

## О ПОНЯТИИ «ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЛЯ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ»

**А.Г. Юферов**

*Обнинский институт ядерной энергетики НИЯУ МИФИ  
249039, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Рассматриваются методические вопросы, связанные с понятийным и терминологическим аппаратом динамики ядерных реакторов. На основании элементарного анализа стандартных уравнений точечной кинетики ЯР показана необходимость уточнения физического смысла входящего в уравнения параметра  $\beta$ , который традиционно трактуется как «эффективная доля запаздывающих нейтронов» (ЭДЗН). Непосредственно из уравнений кинетики следует, что параметр  $\beta$ , фигурирующий в этих уравнениях как ЭДЗН, есть, с точки зрения баланса нейтронов, доля мгновенных нейтронов (МН), потребляемых на генерацию предшественников запаздывающих нейтронов (ПЗН), а с точки зрения баланса ПЗН – выход ПЗН на один мгновенный нейтрон в единичном акте деления. С учётом этих трактовок рассмотрена роль параметра  $\beta$  в ситуациях, связанных с его корректировкой путём умножения на «фактор ценности запаздывающих нейтронов (ЗН)» и с установлением фактических долей мгновенных и запаздывающих нейтронов. В частности, показано, что

– часто используемое в задачах анализа динамики ЯР в качестве исходного положения утверждение «если доля запаздывающих нейтронов равна  $\beta$ , то доля мгновенных равна  $1 - \beta$ » нельзя полагать применимым к любым состояниям реактора;

– увеличение параметра  $\beta$  путём умножения на «фактор ценности ЗН» приводит, вопреки традиционным трактовкам, не к увеличению, а к уменьшению репродукции нейтронов в надкритическом реакторе.

Предлагаемые уточнения целесообразны как с точки зрения более адекватного описания процессов в ЯР, так и применительно к формулировкам требований ядерной безопасности.

**Ключевые слова:** динамика ядерного реактора, эффективная доля запаздывающих нейтронов.

### ВВЕДЕНИЕ

Понятие «эффективная доля запаздывающих нейтронов» (ЭДЗН) является одним из ключевых в физике ядерных реакторов. Соответствующая величина  $\beta$  в существенной степени определяет динамику ЯР как мера реактивности и выражение «мгновенной критичности».

Согласно общепринятой трактовке ЭДЗН [1 – 21], параметр  $\beta$  определяется как «доля запаздывающих нейтронов (ЗН) в полном выходе нейтронов деления, умноженная на фактор ценности ЗН». Поскольку последний зависит от состава и геометрии ЯР, то ЭДЗН оказывается переменной величиной [21].

Однако при детальном рассмотрении уравнений динамики ЯР обнаруживается, что

© А.Г. Юферов, 2022

параметр  $\beta$ , фигурирующий в этих уравнениях как ЭДЗН, на самом деле имеет смысл выхода предшественников запаздывающих нейтронов (ПЗН) на один мгновенный нейтрон в единичном акте деления. И, следовательно, должен быть константой. Данная коллизия требует более тщательного рассмотрения роли параметра  $\beta$  в различных ситуациях, связанных с его корректировкой путём умножения на «фактор ценности» и с установлением долей мгновенных и запаздывающих нейтронов.

Очевидно, следует различать доли в элементарном акте деления, в стационарном состоянии ЯР и в переходных процессах. Представляют интерес как доли текущего числа запаздывающих и мгновенных нейтронов относительно полного объёма популяции нейтронов, так и доли генерации и потери этих частиц, т.е. отношения скоростей процессов. Элементарный анализ уравнений динамики ЯР (как точечных, так и распределённых) показывает, что указанные величины применительно к запаздывающим нейтронам далеко не всегда выражаются посредством параметра  $\beta$ . Поэтому исторически сформировавшаяся трактовка параметра  $\beta$  как «эффективной доли запаздывающих нейтронов» требует и содержательного, и терминологического уточнения.

### ПАРАМЕТР $\beta$ В УРАВНЕНИЯХ ДИНАМИКИ ЯР

Уравнения точечной динамики ЯР

$$dn / dt = (\rho - \beta) / \Lambda n + \sum_{j=1}^J \lambda_j c_j + Q, \quad (1)$$

$$dc_j / dt = -\lambda_j c_j + (\beta_j / \Lambda) n, \quad j = \overline{1, J} \quad (2)$$

(где все обозначения стандартны:  $n$  – численность популяции нейтронов;  $c_j$  – численность  $j$ -й группы ПЗН;  $\rho$  – реактивность;  $\Lambda, l$  – время генерации и время жизни нейтронов;  $\beta_j, \lambda_j$  – групповые параметры ПЗН) описывают репродукцию популяции нейтронов как баланс скоростей процессов. При этом очевидна следующая интерпретация слагаемых. Величина

$$v_{\text{мн}}^p = (\rho / \Lambda) \cdot n = (1 / \Lambda - 1 / l) \cdot n$$

есть разность скорости генерации мгновенных нейтронов  $v_{\text{мн}}^g$  и скорости  $v_{\text{мн}}^n$  потери нейтронов любого происхождения (мгновенных и запаздывающих) в процессах утечки и непродуктивного поглощения:

$$v_{\text{мн}}^g = n / \Lambda \quad \text{и} \quad v_{\text{мн}}^n = n / l. \quad (3)$$

Будем называть величину  $v_{\text{мн}}^p$  *скоростью репродукции мгновенных нейтронов*, чтобы отличить её от скорости репродукции популяции в целом  $dn/dt$ .

Согласно уравнениям (2), слагаемое

$$v_{\text{пзн}}^g = (\beta / \Lambda) \cdot n$$

есть суммарная по всем группам ПЗН скорость генерации предшественников или, применительно к уравнению (1), скорость потребления нейтронов популяции на генерацию ПЗН. Поэтому параметр  $h_0 = \beta / \Lambda$  имеет смысл относительной скорости – доли потребления (в единицу времени) нейтронов популяции на генерацию ПЗН, поскольку

$$h_0 = (h_0 \cdot n) / n = v_{\text{пзн}}^g / n.$$

Соответственно, параметр  $\beta = \sum \beta_j$  есть доля потребления мгновенных нейтронов на генерацию ПЗН – выход ПЗН на один мгновенный нейтрон:

$$\beta = v_{\text{пзн}}^g / (n / \Lambda) = v_{\text{пзн}}^g / v_{\text{мн}}^g \equiv \beta_{\text{пзн}}^{\text{мн}}, \quad (4)$$

Таким образом, параметр  $\beta$  следует рассматривать как константу, характеризующую единичный акт деления и связывающую число ПЗН на деление

$$v_{\text{пзн}} = v_{\text{пзн}}^g / v_{\text{дел}} = v_{\text{пзн}}^g / (v_{\text{мн}}^g / v_{\text{мн}}) = \beta \cdot v_{\text{мн}} \quad (5)$$

с соответствующим числом мгновенных нейтронов  $v_{\text{мн}}$ . Именно в таком качестве параметр  $\beta$  фигурирует в первых работах по нейтронной динамике ЯР [20].

Укоренившаяся позже во многих работах трактовка параметра  $\beta$  в уравнении (1) как «эффективной величины», некоторым образом уточняющей долю запаздывающих нейтронов в полном выходе на деление, является ошибочной и содержательно, и терминологически.

Во-первых, параметр  $\beta$  имеет смысл «доли» (как характеристики некоторой части однородной по определённому признаку совокупности), когда он характеризует потребление мгновенных нейтронов на генерацию ПЗН в уравнении (1). Но в уравнениях (2) параметр  $\beta$  как выход ПЗН на один мгновенный нейтрон уже не может, строго говоря, именоваться «долей».

Во-вторых, хотя распад ядра-предшественника даёт один запаздывающий нейтрон, т.е.  $v_{\text{зн}} = v_{\text{пзн}}$ , но доля запаздывающих нейтронов в полном выходе на деление  $\beta^{\text{пзн}}$  не равна фигурирующей в уравнениях (1), (2) величине  $\beta \equiv \beta^{\text{пзн}}_{\text{мн}}$ :

$$\beta^{\text{пзн}} = v_{\text{зн}} / (v_{\text{зн}} + v_{\text{мн}}) \neq \beta = v_{\text{зн}} / v_{\text{мн}}. \quad (6)$$

Разумеется, можно использовать параметр  $\beta^{\text{пзн}}$  вместо параметра  $\beta$  согласно очевидному соотношению  $\beta = \beta^{\text{пзн}} / (1 - \beta^{\text{пзн}})$ . Но тогда следует изменить соответствующие коэффициенты в уравнениях (1), (2).

Распределённые модели переноса нейтронов структурно аналогичны уравнениям (1), (2). В частности, генерация мгновенных и запаздывающих нейтронов описывается следующими слагаемыми (см., например, [1, 16]):

$$\chi_p(E) \iint_{\Omega, E} (1 - \beta(\mathbf{r}, E)) v(\mathbf{r}, E^*) \Sigma_f \Phi^* d\Omega^* dE^* + \sum_j \chi_{jd}(E) \lambda_j c_j. \quad (7)$$

Однако важно обратить внимание, что параметр  $v(\mathbf{r}, E^*)$  здесь следует трактовать как выход мгновенных нейтронов на деление. Тогда смысл параметра  $\beta(\mathbf{r}, E^*)$  будет аналогичен определяемому соотношениями (4), (5). Если же, как это иногда делается [8], понимать параметр  $v(\mathbf{r}, E^*)$  как полный выход, включающий и запаздывающие нейтроны, то трактовка  $\beta(\mathbf{r}, E)$  как величины  $\beta^{\text{пзн}} = v_{\text{зн}} / (v_{\text{зн}} + v_{\text{мн}})$  приведёт к нарушению баланса скоростей. В этом случае первое слагаемое в выражении (7) выражает только скорость генерации мгновенных нейтронов, и модель не включает скорость потребления нейтронов на генерацию ПЗН. Применительно к уравнению (1) это означает, что мы пренебрегаем слагаемым  $v_{\text{пзн}}^i = (\beta/\Lambda) \cdot n$ . Если при этом условии просуммировать уравнения (1), (2), то получим, что

$$d(n + C)/dt = (r + h_0) \cdot n.$$

Иными словами, в случае критичности ( $r = 0$ ) не обеспечивается стационарный режим. Это и указывает на нарушение баланса.

### ОБ «ЭФФЕКТИВНОСТИ» ПАРАМЕТРА $\beta$

Параметр  $\beta$  можно не вводить явно и использовать только константу скорости  $h_0 = \beta/\Lambda$  – долю популяции нейтронов, уходящую на генерацию ПЗН в единицу времени. Это особенно удобно, если преобразовать систему (1), (2) в интегральное уравнение

$$v(t) = r(t)n(t) - h_0 \int_0^t h(t - \tau)v(\tau)d\tau + Q(t). \quad (8)$$

Здесь скорость репродукции популяции нейтронов  $v(t) = dn/dt$ , реактивность в  $\Lambda$ -шкале  $r(t) = \rho/\Lambda$  имеет смысл относительной скорости репродукции мгновенных нейтронов  $r(t) \equiv r_{\text{мн}}(t) = v_{\text{мн}}(t)/n(t)$ , нормированная функция репродукции ПЗН

$$h(t - \tau) = \sum_{j=1}^J a_j \exp(-\lambda_j(t - \tau)), \quad a_j = \beta_j / \beta,$$

интеграл репродукции ПЗН

$$Y(t) = h_0 \int_0^t h(t - \tau) v(\tau) d\tau \equiv dC / dt, \quad C = \sum c_j,$$

равен текущей суммарной скорости репродукции ПЗН

$$dC / dt = h_0 n - \sum \lambda_j c_j. \quad (9)$$

Запись уравнения (8) в форме

$$v(t) = r(t) \cdot n(t) - dC(t)/dt + Q(t) \quad \text{или} \quad d(n + C)/dt = r(t) \cdot n(t) + Q(t)$$

показывает, что рассматриваемая модель описывает динамику популяции нейтронов с отражением только двух процессов – репродукции мгновенных нейтронов со скоростью  $r(t) \cdot n(t)$  и репродукции ПЗН со скоростью  $dC/dt$ . При таком уровне детальности нет оснований для введения «эффективного» параметра  $\beta$  в уравнение (9), определяющее скорость репродукции ПЗН.

Это обусловлено тем, что уравнения (1), (2), (8) описывают только изменение численности популяции нейтронов. В таком случае для отражения *повышенного вклада* ЗН следовало бы корректировать слагаемое  $\sum \lambda_j c_j$  – скорость генерации запаздывающих нейтронов. Однако на самом деле модели (1), (2), (8) не требуют подобного уточнения. Во-первых, эти модели оперируют численностью популяции как таковой без какого-либо качественного подразделения нейтронов. Во-вторых, баланс скоростей пополнения-убыли популяции определяется только текущими значениями времени генерации  $\Lambda$  и времени жизни  $l$ . Только в этих параметрах отражаются геометрия и материальный состав конкретного реактора, обуславливающие ценность нейтронов любого происхождения, в том числе и запаздывающих. Запаздывающие нейтроны выступают просто как дополнительный источник с «фактической» скоростью генерации  $\sum \lambda_j c_j$ .

Параметры  $\Lambda$  и  $l$  полностью определяют размножающие свойства ЯР, поскольку посредством их выражается условие критичности  $r = 1/\Lambda - 1/l = 0$ . Это условие требует равенства прямой  $(\beta/\Lambda) \cdot n$  и обратной  $\sum \lambda_j c_j$ , скоростей двусторонней реакции «нейтроны  $\leftrightarrow$  ПЗН». Равенство инвариантно к умножению на фактор эффективности, т.е. в рамках рассматриваемой модели критичность ЯР не зависит от ценности запаздывающих нейтронов. Другими словами, здесь учитывается только пополнение популяции запаздывающими нейтронами, а их ценность опосредованно отражается в параметрах  $\Lambda$  и  $l$ . Следовательно, параметр  $\beta$  следует трактовать именно как константу, определяемую соотношениями (4), (5). Как-либо корректировать параметр  $\beta$  путём умножения на фактор ценности запаздывающих нейтронов и затем трактовать полученное значение как «эффективное» неправомерно. Проиллюстрируем это двумя примерами.

После установления нулевой реактивности уравнение (8), принимающее в таком случае форму  $v(t) = -dC(t)/dt$  (при  $Q = 0$ ), должно описывать фактически наблюдаемый распад ПЗН с соответствующими долями  $\sum \beta_j = \beta$ . Использование «эффективного» параметра  $\beta$  исказит реальную картину распада.

Далее, в случае  $v(t) > 0$ ,  $r(t) > 0$  первое слагаемое в уравнении (8) имеет смысл скорости генерации популяции нейтронов, а второе – скорости потерь нейтронов, уходящих на генерацию ПЗН. При этом второе слагаемое  $dC/dt > 0$ . Следовательно, согласно уравнению (9),  $h_0 n > \sum \lambda_j c_j$ , т.е. скорость потребления нейтронов на производство ПЗН превосходит скорость генерации запаздывающих нейтронов. Поэтому, умножив параметр  $h_0$  (или, что то же, параметр  $\beta$ ) на некоторый «фактор эффективности», мы, воп-

реки традиционным интерпретациям, не увеличим, а уменьшим репродукцию популяции. Этот факт однозначно указывает на ошибочность привычных трактовок «эффективности» параметра  $\beta$ .

### **О СООТНОШЕНИИ ДОЛЕЙ МГНОВЕННЫХ И ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ**

Анализ динамики ЯР часто начинают с тезиса «если доля запаздывающих нейтронов равна  $\beta$ , то доля мгновенных равна  $1 - \beta$ », полагая его применимым к любым состояниям реактора. На этом основании выражение скорости репродукции мгновенных нейтронов представляют в следующем виде (см., например, [13, с. 312]):

$$(1 - \beta)v_{\text{мн}}^{\text{г}} - v_{\text{н}}^{\text{п}}. \quad (10)$$

Отсюда, с учётом выражений (3) для скоростей  $v_{\text{мн}}^{\text{г}}$ ,  $v_{\text{н}}^{\text{п}}$  следует первое слагаемое уравнения (1). Однако даже из записи (10) видно, что параметр  $\beta$  не связан с полным выходом нейтронов деления. Слагаемое  $\beta v_{\text{мн}}^{\text{г}}$  есть скорость потребления мгновенных нейтронов на генерацию ПЗН, и, следовательно, параметр  $\beta$  выражает выход ПЗН на один мгновенный нейтрон. В свою очередь, коэффициент  $(1 - \beta)$  имеет смысл «эффективной» доли мгновенных нейтронов – как отношение скорости положительного вклада мгновенных нейтронов (в общую популяцию нейтронов) к полной скорости генерации мгновенных нейтронов. Поэтому процитированное выше утверждение имеет смысл только применительно к единичному акту деления, если  $\beta$  понимать как величину  $\beta_{\text{пв}}^{\text{ЗН}}$ , определяемую соотношениями (6). Но в таком качестве оно не имеет отношения к выражению (10), которое выписывается непосредственно при составлении баланса скоростей в уравнении (1).

Приведённый выше тезис конкретизируют, например, следующим образом [10]: «в критической активной зоне при  $\Lambda = 0.001$  и  $\beta = 0.0064$  из каждых ста тысяч нейтронов деления 99360 являются мгновенными, а остальные 640 – запаздывающими нейтронами». Однако непосредственно из уравнений (1), (2) следует, что эта картина выглядит несколько иначе.

В популяции из  $n$  нейтронов появляется в секунду  $n/\Lambda$  мгновенных нейтронов,  $(\beta/\Lambda) \cdot n$  ядер-предшественников ЗН,  $\Sigma \lambda_j c_j$  запаздывающих нейтронов. Таким образом, в любом состоянии реактора при указанных значениях параметров  $\Lambda$  и  $\beta$  на один нейтрон популяции генерируется каждую секунду тысяча МН и 6.4 ядра ПЗН.

В критическом состоянии скорости генерации ПЗН и ЗН равны:  $(\beta/\Lambda) \cdot n = \Sigma \lambda_j c_j$ , так что на один нейтрон популяции каждую секунду генерируется  $\beta/\Lambda = 6.4$  запаздывающих нейтрона, т.е. каждую секунду возникает 1006.4 нейтронов. В таком случае доля ЗН в полном выходе (МН+ЗН) равна, очевидно,  $6.4/1006.4 = 0,00636 \neq \beta$ . Следовательно, формулировка приведенного выше примера должна быть изменена следующим образом: «из каждых 100000 нейтронов деления в критическом реакторе мгновенными являются 99364, а 636 – запаздывающими».

Как видим, для уточнения содержания понятия ЭДЗН необходимо более аккуратное и детальное определение долей мгновенных и запаздывающих нейтронов (относительно полной популяции и относительно друг друга). При этом следует иметь в виду, что модель (1), (2) явно выражает только скорости генерации МН и ЗН, но не скорости их потери. Поэтому невозможно определить текущее количество МН и ЗН и установить их фактическую долю в популяции. Можно сопоставить только скорость генерации со скоростями других процессов, учитываемых в модели, или с текущим объёмом популяции. Практическое значение такого сопоставления состоит в том, что оно позволяет оценить вклад генерации МН и ЗН при различных значениях реактивности [22].

Согласно уравнению (1) параметр  $\beta \equiv \beta_{\text{пв}}^{\text{ЗН}}$  равен доле генерации запаздывающих нейтронов относительно мгновенных (равен выходу ЗН или ПЗН на один мгновенный нейтрон):

$$\beta_{\text{мн}}^{\text{пзн}} = \beta_{\text{мн}}^{\text{зн}} = v_{\text{зн}}^{\text{г}} / v_{\text{мн}}^{\text{г}} \equiv (\sum_{j=1}^J \lambda_j c_j) / (n / \Lambda) \quad (11)$$

только в стационарном состоянии ЯР, когда равны скорость генерации ПЗН  $v_{\text{пзн}}^{\text{г}} = h_0 n$  и скорость распада ПЗН – скорость генерации запаздывающих нейтронов. В этом состоянии параметр  $h_0$  выражает темп обновления популяции – относительная скорость генерации запаздывающих нейтронов равна  $h_0 = \sum \lambda_j c_j / n$ . В форме  $(\beta / \Lambda) \cdot n = \sum \lambda_j c_j$  это соотношение означает, что в стационарном состоянии ЯР скорость потребления мгновенных нейтронов на генерацию ПЗН равна скорости генерации запаздывающих нейтронов. Разумеется, это равенство следует рассматривать как формальное, поскольку модель (1), (2) не конкретизирует как и какие нейтроны мгновенного или запаздывающего происхождения потребляются на генерацию ПЗН.

В нестационарных режимах баланс, определяющий относительную скорость репродукции популяции нейтронов  $\alpha(t) = (dn/dt)/n(t)$ , выглядит, согласно уравнению (1), следующим образом:

$$\alpha(t) = \rho(t) / \Lambda - h_0 + v_{\text{зн}}^{\text{г}}(t) / n(t) + Q(t) / n(t).$$

Представив здесь относительную скорость генерации запаздывающих нейтронов как

$$v_{\text{зн}}^{\text{г}}(t) / n(t) = v_{\text{зн}}^{\text{г}}(t) / (\Lambda v_{\text{мн}}^{\text{г}}(t)) = \beta_{\text{мн}}^{\text{зн}} / \Lambda,$$

получим выражение доли генерации ЗН, определяемой соотношением (11) (т.е.  $\beta_{\text{мн}}^{\text{зн}} = v_{\text{зн}}^{\text{г}} / v_{\text{мн}}^{\text{г}}$ ):

$$\beta_{\text{мн}}^{\text{зн}}(t) = (\beta - \rho(t)) + \Lambda(\alpha(t) - Q(t) / n(t)). \quad (12)$$

Для медленных переходных процессов в эксплуатационных режимах ЯР, когда можно пренебречь слагаемыми  $\alpha$  и  $Q/n$ , это выражение упрощается:

$$\beta_{\text{мн}}^{\text{зн}}(t) = \beta - \rho(t),$$

и показывает, что в оговоренных условиях ( $\alpha = 0, Q = 0$ ) в надкритическом реакторе выход ЗН на один мгновенный нейтрон всегда меньше аналогичного выхода ПЗН.

При  $\rho = \beta$  соотношение (12) принимает (при  $Q = 0$ ) форму

$$v_{\text{зн}}^{\text{г}}(t) / n(t) = \beta_{\text{мн}}^{\text{зн}}(t) / \Lambda = \alpha(t),$$

указывающую на равенство скорости репродукции популяции нейтронов и скорости генерации ЗН. Равенство  $\rho = \beta$  означает также, что скорость потребления нейтронов на генерацию ПЗН  $v_{\text{пзн}}^{\text{г}} = (\beta / \Lambda) n$  равна скорости репродукции мгновенных нейтронов  $v_{\text{мн}}^{\text{г}} = (\rho / \Lambda) n$ . В этом смысле можно сказать, что при  $\rho = \beta$  мгновенные нейтроны полностью уходят на генерацию ПЗН, а положительная репродукция популяции обусловлена только вкладом запаздывающих нейтронов.

Приведённые интерпретации параметра  $\beta \equiv \beta_{\text{мн}}^{\text{пзн}}$ , фигурирующего в уравнениях динамики ЯР в качестве ЭДЗН, и связь этого параметра с долей ЗН в полном выходе  $\beta_{\text{пв}}^{\text{зн}}$  непосредственно усматриваются из стандартных уравнений кинетики ЯР, но, как видим, существенно отличаются от привычных трактовок.

## НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

Выполненный в работе достаточно очевидный анализ уравнений динамики ЯР позволяет, в частности, констатировать следующее.

1. Параметр  $\beta$ , фигурирующий в упомянутых уравнениях как «эффективная доля запаздывающих нейтронов», в общем случае равен доле мгновенных нейтронов, потребляемых на генерацию ПЗН, или выходу ПЗН на один мгновенный нейтрон в единичном акте деления.

2. Только в стационарном режиме работы ЯР выход запаздывающих нейтронов на один мгновенный нейтрон равен  $\beta$ . При этом о доле запаздывающих нейтронов относительно полной популяции нейтронов в рамках модели (1), (2) ничего сказать нельзя.

3. В переходных процессах ЯР доля генерации запаздывающих нейтронов относительно мгновенных  $v_{zn}^r/v_{mn}^r$  является переменной величиной и связана с параметром  $\beta$  уравнением (12). Это означает, что часто используемый в анализе динамики ЯР тезис «если доля запаздывающих нейтронов равна  $\beta$ , то доля мгновенных равна  $1 - \beta$ » является некорректным.

4. Умножение параметра  $\beta$  на «фактор эффективности» означает, согласно уравнению (1), увеличение потребления нейтронов на генерацию ПЗН, т.е., вопреки традиционным представлениям, уменьшение репродукции нейтронов в надкритическом реакторе.

Таким образом, привычное определение параметра  $\beta$  как «эффективной доли запаздывающих нейтронов» не вполне отвечает физическому содержанию этого параметра и должно употребляться только с соответствующими оговорками. В частности, необходимо различать доли в элементарном акте деления, в стационарном состоянии ЯР и в переходных процессах. В последних двух случаях речь может идти о долях в смысле отношения скоростей процессов или об отношении этих скоростей к полной численности популяции нейтронов.

Представляется, что предлагаемые уточнения целесообразны как с точки зрения более адекватного описания процессов в ЯР, так и применительно к формулировкам требований ядерной безопасности.

### Литература

1. *Bahman Z.* Neutronic Analysis for Nuclear Reactor Systems. – Springer, 2019. – 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04906-5>.
2. *Kerlin T.W., Upadhyaya B.R.* Dynamics and Control of Nuclear Reactors. – Academic Press, 2019. – 402 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815261-4.00011-1>.
3. *Marguet S.* The Physics of Nuclear Reactors. – Springer, 2017. – 1462 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59560-3>.
4. *Селезнев Е.Ф.* Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Наука, 2013. 239 с.
5. *Попов А.К.* Основы управления ядерным реактором. – М.: МГУ, 2012. – 208 с.
6. *Саркисов А.А., Пучков В.Н.* Нейтронно-физические процессы в быстрых реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. – М.: Наука, 2011. – 168 с.
7. *Владимиров В.И.* Физика ядерных реакторов: Практические задачи по их эксплуатации. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 480 с.
8. *Халимончук В.А.* Динамика реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК. – Киев: Основа, 2008. – 228 с. DOI: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/108/40108236.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/108/40108236.pdf).
9. *Юркевич Г.П.* Системы управления энергетическими реакторами. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
10. *Мерзликин Г.Я.* Основы теории ядерных реакторов. Курс для эксплуатационного персонала АЭС. Севастополь: СИЯЭИП, 2001. – 343 с.
11. *Колесов В.Ф., Лепник П.А., Павлов С.П., Плютинский В.И., Сабаев Е.Ф., Торлин Б.З., Шевелёв Я.В.* Динамика ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 516 с.
12. *Дементьев Б.А.* Кинетика и регулирование ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
13. *Саркисов А.А., Пучков В.Н.* Физика переходных процессов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
14. *Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
15. *Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В.* Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
16. *Белл Д., Глестон С.* Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 489 с.
17. *Lewins J.* Nuclear Reactor Kinetics and Control. Pergamon Press, 1978. – 275 p.
18. *Akcasu Z., Lellouche G.S., Shotkin L.M.* Mathematical Methods in Nuclear Reactor

Dynamics. – Academic Press, 1971. – 465 p.

19. Физика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1964. 384 с.

20. Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954. – 458 с.

21. Тошинский Г.И., Булавин П.Е. К расчету относительной ценности запаздывающих нейтронов в реакторе. // Атомная энергия. – 1967. – Т. 23. Вып. 2. С. 146-147. Электронный ресурс: [http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t23-2\\_1967/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t23-2_1967/go,0/) (дата доступа 01.12.2021).

22. Юферов А.Г. О понятии «мгновенная критичность». // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 4. – С. 135-145. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2021.4.12>.

Поступила в редакцию 04.12.2021 г.

#### Автор

Юферов Анатолий Геннадьевич, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: [anatoliy.yuferov@mail.ru](mailto:anatoliy.yuferov@mail.ru)

UDC 621.039.514.4:621.039.515:621.039.516:378

## ON THE CONCEPT OF «EFFECTIVE DELAYED NEUTRON FRACTION»

Yuferov A.G.

IATE MPhI

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

#### ABSTRACT

The article considers methodological issues related to the conceptual and terminological apparatus of the dynamics of nuclear reactors. Based on an elementary analysis of the standard point reactor kinetics equations, the authors shows that it is necessary to clarify the physical meaning of the parameter  $\beta$  included in the equations, which is traditionally interpreted as the «effective delayed neutrons fraction» (EDNF). It follows directly from the kinetics equations that the parameter  $\beta$ , which appears in these equations as EDNF, is, from the point of view of the neutron balance, the fraction of prompt neutrons consumed for the generation of delayed neutron precursors (DNP), and, from the point of view of the DNP balance, the DNP yield per prompt neutron in a single fission event. With these interpretations taken into account, the role of the  $\beta$  parameter is considered in situations related with its adjustment by multiplying it by the «delayed neutron efficiency factor» and with the establishment of the actual fractions of prompt and delayed neutrons. In particular, it is shown that:

– the statement «if the delayed neutron fraction is  $\beta$ , then the prompt neutron fraction is equal to  $1 - \beta$ » used in the problems of analyzing the nuclear reactor dynamics as a starting position, cannot be considered applicable to any reactor conditions;

– an increase in the  $\beta$  parameter by multiplying it by the «delayed neutron efficiency factor» leads, contrary to traditional interpretations, not to an increase but to a decrease in neutron reproduction in a supercritical reactor.

The proposed clarifications are appropriate both in terms of more adequate descriptions of processes in nuclear reactors, and in relation to the formulations of nuclear safety requirements.

**Key words:** nuclear reactor dynamics, effective delayed neutron fraction.

#### REFERENCES

1. Bahman Z. *Neutronic Analysis For Nuclear Reactor Systems*. Springer, 2019, 672 p.; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04906-5>.

2. Kerlin T.W., Upadhyaya B. R. *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*. Academic Press, 2019, 402 p.; DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815261-4.00011-1>.
3. Marguet S. *The Physics of Nuclear Reactors*. Springer Publ., 2017, 1462 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59560-3>.
4. Seleznev E.F. *Kinetics of Fast Neutron Reactors*. Moscow. Nauka Publ., 2013, 239 p. (in Russian).
5. Popov A.K. *Fundamentals of Nuclear Reactor Control*. Moscow. MGU Publ., 2012, 208 p. (in Russian).
6. Sarkisov A.A., Puchkov V.N. *Neutron-Physical Processes in Fast Reactors with Heavy Liquid-Metal Heat Carriers*. Moscow. Nauka Publ., 2011, 168 p. (in Russian).
7. Vladimirov V.I. *Physics of Nuclear Reactors: Practical Tasks for Their Operation*. Moscow. LIBROCOM Publ., 2009, 480 p. (in Russian).
8. Halimonchuk V.A. *Dynamics of Reactor with Distributed Parameters in Studies of Transient Operation Modes of VVER and RBMK*. Kiev. Osnova Publ., 2008, 228 p. (in Russian).
9. Yurkevich G.P. *Power Reactor Control Systems*. Moscow. ELEKS-KM Publ., 2001, 344 p. (in Russian).
10. Merzlikin G.Ya. *Fundamentals of the Theory of Nuclear Reactors. A Course for NPP Operating Personnel*. Sevastopol. SIYaEiP Publ., 2001. – 343 pp. (in Russian).
11. Kolesov V.F., Leppik P.A., Pavlov S.P., Plyutinsky V.I., Sabaev E.F., Torlin B.Z., Shevelev Ya.V. *Dynamics of Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 518 pp. (in Russian).
12. Dementiev B. A. *Kinetics and Regulation of Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986, 272 p. (in Russian).
13. Sarkisov A.A., Puchkov V.N. *Physics of Transients in Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 264 p. (in Russian).
14. Bartolomey G.G., Bat G.A., Baibakov V.D., Alkhutov M.S. *Fundamentals of Theory and Calculation Methods for Nuclear Power Reactors*. Moscow. Energoizdat Publ., 1982, 512 p. (in Russian).
15. Emeliyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Scientific and Technical Fundamentals of Nuclear Reactor Management*. Moscow. Energoizdat Publ., 1981, 360 p. (in Russian).
16. Bell D., Glesson S. *Theory of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1974. 489 p. (in Russian).
17. Lewins J. *Nuclear Reactor Kinetics and Control*. Pergamon Press, 1978, 275 p.
18. Akcasu Z., Lellouche G.S., Shotkin L.M. *Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics*. Academic Press, 1971, 465 p.
19. *Physics of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1964, 384 p.
20. Glasston S., Edlund M. *Foundations of the Theory of Nuclear Reactors*. Moscow. Inostrannaya Literatura Publ., 1954, 458 p. (in Russian).
21. Toshinsky G.I., Bulavin P.E. Calculation of the Relative Importance of Delayed Neutrons in a Reactor. *Atomic Energy*. 1967, v. 23, iss. 2, pp. 845-846; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01179634>.
22. Yuferov A.G. About the Concept of «Prompt Criticality». *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 4, pp. 135-145; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.12> (in Russian).

**Author**

Yuferov Anatoly Gennadyevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [anatoliy.yuferov@mail.ru](mailto:anatoliy.yuferov@mail.ru)