

# МЕХАНИКА

УДК 621.039:517.925.54

## ВСПЫШКА МОЩНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ВЫРОВНЕННОЙ ЗОНОЙ

© 2009 г.

*Е.Ф. Сабаяев, Т.А. Сабаяева*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

sabaeva@unn.ru

Поступила в редакцию 10.03.2009

Аналізу Чернобыльської аварії посвящено к настоящему времени большое число работ, в которых обсуждаются причины аварии и приводятся результаты расчетов аварийных процессов, в том числе по простым математическим моделям. В работе получена оценка влияния выровненной зоны на аварийный процесс при малых мощностях.

*Ключевые слова:* реактор, выровненная зона, реактивность, переходный процесс, мощностной паровой коэффициент.

Авария на ЧАЭС произошла в 1986 г. Причина аварии обсуждалась в работе [1] (приведен обзор работ за последние 10 лет). Конструкция реактора подробно описана в работе [2]. Представление о коэффициентах реактивности изложено в работах [3, 4]. Простая математическая модель и расчеты переходного процесса даны в работах [5–7].

В результате аварии был разрушен реактор и пострадали некоторые другие части станции. На станции предполагалось провести эксперимент по определению времени работы на остаточном тепловыделении. Однако реактор не был полностью погашен, а только переведен на малый уровень мощности (несколько процентов от номинала). Для того чтобы поддержать желаемый уровень мощности, из зоны были выведены (последовательно) почти все поглощающие стержни. В зоне осталось только 7 из 1400 поглощающих стержней (по условиям безопасности в зоне должно быть не менее 14 поглощающих стержней).

Ниже рассматривается задача о вспышках мощности канального реактора типа РБМК. Активная зона этого реактора в плане имеет форму цилиндра диаметром 12.5 м. Радиус выровненной зоны можно определить из равенства площадей этой зоны и периферийной:

$$R_{\dot{a}\zeta}^2 - R_{\dot{a}\zeta}^2 = R_{\dot{a}\zeta}^2, \quad R_{\dot{a}\zeta} = R_{\dot{a}\zeta} / \sqrt{2},$$

$$R_{\dot{a}\zeta} = 6.25/1.41 = 4.4,$$

$$R_{\dot{a}\zeta} - R_{\dot{a}\zeta} = 6.25 - 4.4 = 1.85,$$

где  $R_{\dot{a}\zeta}$  – радиус активной зоны,  $R_{\dot{a}\zeta}$  – радиус выровненной зоны.

Перегрузка топливной кассеты происходит следующим образом:

1. Выгружается кассета из выровненной зоны и помещается в хранилище.
2. На ее место устанавливается полувыгоревшая кассета, извлеченная из периферийной зоны.
3. На место последней устанавливается свежая кассета.

В итоге в периферийной зоне оказываются свежие кассеты, а в выровненной зоне частично выгоревшие.

Известно, что коэффициент паровой реактивности для свежих кассет  $a_i \cong -\beta$ ,  $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$  – вклад запаздывающих нейтронов, и зависит от выгорания.  $a_n$  растет и может достигнуть значения  $a_n = +4\beta$ .

Распределение поля по радиусу реактора представлено на рис. 1. Пусть в выровненной зоне  $a_n = 4\beta$ , а в периферийной зоне  $a_n = -0.5\beta$ . Подсчитаем  $a_n$ , соответствующий этому полю (реактивность взвешивается с квадратом потока

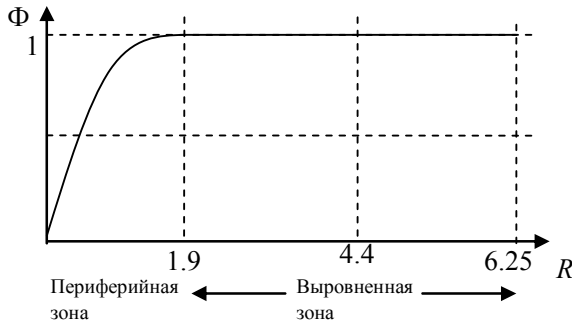


Рис. 1

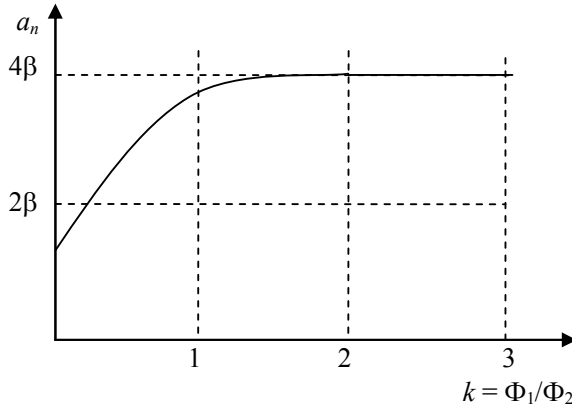


Рис. 2

нейтронов):  $\frac{+4\beta - \beta/2}{2} = \frac{7}{4}\beta$ . При увеличении

общей мощности реактора в центральной зоне мощность будет быстро увеличиваться, так как  $a_n > 0$ , а в периферийной практически изменяться не будет ввиду отрицательности  $a_n$  в этой зоне ( $a_n = -1.5\beta$ ). Будем считать, что форма поля полностью определяется максимальным значением нейтронного потока в пределах каждой из зон. Пусть  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – максимальные значения поля в каждой из зон,  $\Phi_1$  – в центральной зоне, а  $\Phi_2$  – в периферийной,  $\Phi_1/\Phi_2 = k$ . В этом случае, интегрируя  $a_n$  с квадратом потока нейтронов, имеем  $\dot{a}_i = \frac{4\beta(k+1)^2 - \beta}{(k+1)^2 + 1}$ . Эта зависи-

мость представлена на рис. 2. Поскольку в начальном состоянии  $\dot{a}_i \cong \frac{3\beta}{2} > 0$ , то состояние, близкое к нулевому, будет неустойчиво и происходит рост мощности реактора. При этом наиболее сильный рост будет происходить в выровненной зоне, а в периферийной роста практически не будет ввиду отрицательности коэффициентов реактивности в этой зоне. Реактивность в реакторе РБМК зависит от температуры горючего (температурный коэффициент реактивности по горючему) и от среднего паросодержания в

зоне (паровой коэффициент реактивности). Пусть  $\phi$  – истинное паросодержание,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  – удельная плотность воды и пара на линии насыщения,  $X$  – весовое расходное паросодержание:

$$X = \frac{\gamma''\phi}{\gamma''\phi + (1-\phi)\gamma'}, \quad \frac{\gamma'}{\gamma''} = M = 20$$

$$\text{или } \phi = \frac{MX}{(1-X) + MX}.$$

Интегрируя по длине каналов, находим (приращение  $dX$  пропорционально плотности теплового потока в реакторе, следовательно

$$X = \frac{0.14Q}{Q^*})$$

$$\bar{\phi} = \frac{M}{M-1} \left( \frac{Q_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}}{Q^*} - \frac{\ln(1 + 0.14M Q_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}/Q^*)}{0.14(M-1)} \right),$$

$$\bar{\phi} = \frac{M(M-1)}{2} 0.14 \left( \frac{Q_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}}{Q^*} \right)^2 + o \left( \left( \frac{Q_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}}{Q^*} \right)^3 \right),$$

для малых  $Q$ .

Изменение мощности реактора во времени можно описать точечными уравнениями кинетики

$$l \frac{d\Phi}{dt} = \Phi(\Delta k_0 - a_{\hat{A}}Q + a_i \bar{\phi}) + \sum_{i=1}^6 \beta_i (\Phi_i - \Phi),$$

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = \lambda_i (\Phi - \Phi_i), \quad i = 1 \div 6, \quad (1)$$

$$T \frac{dQ}{dt} = \hat{O} - Q,$$

где  $\Phi$  – плотность потока нейтронов,  $\Phi_i$  – плотность ядер – излучателей запаздывающих нейтронов,  $Q$  – плотность теплового потока,  $a_{\hat{A}}$  – коэффициент реактивности по горючему,  $a_n$  – паровой коэффициент реактивности,  $\lambda_i$  – постоянные распада ядер – излучателей запаздывающих нейтронов  $i$ -й группы,  $T$  – постоянная времени прогрева таблеток горючего. Как показано выше,  $a_n$  довольно быстро достигает предельного значения  $a_n = 4\beta$ . Поэтому без большой погрешности можно в уравнениях (1) положить  $a_n = 4\beta$ , то есть взять равным значению парового коэффициента реактивности в выровненной зоне (ошибка будет только на начальном участке переходного процесса, то есть до значения  $Q \approx Q^* = 1$ ).

Ограничимся одной группой запаздывающих нейтронов с  $\lambda_{\text{экс}} = 0.1$ . В этом случае  $\Phi_{\text{экс}} = Q$  (ввиду того, что  $T\lambda_{\text{экс}} = 1$ ). Подставляя в первые

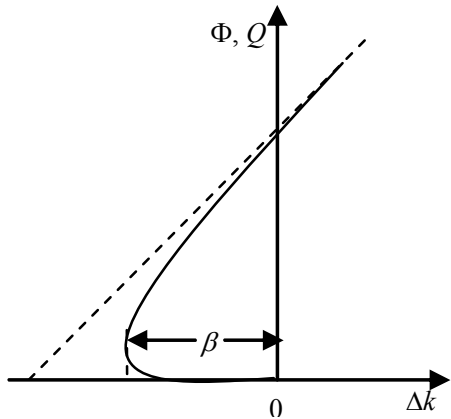


Рис. 3

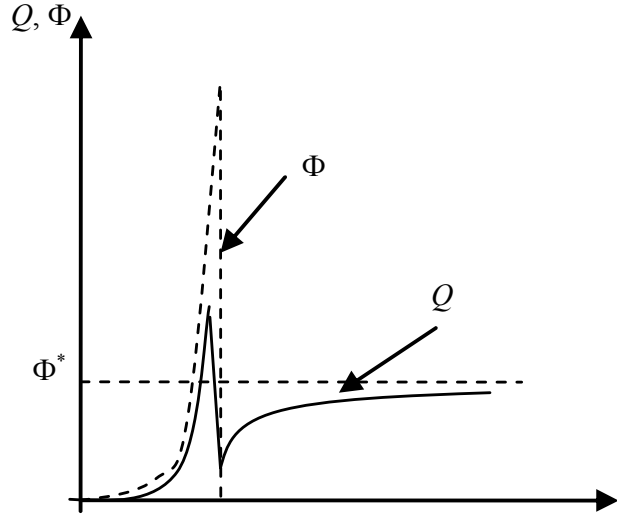


Рис. 4

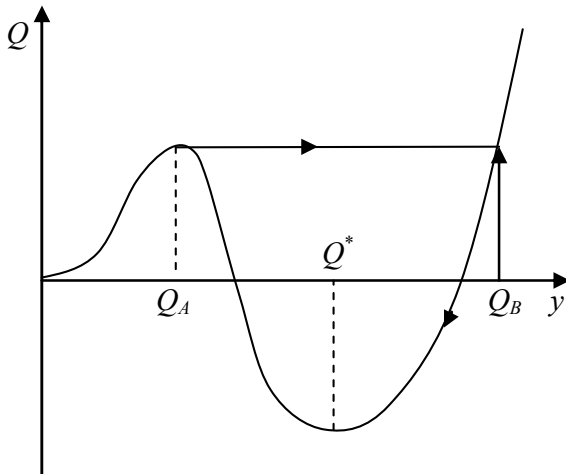


Рис. 5

уравнения системы (1)  $\Phi = Q + T \frac{dQ}{dt}$  и полагая

$\Delta k_0 = 0$  (так как реактор считаем непогашенным), получаем

$$T \frac{d}{dt} \left( l \dot{Q} + \frac{LQ}{T} + \frac{a_A Q^2}{2} + \beta Q - a_i \int_0^Q \bar{\zeta} \bar{\varphi}(\zeta) d\zeta \right) = Q(-a_A Q + \bar{\varphi}(Q) a_i)$$

или, обозначая

$$y = l \dot{Q} + \frac{LQ}{T} + \frac{a_A Q^2}{2} + \beta Q - a_i \int_0^Q \bar{\zeta} \bar{\varphi}(\zeta) d\zeta, \quad (2)$$

имеем

$$T \frac{dy}{dt} = Q[-a_A Q + a_i \bar{\varphi}(Q)]. \quad (3)$$

Уравнение (2) описывает быстрые процессы, а уравнение (3) – медленные.

Бифуркационная диаграмма состояний равновесия в координатах  $\Delta k, Q$  или  $\Phi$  приведена на рис. 3. Поток нейтронов в реакторе испытывает резкий всплеск большой амплитуды, так как значительная часть переходного процесса идет на быстрой кинетике. Качественный вид  $Q(t)$  и  $\Phi(t)$  приведен на рис. 4. Переходный процесс имеет две стадии: 1 – начальная (медленная) и 2 – быстрая до значения  $t_x$ . В момент  $t_x$  происходит разрушение зоны (слышен первый звук взрыва). Происходит отрыв патрубков от сборников паро-водяной смеси. Перед этим происходит реакция горячего пара с цирконием ( $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2$ ). Избыточное давление поднимает плиту (которая закрывала камеру с реактором), водород смешивается с кислородом надреакторного помещения и происходит второй взрыв.

Так как ловить узкий импульс довольно затруднительно и гораздо легче найти условие для скачка  $Q$ , то качественно рассмотрим уравнения (2) и (3). Плоскость  $Q$ - $y$ -движений представлена на рис. 5. Скачок тепловыделения можно оценить по формуле  $\Delta\Phi \cong (Q_B - Q_A)/l$ . Так как  $l$  мало, то скачок тепловыделения будет довольно большим. При  $l = 10^{-3}c$   $\Delta\Phi$  достигает весьма больших значений. В процессе набора мощности реактора паровой коэффициент быстро увеличивается до предельного значения

$$a_i = \frac{(k+1)^2 4\beta - \beta}{(k+1)^2 + 1}.$$

Оценку процесса можно провести, приняв и паровой коэффициент равным его значению для выровненной зоны.

*Список литературы*

1. Абагян А.А., Адамов Е.О., Понмарев-Степной Н.Н. и др. Причины аварии на Чернобыльской АЭС: обзор исследований за 10 лет // Междун. конф. МАГАТЭ. Чернобыльская авария 10 лет спустя: Аспекты ядерной безопасности. Вена, 1996.
2. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
3. Шевелев Я.В. Реактивность ядерного реактора // В кн. «Динамика ядерных реакторов» / Отв. ред. Я.В. Шевелев. М.: Атомиздат, 1990. С. 5–121.

4. Горяченко В.Д. Элементы теории колебаний. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2001.

5. Сабаев Е.Ф. Переходные процессы в кипящих канальных реакторах при потере управления на малых уровнях мощности // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. Динамика ядерных энергетических установок. 1988. № 1. С. 3–9.

6. Нейтронные вспышки в кипящем канальном реакторе с положительным паровым коэффициентом реактивности / Отчет НИИ механики ННГУ. № гос. регистрации 01200107689, инв. № 02200201342. Н. Новгород, 2001.

7. Смирнов Л.В., Пригоровский А.Л., Сабаев Е.Ф. Качественное исследование Чернобыльской аварии на основе анализа простой математической модели // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. Динамика ядерных энергетических установок. 2001. № 3. С. 61–70.

**POWER BURST IN A NUCLEAR REACTOR WITH A FLATTENED ZONE**

*E.F. Sabayev, T.A. Sabayeva*

The Chernobyl nuclear reactor catastrophe has been analyzed in a large number of works in which the causes of the failure have been discussed and the calculation results of emergency processes have been given including those based on simple mathematical models. Of special interest is the impact of the flattened zone on the emergency process. An example given shows that in a reactor with a flattened zone  $a_n \cong 7/4\beta$  in the emergency process comes quickly up to  $4\beta$ .

*Keywords:* reactor, flattened zone, reactivity, transient process, power steam coefficient.