавляющему большинству реальных нуклидов.

Таким образом, нахождение эффективных микросечений поглощения компонентов является обязательной операцией предварительного расчёта.

Кроме того, величины пяти из шести сомножителей эффективного коэффициента размножения существенным образом зависят от *состава и структуры* активной зоны. В реальной гетерогенной активной зоне ВВЭР *ячейки* (тепловыделяющие сборки – ТВС) по составу отличаются друг от друга: в трубах одних ТВС есть подвижные поглотители, в трубах других – их нет; в одних ТВС есть стержни с выгорающими поглотителями, в других их нет; причём, разные ТВС и по количеству поглощающих элементов (пэлов) и по их составу отличаются друг от друга. Но в той активной зоне, для которой ведётся расчёт общего запаса реактивности (то есть с *пустыми* трубами для пэлов), можно считать, что *все ТВС в активной зоне одинаковы*. Эта однородность структуры

позволяет рассчитывать размножающие свойства активной зоны как размножающие свойства *одной её ячейки*. Но, так или иначе, должно быть учтено соотношение количеств различных материалов *в отдельной ТВС*. Соотношение объёмов материалов в любой ТВС с учётом того, что все ТВС в активной зоне имеют равную высоту, *равно соотношению площадей поперечных сечений*, занимаемых этими материалами в ТВС. Поэтому для расчётов сомножителей эффективного коэффициента размножения необходимо рассчитать площади поперечных сечений всех однородных материалов в ТВС.

Итак, весь расчёт начального запаса реактивности удобнее всего разделить на две приблизительно равные по объёму части – предварительный расчёт и расчёт собственно величины полного начального запаса реактивности ВВЭР.

1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЁТ

1.1 Расчёт площадей поперечных сечений материалов в ТВС

Чертёж поперечного сечения ТВС показан на рис. 1.

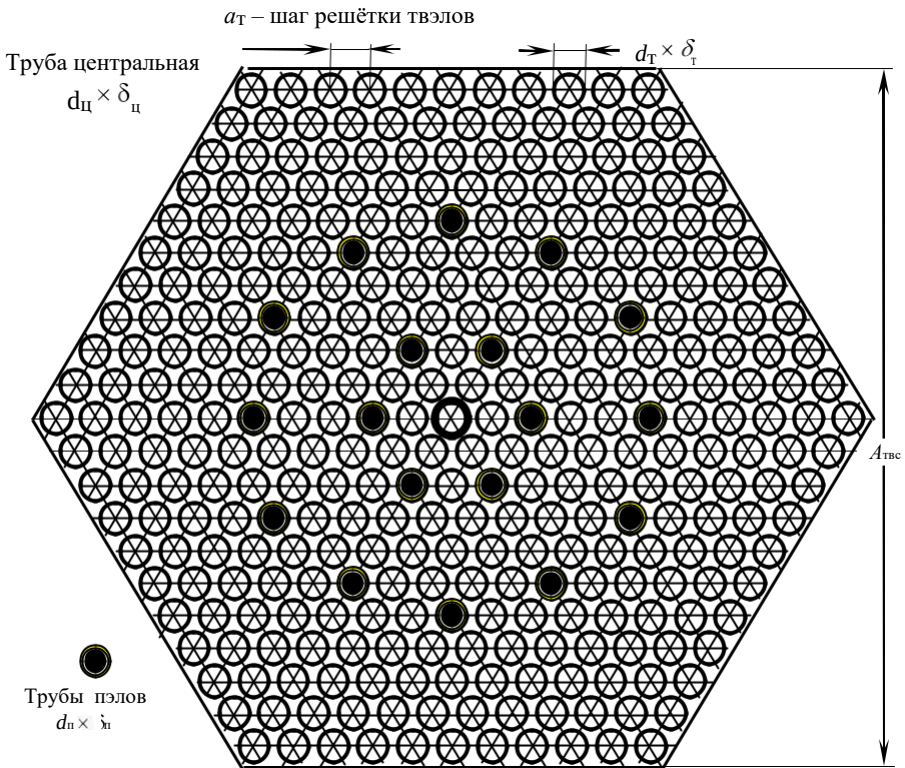


Рис. 1 – Поперечное сечение тепловыделяющей сборки

Исходными данными к расчёту являются указанные в задании размеры:

- размеры циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) - $d_T \times \delta_T$, то есть наружный диаметр (d_T) и толщина оболочки (δ_T), выраженные в сантиметрах;
- число ТВЭлов в одной ТВС – n_T (как и в реальном ВВЭР-1000, $n_T = 312$);
- размеры труб из нержавеющей стали для размещения в них поглощающих элементов (пЭлов) - $d_{\Pi} \times \delta_{\Pi}$;
- число труб под поглощающие элементы – n_{Π} (как и в реальном ВВЭР-1000 $n_{\Pi} = 18$);
- размеры центральной трубы ТВС, выполненной из нержавеющей стали, предназначенной для размещения датчиков контроля распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте ТВС, - $d_{\Pi} \times \delta_{\Pi}$;
- шаг треугольной решётки ТВС в активной зоне – $A_{\text{ТВС}}$, см (он равен «размеру под ключ» шестигранной ТВС);
- высота активной зоны – $H_{\text{аз}}$, см;
- число ТВС в активной зоне – m (как и в реальной активной зоне ВВЭР-1000, $m = 163$).

Последовательность расчёта площадей поперечных сечений материалов ТВС выглядит следующим образом.

1.1.1 Площадь поперечного сечения тепловыделяющей сборки

$$S_{\text{ТВС}} = \frac{\sqrt{3}}{2} A_{\text{ТВС}}^2, \text{ см}^2.$$

*) Это известная из планиметрии формула для расчёта площади правильного шестиугольника по величине диаметра вписанной в него окружности, который в данном случае как раз и равен размеру «под ключ».

1.1.2 Площадь поперечного сечения всех ТВС в активной зоне

$$S_{\text{аз}} = m S_{\text{ТВС}}, \text{ см}^2.$$

1.1.3 Эквивалентный диаметр активной зоны $D_{\text{аз}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{аз}}}{\pi}}, \text{ см}.$

*) Формула получена из условия, что суммарное сечение m ТВС образует равное сечение полностью заполненного ими круга.

1.1.4 Площадь поперечного сечения топливной композиции в ТВС

$$S_{\text{тк}} = \frac{\pi(d_T - 2\delta_T)^2}{4} n_T, \text{ см}^2.$$

*) Формула для суммарной площади n_T кружков, каждый из которых имеет диаметр, равный диаметру топливной таблетки в ТВэле (диаметр ТВэла за вычетом удвоенной толщины циркониевой оболочки).

1.1.5 Площадь поперечного сечения циркониевых оболочек ТВЭлов

$$S_{\text{ЗГ}} = n_T \pi (d_T - \delta_T), \text{ см}^2.$$

*) Формула площади n_T колец, имеющих средний диаметр, равный $(d_T - \delta_T)$, и ширину, равную толщине циркониевой оболочки ТВэла δ_T .

1.1.6 Площадь поперечного сечения нержавеющей стали в

$$TBC S_{ст} = n_{ст} \pi (d_{ст} - \delta_{ст}) \pi (d_{ст} - \delta_{ст}), \text{ см}^2.$$

*) Аналогично примечанию п. 1.1.5, так как цилиндрические трубы в поперечном сечении имеют форму кольца.

1.1.7 Площадь поперечного сечения воды в отдельной ТВС

$$S_B = S_{TBC} - S_{TK} - S_{ZГ} - S_{ст}, \text{ см}^2$$

1.2 Расчёт молекулярных и ядерных концентраций компонентов

Исходными данными для расчёта являются приведенные в задании:

- реальная плотность топливной композиции (UO_2) - $\gamma_{TK} = 10.2 \text{ г/см}^3$;
- давление воды в активной зоне - p , МПа;
- средняя температура воды в активной зоне - t_B , °C;
- начальное обогащение топлива x , %.

1.2.1 Молекулярная концентрация топливной композиции (UO_2)

$$N_{TK} = \gamma_{TK} \frac{N_A}{M_{UO_2}} = 10.2 \frac{6.0221 \cdot 10^{23}}{270} = 2.275 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

Примечание. Эта же величина является и атомной и ядерной концентрацией **урана**, поскольку в каждой молекуле UO_2 содержится по *одному* атому (а, значит, и по одному ядру) урана.

1.2.2 Ядерная концентрация кислорода в топливной композиции

$$N_O = 2 N_{TK} = 4.55 \cdot 10^{22}, \text{ см}^{-3},$$

*) Поскольку ядер кислорода в молекуле топливной композиции (UO_2) в 2 раза больше, чем ядер урана.

1.2.3 Ядерная концентрация урана-235 в топливной композиции

$$N_5 = N_U x.$$

1.2.4 Ядерная концентрация урана-238 в топливной композиции

$$N_8 = N_U (1 - x).$$

*) Поскольку величина обогащения по определению – доля ядер урана-235 среди всех ядер урана ($^{235}U + ^{238}U$) - в двух последних пунктах величина обогащения подставляется не в [%] (как указано в задании), а в долях от единицы (то есть *заданная величина обогащения должна быть уменьшена в 100 раз*).

1.2.5 Средняя плотность воды в активной зоне реактора - γ , г/см³ – находится по заданным давлению и средней температуре воды в таблицах теплофизических свойств воды и водяного пара (Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Энергоиздат., М.),

Примечание. Извлекаемое из указанных источников значение плотности воды (величины, обратной величине удельного объёма воды при заданных параметрах) имеет размерность системы СИ (кг/м^3); для обращения этой величины в (г/см^3) её следует уменьшить в 1000 раз.

1.2.6 Молекулярная концентрация воды в реакторе

$$N_B = \gamma_B \frac{N_A}{M_{H_2O}} = \gamma_B \frac{6.0221 \cdot 10^{23}}{18.02}, \text{ см}^{-3},$$

т.к. молярная масса H_2O равна 18.02 а.е.м., а число Авогадро $N_A = 6.0221 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

1.3 Расчёт эффективных микросечений поглощения компонентов и материалов ТВС

Эффективные микросечения поглощения для любых сортов ядер рассчитываются исходя из извлекаемых из справочника *стандартных* величин этих сечений (σ_0) по общей формуле

$$\sigma_a = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi}{2T_n}} \sqrt{\frac{293}{T_n}} g_a^i(T_n),$$

причём, для подавляющего большинства нуклидов фактор Весткотта (корректирующий множитель, учитывающий отклонение зависимости микросечения поглощения от закономерности $\langle 1/v \rangle$) равен *единице* (поскольку большинство реальных зависимостей сечений поглощения нуклидов подчиняется этой закономерности). Из всех «реакторных» нуклидов только сечения урана-235 (и плутония-239) существенно отклоняются от закона $\langle 1/v \rangle$.

*) Строго говоря, слегка отклоняется от закона $\langle 1/v \rangle$ и сечение поглощения урана-238, но относительная величина этого отклонения в пределах температур нейтронов (300 – 2000 K) не превышает 4 %, поэтому в расчётах одногруппового приближения это отклонение не учитывается.

Таким образом, общим множителем при расчёте микросечений поглощения для любых нуклидов (и подчиняющихся, и не подчиняющихся закону $\langle 1/v \rangle$) является величина

$$k_t = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_n}},$$

которую для сокращения объёма вычислений удобно рассчитать сразу.

Что касается сечения поглощения ядер урана-235, то для его расчёта надо вначале вычислить величину фактора Весткотта по эмпирической формуле

$$g_a^5(T_n) = 0.912 + 0.25 \exp(-0.00475 T_n).$$

В предыдущих вычислениях фигурирует *температура тепловых нейтронов* T_n . Вообще говоря, температура тепловых нейтронов является очень сложной функцией не только температуры среды активной зоны, *но и её состава*, который определяет замедляющие и поглощающие свойства активной зоны. В частности для уран-водных гомогенных активных зон температуру нейтронов можно с достаточной высокой степенью точности вычислять по полуэмпирической формуле Коуэна [4]:

$$T_n \approx T_{H_2O} \left[1 + 1.8 \frac{\sum_a^{a3}}{(\xi \sum_s)_{a3}} \right], K,$$

в которой $\sum_a^{a3}$ – макросечение поглощения тепловых нейтронов *гомогенизированной* среды активной зоны, а $(\xi \sum_s)_{a3}$ – замедляющая способность этой среды по отношению к нейтронам с энергией 1 эВ. Разумеется, на данной стадии предварительного расчёта воспользоваться этой формулой не представляется возможным, поскольку макросечения поглощения и замедляющие способности материалов активной зоны пока не известны. В уточнённых расчётах эта задача решается методом последовательных приближений, что связано с выполне-

нием вариантных вычислительных операций очень большого объёма. Однако из исследований этой зависимости В.В. Обольяниновым [6] вытекает, что для водо-водяных реакторов с топливом небольшого обогащения величина температуры тепловых нейтронов оказывается выше средней температуры воды в активной зоне на 18–24 %. Поэтому для расчётов первого приближения можно полагать, что температура нейтронов

$$T_H \approx 1.2 T_B,$$

то есть на 20 % выше средней термодинамической температуры воды в реакторе, указанной в задании, но выраженной не в градусах Цельсия, а в Кельвинах, то есть

$$T_H \approx 1.2 (t_B + 273).$$

Таким образом, последовательность расчёта эффективных микросечений поглощения компонентов активной зоны выглядит так.

1.3.1 Температура тепловых нейтронов $T_H \approx 1.2(t_B + 273)$, К.

1.3.2 Коэффициент усреднения сечений поглощения по спектру Максвелла с учётом температурной подвижки максимума спектра в область более высоких энергий

$$k_t = \frac{\sqrt{\pi}}{2T_H} \sqrt{\frac{293}{2T_H}}.$$

1.3.3 Фактор Весткотта для сечения поглощения урана-235

$$g_a^5 = 0.912 + 0.25 \exp(-0.00475 T_H).$$

1.3.4 Эффективное микросечение поглощения урана-235

$$\sigma_{a^5} = \sigma_{a0^5} k_t g_a^5 = 680.9 k_t g_a^5, \text{ барн (т.к. } \sigma_{a0^5} = 680.9 \text{ барн [3])}$$

1.3.5 Эффективное микросечение поглощения урана-238

$$\sigma_a^8 = \sigma_{a0^8} k_t = 2.71 k_t, \text{ барн (т.к. } \sigma_{a0^8} = 2.71 \text{ барн [2])}$$

1.3.6 Эффективное микросечение поглощения кислорода в топливной композиции полагается равным 0 (т.к. стандартное микросечение поглощения кислорода – величина, меньшая 10^{-4} барн [2]).

1.3.7 Эффективное микросечение поглощения воды при заданной температуре активной зоны $\sigma^B = \sigma_{a0^B} k_t = 0.66 k_t, \text{ барн (т.к. } \sigma_{a0^B} = 0.66 \text{ барн [2])}$.

Что касается эффективных микросечений поглощения циркониевого сплава оболочек ТВЭЛов и нержавеющей стали труб, то это – достаточно сложные по составу сплавы, но величины микросечений поглощения их компонентов определять нет необходимости потому, что в конечном счёте нужны величины их *макросечений* поглощения, а точные значения их стандартных макросечений (определённые экспериментально) приведены в справочниках по ядерным константам. Поэтому для нахождения величин эффективных макросечений поглощения циркониевого сплава и конструкционной нержавеющей стали достаточно их стандартные макросечения умножить на вычисленный в п.

1.3.2 коэффициент k_t , что и будет сделано в следующем пункте расчёта.

1.4 Расчёт эффективных макросечений поглощения материалов ТВС

Макросечения поглощения отдельных компонентов сложных веществ находятся по стереотипной формуле $\Sigma_a^i = \sigma_a^i N_i$. Величины макросечений поглощения сложных соединений (в данном случае – топливной композиции UO_2) находятся как сумма макросечений поглощения их компонентов. Макросечения поглощения циркониевого сплава оболочек твэлов и нержавеющей стали труб усредняются порядком, оговоренным в предыдущем пункте.

1.4.1 Макросечение поглощения урана-235 $\Sigma_a^5 = \sigma_a^5 N_5 \cdot 10^{-24}$, см^{-1} .

*) Множитель 10^{-24} включается в формулу для обращения величины микросечения из внесистемных единиц *барн* в см^2 (т.к. $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$).

1.4.2 Макросечение поглощения урана-238 $\Sigma_a^8 = \sigma_a^8 N_8 \cdot 10^{-24}$, см^{-1} .

1.4.3 Макросечение поглощения топливной композиции

$$\Sigma_a^{\text{TK}} = \Sigma_a^5 + \Sigma_a^8, \text{ см}^{-1} \text{ (с учётом того, что } \Sigma_a \approx 0 \text{)}.$$

1.4.4 Макросечение поглощения циркониевого сплава оболочек

$$\Sigma_a^{\text{Zr}} = \Sigma_{a0}^{\text{Zr}} k_t = 0.0515 k_t, \text{ см}^{-1} \text{ (т.к. } \Sigma_{a0}^{\text{Zr}} = 0.0515 \text{ см}^{-1} [2]).$$

1.4.5 Макросечение поглощения нержавеющей стали труб ТВС

$$\Sigma_a^{\text{CT}} = \Sigma_{a0}^{\text{CT}} k_t = 0.239 k_t, \text{ см}^{-1} \text{ (т.к. } \Sigma_{a0}^{\text{CT}} = 0.239 \text{ см}^{-1} [2]).$$

1.4.6 Макросечение поглощения воды в ТВС $\Sigma_a^{\text{B}} = \sigma_a^{\text{B}} N_{\text{B}} \cdot 10^{-24}$, см^{-1} .

1.5 Расчёт транспортных макросечений материалов ТВС

Транспортные макросечения для циркониевого сплава и нержавеющей стали от температуры в активной зоне практически не зависят и извлекаются из справочника [2]:

$$\Sigma_{tr}^{\text{Zr}} = 2.21 \text{ см}^{-1}, \Sigma_{tr}^{\text{CT}} = 0.861 \text{ см}^{-1}.$$

Транспортные макросечения компонентов топливной композиции и воды находятся общим порядком (то есть исходя из величин транспортных микросечений компонентов и их концентраций).

1.5.1 Транспортное макросечение ^{235}U $\Sigma_{tr}^5 = \sigma_{tr}^5 N_5 \cdot 10^{-24} = 15.16 \cdot 10^{-24} N_5$, см^{-1} (т.к. $\sigma_{tr}^5 = 15.16 \text{ барн} [2]$).

1.5.2 Транспортное макросечение ^{238}U $\Sigma_{tr}^8 = \sigma_{tr}^8 N_8 \cdot 10^{-24} = 8.38 \cdot 10^{-24} N_8$, см^{-1} (т.к. $\sigma_{tr}^8 = 8.38 \text{ барн} [2]$).

1.5.3 Транспортное макросечение кислорода в топливной композиции

$$\Sigma_{tr}^0 = \sigma_{tr}^0 N_0 \cdot 10^{-24} = 4.2 \cdot 10^{-24} \cdot 4.55 \cdot 10^{22} = 0.1911 \text{ см}^{-1} \text{ (т.к. } \sigma_{tr}^0 = 4.2 \text{ барн} [2]).$$

1.5.4 Транспортное макросечение топливной композиции

$$\Sigma_{tr}^{\text{TK}} = \Sigma_{tr}^5 + \Sigma_{tr}^8 + \Sigma_{tr}^0, \text{ см}^{-1},$$

1.5.5 Транспортное макросечение воды $\Sigma_{tr}^{\text{B}} = \sigma_{tr}^{\text{B}} N_{\text{B}} \cdot 10^{-24} = 61.1 \cdot 10^{-24} N_{\text{B}}$, см^{-1}

Этим завершается этап предварительного расчёта, в результате которого имеются все данные для расчёта начального запаса реактивности реактора.

2 РАСЧЁТ НАЧАЛЬНОГО ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ ВВЭР

2.1 Величина константы

Эффективный выход нейтронов деления — это среднее число нейтронов деления, приходящееся на каждый поглощаемый делящимися под действием тепловых нейтронов нуклидами топлива тепловой нейтрон.

Таковыми нуклидами в топливе ВВЭР являются уран-235 (основной делящийся тепловыми нейтронами компонент топлива) и плутоний-239 (воспроизводимый в процессе кампании вторичный делящийся компонент).

Поскольку речь идёт о *начальном* запасе реактивности, то есть о запасе реактивности в начале кампании загрузки активной зоны, когда топливо в активной зоне *свежее* (содержащее только один делящийся под действием тепловых нейтронов нуклид - ^{235}U), величина $\eta = \eta_0$. Для урана-235 стандартная величина (т.е. при $T_{\text{н.о}} = 293 \text{ K}$) константы $\eta_0 \approx 2.071$.

Так как средняя температура нейтронов в реакторе отличается от «комнатной», уточнённая её величина находится как

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{0.004}{g_{a5}} \right),$$

где g_{a5} - фактор Весткотта для сечения поглощения ^{235}U , величина которого рассчитана для нужной температуры нейтронов ранее (в п.1.3.3).

2.2. Расчёт коэффициента размножения на быстрых нейтронах (ε)

Коэффициентом размножения на быстрых нейтронах называют число, показывающее, во сколько раз число нейтронов деления, полученных в результате делений топлива под действием нейтронов всех кинетических энергий, больше числа нейтронов деления, полученных в делениях топлива, инициируемых только тепловыми нейтронами.

Быстрыми нейтронами делится уран-238, для которого деление имеет пороговый характер: нейтроны с энергией выше порога ($E \geq 1.1 \text{ МэВ}$) делят ядра урана-238, в то время как нейтроны с $E \leq 1 \text{ МэВ}$ - такой способностью не обладают. В этих делениях рождаются дополнительные быстрые нейтроны, участвующие во всех нейтронно-физических процессах в ВВЭР, в том числе и в делениях. Величина ε равная (допустим) 1.035 говорит о том, что из каждых 1035 рождаемых нейтронов деления 1000 рождается в делениях ядер топлива тепловыми нейтронами, а 35 – в делениях ядер урана-238 быстрыми надпороговыми нейтронами.

Величина коэффициента размножения на быстрых нейтронах в «тесной» решётке» твэлов в ТВС ВВЭР находится по формуле Батя - Цыганкова [6]:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{1.193 \cdot \frac{N_1}{S_1}}{1 + 4.6 \cdot \frac{N_8}{S_{\text{тк}}}},$$

исходящей из величины коэффициента размножения на быстрых нейтронах в *одиночном изолированном твэле* (ε_1) и учитывающей влияние перекрестного эффекта размножения на быстрых нейтронах в «тесной» решётке таких твэлов.

Здесь N_B – молекулярная концентрация воды, а N_8 – ядерная концентрация урана-238 в топливной композиции (п.1.2.4, 1.2.6).

Площади поперечного сечения топливной композиции (S_{TK}) и воды (S_B) также получены ранее (пп.1.1.4 и 1.1.7), поэтому для расчёта ε остаётся найти только величину ε_1 , которая определяется по формуле

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{0.092 p}{1 - 0.52 p},$$

в которой p – вероятность того, что быстрый нейтрон, рождённый в твэле, испытает первое взаимодействие в топливной композиции этого твэла. Эта величина находится через величину *пористости* топлива

$$b = \frac{N_8}{N_{8M}} = \frac{N_8}{4.783 \cdot 10^{22}}$$

по приближённой формуле $p \approx 0.125(d_T - 2\delta) \cdot b$, где величина $(d_T - 2\delta)$, см – наружный диаметр топливных таблеток, заполняющих твэлы, а $N_{8M} = 4.783 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – концентрация ядер урана-238 в природном металлическом уране.

Таким образом, алгоритм расчёта ε выглядит так.

$$= \frac{N_8}{4.783 \cdot 10^{22}}.$$

2.2.1 Пористость топлива

2.2.2 Вероятность для нейтрона деления испытать первое взаимодействие внутри топливной композиции твэла $p = 0.125 (d_T - 2\delta) b$.

2.2.3 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (БН) в однофазном твэле

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{0.092 p}{1 - 0.52 p}.$$

2.2.4 Коэффициент размножения на БН «тесной» решётки твэлов

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{1.193 - \varepsilon_1}{1 + \frac{N_B \cdot S_B}{4.6 N_{8TK}}}.$$

2.3. Расчёт вероятности избежания резонансного захвата

Вероятность избежания резонансного захвата – это доля нейтронов, избежавших резонансного захвата при замедлении, от числа нейтронов, замедлившихся в пределах активной зоны до верхней границы интервала резонансного захвата ядрами урана-238.

Дело в том, что во всём диапазоне энергий замедления – от 2 МэВ до энергии «сшивки» E_c , величины порядка десятых долей эВ, – есть интервал энергий – (6–600 эВ), – в котором замедляющиеся нейтроны испытывают резонансный захват ядрами урана-238, и таким образом безвозвратно выбывают из цикла размножения нейтронов в ВВЭР.

Цифра, например, 0.857 говорит о том, что из каждой 1000 замедлившихся в активной зоне до $E = 600$ эВ нейтронов на уровне $E = 6$ эВ останут-

ся 857 нейтронов, а остальные 143 нейтрона поглощаются ядрами урана-238, которых в активной зоне ВВЭР, по меньшей мере, в 20 раз больше, чем ядер урана-235. Иных резонансных поглотителей в активной зоне ВВЭР нет.

Величина вероятности избежания резонансного захвата (φ) находится по одной из модификаций формулы Гуревича - Померанчука [6]:

$$\varphi = \exp \left[- \frac{N_8 \cdot 10^{-24} \cdot S_{\text{тк}}}{\left(\xi_s^B \right)_{\text{рез}} \cdot S_B} \cdot (3.75 \sqrt{\frac{2.145 \cdot 10^{12} \cdot k_T}{(d_T - 2 \delta_T) \cdot N_8}}) \right] .$$

Новыми (ранее не встречавшимися в расчёте) величинами в этой формуле являются $(\xi_s^B)_{\text{рез}}$ – замедляющая способность воды в резонансном интервале энергий, и доплеровская температурная поправка по Егiazарову (k_T). Первая находится исходя из «стандартной» замедляющей способности воды (то есть замедляющей способности воды при её плотности, равной 1 г/см^3) которая равна 1.385 см^{-1} [2].

Поэтому для нахождения замедляющей способности воды в действительных теплофизических условиях активной зоны достаточно стандартную замедляющую способность воды умножить на величину средней плотности воды в реакторе: $(\xi_s^B)_{\text{рез}} = 1.385 \cdot \rho_B$.

Снижение величины вероятности избежания резонансного захвата ядрами ^{238}U с ростом температуры топлива учитывается с помощью корректировочного коэффициента k_T , находимого по эмпирической формуле [5]

$$k_T = 0.775(1 + 0.0175 \sqrt{T_T}) ,$$

в которой величина абсолютной средней температуры топливной композиции T_T также находится по эмпирической зависимости, справедливой для высоко-температурных топлив

$$T_T \approx 293 + 4.126(t_B - 20), K,$$

где t_B – указанная в задании величина средней температуры воды в реакторе, выраженная в градусах Цельсия.

Все остальные величины в формуле для φ получены в предварительном расчёте, поэтому алгоритм расчёта φ будет выглядеть так.

2.3.1 Замедляющая способность воды в резонансном интервале энергий при заданных условиях в активной зоне $(\xi_s^B)_{\text{рез}} = 1.385 \rho_B, \text{ см}^{-1}$.

2.3.2 Средняя температура топливной композиции в реакторе

$$T_T = 293 + 4.126 (t_B - 20), K.$$

2.3.3 Доплеровская температурная поправка по Егiazарову

$$k_T = 0.775(1 + 0.0175 \sqrt{T_T}) .$$

2.3.4 Вероятность избежания резонансного захвата

$$\varphi = \exp \left[- \frac{N_8 \cdot 10^{-24} \cdot S_{\text{тк}}}{\left(\xi_s^B \right)_{\text{рез}} \cdot S_B} \cdot (3.75 \sqrt{\frac{2.145 \cdot 10^{12} \cdot k_T}{(d_T - 2 \delta_T) \cdot N_8}}) \right] .$$

2.4 Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов (ТН)

Коэффициент использования тепловых нейтронов - это доля тепло-вых нейтронов, поглощаемых делящимися под действием тепловых нейтронов ядрами топлива, от числа тепловых нейтронов, поглощаемых за тот же промежуток времени всеми материалами активной зоны.

Смысл этого коэффициента прост: если, скажем, $k = 0.805$, то это означает, что из каждой тысячи поглощаемых ежесекундно ядрами всех материалов активной зоны тепловых нейтронов 805 поглощаются ядрами урана-235, а остальные 195 тепловых нейтронов непроизводительно поглощаются за ту же секунду остальными (кроме урана-235) компонентами активной зоны.

Вычисление величины коэффициента использования тепловых нейтронов производится с использованием метода *двухзонной гомогенизации*, краткая суть которого состоит в том, что реальная совокупность различных по составу ячеек в ТВС условно заменяется таким же количеством ячеек *одинаковых, усреднённых по составу*, и величина k рассчитывается для *одной* такой усреднённой ячейки (часто называемой *эквивалентной* ячейкой).

Как получается такая ячейка? - Вся тепловыделяющая сборка состоит из n_T ТВЭЛОВ, поэтому предполагается, что она условно состоит из n_T эквивалентных ячеек, каждая из которых имеет реальную основу – *топливный блок, равнообъёмный цилиндрическому топливному сердечнику ТВЭЛА, окружённый кольцевым слоем гомогенизированного замедлителя*, в состав которого входят относящиеся к одному ТВЭЛУ реальный замедлитель (вода), циркониевый сплав оболочки ТВЭЛА и нержавеющая сталь труб, входящих в состав ТВС. Поэтому, если полные объёмы циркониевого сплава и нержавеющей стали в ТВС разделить поровну на n_T частей, то каждая из таких частей и будет соответственно объёмом циркониевого сплава или стали, *относящимся к одному ТВЭЛУ*.

Теперь, если вообразить, что вода, циркониевый сплав и сталь, относящиеся к одному ТВЭЛУ, «перетираются в атомный порошок» и равномерно распределяются в окружающем топливный блок кольцевом слое равной толщины, имеющем объём, равный суммарному объёму воды, циркониевого сплава и стали, относящихся к одному ТВЭЛУ, то несложно понять, что собой представляет упомянутый *гомогенизированный замедлитель*. Таким образом, эквивалентная ячейка, имея объём топливного блока, *равный* объёму реальной топливной композиции одного ТВЭЛА, обладает общим объёмом, немного большим, чем объём реальной ячейки (а именно, на величину объёма нержавеющей стали, приходящегося на один ТВЭЛ в ТВС).

Поскольку в расчётных зависимостях двухзонной гомогенизации фигурируют не абсолютные величины объёмов материалов ячейки, а их отношения, то находить объём гомогенизированного замедлителя нет нужды: отношения этих объёмов равны отношениям площадей поперечных сечений, занятых материалами в ТВС, которые уже вычислены в предварительном расчёте.

Величина коэффициента использования тепловых нейтронов по методике двухзонной гомогенизации находится как произведение:

$$\theta = \theta_{\text{тк}} \theta,$$

где $\theta_{\text{тк}}$ – коэффициент использования тепловых нейтронов в топливной композиции (то есть доля тепловых нейтронов, поглощаемых ядрами урана-235, от всех тепловых нейтронов, поглощаемых всеми компонентами топливной композиции – ядрами ^{235}U , ^{238}U и кислорода); θ – относительная доля поглощений тепловых нейтронов топливным блоком среди поглощений тепловых нейтронов всеми материалами эквивалентной ячейки.

Топливная композиция – среда гомогенная, поэтому величина $\theta_{\text{тк}}$ легко находится по формуле для гомогенных сред, как соотношение макросечений поглощения ^{235}U и всей топливной композиции

$$\theta_{\text{тк}} = \Sigma_a^5 / \Sigma_a^{\text{тк}},$$

вычисленных ранее в предварительном расчёте.

Относительная доля поглощений тепловых нейтронов топливным блоком в ячейке θ находится по теоретической зависимости:

$$\theta_o = \left(\frac{\Sigma_a^3 \cdot S^{\text{я}}}{\Sigma_a^{\text{тк}} \cdot S^{\text{я}}_{\text{тк}}} \cdot F + E \right)^{-1},$$

учитывающей как соотношение величин макросечений поглощения гомогенизированного замедлителя и топливной композиции ($\Sigma_a^3 / \Sigma_a^{\text{тк}}$), соотношение площадей поперечных сечений их в ячейке ($S^{\text{я}} / S_{\text{тк}}^{\text{я}}$), так и влияние гетерогенных эффектов на величину коэффициента использования тепловых нейтронов (F – коэффициент экранировки – мера внутреннего блок-эффекта; E – относительная величина избыточного поглощения тепловых нейтронов в гомогенизированном замедлителе ячейки – мера внешнего блок-эффекта).

Величины F и E определяются по эмпирическим формулам

$$F \approx 1 + \frac{d}{30L_{\text{тк}}} \left(1 + \frac{d}{2L_{\text{тк}}} \right)^{0.1} = + \frac{S}{2\pi L^2} \left[\frac{\ln d}{d^*} + \frac{d^2}{1} + \frac{d^2}{4} \right]^{0.75}.$$

В этих формулах фигурируют до сих пор не найденные величины:

$$L_{\text{тк}} = \frac{1}{\sqrt{3 \Sigma_a^{\text{тк}} \Sigma_{\text{tr}}^{\text{тк}}}}, \text{ см, — длина диффузии в топливной композиции;}$$

$$d_{\text{тк}} = d_{\text{т}} - 2\delta_{\text{т}}, \text{ см — диаметр топливного блока (диаметр таблетки твэла);}$$

$$d^* = \frac{d_{\text{тк}}}{d_{\text{я}}} - \text{относительный диаметр топливного блока в ячейке}$$

$$d_{\text{я}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{я}}}{\pi}}, \text{ см — эквивалентный диаметр ячейки;}$$

$$S_{\text{я}} = \frac{S_{\text{твс}}}{n_{\text{т}}}, \text{ см}^2 - \text{площадь поперечного сечения одиночной ячейки;}$$

$$L_{\text{з}}^2 = \frac{1}{3 \Sigma_a^{\text{з}} \Sigma_{\text{tr}}^{\text{з}}}, \text{ см}^2 - \text{площадь диффузии гомогенизированного замедлителя.}$$

Поэтому для того, чтобы воспользоваться для расчёта этими формулами, необходимо выполнить ряд предварительных «геометрических» вычислений, а также найти величины макросечений (поглощения и транспортного) для гомогенизированного замедлителя, определяемые как средневзвешенные значения:

$$\Sigma_a^3 = \frac{\sum_a^B \cdot S_B^y + \sum_a^{Zr} \cdot S_{Zr}^y + \sum_a^{ст} \cdot S_{ст}^y}{S_B^y + S_{Zr}^y + S_{ст}^y}, \text{см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^3 = \frac{\sum_{tr}^B \cdot S_B^y + \sum_{tr}^{Zr} \cdot S_{Zr}^y + \sum_{tr}^{ст} \cdot S_{ст}^y}{S_B^y + S_{Zr}^y + S_{ст}^y}, \text{см}^{-1}.$$

С учётом всего сказанного алгоритм расчёта величины коэффициента использования тепловых нейтронов выглядит так.

2.4.1 Площадь поперечного сечения одиночной ячейки $S_y = \frac{S_{твс}}{n_T}, \text{см}^2.$

2.4.2 Площадь поперечного сечения топлива в ячейке $S_{тк}^y = \frac{S_{тк}}{n_T}, \text{см}^2.$

2.4.3 Площадь сечения циркониевого сплава в ячейке $S_{Zr}^y = \frac{S_{Zr}}{n_T}, \text{см}^2.$

2.4.4 Площадь поперечного сечения стали в ячейке $S_{ст}^y = \frac{S_{ст}}{n_T}, \text{см}^2.$

2.4.5 Площадь поперечного сечения воды в ячейке $S_B^y = \frac{S_B}{n_T}, \text{см}^2.$

2.4.6 Площадь сечения гомогенизированного замедлителя в ячейке

$$S_z^y = S_B^y + S_{Zr}^y + S_{ст}^y, \text{см}^2.$$

2.4.7 Эквивалентный диаметр ячейки $d_y = \sqrt{\frac{4S_y}{\pi}}, \text{см}.$

2.4.8 Диаметр топливного блока в ячейке $d_{тк} = d_T - 2\delta_T, \text{см}.$

2.4.9 Относительный диаметр топливного блока в ячейке $d_* = \frac{d_{тк}}{d_y}.$

2.4.10 Коэффициент использования ТН в топливной композиции

$$\theta_{тк} = \frac{\sum_a^5}{\sum_a^{тк}}.$$

2.4.11 Длина диффузии тепловых нейтронов в топливной композиции.

Квадрат длины диффузии любой диффузионной среды (вещества) – по определению – это шестая часть среднего квадрата линейного пространственного смещения теплового нейтрона за время диффузии в этой среде (от точки рождения теплового нейтрона до точки его поглощения). В кинетической теории показано, что величина этого квадрата определяется через поглощающие и транспортные свойства рассматриваемой среды:

$$L^2 = \frac{1}{\sum_a^3 \Sigma_{tr}^a}, \text{ см}^2.$$

Поэтому применительно к среде топливной композиции сама величина длины диффузии тепловых нейтронов в ней

$$L_{\text{TK}} = \frac{1}{\sqrt{3 \sum_a^3 \Sigma_{\text{TK}}^a \Sigma_{tr}^a}}, \text{ см}.$$

Кроме того, длина диффузии вещества интерпретируется *толщиной слоя этого вещества, ослабляющего плотность потока тепловых нейтронов от бесконечного плоского их источника в 2.718 раза* (e – основание натурального логарифма).

2.4.12 Коэффициент экранировки в топливном блоке ячейки.

Тепловые нейтроны, рождаясь в результате замедления быстрых нейтронов *в замедлителе* ячейки, в силу закона Фика диффундируют в топливный блок, обладающий сильными поглощающими свойствами, в результате чего величина плотности их потока по мере диффузии от поверхности топливной таблетки к её оси заметно снижается.

Это явление называют *внутренним блок-эффектом* или эффектом *само-экранировки* топлива. Количественной мерой этого эффекта служит коэффициент экранировки, равный *отношению плотности потока на поверхности топливного блока к среднерадиальному её значению в топливном блоке*.

Строго говоря, коэффициент экранировки описывается существенно более громоздким выражением, получаемым в результате решения волнового уравнения диффузии в среде топливного блока. Поэтому здесь для вычисления коэффициента экранировки используется приближённая формула, определяемая тем же параметром – относительным диаметром топливного блока - $d_{\text{TK}}/L_{\text{TK}}$:

$$F \approx 1 + \frac{d_{\text{TK}}}{30L_{\text{TK}}} \left(1 - \frac{d_{\text{TK}}}{2L_{\text{TK}}} \right).$$

2.4.13 Эффективное макросечение поглощения гомогенизированного замедлителя

$$\Sigma_a^3 = \frac{\sum_B^3 \cdot S_B^3 + \sum_a^3 \cdot S_a^3 + \sum_{tr}^3 \cdot S_{tr}^3}{S_{\text{я}}^3}, \text{ см}^{-1}.$$

2.4.14 Транспортное макросечение гомогенизированного замедлителя

$$\Sigma_{tr}^3 = \frac{\sum_{tr}^3 \cdot S_{tr}^3 + \sum_B^3 \cdot S_B^3 + \sum_a^3 \cdot S_a^3 + \sum_{tr}^3 \cdot S_{tr}^3}{S_{\text{я}}^3}, \text{ см}^{-1}.$$

2.4.15 Квадрат длины диффузии в гомогенизированном замедлителе

$$L^2 = \frac{1}{\sum_a^3 \Sigma_{tr}^a}, \text{ см}^2.$$

2.4.16 Относительное избыточное поглощение тепловых нейтронов в гомогенизированном замедлителе эквивалентной ячейки. Эта величина

является, как отмечалось, мерой внешнего блок-эффекта в двухзонной ячейке. *Внешним блок-эффектом* принято называть эффект непрерывного снижения плотности потока тепловых нейтронов по мере их диффузии от периферии ячейки к топливному блоку (топливу твэла) в замедлителе, обусловленный ненулевыми поглощающими свойствами любого реального замедлителя.

Коэффициент относительного избыточного поглощения тепловых нейтронов в замедлителе ячейки E – как меры внешнего блок-эффекта – представляет собой число, показывающее, во сколько раз число тепловых нейтронов, ежесекундно поглощаемых во всей двухзонной ячейке, больше числа их, ежесекундно поглощаемых в топливном блоке ячейки.

Точное выражение для E находится из решения стационарного волнового уравнения диффузии для кольцевого слоя замедлителя двухзонной ячейки и представляет собой громоздкую комбинацию разнородных бесселевых функций первого рода нулевого и первого порядков, а потому очень неудобно для вычислений. В.Н. Пучков [5] получил достаточно точное (с относительной погрешностью $\approx 3\pm\%$) выражение для E через те же основные параметры, которые фигурируют при решении волнового уравнения (площадь ячейки $S_{\text{я}}$, длины диффузии в замедлителе L_3 и относительного диаметра топливного блока в ячейке d^*):

$$E = 1 + \frac{S_{\text{я}}}{2\pi L_3^2} \left[\frac{\ln d^*}{d^{*2} - 1} + \frac{d^{*2}}{4} - 0.75 \right].$$

$$2.4.17 \text{ Доля поглощений ТН топливом в ячейке } \theta_o = \left(\frac{\sum_a \cdot S_{\text{я}}}{\sum_{\text{а}}^{\text{ТК}} \cdot S_{\text{я}}^{\text{ТК}}} \cdot F \right)^{-1}.$$

$$2.4.18 \text{ Коэффициент использования ТН в решётке твэлов реактора } \theta = \theta_{\text{ТК}} \theta.$$

2.5 Квадрат длины диффузии в решётке твэлов активной зоны

Эта величина находится как *средневзвешенная* величина квадратов длин диффузии в топливной композиции и гомогенизированном замедлителе по формуле

$$L^2 = L_3^2(1 - \theta_o) + L_{\text{ТК}}^2 \theta,$$

в которую входят все ранее рассчитанные величины.

2.6 Величина возраста тепловых нейтронов в активной зоне ВВЭР

Возраст тепловых нейтронов в гетерогенной среде активной зоны рассчитывается исходя из «стандартного» возраста основного замедлителя (воды) $\tau_{\text{Т0}}^{\text{В}} = 29.6 \text{ с.м}^2$ по интерполяционной формуле:

$$\tau_{\text{T}} = 29.6(1.4808 - 0.062 \ln T) \left[\frac{S_{\text{ТВС}}}{\gamma_{\text{В}} S_{\text{В}} + 0.82 S_{\text{ТК}} + 0.4 S_{\text{Зr}} + 0.28 S_{\text{СТ}}} \right]^2, \text{ с.м}^2.$$

В этой формуле сомножитель $(1.4808 - \ln T_{\text{н}})$ учитывает подвижку спектра тепловых нейтронов в область более высоких энергий с ростом температуры активной зоны (а следовательно, - и связанное с увеличением температуры

тепловых нейтронов увеличение энергии сшивки). Второй множитель отражает отклонение средней величины возраста тепловых нейтронов от значения возраста для чистой воды, связанное с наличием в активной зоне не только воды, но и топливной композиции, циркониевого сплава оболочек и стали труб.

Введение множителя $\mathbb{K}$ учитывает изменение удельного объёма воды в ТВС вследствие более высоких (по сравнению с нормальными) величин температуры и давления её в активной зоне. Множители перед величинами площади поперечного сечения прочих материалов активной зоны являются «весовыми коэффициентами» влияния этих материалов на величину среднего возраста тепловых нейтронов в активной зоне.

2.7 Величина эффективной добавки Эта

величина рассчитывается по эмпирической формуле

$$\delta_3 \approx 3.2 + 0.1(L^2 + \tau_T), \text{ см.}$$

2.8 Величина геометрического параметра активной зоны реактора

- находится по известной теоретической зависимости

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H \mathbb{Z}_3} \right)^2 + \left(\frac{4.81}{D \mathbb{Z}_5} \right)^2, \text{ см}^{-2}.$$

2.9 Вероятность избежания утечки замедляющихся нейтронов

- в возрастном приближении равна $p_3 = \exp(-B^2 \tau_T)$.

2.10 Вероятность избежания утечки тепловых нейтронов

- в диффузионном приближении равна $p_T = (1 + B^2 L_{a3}^2)^{-1}$.

2.11 Коэффициент размножения в бесконечной среде

- находится как произведение четырёх ранее найденных сомножителей:

$$k_\infty = \mathbb{K} \varepsilon \varphi \theta$$

2.12 Эффективный коэффициент размножения в реакторе

- находится умножением величины k_∞ на величины двух вероятностей избежания утечки $k_3 = k p_3 p_T$.

2.13 Величина начального запаса реактивности реактора

$$\rho_3 = \frac{1}{1} \times \frac{1}{(1)} 100, \% k_3$$

УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ РАСЧЕТА

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД к исполнению текстовых конструкторских документов. Основными из них являются следующие.

1. Записка выполняется на стандартных листах белой (или клетчатой) бумаги размером 210 297 (формат А4 по международной классификации).

2. Обязательными атрибутами записки являются:

- титульный лист;
- задание с исходными данными и фамилией исполнителя;
- перечень сокращений, не являющихся общеупотребительными;
- текстово-расчётная часть, в обязательном порядке разбиваемая на разделы, пункты и подпункты, причём, каждый пункт (подпункт) должен иметь:

а) полное название рассчитываемой величины, исключающее её неоднозначное толкование; в названиях не допускается такое построение предложений, в котором в явном или неявном виде подчёркивалась бы личность автора (манера типа «вычисляем..., ...находим..., ...рассчитываю...» и т.п.);

б) расчётную формулу, в которую в том же порядке подставляются числовые значения входящих в неё величин, численный результат расчёта (без промежуточных вычислений), размерность вычисленной величины;

в) при необходимости – пояснения (если расчёты выполняются по новой методике или местами отклоняющейся от стандартной методики);

г) текстовая часть документа должна завершаться *выводом (выводами)*, логически вытекающими из произведенных расчётов.

- пронумерованный перечень всей справочной, методической и иной литературы, использованной для обоснований и ведения расчётов, ссылки на источники которого имеются в тексте пояснительной записки; каждый литературный источник записывается в перечне по установленной форме: Фамилии и инициалы автора (авторов). Полное название книги. Краткое (или полное) название издательства. Город издательства (Москва – М., Ленинград – Л., Санкт-Петербург – СПб, остальные города – без сокращений). Год издания.

Требуемая точность выполнения расчётов – *четыре значащие цифры* в любом пункте расчёта. То есть результаты должны выглядеть так: 3.125, 0.01483, 128.7, 39.42, 1293.0, 5.944, 84.36, $1.755 \cdot 10^{21}$, $2.275 \cdot 10^{22}$ (но не $17.55 \cdot 10^{20}$, и не $175.5 \cdot 10^{19}$, и не $0.2275 \cdot 10^{-23}$: характеристика записываемой в экспоненциальной форме величины должна иметь целую часть, выражаемую числом от 1 до 10).

ПРИМЕР РАСЧЁТА И ОФОРМЛЕНИЯ

РАСЧЁТ НАЧАЛЬНОГО ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ ВВЭР

Исходные данные (следует лист - бланк задания на расчет)

1 Предварительный расчёт

1.1 Расчёт площадей поперечных сечений материалов в ТВС Чертёж поперечного сечения ТВС показан на рис.1.

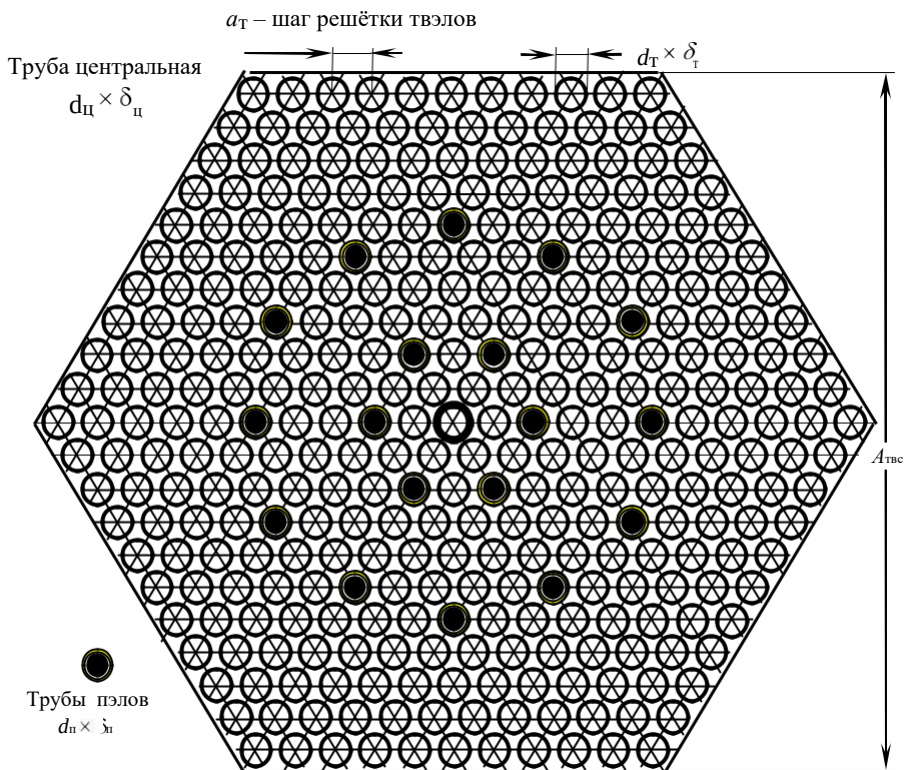


Рис.1 – Поперечное сечение тепловыделяющей сборки

1.1.1 Площадь поперечного сечения тепловыделяющей сборки

$$S_{\text{ТВС}} = \frac{\sqrt{3}}{2} A_{\text{ТВС}}^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 22.55^2 = 440.38 \text{ см}^2.$$

1.1.2 Площадь поперечного сечения всех ТВС в активной зоне

$$S_{\text{аз}} = m S_{\text{ТВС}} = 163 \cdot 440.38 = 71781 \text{ см}^2.$$

1.1.3 Эквивалентный диаметр активной зоны

$$D_{\text{аз}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{аз}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 71781}{\pi}} = 302.32 \text{ см}.$$

1.1.4 Площадь поперечного сечения топливной композиции в ТВС

$$S_{\text{ТК}} = \frac{\pi(d_{\text{Т}} - 2\delta_{\text{Т}})^2}{4} \cdot n_{\text{Т}} = \frac{\pi(0.94 - 2 \cdot 0.084)^2}{4} \cdot 312 = 146.04 \text{ см}^2.$$

1.1.5 Площадь поперечного сечения циркониевых оболочек ТВЭЛОВ

$$S_{\text{ЗГ}} = n_{\text{Т}} \pi \delta_{\text{Т}} (d_{\text{Т}} - \delta_{\text{Т}}) = 312 \pi \cdot 0.084 (0.94 - 0.084) = 70.479 \text{ см}^2.$$

1.1.6 Площадь поперечного сечения нержавеющей стали в ТВС

$$S_{\text{СТ}} = \pi [n_{\text{П}} \delta_{\text{П}} (d_{\text{П}} - \delta_{\text{П}}) + \delta_{\text{Ц}} (d_{\text{Ц}} - \delta_{\text{Ц}})] = \pi [18 \cdot 0.2 (1.2 - 0.2) + 0.25 (1.25 - 0.2)] = 11.97 \text{ см}^2.$$

1.1.7 Площадь поперечного сечения воды в отдельной ТВС

$$S_{\text{В}} = S_{\text{ТВС}} - S_{\text{ТК}} - S_{\text{ЗГ}} - S_{\text{СТ}} = 440.38 - 146.04 - 70.479 - 11.97 = 211.89 \text{ см}^2.$$

1.2 Расчёт молекулярных и ядерных концентраций компонентов

1.2.1 Молекулярная концентрация топливной композиции (UO₂)

$$N_{\text{ТК}} = \gamma_{\text{ТК}} \frac{N_{\text{А}}}{M_{\text{UO}_2}} = 10.2 \frac{6.0221 \cdot 10^{23}}{270} = 2.275 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

1.2.2 Ядерная концентрация кислорода в топливной композиции

$$N_{\text{О}} = 2 N_{\text{ТК}} = 4.55 \cdot 10^{22}, \text{ см}^{-3}.$$

1.2.3 Ядерная концентрация урана-235 в топливной композиции

$$N_5 = N_{\text{U}} x = 2.275 \cdot 10^{22} \cdot 0.04 = 9.1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}.$$

1.2.4 Ядерная концентрация урана-238 в топливной композиции

$$N_8 = N_{\text{U}} (1 - x) = 2.275 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0.04) = 2.184 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

1.2.5 Средняя плотность воды в активной зоне реактора - $\gamma_{\text{В}}$, г/см³ - находится по заданному давлению и средней температуре воды по программе теплофизических свойств воды - International Association for Properties of Water and Steam (IAPWS): $v = v(16 \text{ МПа}, 270^\circ \text{C}) = 1.2793 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $\gamma_{\text{В}} = 10^{-3}/v = 0.78168 \text{ г/см}^3$.

1.2.6 Средняя молекулярная концентрация воды в реакторе

$$N_{\text{В}} = \gamma_{\text{В}} \frac{N_{\text{А}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 0.78168 \frac{6.0221 \cdot 10^{23}}{18.02} = 2.6123 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

1.3 Расчёт эффективных микросечений поглощения компонентов

1.3.1 Температура нейтронов $T_{\text{Н}} = 1.2(t_{\text{В}} + 273) = 1.2(270 + 273) = 651.6 \text{ К}$.

1.3.2 Коэффициент усреднения сечений поглощения по спектру Максвелла с учётом температурного ужесточения спектра

$$k_t = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293}{T_{\text{Н}}}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293}{651.6}} = 0.59428$$

1.3.3 Фактор Весткотта для сечения поглощения урана-235

$$g_a^5 = 0.912 + 0.25 \exp(-0.00475 T_{\text{Н}}) = 0.912 + 0.25 \exp(-0.00475 \cdot 651.6) = 0.92331.$$

1.3.4 Эффективное микросечение поглощения урана-235

$$\sigma_a^5 = \sigma_0^5 k_t g_a^5 = 680.9 \cdot 0.59428 \cdot 0.92331 = 373.61 \text{ барн} \quad (\sigma_0^5 = 680.9 \text{ барн} [3]).$$

1.3.5 Эффективное микросечение поглощения урана-238

$$\sigma_a^8 = \sigma_{a0}^8 k_t = 2.71 \cdot 0.59428 = 1.6105 \text{ барн. } (\sigma_{a0}^8 = 2.71 \text{ барн [2]}).$$

1.3.6 Эффективное микросечение поглощения кислорода в топливной композиции полагается равным 0 (т.к. стандартное микросечение поглощения кислорода – величина, меньшая 10^{-4} барн [2]).

1.3.7 Эффективное микросечение поглощения воды

$$\sigma_a^B = \sigma_{a0}^B k_t = 0.66 \cdot 0.59428 = 0.39222 \text{ барн (т.к. } \sigma_{a0}^B = 0.66 \text{ барн [2]}).$$

1.4 Расчёт эффективных макросечений поглощения материалов ТВС

1.4.1 Макросечение поглощения урана-235

$$\Sigma_a^5 = \sigma_a^5 \cdot N_5 \cdot 10^{-24} = 373.61 \cdot 9.1 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-24} = 0.33999 \text{ см}^{-1}.$$

1.4.2 Макросечение поглощения урана-238

$$\Sigma_a^8 = \sigma_a^8 N_8 \cdot 10^{-24} = 1.6105 \cdot 2.184 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0.035173 \text{ см}^{-1}.$$

1.4.3 Макросечение поглощения топливной композиции

$$\Sigma_a^{\text{TK}} = \Sigma_a^5 + \Sigma_a^8 = 0.33999 + 0.035173 = 0.37516 \text{ см}^{-1}.$$

1.4.4 Макросечение поглощения циркониевого сплава оболочек

$$\Sigma_a^{\text{Zr}} = \sigma_{a0}^{\text{Zr}} k_t = 0.0515 \cdot 0.59428 = 0.030605 \text{ см}^{-1} \quad (\sigma_{a0}^{\text{Zr}} = 0.0515 \text{ см}^{-1} [2]).$$

1.4.5 Макросечение поглощения нержавеющей стали труб ТВС

$$\Sigma_a^{\text{CT}} = \sigma_{a0}^{\text{CT}} k_t = 0.239 \cdot 0.59428 = 0.14203 \text{ см}^{-1} \quad (\sigma_{a0}^{\text{CT}} = 0.239 \text{ см}^{-1} [2]).$$

1.4.6 Макросечение поглощения воды в ТВС

$$\Sigma_a^B = \sigma_a^B N_B \cdot 10^{-24} = 0.39222 \cdot 2.6123 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0.010246 \text{ см}^{-1}.$$

1.5 Расчёт транспортных макросечений материалов ТВС

Транспортные макросечения для циркониевого сплава и нержавеющей стали от температуры практически не зависят и находятся из справочника [2]

$$\Sigma_{tr}^{\text{Zr}} = 2.21 \text{ см}^{-1}, \Sigma_{tr}^{\text{CT}} = 0.861 \text{ см}^{-1}.$$

1.5.1 Транспортное макросечение ^{235}U

$$\Sigma_{tr}^5 = \sigma_{tr}^5 N_5 \cdot 10^{-24} = 15.16 \cdot 10^{-24} \cdot 9.1 \cdot 10^{20} = 0.0138 \text{ см}^{-1} \quad (\sigma_{tr}^5 = 15.16 \text{ барн [2]}).$$

1.5.2 Транспортное макросечение ^{238}U

$$\Sigma_{tr}^8 = \sigma_{tr}^8 N_8 \cdot 10^{-24} = 8.38 \cdot 10^{-24} \cdot 2.184 \cdot 10^{22} = 0.1830 \text{ см}^{-1} \quad (\sigma_{tr}^8 = 8.38 \text{ барн [2]}).$$

1.5.3 Транспортное макросечение кислорода в топливной композиции

$$\Sigma_{tr}^O = \sigma_{tr}^O N_O \cdot 10^{-24} = 4.2 \cdot 10^{-24} \cdot 4.55 \cdot 10^{22} = 0.1911 \text{ см}^{-1} \quad (\text{т.к. } \sigma_{tr}^O = 4.2 \text{ барн [2]}).$$

1.5.4 Транспортное макросечение топливной композиции

$$\Sigma_{tr}^{\text{TK}} = \Sigma_{tr}^5 + \Sigma_{tr}^8 + \Sigma_{tr}^O = 0.0138 + 0.1830 + 0.1911 = 0.3879 \text{ см}^{-1},$$

1.5.5 Транспортное макросечение воды

$$\Sigma_{tr}^B = \sigma_{tr}^B N_B \cdot 10^{-24} = 61.1 \cdot 10^{-24} \cdot 2.6123 \cdot 10^{22} = 1.5961 \text{ см}^{-1}.$$

2. Расчёт начального запаса реактивности реактора

2.1 Эффективный выход нейтронов деления

В свежем топливе в начале кампании один делящийся тепловыми нейтронами нуклид – уран-235, для которого стандартная (при $T_H = 293\text{ K}$) величина $\beta = 2.071$. С учётом того, что температура нейтронов в активной зоне в заданном исходном состоянии отличается от «комнатной»,

$$\eta = \eta_{50} \left(1 - \frac{0.004}{g_a^5} \right) = 2.071 \left(1 - \frac{0.004}{0.92331} \right) = 2.062,$$

где $g_a^5 = 0.92331$ – величина фактора Весткотта для сечения поглощения урана-235 при $T_H = 651.6\text{ K}$ (п.1.3.4).

2.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

$$2.2.1 \text{ Пористость топлива } b = \frac{N_8}{4.783 \cdot 10^{22}} = \frac{2.184 \cdot 10^{22}}{4.783 \cdot 10^{22}} = 0.4566.$$

2.2.2 Вероятность для нейтрона деления испытать первое взаимодействие внутри топливной композиции этого твэла

$$p = 0.125 (d_T - 2 \cdot \phi) b = 0.125 (0.94 - 2 \cdot 0.84) \cdot 0.4566 = 0.04406.$$

2.2.3 Коэффициент размножения на БН в одиночном твэле

$$\varepsilon_T = 1 - \frac{0.092 p}{1 - 0.52 p} = 1 - \frac{0.092 \cdot 0.04406}{1 - 0.52 \cdot 0.04406} = 1.0041.$$

2.2.4 Коэффициент размножения на БН «тесной» решётки твэлов

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \frac{1.193 \cdot \varepsilon_T}{N_B \cdot S_B} = 1.0041 + \frac{1.193 \cdot 1.0041}{2.6123 \cdot 10^{22} \cdot 211.89} = 1.0251.$$

$$+ \frac{1}{N_B \cdot S_{TK}} + \frac{1}{2.6123 \cdot 10^{22} \cdot 146.04}$$

2.3 Вероятность избежания резонансного захвата

2.3.1 Замедляющая способность воды в резонансном интервале энергий при заданных условиях в активной зоне

$$(\xi_{-s}^B)_{рез} = 1.385 \gamma_B = 1.385 \cdot 0.78168 = 1.0826 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.2 Средняя температура топливной композиции в реакторе

$$T_T = 293 + 4.126 (t_B - 20) = 293 + 4.126 (270 - 20) = 1324.5\text{ K}.$$

2.3.3 Доплеровская температурная поправка по Егизарову

$$k_T = 0.775 (1 + 0.0175 \sqrt{T_T}) = 0.775 (1 + 0.0175 \sqrt{1324.5}) = 1.2686.$$

2.3.4 Вероятность избежания резонансного захвата

$$\varphi = \exp \left[- \frac{N_8 \cdot 10^{24} S_{TK}}{(\xi_{-s}^B)_{рез} \cdot S} \left(3.75 - \frac{2.145 \cdot 10^{12} k_T}{\sqrt{(d_T - 2s_T) N_B}} \right) \right] \Rightarrow.$$

$$= \exp \left[- \frac{2.184 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} \cdot 146.04}{1.0826 \cdot 211.89} \left(3.75 + \frac{2.145 \cdot 10^{12} \cdot 1.2686}{\sqrt{(0.94 - 2 \cdot 0.084) \cdot 2.184 \cdot 10^{22}}} \right) \right] = 0.7093.$$

2.4 Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов

2.4.1 Площадь поперечного сечения одиночной ячейки

$$S_{я} = \frac{S_{\text{твс}}}{n_{\text{т}}} = \frac{440.38}{312} = 1.4115 \text{ см}^2.$$

2.4.2 Площадь поперечного сечения топлива в ячейке

$$S_{\text{тк}}^{\text{я}} = \frac{S_{\text{тк}}}{n_{\text{т}}} = \frac{146.04}{312} = 0.46808 \text{ см}^2.$$

2.4.3 Площадь сечения циркониевого сплава в ячейке

$$S_{\text{Zr}}^{\text{я}} = \frac{S_{\text{Zr}}}{n_{\text{т}}} = \frac{70.479}{312} = 0.22589 \text{ см}^2.$$

2.4.4 Площадь поперечного сечения стали в ячейке

$$S_{\text{ст}}^{\text{я}} = \frac{S_{\text{ст}}}{n_{\text{т}}} = \frac{11.97}{312} = 0.038365 \text{ см}^2.$$

2.4.5 Площадь поперечного сечения воды в ячейке

$$S_{\text{в}}^{\text{я}} = \frac{S_{\text{в}}}{n_{\text{т}}} = \frac{211.89}{312} = 0.67913 \text{ см}^2.$$

2.4.6 Площадь сечения гомогенизированного замедлителя в ячейке

$$S^{\text{я}} = S_{\text{в}}^{\text{я}} + S_{\text{Zr}}^{\text{я}} + S_{\text{ст}}^{\text{я}} = 0.67913 + 0.22589 + 0.038365 = 0.94338 \text{ см}^2.$$

2.4.7 Эквивалентный диаметр ячейки

$$d_{я} = \sqrt{\frac{4S_{я}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.4115}{\pi}} = 1.3406 \text{ см}.$$

2.4.8 Диаметр топлива в ячейке $d_{\text{тк}} = d_{\text{т}} - 2 \delta_{\text{т}} = 0.94 - 2 \cdot 0.084 = 0.772 \text{ см}.$

2.4.9 Относительный диаметр топливного блока в ячейке

$$d^* = \frac{d_{\text{тк}}}{d_{я}} = \frac{0.772}{1.3406} = 0.57586.$$

2.4.10 Коэффициент использования ТН в топливной композиции

$$\theta_{\text{тк}} = \frac{\sum_{a=1}^5 \frac{a}{\Sigma_{a=1}^5 a}}{\sum_{a=1}^5 \frac{a}{\Sigma_{a=1}^5 a}} = \frac{0.33999}{0.37516} = 0.90625.$$

2.4.11 Длина диффузии тепловых нейтронов в топливной композиции

$$L_{\text{тк}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{a=1}^5 \frac{a^2}{\Sigma_{a=1}^5 a^2}}} = \frac{1}{\sqrt{0.37516 \cdot 0.3879}} = 1.5135 \text{ см}$$

2.4.12 Коэффициент экранировки в топливном блоке ячейки

$$F \approx 1 + \frac{d_{\text{тк}}}{30 L_{\text{тк}}} \left(1 + \frac{d_{\text{тк}}}{2 L_{\text{тк}}} \right) \approx 1 + \frac{0.772}{30 \cdot 1.5135} \left(1 + \frac{0.772}{2 \cdot 1.5135} \right) = 1.02134.$$

2.4.13 Макросечение поглощения гомогенизированного замедлителя

$$\Sigma_a^3 = \frac{\Sigma_a^B \cdot S_a^Я + \Sigma_a^{Zr} \cdot S_a^Я + \Sigma_a^{ст} \cdot S_a^Я}{S_a^3} =$$

$$= \frac{0.01025 \cdot 0.6791 + 0.030605 \cdot 0.22589 + 0.14203 \cdot 0.038365}{0.94338} = 0.020483 \text{ см}^{-1}.$$

2.4.14 Транспортное макросечение гомогенизированного замедлителя

$$\Sigma_{tr}^3 = \frac{\Sigma_{tr}^B \cdot S_a^Я + \Sigma_{tr}^{Zr} \cdot S_a^Я + \Sigma_{tr}^{ст} \cdot S_a^Я}{S_a^3} =$$

$$= \frac{1.5961 \cdot 0.6791 + 2.21 \cdot 0.22589 + 0.861 \cdot 0.038365}{0.94338} = 1.7132 \text{ см}^{-1}.$$

2.4.15 Квадрат длины диффузии в гомогенизированном замедлителе

$$L^2 = \frac{1}{3 \Sigma_a^3 \Sigma_{tr}^3} = \frac{1}{3 \cdot 0.020483 \cdot 1.7132} = 9.499 \text{ см}^2.$$

2.4.16 Относительное избыточное поглощение тепловых нейтронов в гомогенизированном замедлителе эквивалентной ячейки

$$E = 1 + \frac{S_a^Я}{2 \pi L^2} \left[\frac{\ln d_*}{d_*^2 - 1} + \frac{d_*^2}{4} - 0.75 \right] = 1 + \frac{1.3115}{2 \pi \cdot 9.499} \left[\frac{\ln 0.57586}{0.57586^2 - 1} + \frac{0.57586^2}{4} - 0.75 \right] =$$

$$= 1.00348.$$

2.4.17 Доля поглощений ТН топливной композицией в ячейке

$$\theta_o = \left(\frac{\Sigma_a^3 \cdot S_a^Я}{\Sigma_{тк} \cdot S_a^Я} \cdot F + E \right)^{-1} = \left(\frac{0.020483 \cdot 0.94338}{0.37516 \cdot 0.46808} \cdot 1.02134 + 1.00348 \right)^{-1} = 0.89616.$$

2.4.18 Коэффициент использования ТН в решётке твэлов реактора

$$\theta = \theta_{тк} \theta_o = 0.90625 \cdot 0.89616 = 0.81215.$$

2.5 Квадрат длины диффузии в решётке твэлов активной зоны

$$L^2 = L_3^2 (1 - \theta_o) + L_{тк}^2 \theta_o = 9.499 (1 - 0.89616) + 1.5135^2 \cdot 0.89616 = 3.039 \text{ см}^2.$$

2.6 Возраст тепловых нейтронов в активной зоне ВВЭР

$$\tau_T = 29.6 (1.4808 - 0.062 \ln T_H) \left[\frac{S_{твс}}{\gamma_B S_B + 0.82 S_{тк} + 0.4 S_{Zr} + 0.28 S_{ст}} \right]^2 = 29.6 (1.4808 -$$

$$- 0.062 \ln 651) \left[\frac{440.38}{0.7817 \cdot 211.89 + 0.82 \cdot 146.04 + 0.4 \cdot 70.48 + 0.28 \cdot 11.97} \right]^2 = 61.67 \text{ см}^2.$$

2.7 Величина эффективной добавки

$$\delta_3 \approx 3.2 + 0.1(L^2 + \tau_T) = 3.2 + 0.1(3.039 + 61.67) = 9.671 \text{ см}.$$

2.8 Величина геометрического параметра активной зоны

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_{аз} + 2\delta_3} \right)^2 + \left(\frac{4.81}{D_{аз} + 2\delta_3} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{328 + 2 \cdot 9.67} \right)^2 + \left(\frac{4.81}{302 + 2 \cdot 9.67} \right)^2 = 3.059 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}$$

2.9 Вероятность избежания утечки замедляющихся нейтронов $p_3 = \exp(-B^2 \tau) = \exp(-3.059 \cdot 10^{-4} \cdot 61.67) = 0.9813$.

2.10 Вероятность избежания утечки тепловых нейтронов
 $p_T = (1 + B^2 L_{az}^2)^{-1} = (1 + 3.059 \cdot 10^{-4} \cdot 3.039)^{-1} = 0.9991$.

2.11 Коэффициент размножения в бесконечной среде
 $k_{\infty} = \eta \varepsilon \varphi \theta = 2.062 \cdot 1.0251 \cdot 0.7093 \cdot 0.81215 = 1.2176$.

2.12 Эффективный коэффициент размножения в реакторе
 $k_3 = k_{\infty} p_3 p_T = 1.34366 \cdot 0.9813 \cdot 0.9991 = 1.1938$.

2.13 Величина начального запаса реактивности реактора

$$\rho_3 = \left(1 - \frac{1}{k_3}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{1}{1.1938}\right) \times 100 = 16.23 \%$$

Итого, величина начального запаса реактивности ВВЭР, для заданных условий эксплуатации, в начале топливной кампании составляет 16.23 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. Справочные таблицы. М.: Энергоиздат., 1986.
2. Гордеев И.В., Кардашев Д.И., Малышев А.В. Ядерно-физические константы. Справочник. М.: Энергоатомиздат., 1989.
3. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. Для студентов ВТУЗ. М.: Энергоатомиздат., 1990.
4. Бартоломей Г.Г. и др. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. Для студентов ВУЗов. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат., 1989.
5. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физика переходных процессов в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат., 1983.
6. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок. М.: Энергоатомиздат., 1989.
7. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки. Для студентов ВУЗов. М.: Энергоатомиздат., 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Алгоритм выполнения расчёта	3
1 Предварительный расчёт	5
2 Расчёт начального запаса реактивности ВВЭР	11
Указания по оформлению пояснительной записки	20
Пример расчёта и оформления	21
Литература	27

Матузаев Кирилл Борисович
Мерзликин Геннадий Яковлевич
Шаповаленко Виктория Владимировна

РАСЧЁТ НАЧАЛЬНОГО ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ ВВЭР

Учебное пособие

В авторской редакции