

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА

Основные параметры и обозначения

$\Phi(r)$ – пространственное распределение плотности потока нейтронов, $n/(cm^2 \cdot s)$

R_0 – радиус реактора без отражателя

$R_{\text{э}}$ – радиус экстраполированной границы реактора без отражателя, $R_{\text{э}} = R_0 + 0,71\lambda_{tr}$

χ^2 – материальный параметр

α^2 – геометрический параметр

Кэф.- эффективный коэффициент размножения

P_{ut} . – вероятность нейтронам избежать утечки из реактора

P_L - вероятность нейтронам избежать утечки в процессе диффузии

P_t - вероятность нейтронам избежать утечки в процессе замедления

$M_{кр.}$ – критическая масса топлива в реакторе

d, Δ - толщина отражателя

δ -эффективная добавка

E_c -энергия сшивки спектров Ферми и
Максвелла, эВ

τ -возраст нейтронов, см²

L^2 -квадрат длины диффузии нейтронов, см²

M^2 -площадь миграции нейтронов, см²

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

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

$$\text{Отв. } \alpha_{\text{пл.}}^2 = (\pi/a_{\text{э}})^2 ; \alpha_{\text{цил.}}^2 = (2,405/R_{\text{э}})^2$$

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

$$\text{Отв. } a_{\text{пл.}} / D_{\text{цил.}} = 0,65$$

5. Получить выражение для
геометрического параметра
сферического реактора
радиуса R

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

6. Сравнить критический радиус сферического реактора $R_{\text{сф.}}$ с критическим радиусом цилиндрического реактора $R_{\text{цил.}}$ бесконечной высоты. Объяснить различие.

$$R_{\text{сф.}} / R_{\text{цил.}} = 1,3$$

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

$$\alpha^2_{\text{цил.}} = (2,405/R_{\text{э}})^2 + (\pi/H_{\text{э}})^2$$

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 $a=b=c$

$$\alpha^2_{\text{призм.}} = (\pi/a_{\text{э}})^2 + (\pi/b_{\text{э}})^2 + (\pi/c_{\text{э}})^2$$

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_0 , (в остальных направлениях размеры бесконечны);

2) реактор в виде сферы радиуса R_0 ;

3) реактор в виде прямого кругового цилиндра радиуса R_0 и бесконечной высотой;

4) реактор в виде прямого кругового цилиндра радиуса R_0 и высотой H_0 ;

5) реактор в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами ребер a_0 , b_0 , c_0 .

Реактор в виде пластины. Для реактора в виде пластины толщиной H_3 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

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

$$\psi \left(x = \pm \frac{H_3}{2} \right) = 0.$$

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 :

$$\psi \left(\frac{H_3}{2} \right) = c_1 \cos \alpha \frac{H_3}{2} = 0.$$

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

$$\cos \alpha \frac{H_3}{2} = 0,$$

откуда получаем для α следующие решения:

$$\alpha_k = \left(\frac{\pi}{2} + k\pi \right) / \left(\frac{H_3}{2} \right),$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

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 $-\frac{H_3}{2} \leq 0 \leq \frac{H_3}{2}$. Из $\psi_k = \cos \alpha_k x$ видно, что все ψ_k являются ограниченными. Проверим знак этих функций в области реактора.

Рассмотрим

$$\psi_1 = \cos \frac{3\pi}{H_3} x.$$

Видно, что эта функция меняет знак внутри интервала $-\frac{H_3}{2} \leq x \leq \frac{H_3}{2}$. А именно, она положительна в области $-\frac{H_3}{6} \leq x \leq \frac{H_3}{6}$ и отрицательна в области $-\frac{H_3}{6} < |x| < \frac{H_3}{6}$. 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

$$\psi_k = \cos \frac{(2k+1)\pi}{H_3} x,$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$.

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

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

где $\alpha = \frac{\pi}{H_3}$.

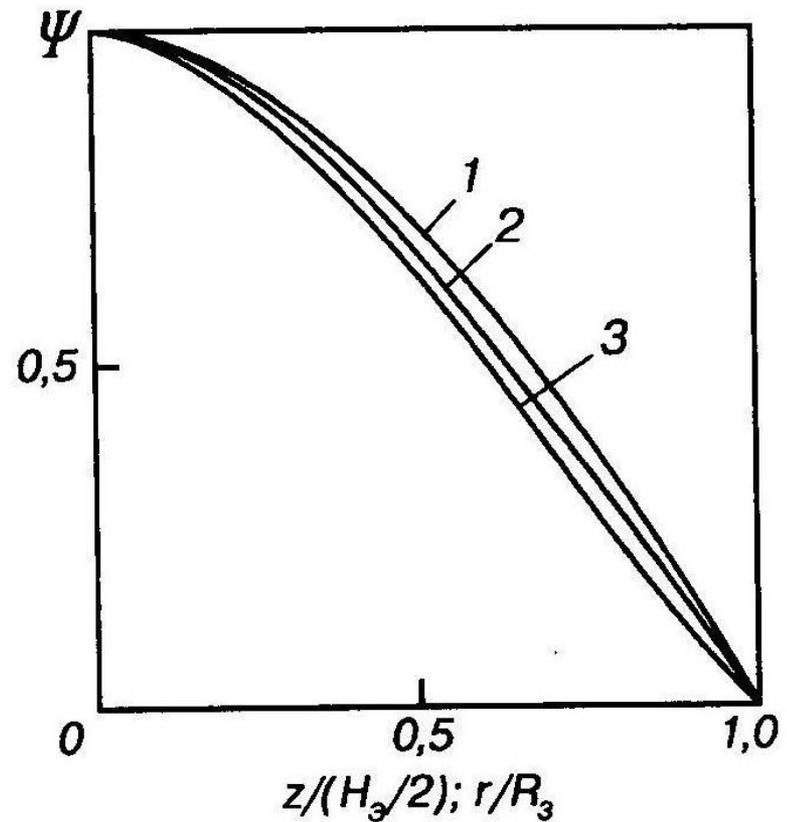
Откуда

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{H_3} \right)^2.$$

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

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{H_3} \right)^2.$$

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



Реактор в виде сферы. Для реактора в виде однородной сферы радиуса R_0 , задача сводится к одномерной. Если за начало координат принять центр сферы и использовать сферические координаты, то уравнение примет вид

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

$$\psi(R_0) = 0.$$

Для того чтобы решить данную задачу, введем новую искомую функцию

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

Тогда переписется в виде

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

$$\psi(R_0) = u(0) = 0.$$

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

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 $u(R_0) = 0$ следует

$$c_1 \sin \alpha R_0 = 0.$$

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

$$\sin \alpha R_0 = 0.$$

Откуда получаем

$$\alpha_k = \frac{\pi + k\pi}{R_0}.$$

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 $0 \leq r < R_0$.

$$\text{Рассмотрим } \psi_0 = c_1 \frac{\sin \frac{\pi}{R_0} r}{r}.$$

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

Рассмотрим

$$\psi_1 = c_1 \frac{\sin \frac{2\pi}{R_0} r}{r}.$$

Нетрудно проверить, что эта функция меняет знак внутри интервала $0 < r < R_3$ и, следовательно, нам не подходит. Очевидно, что ψ_2 также меняет знак в рассматриваемой области. То же самое можно сказать и о любой функции

$$\psi_k = c_1 \frac{\sin \frac{\pi (k+1)}{R_3} r}{r},$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$.

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

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

где $\alpha = \frac{\pi}{R_3}$.

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

Тогда получим

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

$$\alpha^2 = \left(\frac{\pi}{R_3} \right)^2.$$

Реактор в виде цилиндра бесконечной высоты. Для реактора в виде прямого кругового цилиндра радиуса R_0 , и бесконечной высоты задача сводится к одномерной.

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

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

$$\psi(R_0) = 0.$$

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

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

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

$$J_0(\alpha R_3) = 0.$$

Обозначив $\alpha R_3 = x_3$, условие перепишем в виде

$$J_0(x_3) = 0,$$

т.е. x_3 являются корнями уравнения . Множество корней
уравнения протабулировано в порядке возрастания их ве-
личин и может быть найдено в математических справочниках:

$$x_{30} = 2,405;$$

$$x_{31} = 5,521;$$

$$x_{32} = 8,654$$

и т.д.

Следовательно, мы будем иметь множество решений системы

$$\begin{aligned}\psi_0 &= J_0 \left(\frac{x_{\text{э}0}}{R_3} r \right); \\ \psi_1 &= J_0 \left(\frac{x_{\text{э}1}}{R_3} r \right); \\ \psi_2 &= J_0 \left(\frac{x_{\text{э}2}}{R_3} r \right) \text{ и т.д.}\end{aligned}$$

Нетрудно проверить, что требованию положительности решения в области реактора $0 < r < R_3$ удовлетворяет лишь функция

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

где $\alpha = \frac{x_{\text{э}0}}{R_3} = \frac{2,405}{R_3}$.

При этом геометрический параметр рассматриваемого реактора будет

$$\alpha^2 = \left(\frac{2,405}{R_3} \right)^2.$$

Реактор в виде конечного по высоте цилиндра. Для реактора в виде прямого кругового цилиндра радиуса R_0 и конечной высоты H_0 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

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

$$\psi(r, z) \Big|_{r=R_0} = 0;$$

$$\psi(r, z) \Big|_{z=\pm \frac{H_0}{2}} = 0,$$

где

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

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

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

$$\Psi_z \nabla_r^2 \Psi_r + \Psi_r \nabla_z^2 \Psi_z = -\alpha^2 \Psi_r \Psi_z;$$

$$\Psi_r(r) \Big|_{r=R_0} = 0;$$

$$\Psi_z(z) \Big|_{z=\pm \frac{H_0}{2}} = 0.$$

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:

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

$$\psi_r(R_3) = 0$$

и

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

$$\psi_z\left(\pm \frac{H_3}{2}\right) = 0.$$

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:

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

$$\alpha_r = \frac{2,405}{R_3}; \quad \alpha_r^2 = \left(\frac{2,405}{R_3}\right)^2$$

и

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

$$\alpha_z = \frac{\pi}{H_3}; \quad \alpha_z^2 = \left(\frac{\pi}{H_3}\right)^2.$$

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

$$\alpha_r = \frac{2,405}{R_3}; \quad \alpha_z = \frac{\pi}{H_3},$$

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_3 , b_3 , c_3 задача нахождения пространственного распределения нейтронов является трехмерной. Если за начало координат принять точку, совпадающую с центром параллелепипеда, то систему можно записать в виде

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

$$\psi \Big|_{x = \pm \frac{a_3}{2}} = 0;$$

$$\psi \Big|_{y = \pm \frac{b_3}{2}} = 0;$$

$$\psi \Big|_{z = \pm \frac{c_3}{2}} = 0.$$

Здесь ось x направлена вдоль ребра a_3 , ось y — вдоль ребра b_3 , ось z — вдоль c_3 ;

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

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:

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

$$\psi_x \left(\pm \frac{a_3}{2} \right) = 0;$$

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

$$\psi_y \left(\pm \frac{b_3}{2} \right) = 0;$$

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

$$\psi_z \left(\pm \frac{a_3}{2} \right) = 0.$$

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

$$\alpha_x = \left(\frac{\pi}{a_0} \right); \quad \alpha_y = \left(\frac{\pi}{b_0} \right); \quad \alpha_z = \left(\frac{\pi}{c_0} \right),$$

геометрический параметр будет

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

а распределение нейтронов

$$\psi = \psi_x \psi_y \psi_z = \left(\cos \frac{\pi}{a_0} x \right) \left(\cos \frac{\pi}{b_0} y \right) \left(\cos \frac{\pi}{c_0} z \right).$$

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.

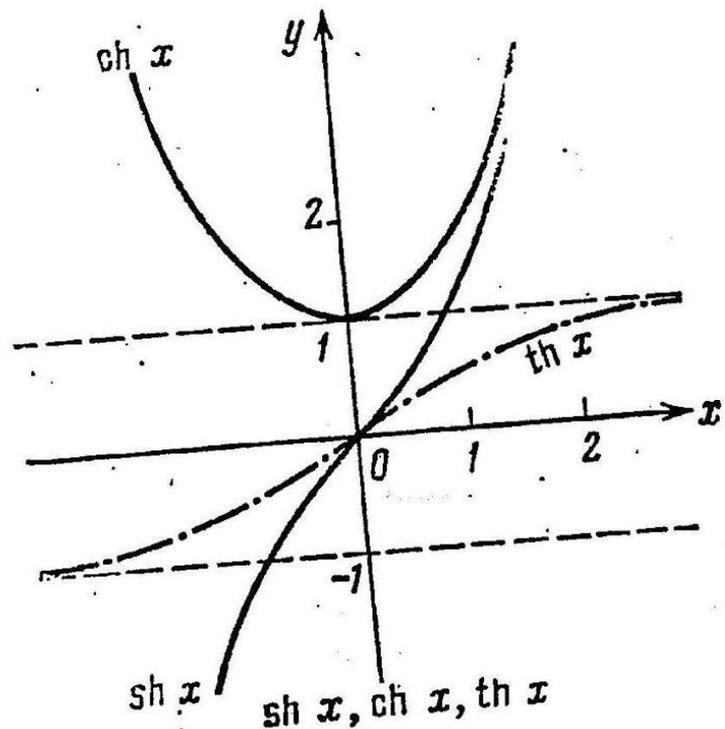
Все эти данные сведены в таблицу.

Форма реактора	Геометрический параметр	Пространственное распределение нейтронов
Пластина высотой H_0	$\left(\frac{\pi}{H_0}\right)^2$	$\cos \frac{\pi}{H_0} x$
Сфера радиуса R_0	$\left(\frac{\pi}{R_0}\right)^2$	$\frac{\sin \alpha r}{\alpha r}$
Цилиндр радиуса R_0 бесконечной высоты	$\left(\frac{2,405}{R_0}\right)^2$	$J_0\left(\frac{2,405}{R_0} r\right)$
Цилиндр конечной высоты H_0 радиуса R_0	$\left(\frac{2,405}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_0}\right)^2$	$\left(J_0\left(\frac{2,405}{R_0} r\right)\right)\left(\cos \frac{\pi}{H_0} z\right)$
Прямоугольный параллелепипед с размерами a_0, b_0, c_0	$\left(\frac{\pi}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b_0}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c_0}\right)^2$	$\left(\cos \frac{\pi}{a_0} x\right)\left(\cos \frac{\pi}{b_0} y\right)\left(\cos \frac{\pi}{c_0} z\right)$

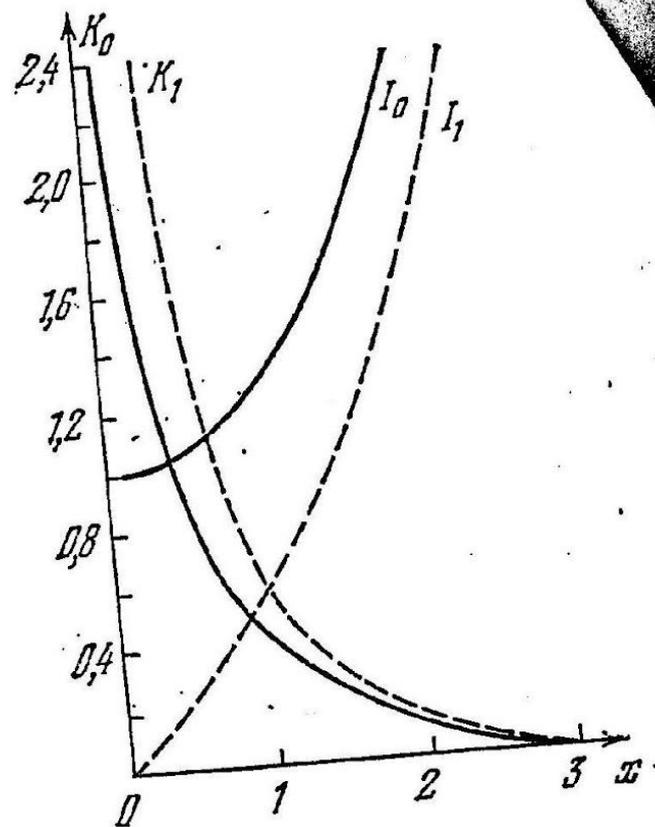
3. Общие решения волнового уравнения $\Delta\phi + \alpha^2\phi = 0$ для разных геометрий.

геометрия	$\alpha^2 > 0$	$\alpha^2 < 0$
плоская	$A \sin \alpha x + B \cos \alpha x$	$A \operatorname{sh} \alpha x + B \operatorname{ch} \alpha x$
сферическая	$A \frac{\sin \alpha r}{r} + B \frac{\cos \alpha r}{r}$	$A \frac{\operatorname{sh} \alpha r}{r} + B \frac{\operatorname{ch} \alpha r}{r}$
цилиндрическая	$A Y_0(\alpha r) + B N_0(\alpha r)$	$A I_0(\alpha r) + B K_0(\alpha r)$

Лекция 1.9 Волновая функция цилиндра



6. Гиперболические функции.



7. Модифицированные функции Бесселя и Ганкеля.

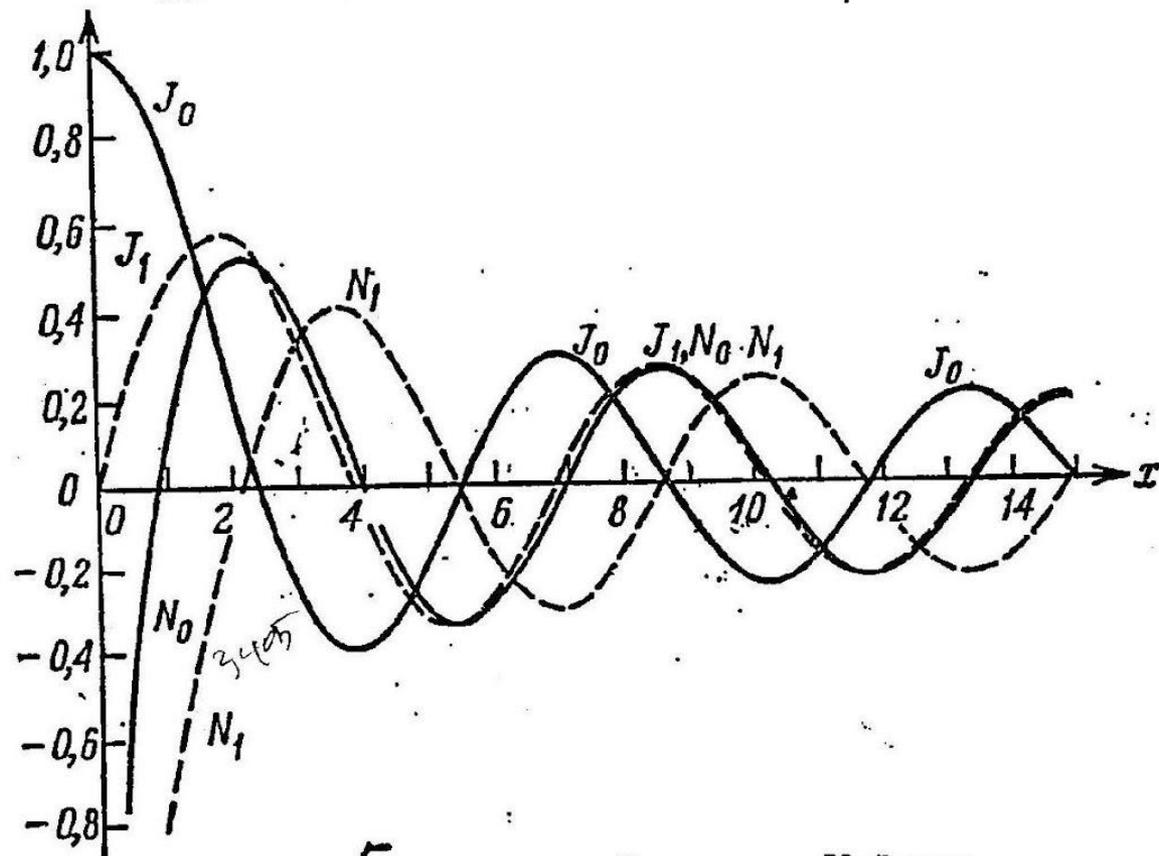


Рис. 21.5. Функции Бесселя и Неймана.

$$K_{\infty} = v_{\text{эф.}}(T_H) \cdot \theta(T_H) \cdot \varphi \cdot \mu$$

$$L_{\text{см.}}^2 = \frac{D_{\text{см.}}}{\Sigma_a^{\text{см.}}(T_H)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{\text{см.}}(T_H) \cdot \Sigma_a^{\text{см.}}(T_H)}$$

$$L_{\text{см.}}^2 = \frac{1}{6} \cdot \overline{r_{\text{диф.}}^2}$$

$$\tau_{\text{см.}} = \frac{1}{6} \cdot \overline{r_{\text{зам.}}^2}$$

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

$$[\tau] = \text{см}^2$$

Интерполяционная формула проф. Галанина А.Д.

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

$$C_U = \frac{N_{\text{топл.}}^{\text{в см.}}}{N_{\text{топл.}}^{\text{чист.}}} = \frac{1}{C} \cdot \frac{N_{\text{зам.}}^{\text{чист.}}}{N_{\text{топл.}}^{\text{чист.}}} \quad (\text{см. табл.})$$

$$L_{\text{см.}}^2 + \tau_{\text{см.}} = M_{\text{см.}}^2 \cdot C_{\text{зам.}} = \frac{N_{\text{зам.}}^{\text{в см.}}}{N_{\text{зам.}}^{\text{чист.}}} \approx 1 \quad \text{при } C \gg 10$$

Площадь миграции

$$L_{\text{см.}}^2 + \tau_{\text{см.}} = M_{\text{см.}}^2 \approx$$

$$L_{\text{см.}}^2 + \tau_{\text{см.}} = M_{\text{см.}}^2 \approx \tau \quad L_{\text{UO}_2+\text{H}_2\text{O}}^2 \ll \tau_{\text{UO}_2+\text{H}_2\text{O}} \text{ если зам. - легкая вода}$$

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

$$L_{\text{см.}}^2 + \tau_{\text{см.}} = M_{\text{см.}}^2 \approx L^2 \quad L_{\text{UO}_2+\text{D}_2\text{O}}^2 \gg \tau_{\text{UO}_2+\text{D}_2\text{O}} \text{ если зам. - тяжелая вода}$$

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

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

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