

УДК 621.039.514

Исследование области перехода от модели мгновенного скачка к модели Нордгейма-Фукса

В.В. Зенин, студент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и энергоустановки»

Научный руководитель: Е.Б. Копосов, к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и энергоустановки»

averina@power.bmstu.ru

Известна модель динамики реактора, описывающая поведение реактора при подаче в него положительных возмущений по реактивности, превышающих долю запаздывающих нейтронов и переводящих реактор в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам [1]. Это так называемая адиабатическая модель, или модель Нордгейма-Фукса.

Модель выводится из общей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_i \lambda_i c_i + q \\ \frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i c_i \quad i = 1 \dots 6 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где β и β_i - доля запаздывающих нейтронов и доля запаздывающих нейтронов соответствующей i - й группы,

λ_i - постоянная распада i - й группы ядер-предшественников, s^{-1} .

В модели принимается во внимание только генерация мгновенных нейтронов, вклад других источников нейтронов – запаздывающих нейтронов и нейтронов источника – считается пренебрежимо малым. Другим упрощающим положением модели Нордгейма-Фукса является адиабатичность процесса, то есть пренебрежение потерями тепла, отводимыми от активной зоны за время, описываемое моделью.

С указанными упрощениями система уравнений, описывающих поведение реактора, согласно модели Нордгейма-Фукса, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n \\ \frac{d\rho}{dt} = -\alpha Kn \end{cases}, \quad (2)$$

где α - температурный коэффициент реактивности, K^{-1} ,

K – величина, обратная теплоемкости реактора.

При рассмотрении модели Нордгейма-Фукса для определения постоянной интегрирования из начальных условий принимают, что плотность нейтронов в начальный момент пренебрежимо мала, то есть $n_0 = 0$ [1], что не приводит к заметным погрешностям даже при возмущениях, не слишком превышающим β . Тогда уравнение фазовой траектории принимает вид:

$$n = \frac{1}{2\alpha K\ell} [(\rho_0 - \beta)^2 - (\rho - \beta)^2], \quad (3)$$

позволяющий, в частности, определить максимальное значение плотности нейтронов в импульсе

$$n_{\max} = \frac{(\rho_0 - \beta)^2}{2\alpha K\ell}. \quad (4)$$

Эта формула дает результаты, мало отличающиеся от результатов расчета по одногрупповой и даже шестигрупповой моделям кинетики с учетом уравнения, описывающего адиабатическую обратную связь (второе уравнение системы (2)). При этом относительная погрешность расчета n_{\max} уменьшается с увеличением возмущения ρ_0 , однако в области, близкой к доле запаздывающих нейтронов, погрешности модели заметно возрастают.

Известна также модель мгновенного скачка, используемая в динамике ядерных реакторов и описанная в [1], которая представляет собой систему двух дифференциальных уравнений, первое из которых описывает нейтронную кинетику в приближении мгновенного скачка, а второе – адиабатическую обратную связь по температуре.

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{\beta - \rho} \left(\lambda\rho + \frac{d\rho}{dt} \right) n \\ \frac{d\rho}{dt} = -\alpha Kn \end{cases}. \quad (5)$$

Эта модель также позволяет получить уравнение траектории процесса в плоскости n, ρ и выражение для максимального значения плотности нейтронов

$$n = \frac{\lambda(\rho_o^2 - \rho^2)}{2\alpha K(\beta - \rho)} \quad (6)$$

$$n_{\max} = \frac{\lambda}{\alpha K} \left(\beta - \sqrt{\beta^2 - \rho_o^2} \right). \quad (7)$$

Модель мгновенного скачка динамики позволяет изучать изменение плотности нейтронов n в реакторе в диапазоне положительных возмущений ρ_o , ограниченных сверху значением β , при этом погрешности при приближении величины возмущения к значению β заметно растут.

Таким образом, существует область (в районе мгновенной критичности), где обе упомянутые модели не обеспечивают требуемой точности расчетов. Задачей настоящей работы и является оценка погрешностей использования указанных моделей и выяснение границ применения обеих моделей в области перехода от одной к другой.

Работа выполнена в программном комплексе “Моделирование в технических устройствах” (“МВТУ”), в среде которого была создана программа, позволяющая произвести необходимые вариантные расчеты, построить необходимые графические зависимости, а также оценить погрешность определения основных параметров в области перехода, где результаты, полученные с помощью рассмотренных моделей заметно отличаются от результатов одnogрупповой модели кинетики (с учетом обратной связи). Все уравнения в программе были основаны на описанных выше уравнениях и соотношениях. Расчеты проводились для различных времен жизни: $l = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$. Расчеты проводились для следующих значений параметров реактора: постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов $\lambda = 0,0767 \frac{1}{\text{с}}$; доля запаздывающих нейтронов $\beta = 0,0065$; температурный коэффициент реактивности $\alpha = 0,0065 \frac{1}{\text{К}}$.

На рисунках 1-3 представлены полученные зависимости максимальной плотности нейтронов (рис.1), реактивности при максимальной плотности нейтронов (рис.2) и энергии, выделившейся до максимальной плотности нейтронов (рис.3), от начального возмущения для времени жизни мгновенных нейтронов 10^{-3} с. На этих же графиках приведены зависимости, полученные из аналитических выражений для рассматриваемых моделей.

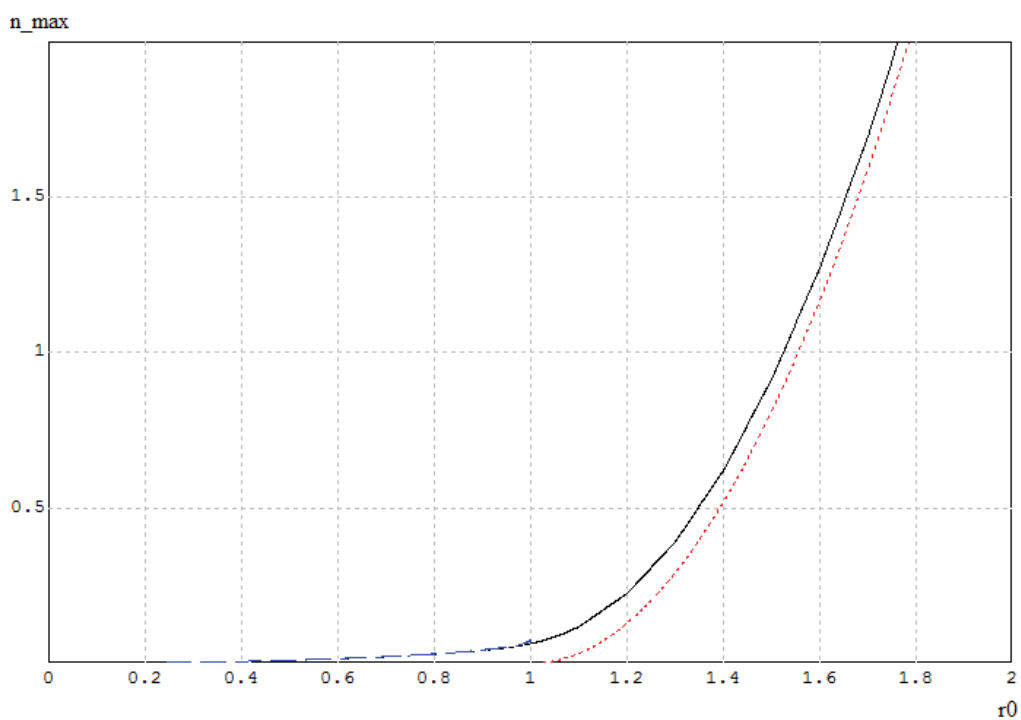


Рис.1. График зависимости максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения для времени жизни 10^{-3} с. (Здесь и далее $\frac{\rho_0}{\beta}$. Пунктирная кривая – модель Нордгейма-Фукса, цельная – одногрупповая модель кинетики, штриховая – модель мгновенного скачка)

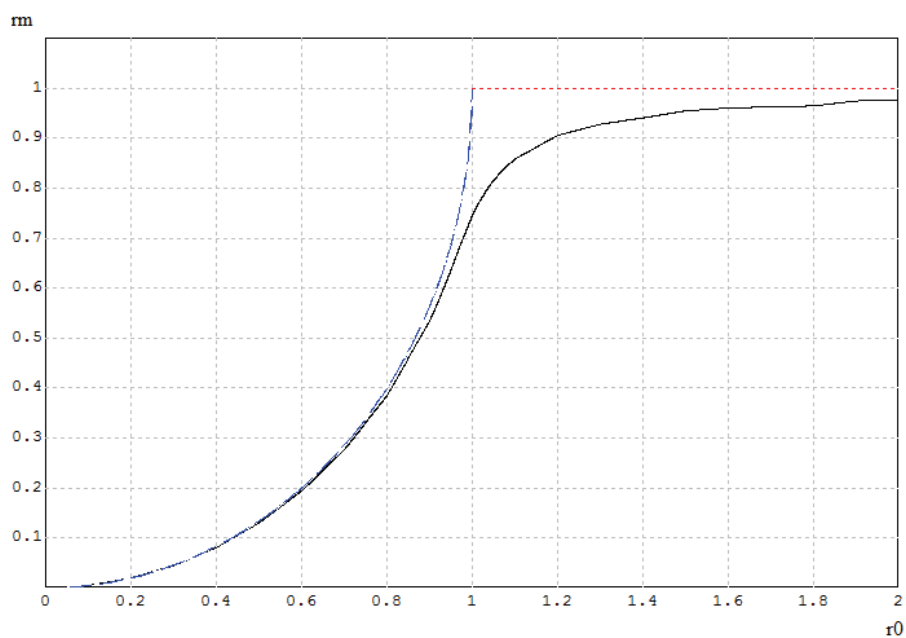


Рис. 2. График зависимости реактивности при максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения 10^{-3} с

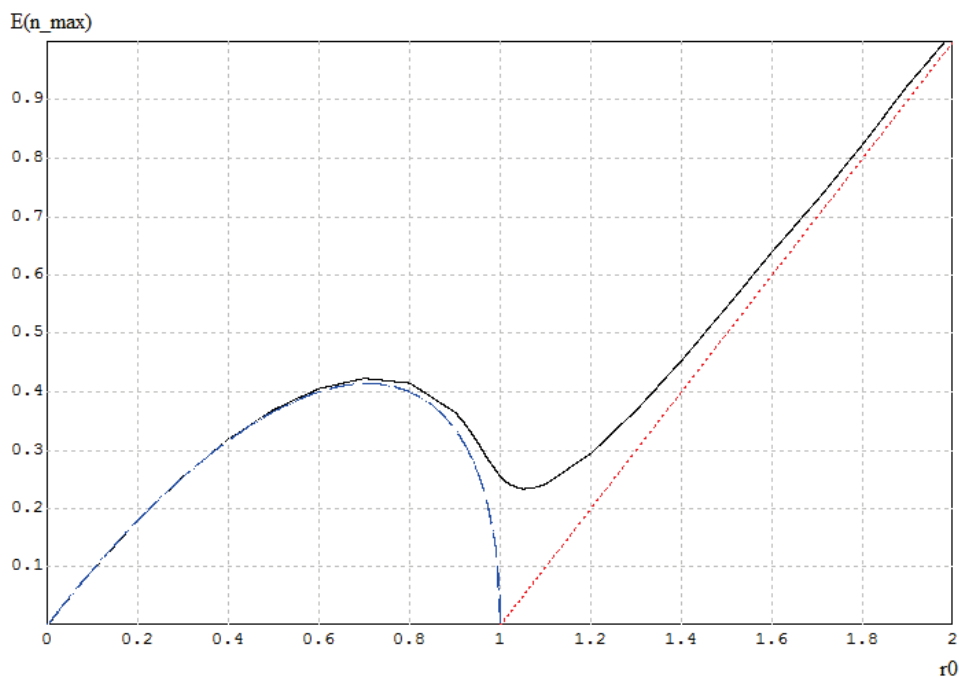


Рис.3. График зависимости энергии выделившейся до максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения 10^{-3} с

Приведенные на рис. 1 зависимости показывают, что в области применения модели мгновенного скачка зависимость, полученная из модели (уравнение 7), практически полностью совпадает с расчетом по одногрупповой модели, расходясь только в области, непосредственно прилегающей к мгновенной критичности. Это имеет место и при изменении времени жизни мгновенных нейтронов (рис.4), что также подтверждается уравнением (7), в котором этот параметр отсутствует. В области же после β видно резкое увеличение скорости роста кривой максимальной плотности нейтронов при уменьшении времени жизни мгновенных нейтронов, так как последняя обратно пропорциональна времени жизни нейтронов (выражение 4). В области мгновенной критичности, где одна модель переходит в другую, на графике имеется разрыв, что в реальных условиях само по себе невозможно. Кривая плотности нейтронов одногрупповой модели проходит между ними и сближается с моделью Нордгейма-Фукса при дальнейшем росте величины возмущения. Построение графических зависимостей погрешностей моделей в области перехода (рис. 5) показали, что максимальная погрешность доходит до ста процентов в области сразу после β . Уменьшение времени жизни мгновенных нейтронов заметно сужает область высоких погрешностей, не сильно уменьшая максимальную ее величину.

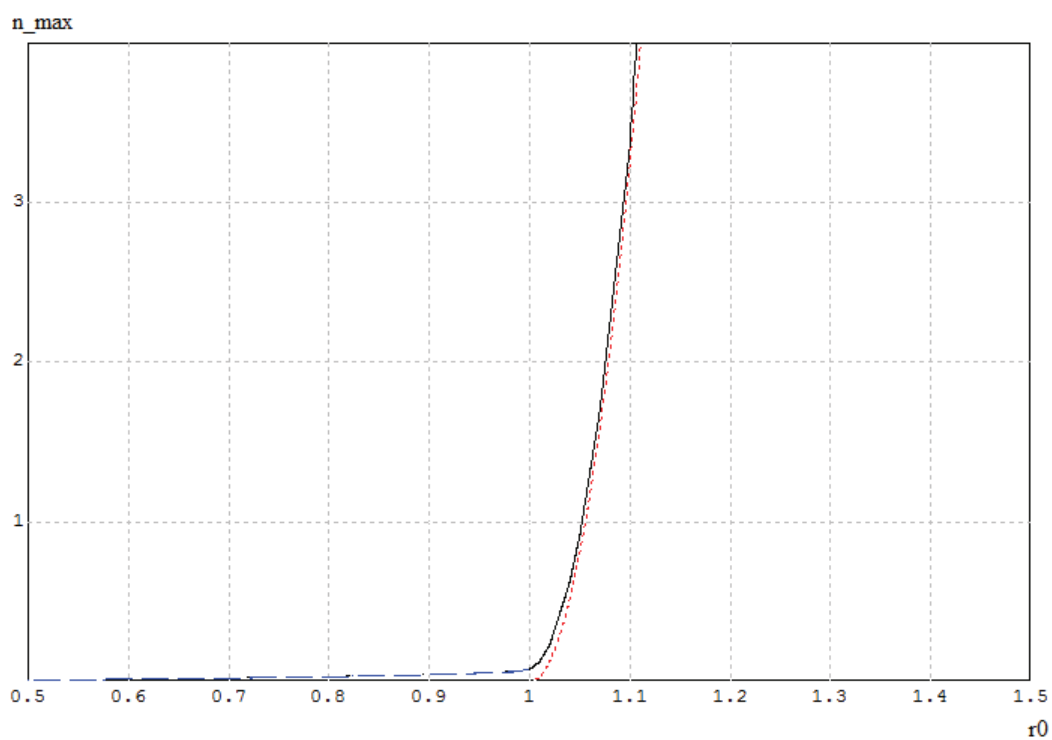


Рис.4. График зависимости максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения 10^{-5} с

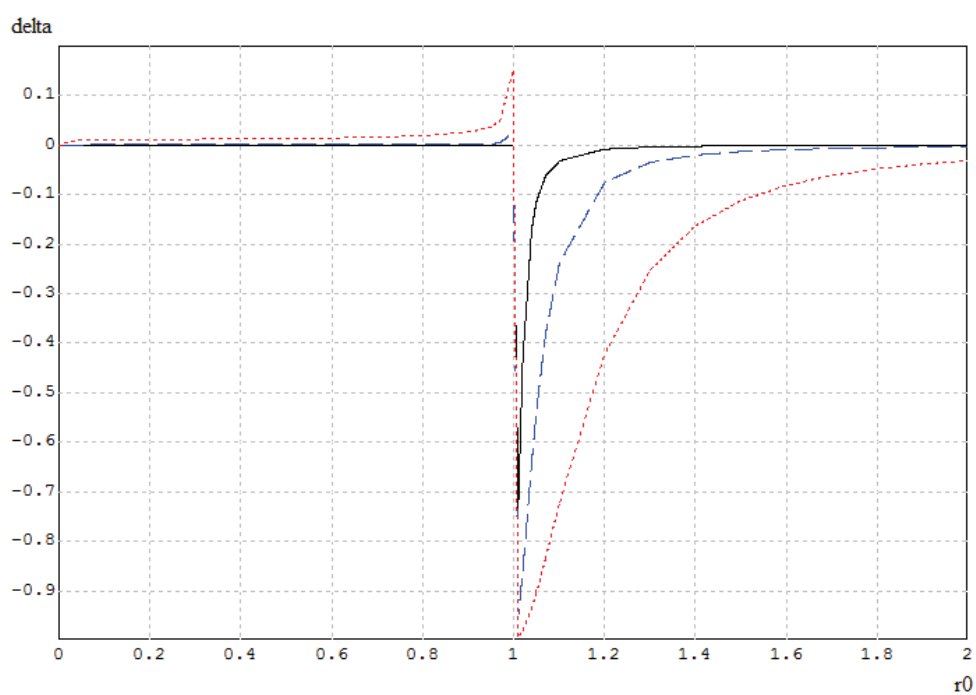


Рис.5. График зависимости погрешностей моделей в области перехода для различных времен жизни мгновенных нейтронов. (цельная – 10^{-5} с, пунктирная кривая – 10^{-4} с, штриховая – 10^{-3} с)

На рис. 2 представлены графики зависимостей реактивности при максимальной плотности нейтронов от начального возмущения. Из приведенных зависимостей видно, что расчет ρ_m по модели мгновенного скачка [2], как и в случае для n_{\max} практически полностью совпадает с расчетом ρ_m по одногрупповой модели, расходясь только в области, непосредственно прилегающей к мгновенной критичности. Для модели Нордгейма-Фукса реактивность при максимальной плотности потока нейтронов от величины возмущения не зависит, что превращает ее в константу. Реальный переход одногрупповой модели к этому значению оказывается достаточно затянутым. Однако, уменьшение времени жизни мгновенных нейтронов существенно снижает длительность этого интервала (рис. 6).

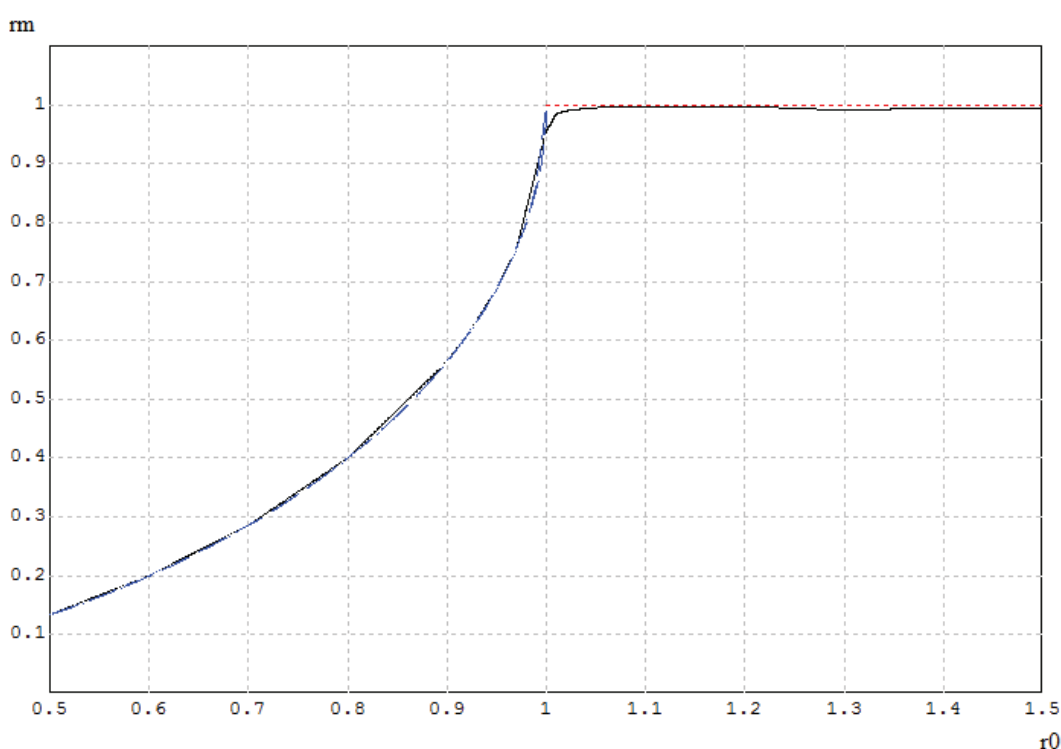


Рис 6. График зависимости реактивности при максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения 10^{-5} с

Далее на рис. 3 представлены графики зависимостей энергии, выделившейся до максимальной плотности потока нейтронов, от начального возмущения. Обе рассматриваемые модели показывают, что энергия стремится к нулю при подходе к области мгновенной критичности. Расчеты по одногрупповой модели кинетики показывают, что практически совпадая с результатами моделей при малых значениях возмущений и при достаточно больших, в области мгновенной критичности результаты

серьезно расходятся. Однако характер зависимости сохраняется такой же, как и у модельных зависимостей. При этом, как и в случае с реактивностью ρ_m уменьшение времени жизни увеличивает это сближение зависимостей и, соответственно, уменьшает погрешности моделей (рис.7).

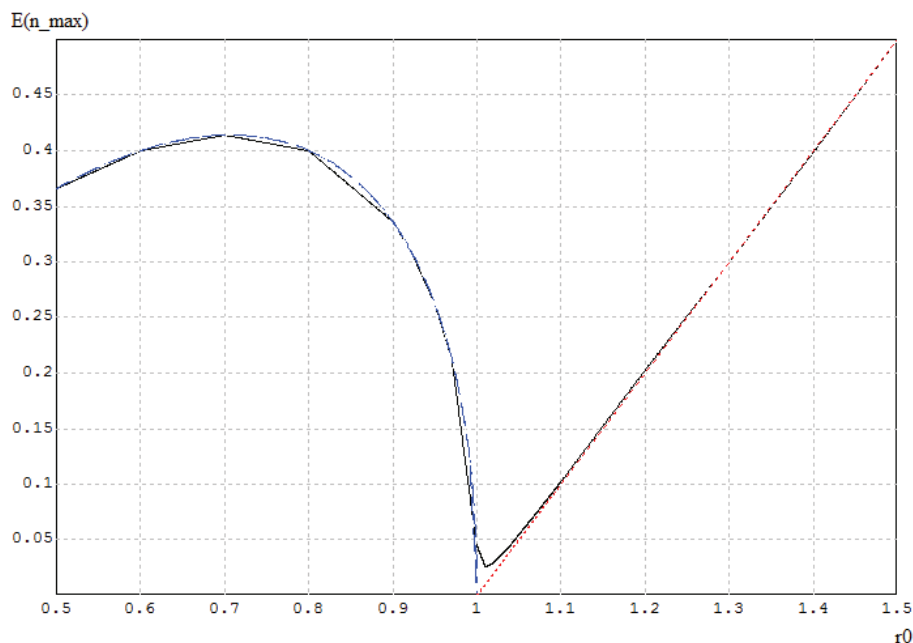


Рис 7. График зависимости энергии выделившейся до максимальной плотности потока нейтронов от начального возмущения $10^{-5}c$

Зависимости погрешностей для реактивности при максимальной плотности потока нейтронов и энергии, выделившейся до максимальной плотности потока нейтронов, имеют такой же характер, что и погрешности для самой максимальной плотности нейтронного потока (рис. 5). Графики построенных погрешностей для максимальной плотности потока нейтронов позволяют определять области допустимости применения моделей по этому параметру. Задавшись необходимой допустимой погрешностью, можно определить области на шкале начального возмущения, в которых модели будут отвечать требованиям и дадут приемлемые результаты. Следует иметь в виду, что работа носит методический характер и при расчете конкретного реактора необходимо использовать его параметры.

Список литературы

1. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1975, с. 400.
2. Копосов Е.Б. Кинетика ядерных реакторов: Учебное пособие по курсу «Физика ядерных реакторов». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. - 68с.

3. Наумов В.И. Физические основы безопасности. Учебное пособие. – М. МИФИ, 2002 – 129с.