. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА

Основные параметры и обозначения

Ф(r) – пространственное распределение плотности потока нейтронов, н/(см2·с)

R_o – радиус реактора без отражателя

$R_э$ – радиус экстраполированной границы реактора без отражателя, $R_э = R_o + 0,71\lambda_{tr}$

χ^2 – материальный параметр

α^2 – геометрический параметр

Кэф.- эффективный коэффициент размножения

Рут. – вероятность нейтронам избежать утечки из реактора

PL- вероятность нейтронам избежать утечки в процессе диффузии

Рт- вероятность нейтронам избежать утечки в процессе замедления

Мкр. – критическая масса топлива в реакторе

d, Δ- толщина отражателя

δ-эффективная добавка

Ec-энергия сшивки спектров Ферми и Максвелла, эВ

τ-возраст нейтронов, $см^2$

L^2-квадрат длины диффузии нейтронов, см2

M^2-площадь миграции нейтронов, см2

1.Получить условие критичности реактора любой геометрии без отражателя в диффузионно-одногрупповом приближении, используя решение нестационарного уравнения диффузии.

Отв. $\alpha^2=\chi^2$ (геометрический параметр равен материальному). Это условие следует получить из общего решения нестационарного уравнения диффузии в одногрупповом приближении.

2. Показать, что при равенстве материального параметра геометрическому эффективный коэффициент размножения равен единице.

3. Получить выражение для геометрического параметра, имеющего форму:

а) пластины толщиной *a* бесконечной высоты;

б) цилиндра диаметра *D* бесконечной высоты.

Отв. $\alpha^2_{пл.} = (\pi/a_э)^2$; $\alpha^2_{цил.} = (2{,}405/R_э)^2$

4. Вычислить отношение толщины критической пластины к диаметру критического цилиндра бесконечной высоты, если их состав одинаков. Объяснить полученный результат.

Отв. $a_{пл.} / D_{цил.} = 0{,}65$

5. Получить выражение для геометрического параметра сферического реактора радиуса R

$$\alpha^2_{\text{сф.}} = (\pi/R_э)^2$$

6. Сравнить критический радиус сферического реактора Rсф. с критическим радиусом цилиндрического реактора Rцил. бесконечной высоты. Объяснить различие.

$$R_{сф.} / R_{цил.} = 1{,}3$$

7. Получить выражение для геометрического параметра цилиндрического реактора радиуса R и высоты H.

$$\alpha^2_{\text{цил.}} = (2{,}405/R_э)^2 + .(\pi/H_э)^2$$

8. Определить отношение диаметра к высоте в цилиндрическом критическом реакторе минимального объема.

$$D/H = \frac{2{,}405\sqrt{2}}{\pi}$$

9. Написать выражение для геометрического параметра реактора в форме призмы со сторонами a, b, c и куба со стороной a=b=c

$$\alpha^2 призм.=(\pi/a_э)^2+.(\pi/b_э)^2+(\pi/c_э)^2$$

10. В каком соотношении находятся геометрические параметры критических реакторов сферической и цилиндрической формы, если их состав одинаков?

Отв. χ^2 одинаковы,
след. α^2 одинаковы.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ БЕЗ ОТРАЖАТЕЛЯ

Пространственное распределение нейтронов в реакторе без отражателя $\psi(\vec{r})$ должно удовлетворять волновому уравнению и однородному граничному условию . Потребуем, кроме того, чтобы $\psi(\vec{r})$ была положительной и ограниченной в

области реактора, что следует из физического смысла потока нейтронов.

Очевидно, что пространственное распределение нейтронов зависит от геометрии и размеров реактора. Рассмотрим некоторые конкретные геометрии реактора без отражателя:

1) реактор в виде пластины толщиной $H_э$, (в остальных направлениях размеры бесконечны);

2) реактор в виде сферы радиуса $R_э$;

3) реактор в виде прямого кругового цилиндра радиуса $R_э$ и бесконечной высотой;

4) реактор в виде прямого кругового цилиндра радиуса $R_э$ и высотой $H_э$;

5) реактор в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами ребер $a_э$, $b_э$, $c_э$.

Реактор в виде пластины. Для реактора в виде пластины толщиной $H_э$ задача сводится к одномерной. Если за начало координат принять середину пластины и ось x направить перпендикулярно к поверхности пластины, то систему можно переписать в виде

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\alpha^2\psi;$$

$$\psi\left(x = \pm\frac{H_э}{2}\right) = 0.$$

Поскольку реактор является однородным и начало координат выбрано симметрично относительно границ пластины, нас будет интересовать решение, симметричное относительно начала координат.

Общее решение имеет вид

$$\psi = c_1 \cos\alpha x + c_2 \sin\alpha x.$$

В силу требования симметрии решения c_2 следует положить равным нулю, тогда получим

$$\psi = c_1 \cos\alpha x.$$

Воспользуемся граничным условием :

$$\psi\left(\frac{H_э}{2}\right) = c_1 \cos\alpha\frac{H_э}{2} = 0.$$

Заметим, что нас интересует нетривиальное решение , следовательно, $c_1 \neq 0$. (Для определенности в дальнейшем будем считать $c_1 = 1$.) Тогда

$$\cos \alpha \frac{H_э}{2} = 0 ,$$

откуда получаем для α следующие решения:

$$\alpha_k = \left(\frac{\pi}{2} + k\pi\right) \Big/ \left(\frac{H_э}{2}\right),$$

где $k = 0 , 1 , 2 , ...$

Следовательно, мы получим множество решений системы

$$\psi_k = \cos \alpha_k x .$$

Каждое из этих решений называется собственной функцией, а значение α_k^2 — собственным значением задачи . Выберем из этих решений те, которые удовлетворяют дополнительным требованиям, предъявленным ранее, т.е. являются ограниченными и положительными при $-\frac{H_э}{2} \leq 0 \leq \frac{H_э}{2}$. Из видно, что все ψ_k являются ограниченными. Проверим знак этих функций в области реактора.

Рассмотрим

$$\psi_1 = \cos\frac{3\pi}{H_э}\,x\,.$$

Видно, что эта функция меняет знак внутри интервала $-\frac{H_э}{2} \le x \le \frac{H_э}{2}$. А именно, она положительна в области $-\frac{H_э}{6} \le x \le \frac{H_э}{6}$ и отрицательна в области $-\frac{H_э}{6} < \left|x\right| < \frac{H_э}{6}$. Таким образом, ψ_1 нам не подходит. Очевидно, что ψ_2 также меняет знак в рассматриваемой области. То же самое можно сказать и о любой функции

$$\psi_k = \cos\frac{(2k+1)\pi}{H_э}\,x\,,$$

где $k = 1, 2, 3\ldots$.

Таким образом, существует единственная функция, удовлетворяющая системе и ограниченная и положительная в области реактора:

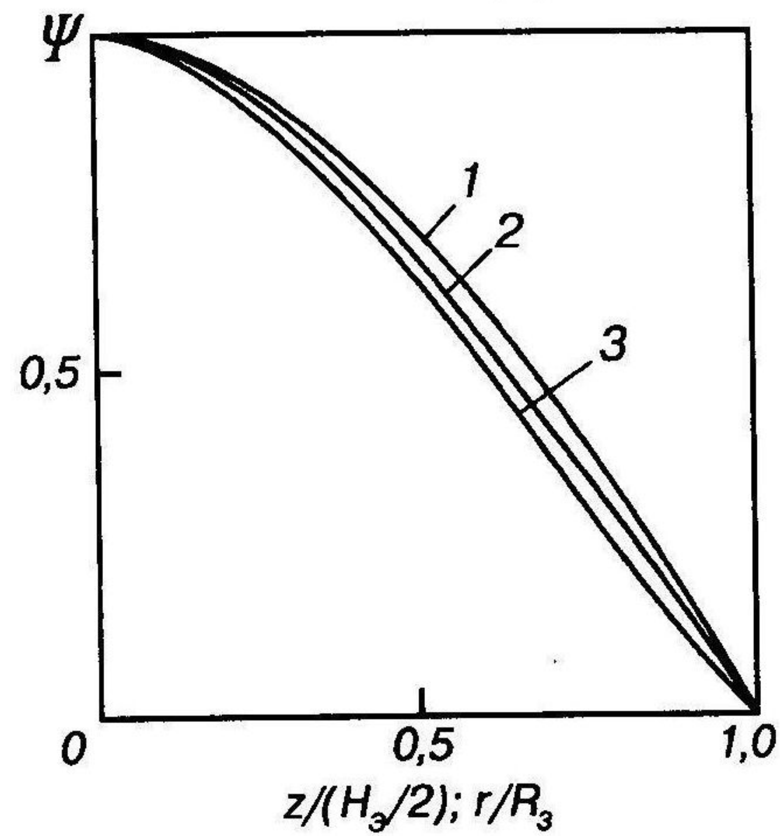
$$\psi = \cos \alpha x,$$

где $\alpha = \dfrac{\pi}{H_э}$.

Откуда

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{H_э}\right)^2.$$

Рис. Пространственное распределение нейтронов в реакторах различной формы без отражателя: 1 — пластина, 2 — цилиндр; 3 — сфера



Следовательно, для реактора в виде пластины распределение нейтронов по координате имеет вид косинуса. На рис. представлены нормированные на величину потока в центре реактора зависимости распределения нейтронного потока от координаты x для пластины, цилиндра и сферы. Зависимости спадают к периферии реактора. Геометрический параметр пластины случая

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{H_э}\right)^2.$$

Реактор в виде сферы. Для реактора в виде однородной сферы радиуса $R_э$, задача сводится к одномерной. Если за начало координат принять центр сферы и использовать сферические координаты, то уравнение примет вид

$$\frac{1}{r^2}\,\frac{d}{dr}\,r^2\,\frac{d\psi}{dr} = -\,\alpha^2\psi\,;$$

$$\psi\left(R_э\right) = 0\,.$$

Для того чтобы решить данную задачу, введем новую искомую функцию

$$u\,(r) = r\,\psi\,(r)\,.$$

Тогда перепишется в виде

$$\frac{d^2u}{dr^2} = -\,\alpha^2 u\,;$$

$$\psi\left(R_э\right) = u\,(0) = 0\,.$$

Требуется пояснить, почему $u(0) = 0$. Поскольку $\psi(r)$ ограниченно в области реактора, то $r\psi(r) \to 0$ при $r \to 0$.

Общее решение уравнения (7.107) имеет вид

$$u = c_1 \sin \alpha r + c_2 \cos \alpha r.$$

Из условия $u(0) = 0$ получим $c_2 = 0$.

Таким образом:

$$u = c_1 \sin \alpha r.$$

Из условия $u\left(R_э\right) = 0$ следует

$$c_1 \sin \alpha R_э = 0.$$

Поскольку $c_1 \neq 0$ (иначе мы будем иметь тривиальное решение), то

$$\sin \alpha R_э = 0.$$

Откуда получаем

$$\alpha_k = \frac{\pi + k\pi}{R_э}.$$

Следовательно, мы получим множество решений u_k и множество решений ψ_k:

$$\psi_k = \frac{u_k}{r}.$$

выражение можно переписать в виде

$$\psi_k = c_1 \frac{\sin \alpha_k r}{r},$$

где c_1 — произвольная константа.

Выберем из этих решений те, которые удовлетворяют требованию положительности в области реактора, т.е. в области $0 \le r < R_э$.

Рассмотрим $\psi_0 = c_1 \dfrac{\sin \dfrac{\pi}{R_э} r}{r}$.

Эта функция при $c_1 > 0$ всюду положительна в области реактора, следовательно, она является подходящим решением поставленной задачи.

Рассмотрим

$$\psi_1 = c_1 \frac{\sin \dfrac{2\pi}{R_э} r}{r}.$$

Нетрудно проверить, что эта функция меняет знак внутри интервала $0 < r < R_э$ и, следовательно, нам не подходит. Очевидно, что ψ_2 также меняет знак в рассматриваемой области. То же самое можно сказать и о любой функции

$$\psi_k = c_1 \frac{\sin \dfrac{\pi (k+1)}{R_э} r}{r},$$

где $k = 1, 2, 3 \ldots$.

Таким образом,существует единственная функция, удовлетворяющая системе ограниченная и положительная в области реактора:

$$\psi = c_1 \frac{\sin \alpha r}{r},$$

где $\alpha = \dfrac{\pi}{R_э}$.

В качестве c_1 удобно принять $c_1 = \dfrac{1}{\alpha}$.

Тогда получим

$$\psi = \frac{\sin \alpha r}{\alpha r};$$

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{R_э}\right)^2.$$

Реактор в виде цилиндра бесконечной высоты. Для реактора в виде прямого кругового цилиндра радиуса $R_э$, и бесконечной высоты задача сводится к одномерной.

Если за начало координат принять ось цилиндра, то систему уравнений можно переписать в виде

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr} r \frac{d\psi}{dr} = -\alpha^2 \psi;$$

$$\psi\left(R_э\right) = 0.$$

Уравнение можно привести к виду

$$x^2 \frac{d^2\psi}{dx^2} + x\frac{d\psi}{dx} + x^2\psi = 0,$$

где через x обозначено $x = \alpha r$.

Сравним уравнение с уравнением Бесселя, которое, как известно, имеет вид

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + \left(x^2 - n^2\right) y = 0 ,$$

Видно, что уравнение совпадает с при $n = 0$. Фундаментальными решениями уравнения являются функции Бесселя

$$y_1 = J_n(x) ;$$

$$y_2 = Y_n(x) .$$

Следовательно, общее решение уравнения имеет вид

$$\psi = c_1 J_0(x) + c_2 Y_0(x) .$$

Функция $Y_0(x)$ неограниченно возрастает по модулю при x, идущем к нулю. В связи с этим из требования ограниченности решения $c_2 = 0$.

Тогда

$$\psi = c_1 J_n(x)$$

или

$$\psi = c_1 J_0(\alpha r) .$$

Произвольную константу c_1 в дальнейшем для определенности примем равной единице:

$$\psi = J_0(\alpha r).$$

Из граничного условия (7.115б) получим требование

$$J_0(\alpha R_э) = 0.$$

Обозначив $\alpha R_э = x_э$, условие перепишем в виде

$$J_0(x_э) = 0,$$

т.е. $x_э$ являются корнями уравнения . Множество корней уравнения протабулировано в порядке возрастания их величин и может быть найдено в математических справочниках:

$$x_{э0} = 2{,}405;$$

$$x_{э1} = 5{,}521;$$

$$x_{э2} = 8{,}654$$

и т.д.

Следовательно, мы будем иметь множество решений системы

$$\psi_0 = J_0\left(\frac{x_{э0}}{R_э}\ r\right);$$

$$\psi_1 = J_0\left(\frac{x_{э1}}{R_э}\ r\right);$$

$$\psi_2 = J_0\left(\frac{x_{э2}}{R_э}\ r\right) \text{ и т.д.}$$

Нетрудно проверить, что требованию положительности решения в области реактора $0 < r < R_э$ удовлетворяет лишь функция

$$\psi = J_0(\alpha r),$$

где $\alpha = \dfrac{x_{э0}}{R_э} = \dfrac{2{,}405}{R_э}$.

При этом геометрический параметр рассматриваемого реактора будет

$$\alpha^2 = \left(\frac{2{,}405}{R_э}\right)^2.$$

Реактор в виде конечного по высоте цилиндра. Для реактора в виде прямого кругового цилиндра радиуса $R_э$ и конечной высоты $H_э$ задача нахождения пространственного распределения нейтронов является двумерной. Если за начало координат принять точку, лежащую на оси цилиндра посередине высоты, то систему можно записать в виде

$$\nabla_r^2 \psi + \nabla_z^2 \psi = -\alpha^2 \psi;$$

$$\psi(r, z) \Big|_{r = R_э} = 0;$$

$$\psi(r, z) \Big|_{z = \pm \frac{H_э}{2}} = 0,$$

где

$$\nabla_r^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r};$$

$$\nabla_z^2 = \frac{\partial}{\partial z^2}.$$

Решение задачи будем искать с помощью метода разделения переменных, т.е. $\psi(r, z)$ представим в виде произведения

$$\psi(r, z) = \psi_r(r)\,\psi_z(z),$$

где $\psi_r(r)$ зависит только от r, $\psi_z(z)$ — только от z.

учитывая, что оператор ∇_r^2 действует только на $\psi_r(r)$, а ∇_z^2 — только $\psi_z(z)$, получим

$$\psi_z \nabla_r^2 \psi_r + \psi_r \nabla_z^2 \psi_z = -\alpha^2 \psi_r \psi_z;$$

$$\psi_r(r)\Big|_{r = R_э} = 0;$$

$$\psi_z(z)\Big|_{z = \pm\frac{H_э}{2}} = 0.$$

Поскольку мы ищем нетривиальное решение, то $\psi_r \neq 0$ и $\psi_z \neq 0$ во внутренней области реактора. В таком случае уравнение можно разделить на ψ_r и ψ_z, в результате получим

$$\frac{\nabla_r^2 \psi_r}{\psi_r} + \frac{\nabla_z^2 \psi_z}{\psi_z} = -\alpha^2$$

или

$$\frac{\nabla_r^2 \psi_r}{\psi_r} = -\left(\alpha^2 + \frac{\nabla_z^2 \psi_z}{\psi_z}\right).$$

В соотношении левая часть зависит только от r, а правая часть — только от z и они равны друг другу. Это может быть только в случае, когда левая и правая части равенства равны одной и той же константе. Обозначим эту константу через $-\alpha_r^2$. (Знак «−» подчеркивает, что мы выбрали отрицательную константу.)

Таким образом,

$$\frac{\nabla_r^2 \psi_r}{\psi_r} = -\alpha_r^2$$

и

$$-\left(\alpha^2 + \frac{\nabla_z^2 \psi_z}{\psi_z}\right) = -\alpha_r^2 .$$

Уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{\nabla_z^2 \psi_z}{\psi_z} = -\alpha_z^2 ,$$

где введено обозначение

$$\alpha_z^2 = \alpha^2 - \alpha_r^2$$

или

$$\alpha^2 = \alpha_z^2 + \alpha_r^2 .$$

Наша исходная задача разбилась на две задачи:

$$\nabla_r^2 \psi_r = - \alpha_r^2 \psi_r ;$$

$$\psi_r \left(R_э \right) = 0$$

и

$$\nabla_z^2 \psi_z = - \alpha_z^2 \psi_r ;$$

$$\psi_z \left(\pm \frac{H_э}{2} \right) = 0 .$$

Но такие задачи нами уже решены, а именно задача совпадает с задачей о распределении нейтронов в цилиндрическом реакторе бесконечной высоты, а задача — с задачей о распределении нейтронов в реакторе в виде пластины. Решения их нам уже известны:

$$\psi_r = J_0(\alpha_r r);$$

$$\alpha_r = \frac{2,405}{R_э}; \qquad \alpha_r^2 = \left(\frac{2,405}{R_э}\right)^2$$

и

$$\psi_z = \cos \alpha_z z;$$

$$\alpha_z = \frac{\pi}{H_э}; \qquad \alpha_z^2 = \left(\frac{\pi}{H_э}\right)^2.$$

Следовательно, решение исходной задачи о распределении нейтронов в цилиндрическом реакторе конечной высоты примет вид

$$\psi = J_0(\alpha_r r) \cos \alpha_z z,$$

где

$$\alpha_r = \frac{2,405}{R_э}; \qquad \alpha_z = \frac{\pi}{H_э},$$

а геометрический параметр такого реактора будет

$$\alpha^2 = \alpha_z^2 + \alpha_r^2.$$

Реактор в виде прямоугольного параллелепипеда. Для реактора в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами ребер $a_э$, $b_э$, $c_э$ задача нахождения пространственного распределения нейтронов является трехмерной. Если за начало координат принять точку, совпадающую с центром параллелепипеда, то систему можно записать в виде

$$\nabla_x^2 \psi + \nabla_y^2 \psi + \nabla_z^2 \psi = -\alpha^2 \psi;$$

$$\psi \Big|_{x = \pm \frac{a_э}{2}} = 0;$$

$$\psi \Big|_{y = \pm \frac{b_э}{2}} = 0;$$

$$\psi \Big|_{z = \pm \frac{c_э}{2}} = 0.$$

Здесь ось x направлена вдоль ребра $a_э$, ось y — вдоль ребра $b_э$, ось z — вдоль $c_э$;

$$\nabla_x^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad \nabla_y^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \quad \nabla_z^2 = \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Решение задачи (7.137) будем искать с помощью метода разделения переменных

$$\psi(x, y, z) = \psi_x(x)\, \psi_y(y)\, \psi_z(z).$$

При этом аналогично предыдущей задаче данная задача распадется на три:

$$\nabla_x^2 \psi_x = -\alpha_x^2 \psi_x;$$

$$\psi_x\left(\pm \frac{a_э}{2}\right) = 0;$$

$$\nabla_y^2 \psi_y = -\alpha_y^2 \psi_y;$$

$$\psi_y\left(\pm \frac{b_э}{2}\right) = 0;$$

$$\nabla_z^2 \psi_z = -\alpha_z^2 \psi_z;$$

$$\psi_z\left(\pm \frac{a_э}{2}\right) = 0.$$

Все эти задачи совпадают с задачей о распределении нейтронов в реакторе в виде пластины, решение которой было найдено выше. Воспользовавшись этим, получим

$$\psi_x = \cos \alpha_x x;$$

$$\psi_y = \cos \alpha_y y;$$

$$\psi_z = \cos \alpha_z z,$$

где

$$\alpha_x = \left(\frac{\pi}{a_э}\right); \qquad \alpha_y = \left(\frac{\pi}{b_э}\right); \qquad \alpha_z = \left(\frac{\pi}{c_э}\right),$$

геометрический параметр будет

$$\alpha^2 = \alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2,$$

а распределение нейтронов

$$\psi = \psi_x \psi_y \psi_z = \left(\cos\frac{\pi}{a_э}x\right)\left(\cos\frac{\pi}{b_э}y\right)\left(\cos\frac{\pi}{c_э}z\right).$$

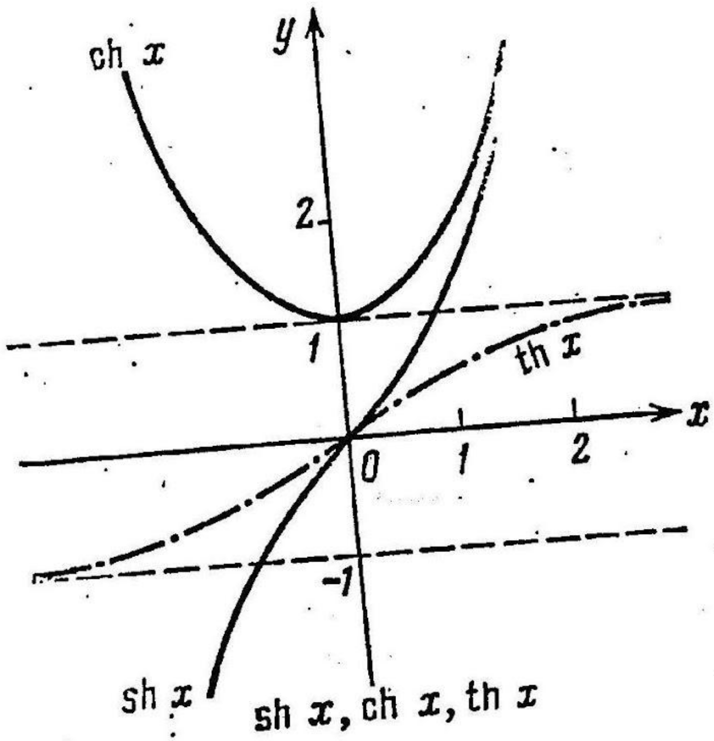
Таким образом, нами получено пространственное распределение нейтронов в реакторе наиболее часто встречающихся геометрических форм, а также значение геометрического параметра в зависимости от формы и размеров реактора.

Все эти данные сведены в таблицу.

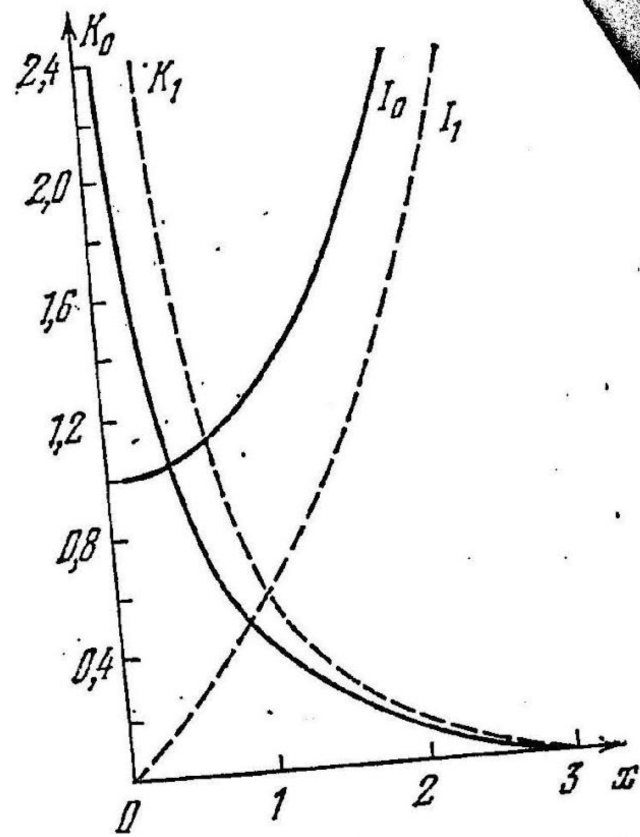
Форма реактора	Геометрический параметр	Пространственное распределение нейтронов
Пластина высотой $H_э$	$\left(\frac{\pi}{H_э}\right)^2$	$\cos \frac{\pi}{H_э} x$
Сфера радиуса $R_э$	$\left(\frac{\pi}{R_э}\right)^2$	$\frac{\sin \alpha r}{\alpha r}$
Цилиндр радиуса $R_э$ бесконечной высоты	$\left(\frac{2{,}405}{R_э}\right)^2$	$J_0\left(\frac{2{,}405}{R_э} r\right)$
Цилиндр конечной высоты $H_э$ радиуса $R_э$	$\left(\frac{2{,}405}{R_э}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_э}\right)^2$	$\left(J_0\left(\frac{2{,}405}{R_э} r\right)\right)\left(\cos \frac{\pi}{H_э} z\right)$
Прямоугольный параллелепипед с размерами $a_э$, $b_э$, $c_э$	$\left(\frac{\pi}{a_э}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b_э}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c_э}\right)^2$	$\left(\cos \frac{\pi}{a_э} x\right)\left(\cos \frac{\pi}{b_э} y\right)\left(\cos \frac{\pi}{c_э} z\right)$

3. Общие решения волнового уравнения $\Delta\phi + \alpha^2\phi = 0$ для разных геометрий.

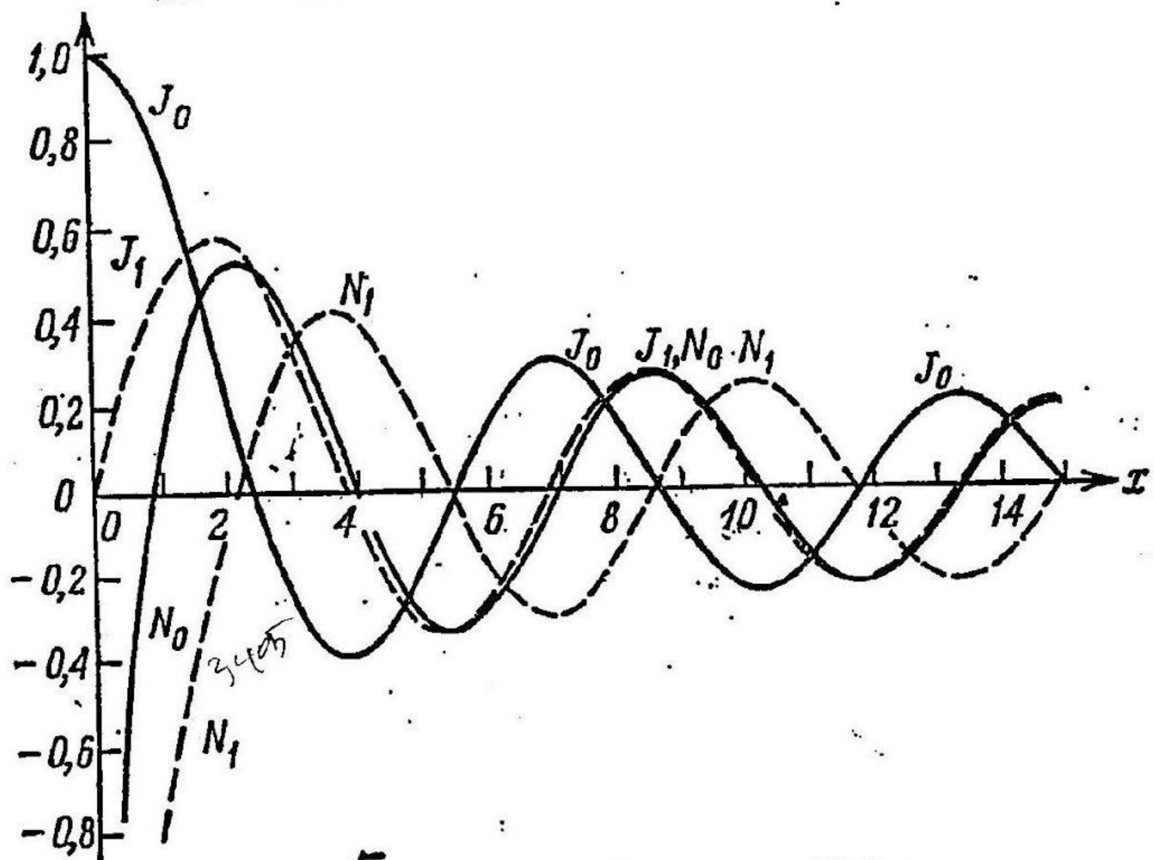
геометрия	$\alpha^2 > 0$	$\alpha^2 < 0$
плоская	$A\sin\alpha x + B\cos\alpha x$	$A\,\mathrm{sh}\,\alpha x + B\,\mathrm{ch}\,\alpha x$
сферическая	$A\dfrac{\sin\alpha r}{r} + B\cdot\dfrac{\cos\alpha r}{r}$	$A\dfrac{\mathrm{sh}\,\alpha r}{r} + B\dfrac{\mathrm{ch}\,\alpha x}{r}$
цилиндрическая	$AJ_0(\alpha r) + BN_0(\alpha r)$	$AI_0(\alpha r) + BK_0(\alpha r)$



6. Гиперболические функции.



7. Модифицированные функции Бесселя и Ганкеля.



5. Функции Бесселя и Неймана.

$$K_{\infty} = \nu_{эф.}(T_{н}) \cdot \theta(T_{н}) \cdot \varphi \cdot \mu$$

$$L^2_{\text{см.}} = \frac{D_{\text{см.}}}{\Sigma_a^{\text{см.}}(T_{\text{н}})} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{\text{см.}}(T_{\text{н}}) \cdot \Sigma_a^{\text{см.}}(T_{\text{н}})}$$

$$L^2_{\text{см.}} = \frac{1}{6} \cdot \overline{\vec{r}_{\text{диф.}}^{\,2}}$$

$$\tau_{см.} = \frac{1}{6} \cdot \overline{\vec{r}_{\text{зам.}}^{\,2}}$$

$$\tau(E_{\text{макс.}}) = \int_{E}^{E_{\text{макс.}}} \frac{D_{\text{см.}}}{(\xi \cdot \Sigma_{\text{s}})^{\text{см.}}} \cdot \frac{dE}{E} = \int_{E}^{E_{\text{макс.}}} \frac{D_{\text{см.}}}{3 \cdot \Sigma_{\text{tr}}^{\text{см.}} \cdot (\xi \cdot \Sigma_{\text{s}})^{\text{см.}}} \cdot \frac{dE}{E}$$

$$[\tau] = \text{см}^2$$

Интерполяционная формула проф. Галанина А.Д.

$$\frac{10^4}{\tau} = A_{зам.,\,зам.} \cdot C^2_{зам.} + A_{U,U} \cdot C^2_U + A_{зам.,U} \cdot C_{зам.} \cdot C_U$$

$$C_U = \frac{N^{в\ см.}_{топл.}}{N^{чист.}_{топл.}} = \frac{1}{C} \cdot \frac{N^{чист.}_{зам.}}{N^{чист.}_{топл.}} \qquad (см.\ табл.)$$

$$L^2_{см.} + \tau_{см.} = M^2_{см.}$$

$$C_{зам.} = \frac{N^{в\ см.}_{зам.}}{N^{чист.}_{зам.}} \approx 1 \quad при \quad C >> 10$$

Площадь миграции

$$L^2_{см.} + \tau_{см.} = M^2_{см.} \approx$$

$$L^2_{\text{см.}} + \tau_{\text{см.}} = M^2_{см.} \approx \tau \qquad L^2_{\mathrm{U0_2+H_2O}} << \tau_{\mathrm{U0_2+H_2O}} \quad \textit{если зам.} - \textit{легкая вода}$$

$$(2{,}7)^2 \text{см}^2 << \quad 30\ \text{см}^2$$

$$L^2_{\text{см.}} + \tau_{\text{см.}} = M^2_{см.} \approx L^2 \qquad L^2_{\mathrm{U0_2+D_2O}} >> \tau_{\mathrm{U0_2+D_2O}} \quad \textit{если зам.} - \textit{тяжелая вода}$$

$$100^2\ \text{см}^2 >> 120\ \text{см}^2$$

разбавление $C\uparrow,\ \ \Sigma_a^{\text{см.}}\downarrow,\ \ L_{\text{см.}}^2 \rightarrow L_{\text{зам.}}^2$

разбавление $C\downarrow,\ \ \Sigma_a^{\text{см.}}\uparrow,\ \ L_{\text{см.}}^2 \rightarrow L_{\text{топ.}}^2$