

О ПОНЯТИИ «МГНОВЕННАЯ КРИТИЧНОСТЬ»

А.Г. Юферов

*Обнинский институт ядерной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Рассматриваются методические вопросы, связанные с понятийным и терминологическим аппаратом динамики ядерных реакторов. На основе анализа стандартных уравнений точечной кинетики, представленных в форме баланса скоростей процессов, показано, что понятия «мгновенная критичность» или «критичность на мгновенных нейтронах» (которые связывают с состоянием ядерного реактора, когда реактивность равна «эффективной доле запаздывающих нейтронов» $\rho = \beta$) уместно относить только к состоянию с нулевой реактивностью.

Это обусловлено тем, что при $\rho = \beta$ скорость репродукции популяции нейтронов равна скорости генерации запаздывающих нейтронов, а мгновенные нейтроны «уходят» на генерацию предшественников запаздывающих нейтронов (ПЗН), поскольку скорость репродукции мгновенных нейтронов равна скорости генерации ПЗН. Показано, что, вопреки традиционному подходу, нельзя противопоставлять «мгновенную критичность» и «критичность на запаздывающих нейтронах», так как эти состояния тождественны (одновременны и совместны), совпадая с состоянием нулевой реактивности. Аналогично, состояние «мгновенной надкритичности» тождественно «надкритичности на запаздывающих нейтронах», совпадая с состоянием экспоненциального увеличения скоростей всех процессов, учитываемых в уравнении точечной кинетики ЯР. Показано, что равенство реактивности эффективной доле запаздывающих нейтронов не может трактоваться как «граница безопасности» или «граница управляемости», поскольку неприемлемый период разгона реактора достигается при существенно меньших значениях реактивности. Предлагаемые уточнения целесообразны как с точки зрения более адекватного описания процессов в ядерном реакторе, так и применительно к формулировкам требований ядерной безопасности.

Ключевые слова: динамика ядерного реактора, мгновенная критичность, критичность на запаздывающих нейтронах.

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «мгновенная критичность» или «критичность на мгновенных нейтронах» широко используется при рассмотрении вопросов динамики ядерных реакторов [1 – 21]. Содержание этого понятия выражается в равенстве реактивности и «эффективной доли запаздывающих нейтронов». Однако более детальный анализ показывает, что такая трактовка мгновенной критичности требует ряда важных уточнений терминологического и содержательного плана. Для этого достаточно рассмотреть обычные уравнения точечной динамики ЯР

© А.Г. Юферов, 2021

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

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

где все обозначения стандартны. Интерпретация этих уравнений в терминах скоростей генерации и потери частиц (нейтронов и осколков деления) очевидна и приводится в ряде работ. Однако, как показано далее, вытекающие из сопоставления скоростей выводы требуют некоторого изменения и традиционного изложения динамики ЯР на основе модели (1), (2) и соответствующей терминологии. Предлагаемые уточнения необходимы как с точки зрения более адекватного описания процессов в ядерном реакторе, так и применительно к формулировкам требований ядерной безопасности.

АБСОЛЮТНЫЕ И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ В ЯР

Уравнение (1) выражает баланс скоростей процессов в реакторе

$$dn/dt = v_{\text{зн}}^r - v_{\text{пзн}}^r + v_{\text{мн}}^p + Q, \quad (3)$$

определяющих скорость изменения численности полной популяции нейтронов (скорость репродукции, т.е. разность скоростей генерации и потери частиц). Аналогично, уравнение (2) представляет слагаемые скорости репродукции предшественников запаздывающих нейтронов (ПЗН).

Согласно уравнениям (2), слагаемое

$$v_{\text{зн}}^r = \sum_{j=1}^J \lambda_j c_j$$

в уравнении (3) есть суммарная по всем группам скорость генерации запаздывающих нейтронов. Слагаемое $v_{\text{пзн}}^r = h_0 n$ есть скорость потери наличных нейтронов на генерацию предшественников запаздывающих нейтронов или, другими словами, суммарная по всем группам скорость генерации ПЗН, что также следует из уравнений (2). Коэффициент $h_0 \equiv \beta / \Lambda$ имеет смысл относительной скорости (вероятности) потребления нейтронов на генерацию ПЗН: $h_0 = v_{\text{пзн}}^r / n$.

Последнее слагаемое в уравнении (3) $v_{\text{мн}}^p = rn$ есть скорость репродукции мгновенных нейтронов. Коэффициент r связан с традиционными параметрами кинетики следующими соотношениями:

$$r \equiv \rho / \Lambda = \frac{1}{\Lambda} - \frac{1}{l} = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{k-1}{k} \right) = \left(\frac{k-1}{l} \right) \quad (4)$$

и имеет смысл *реактивности в Λ -шкале*. В такой форме реактивность приобретает (по сравнению с традиционным определением $\rho = (k-1)/k$) более содержательную интерпретацию как относительная скорость или вероятность репродукции мгновенных нейтронов: $r \equiv v_{\text{мн}}^p / n$. Понимание реактивности как относительной скорости репродукции мгновенных нейтронов обеспечивает необходимую однозначность и согласованность при введении понятия реактивности в рамках различных приближений уравнения переноса. Выражения реактивности в данных приближениях следует рассматривать не в качестве определений реактивности, как это иногда практикуется [7, 21], а как оценки этой величины.

Для сопоставления скоростей процессов введём в рассмотрение суммарную скорость репродукции ПЗН

$$v_{\text{пзн}}^p = dC/dt = (\beta / \Lambda)n - \sum_{j=1}^J \lambda_j c_j, \quad C = \sum_{j=1}^J c_j.$$

В таком случае уравнение (1) принимает вид

$$dn / dt = rn - dC / dt + Q. \quad (5)$$

Используя представление уравнения (2) для случая стационарных начальных условий в виде

$$dc_j / dt = (\beta_j / \Lambda) \int_0^t \exp(-\lambda_j(t - \tau)) dn(\tau),$$

можно записать уравнение (5) в форме, содержащей только наблюдаемые величины:

$$v(t) = r(t)n(t) - \int_0^t h(t - \tau)v(\tau)d\tau + Q(t). \quad (6)$$

Здесь скорость репродукции популяции нейтронов $v(t) = dn / dt$, функция репродукции ПЗН

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

интеграл репродукции ПЗН

$$Y(t) = \int_0^t h(t - \tau)v(\tau)d\tau \equiv dC / dt.$$

Уравнения (5), (6) в форме баланса относительных скоростей дают *уравнение реактиметра-периодомера* (аналог «обращенного решения уравнения кинетики»)

$$\alpha(t) = r(t) - Y(t) / n(t) + Q(t) / n(t), \quad (7)$$

связывающее относительную скорость репродукции популяции нейтронов (мгновенный обратный период $\alpha(t) = v(t)/n(t)$) с относительными скоростями репродукции мгновенных нейтронов $r(t)$, репродукции ПЗН $Y(t)/n(t)$ и с относительной интенсивностью источника $Q(t)/n(t)$. В случае экспоненциального роста популяции этот баланс принимает форму уравнения обратных часов.

Поведение скоростей процессов, отраженных в уравнении (6), и периода реактора после ввода ступеньки реактивности в критическом реакторе представлено на рис. 1 для некоторых соотношений величин ρ и β из интервала $0.1 \beta < \rho < 3 \beta$, когда $\beta = 0.0065$ (константы Кипина для случая деления U-235 тепловыми нейтронами, время генерации $\Lambda = 0.001$ с). При других параметрах запаздывающих нейтронов соотношение скоростей будет несколько иным, но общая картина поведения ЯР сохранится. Отметим, что для отображения процессов здесь используются фазовые портреты в координатах «скорость – мощность». Это делает графики более информативными и интерпретируемыми.

Анализ графиков позволяет отметить следующее.

1. В рассматриваемом интервале вводимых ступенек реактивности вплоть до $\rho = 2\beta$ вклад запаздывающих нейтронов в репродукцию популяции является достаточно существенным ($\geq 10\%$), компенсируя потребление нейтронов на генерацию ПЗН (рис. 1а, б, ж, з). Разумеется, речь идёт о сопоставлении скоростей процессов, а не о реальном распределении нейтронов мгновенного и запаздывающего происхождения между поглощением в реакции деления и пополнением популяции. Это распределение здесь оценить нельзя, поскольку рассматриваемая модель не описывает процессы поглощения и утечки запаздывающих нейтронов. Однако наблюдаемое соотношение скоростей репродукции мгновенных нейтронов и генерации запаздывающих означает, что невозможно различить состояния «надкритичность на мгновенных нейтронах» и «надкритичность на запаздывающих нейтронах». Далее этот факт проанализирован более подробно.

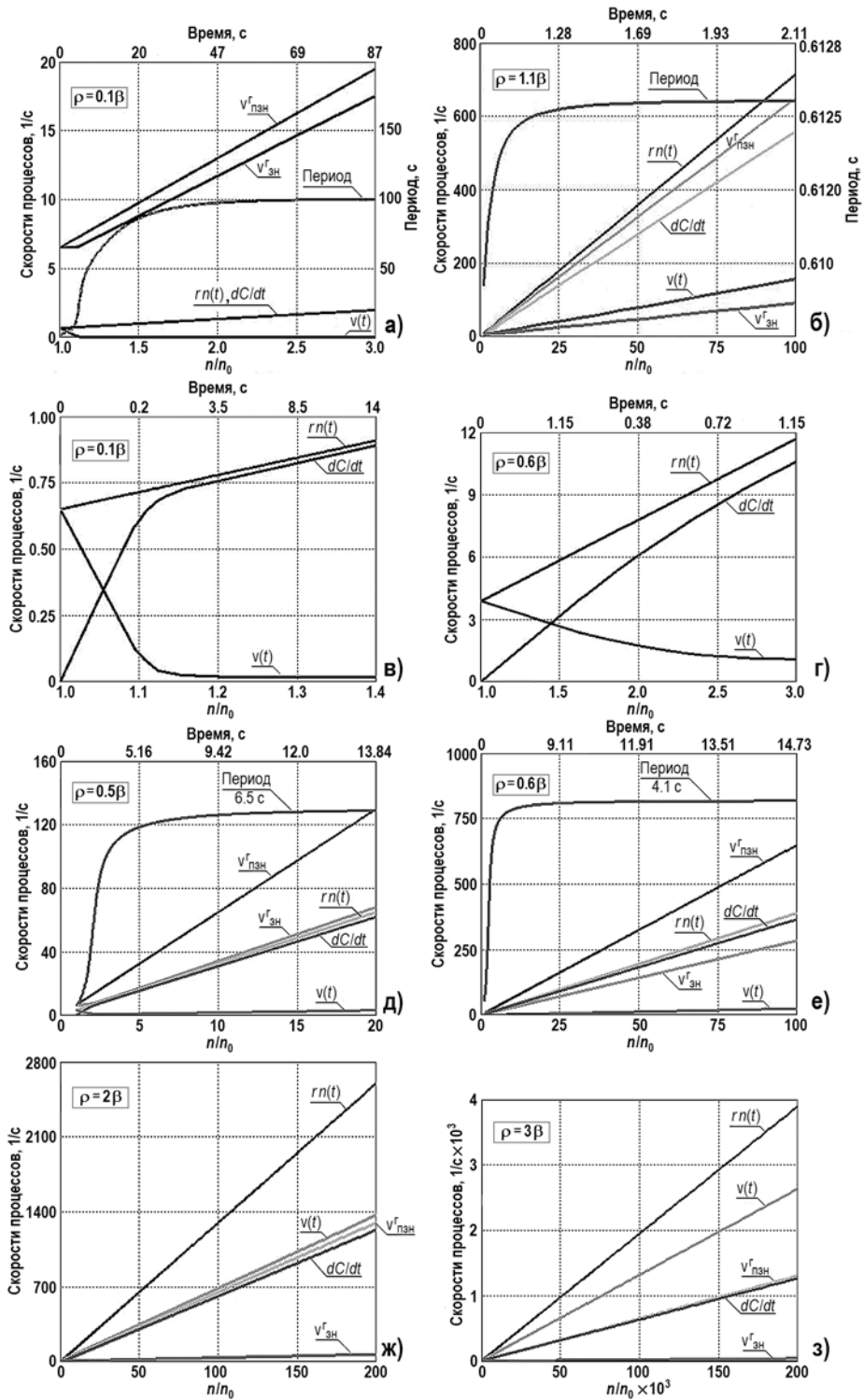


Рис.1. Поведение скоростей процессов и периода после ввода ступеньки реактивности

2. При допустимых по условиям ядерной безопасности значениях вводимой реактивности и вплоть до величин $\rho \approx 0.6\beta$ за время менее одной секунды установ-

ливаются практическое равенство скоростей репродукции мгновенных нейтронов и ПЗН (рис. 1в, г). Разница составляет всего 1.5% при $\rho = 0.1\beta$, увеличиваясь до 6% при $\rho = 0.6\beta$. Этот результат отражает физическое содержание известной модели мгновенного скачка [8] и позволяет оценить границы применимости этой модели. Близость скоростей репродукции мгновенных нейтронов и ПЗН в эксплуатационных режимах ЯР означает, что для прогноза мощности применимо уравнение (6) в форме

$$n(t) = \frac{1}{\rho(t)} \int_0^t H(t-\tau) dn(\tau), \text{ где } H(t-\tau) = \Lambda h(t-\tau) = \sum_{j=1}^J \beta_j \exp(-\lambda_j(t-\tau)).$$

Данное уравнение, в отличие от традиционной модели мгновенного скачка, не содержит концентраций ПЗН. Это упрощает алгоритм расчёта.

3. Скорость репродукции мгновенных нейтронов начинает превосходить скорость генерации запаздывающих нейтронов в области $\rho > 0.5\beta$. Однако это не приводит к каким-либо качественным изменениям в ходе процессов (рис. 1д, е). Сохраняется существенная «тормозящая» роль репродукции ПЗН, и лишь генерация запаздывающих нейтронов обеспечивает положительную репродукцию популяции.

4. При $\rho > \beta$ репродукция мгновенных нейтронов превышает потребление нейтронов на генерацию ПЗН, и мгновенные нейтроны начинают вкладываться в разгон реактора (рис. 1б). В приведённом примере $\rho = 1.1\beta$. Но и здесь генерация запаздывающих нейтронов составляя всего 13% от репродукции мгновенных нейтронов даёт, однако, 58% вклада в репродукцию популяции. При этом поведение реактора качественно не отличается от поведения при $0 < \rho \leq \beta$. Только при $\rho > 2\beta$ репродукция популяции начинает определяться преимущественно мгновенными нейтронами (рис. 1ж, з). Поэтому нет необходимости вводить специальную терминологию для обозначения состояния ЯР при $\rho = \beta$. Во всяком случае, это состояние не есть «мгновенная критичность». Применение здесь этого термина противоречит фактической картине процессов и исходному пониманию понятия «критичность», описывающего состояние $\rho = 0, k = 1$.

5. В состояниях с реактивностью $\rho > 0.4\beta$ (рис. 1д, е) устанавливается период, не превышающий 10 секунд – стандартной уставки на срабатывание аварийной защиты. Отсюда следует, что значение реактивности, равное β , нельзя рассматривать как «границу безопасности» или «границу управляемости», поскольку недопустимый разгон реактора наблюдается при существенно меньших значениях введённой ступеньки реактивности.

6. На всем интервале значений введённой реактивности, указанных на рис. 1, имеет место подобие процессов. За время менее одной секунды устанавливается линейная зависимость рассматриваемых скоростей от мощности, т.е. все процессы развиваются экспоненциально с соответствующими «эффективными» постоянными времени. Это означает, что для рассматриваемого интервала значений реактивности применимо одногрупповое описание запаздывающих нейтронов.

7. Непосредственно после ввода ступеньки реактивности скорость репродукции популяции нейтронов экспоненциально спадает (рис. 1в, г). Данная ситуация может быть описана модифицированным уравнением (6), в котором интеграл репродукции ПЗН аппроксимирован тем или иным образом в предположении малости верхнего предела t , например,

$$dn/dt = rn(t) - h_0[n(t) - n(0)] = (r - h_0)n(t) + h_0n(0). \quad (8)$$

В экспоненциальном спаде проявляется «эффект запаздывания репродукции» или «эффект опережающих потерь», когда, согласно приближению (8), вклад за-

запаздывающих нейтронов остаётся исходным постоянным, равным $h_0 n(0)$, а потребление нейтронов на генерацию ПЗН растёт как $h_0 n(t)$, превышая при этом скорость репродукции мгновенных нейтронов $m(t)$ (рис. 1а). С увеличением введённой ступеньки реактивности спад будет меньше и короче во времени (рис. 1г), исчезая при $r = h_0$. Более содержательная трактовка состоит в том, что в малой окрестности начального момента времени скорость репродукции популяции изменяется как $v(t) = m(t)$, а при больших временах, согласно уравнению обратных часов, как $v(t) = m(t)/K$, где $K = 1 + (\beta/\Lambda)\Sigma(a_j/(\alpha + \lambda_j))$. Переход от первой зависимости ко второй означает, что на начальном участке скорости репродукции популяции «должна» уменьшиться на несколько порядков (при малых значениях введённой реактивности). Поэтому наблюдаемая зависимость не есть следствие вычислительной аппроксимации, подобной использованной в уравнении (8).

О КРИТЕРИЯХ КРИТИЧНОСТИ И НАДКРИТИЧНОСТИ

Сопоставление скоростей процессов на вышеприведённых графиках указывает на необходимость уточнения понятий критичности и надкритичности применительно к мгновенным и запаздывающим нейтронам.

Согласно общепринятой терминологии, ядерный реактор критичен, когда он находится в стационарном состоянии – в реакторе протекает самоподдерживающаяся реакция деления постоянной интенсивности: скорости репродукции популяции нейтронов, dn/dt , и репродукции ПЗН, dc_j/dt , а также интенсивность источника Q равны нулю. Как видно из уравнения (5), эти условия (т.е. $dn/dt = 0$, $dc_j/dt = 0$, $Q(t) = 0$) означают нулевую реактивность. С другой стороны, нулевая реактивность $r = 0$ обуславливает равенство нулю скорости репродукции мгновенных нейтронов $v_{\text{мн}}^{\text{р}} = m$, т.е. если логически аккуратно следовать принятой терминологии, *критичность реактора на мгновенных нейтронах*.

В этом случае (при $Q = 0$) определитель системы (1), (2) равен нулю, а уравнение (5) сводится к равенству скоростей репродукции нейтронов и ПЗН, что можно записать как

$$\frac{d}{dt} \left(n(t) + \sum_{j=1}^J c_j \right) = 0$$

или $n(t) + C(t) = n(0) + C(0)$. Все три критерия выражают условие перехода учитываемых процессов в стационарное состояние при нулевой реактивности, когда уравнения (1), (2) или (5) описывают двустороннюю реакцию (нейтроны \leftrightarrow ПЗН), в которой устанавливается равновесие между генерацией запаздывающих нейтронов и потреблением нейтронов на генерацию ПЗН в силу равенства прямой, $(\beta/\Lambda)n$, и обратной, $\Sigma\lambda_j c_j$, скоростей указанной реакции.

Таким образом, равенство нулю реактивности – относительной скорости репродукции мгновенных нейтронов – *необходимо и достаточно* для критичности реактора. Поэтому понятия «мгновенная критичность» и «критичность на мгновенных нейтронах» уместно связывать только с состоянием нулевой реактивности, а для обозначения состояний $0 < \rho \leq \beta$ и $\rho > \beta$ следует использовать иную терминологию. Стационарность (критичность) реактора означает стационарность всех учитываемых процессов. Поэтому фактически достаточен только термин «критичность», указывающий на нулевую скорость репродукции мгновенных нейтронов, при которой имеет место и «мгновенная критичность», $\rho = 0$, и «критичность на запаздывающих нейтронах», $(\beta/\Lambda)n = \Sigma\lambda_j c_j$. В силу тождественности этих состояний термин «критичность на запаздывающих нейтронах» лишен специфического смысла и должен быть исключен из употребления. Предлагаемая терминология соответствует определению,

приведённому в справочнике [22]: «prompt criticality – state of a fissile system such that the prompt-neutron contribution to k_{eff} equals unity», если понимать это определение, согласно соотношениям (4), как эквивалентность условий $\rho = 0$ и $k_{\text{eff}} = 1$.

Тождественны также состояния «мгновенной надкритичности» и «надкритичности на запаздывающих нейтронах». Если скорость репродукции мгновенных нейтронов положительна, $\rho > 0$ («мгновенная надкритичность»), то, как принято говорить, имеет место *разгон реактора* [23, 24] – экспоненциальный рост популяции нейтронов как мгновенного, так и запаздывающего происхождения. При этом вклады мгновенных и запаздывающих нейтронов в прирост популяции определяются соотношением величин ρ и β .

Нетрудно видеть, что неравенство $\rho \leq \beta$ влечёт аналогичные неравенства для относительных $\rho \leq h_0$ и абсолютных $v_{\text{мн}}^p \leq v_{\text{пзн}}^r$ скоростей. Эти неравенства означают, что потребление нейтронов на генерацию ПЗН преобладает над пополнением популяции мгновенными нейтронами. Более конкретно, при положительной реактивности, составляющей k -ю долю беты, скорость потребления нейтронов на генерацию ПЗН в k раз превышает скорость репродукции мгновенных нейтронов. Поэтому при $0 < \rho \leq \beta$ прирост популяции обеспечивают только запаздывающие нейтроны. При $\rho < \beta$ часть этого прироста, равная $v_{\text{пзн}}^r - v_{\text{мн}}^p$, также уходит на генерацию ПЗН. Наконец, при достижении равенства $\rho = \beta$ потребление на генерацию ПЗН полностью компенсируется репродукцией мгновенных нейтронов: $v_{\text{мн}}^p = v_{\text{пзн}}^r$ и скорость роста популяции совпадает со скоростью генерации запаздывающих нейтронов. Это непосредственно усматривается из уравнения (1), которое при фиксированной реактивности $\rho = \beta$ принимает форму

$$dn(t) / dt = \sum_{j=1}^J \lambda_j c_j. \quad (9)$$

Таким образом, состояние ЯР при $0 < \rho \leq \beta$ уместно именовать как *разгон на запаздывающих нейтронах*, поскольку при указанной надкритичности только генерация запаздывающих нейтронов (со скоростью $v_{\text{пзн}}^r = \sum \lambda_j c_j$) обеспечивает положительную скорость прироста популяции. Приведённое описание процессов в целом соответствует традиционному изложению роли запаздывающих нейтронов на интервале $0 < \rho < \beta$, но с той существенной поправкой, что достижение реактивности $\rho = \beta$ отнюдь не обнуляет их вклад в разгон реактора.

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ПОНЯТИЯ «МГНОВЕННАЯ КРИТИЧНОСТЬ»

Трактовка условия $\rho = \beta$ как «мгновенной критичности» опирается на рассуждения, приведённые ещё в классических руководствах [19 – 21]. В дальнейшем схема этих рассуждений воспроизводилась тождественным образом применительно к различным приближениям уравнения переноса. Она исходит (в обозначениях модели (1)) из рассмотрения вклада запаздывающих нейтронов $v_{\text{пзн}}^r = \sum \lambda_j c_j$ как внешнего независимого источника, которым можно пренебречь в определённых условиях. При этом сохраняют слагаемое $(\beta/\Lambda)n$ – скорость потребления нейтронов на генерацию ПЗН, но, тем не менее, подразумевают, что так усечённое уравнение переноса описывает только процессы на мгновенных нейтронах. Далее, предполагая выполненным условие стационарности $dn/dt = 0$, получают равенство $\rho = \beta$ и трактуют его как выражение «критичности на мгновенных нейтронах».

Представленные рассуждения содержат две ошибки. Во-первых, исключение слагаемого $\sum \lambda_j c_j$ нарушает баланс скоростей в уравнениях (1), (2) – ПЗН генерируются с суммарной скоростью $(\beta/\Lambda)n$, но не распадаются. Но выше показано, что вклад запаздывающих нейтронов является существенным при любом периоде разгона ЯР

вплоть до $\rho = 2\beta$. Если же для сохранения баланса исключить и слагаемые $(\beta_j/\Lambda)n$, то мы приходим к элементарному уравнению кинетики, стационарность которого означает критичность в смысле $\rho = 0$.

Вторая ошибка состоит в допущении стационарности $dn/dt = 0$ применительно к уравнению (1) без слагаемого $\sum \lambda_j c_j$. В действительности уравнение (1) при достижении реактивности $\rho = \beta$ переходит (без каких-либо дополнительных предположений и, следовательно, с заведомым сохранением баланса скоростей) в нестационарное уравнение (7). Это означает, что оба допущения, использованные при выводе равенства $\rho = \beta$ и, как нетрудно видеть, объединяемые условием стационарности уравнения (9)

$$dn(t) / dt = \sum_{j=1}^J \lambda_j c_j = 0,$$

не являются *достаточными* для выполнения равенства $\rho = \beta$. На самом деле при более детальном анализе, не нарушающем условие сохранения баланса скоростей, эти допущения приводят к нулевой реактивности $\rho = 0$.

Появление вышеуказанных ошибок невозможно при рассмотрении эквивалентного уравнения динамики (6) или его распределённого аналога для скорости изменения плотности потока нейтронов $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \equiv \partial \phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) / \partial t$

$$\frac{1}{v} \psi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = R\phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) - \int_0^t \int W(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t - \tau) \psi(\mathbf{r}, \mathbf{v}', \tau) d\mathbf{v}' d\tau + Q, \quad (10)$$

поскольку в этих уравнениях репродукция ПЗН представлена единственным слагаемым в интегральной форме. Из уравнений (6) и (10) непосредственно усматривается, что для стационарности репродукции ПЗН ($dC/dt = 0$) *необходимо и достаточно* установление стационарности $v(t) = 0$ или $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = 0$ на интервале памяти ФРП. (В уравнении (8) ФРП имеет вид

$$W(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t - \tau) = \sum_j \chi_j(v) e^{-\lambda_j(t-\tau)} \beta_j(v') v_j(v') \Sigma_{fj}(\mathbf{r}, \mathbf{v}').)$$

Одновременно это означает и установление критичности в смысле $\rho = 0$ или $R\phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = 0$, где оператор реактивности R описывает процессы репродукции мгновенных нейтронов.

НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

Выполненный в работе анализ содержания и взаимосвязи некоторых понятий динамики ядерных реакторов достаточно тривиален. Однако выявление некорректностей в употреблении привычных понятий и терминов или уточнение соотношений между ними является необходимым средством развития теории ядерных реакторов и улучшения соответствующих учебных курсов. Представляется, что такие уточнения важны как с точки зрения совершенствования понятийного аппарата динамики ядерных реакторов, так и применительно к практическим задачам управления ЯР и обеспечения ядерной безопасности. Из проделанного анализа следует ряд поправок к традиционным укоренившимся представлениям.

– Равенство $\rho = \beta$ означает, что популяция нейтронов увеличивается со скоростью генерации запаздывающих нейтронов. Поэтому обозначение этой ситуации как «мгновенной критичности» представляется некорректным.

– Недопустимый период разгона реактора устанавливается при значениях введённой реактивности, существенно меньших, чем «бета». Поэтому нельзя рассматривать эту величину как «границу безопасности», и, следовательно, соответствующие критерии в Правилах ядерной безопасности должны быть уточнены.

– Критичность в смысле $\rho = 0$ означает стационарность всех учитываемых процессов в реакторе, т.е. критичность и на мгновенных, и на запаздывающих нейтронах. Аналогично, надкритичность в смысле положительной реактивности означает экспоненциальный рост скоростей всех рассмотренных процессов. Поэтому для характеристики размножения нейтронов в реакторе достаточны три термина – «подкритичность», «критичность», «надкритичность» без конкретизации их применительно к мгновенным или запаздывающим нейтронам.

– Равенство $\rho = \beta$ не означает равенства скоростей генерации и потери мгновенных нейтронов, как это иногда трактуют [3]. Оно означает, что скорость репродукции мгновенных нейтронов равна скорости генерации ПЗН.

– В модели (1), (2) параметр β есть выход ПЗН на один мгновенный нейтрон, как это определено в первых работах по динамике ЯР. Поэтому использование здесь понятия «эффективная доля запаздывающих нейтронов» является некорректным. Представляется, что в отношении последнего требуется более обстоятельный анализ, необходимость чего уже отмечалась [5].

Литература

1. *Bahman Z.* Neutronic Analysis For Nuclear Reactor Systems. – Springer, 2019. – 672 p.
2. *Marguet S.* The Physics of Nuclear Reactors. – Springer, 2017. – 1462 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59560-3>.
3. *Oka Y.; Suzuki K.* Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. – Springer, 2013. – 305 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54195-0>.
4. *Anglart H.* Nuclear Reactor Dynamics and Stability. – Warsaw University of Technology, 2013. – 153p.
5. *Селезнев Е.Ф.* Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Наука, 2013. – 239 с.
6. *Саркисов А. А., Пучков В. Н.* Нейтронно-физические процессы в быстрых реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. – М.: Наука, 2011. – 168 с.
7. *Халимончук В.А.* Динамика реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК. – К.: Основа, 2008. – 228 с.
8. *Наумов В.И., Смирнов В.Е.* Моделирование нестационарных и аварийных процессов в ядерных энергетических установках. – М.: МИФИ, 2007. – 104 с.
9. *Van Dam H., van der Hagen T.H.J.J., Hoogenboom J.E.* Nuclear Reactor Physics. – Delft University of Technology, 2005. – 132 p.
10. *Юркевич Г.П.* Системы управления энергетическими реакторами. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
11. *Ганев И.Х.* Физика и расчет реактора. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 496 с.
12. *Дементьев Б.А.* Кинетика и регулирование ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
13. *Шихов С.Б., Троянский В.Б.* Теория ядерных реакторов. Том 2. Газокинетическая теория. – М.: Энергоиздат. 1983. – 368 с.
14. *Саркисов А.А., Пучков В.Н.* Физика переходных процессов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
15. *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.
16. *Lewins J.* Nuclear reactor kinetics and control. - Pergamon Press, 1978. – 275 p.
17. *Akcasu Z., Lellouche G.S., Shotkin L.M.* Mathematical methods in nuclear reactor dynamics. – Academic Press, 1971. – 465 p.
18. *Harrer J.M.* Nuclear reactor control engineering. – Van Nostrand, 1963. – 587 p.
19. Физика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1964. – 384 с.
20. *Глестон С., Эдлунд М.* Основы теории ядерных реакторов. – М.: Издательство ино-

странной литературы, 1954. – 458 с.

21. Судэк Г., Кэмпбелл Э. Элементарная теория котла. // УФН. – 1950. – Т. 42. – С. 93-156. DOI: 10.3367/UFNr.0042.195009g.0093.

22. McLaughlin T.P., Monahan S.P., Pruvost N.L., Frolov V.V., Ryazanov B.G., Sviridov V.I. A Review of Criticality Accidents. – Los Alamos National Laboratory, LA-13638. 2000. – 158 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/760080>.

23. Терминологический словарь по аварийным ситуациям в ядерной энергетике. – М.: Ядерное общество СССР, 1990. – 117 с.

24. Политехнический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.

Поступила в редакцию 06.04.2021 г.

Автор

Юферов Анатолий Геннадьевич, доцент, канд. физ.-мат. наук
E-mail: anatoliy.yuferov@mail.ru

UDC 621.039.514.4:621.039.515:621.039.516.2

ABOUT THE CONCEPT OF «PROMPT CRITICALITY»

Yuferov A.G.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MEPHI
1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The article deals with methodological issues related to the conceptual and terminological apparatus of the dynamics of nuclear reactors. Based on the analysis of the standard point kinetics equations presented in the form of a balance of the processes velocities, it is shown that the concepts of «prompt criticality» or «prompt neutron criticality» (which are associated with the state of a nuclear reactor when the reactivity is equal to the «effective fraction of delayed neutrons», $\rho = \beta$) are appropriate to refer only to the state with zero reactivity. This is due to the fact that at $\rho = \beta$, the rate of reproduction of the neutron population is equal to the rate of generation of delayed neutrons, and the prompt neutrons «go out» to generate the precursors of delayed neutrons (PDN), since the rate of reproduction of prompt neutrons is equal to the rate of generation of PDNs. It is shown that, contrary to the traditional approach, it is impossible to oppose «prompt criticality» and «delayed criticality», since these states are identical (simultaneous and joint), coinciding with the state of zero reactivity. Similarly, the state of «prompt supercriticality» is identical to «delayed supercriticality», coinciding with the state of exponential increase in the velocities of all processes taken into account in the point reactor kinetics equation. It is found that the equality of reactivity to the effective fraction of delayed neutrons cannot be interpreted as a «safety limit» or «controllability limit», since the unacceptable period of reactor acceleration is achieved at significantly lower reactivity values. The proposed clarifications are appropriate both from the point of view of a more adequate description of the processes in a nuclear reactor, and in relation to the wording of nuclear safety requirements.

Key words: nuclear reactor dynamics, prompt criticality, delayed criticality.

REFERENCES

1. Bahman Z. *Neutronic Analysis For Nuclear Reactor Systems*. Springer, 2019, 672 p.
2. Marguet S. *The Physics of Nuclear Reactors*. Springer Publ., 2017, 1462 p.; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59560-3>.

3. Oka Y.; Suzuki K. *Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control*. Springer Publ., 2013, 305 p.; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54195-0>.
4. Anglart H. *Nuclear Reactor Dynamics and Stability*. Warsaw University of Technology, 2013. 153p.
5. Seleznev E.F. *Kinetics of Fast Neutron Reactors*. Moscow. Nauka Publ., 2013, 239 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. Halimonchuk V.A. *Dynamics of a Reactor with Distributed Parameters in Studies of Transient Operation Modes of VVER and RBMK*. Kiev. Osnova Publ., 2008, 228 p. (in Russian).
8. Naumov V. I., Smirnov V. E. *Modeling of Non-Stationary and Emergency Processes in Nuclear Power Plants*. Moscow. MPhI, 2007, 104 p. (in Russian).
9. Van Dam H., van der Hagen T.H.J.J., Hoogenboom J.E. *Nuclear Reactor Physics*. Delft University of Technology, 2005, 132 p.
10. Yurkevich G.P. *Power Reactor Control Systems*. Moscow. ELEKS-KM Publ., 2001, 344 p. (in Russian).
11. Ganey I. Kh. *Physics and Calculation of the Reactor*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1992, 496 p. (in Russian).
12. Dementiev B. A. *Kinetics and Regulation of Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986, 272 p. (in Russian).
13. Shikhov S. B., Troyansky V. B. *Theory of Nuclear Reactors. Vol. 2. Gasokinetic Theory*. Moscow. Energoizdat Publ., 1983, 368 p. (in Russian).
14. Sarkisov A.A., Puchkov V.N. *Physics of Transients in Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 264 p. (in Russian).
15. Bartolomei 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).
16. Lewins J. *Nuclear Reactor Kinetics and Control*. Pergamon Press, 1978, 275 p.
17. Akcasu Z., Lellouche G.S., Shotkin L.M. *Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics*. Academic Press, 1971, 465 p.
18. Harrer J. M. *Nuclear Reactor Control Engineering*. Van Nostrand, 1963, 587 p.
19. *Physics of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1964, 384 p. (in Russian).
20. Glasston S., Edlund M. *Foundations of the Theory of Nuclear Reactors*. Moscow. Inostrannaya Literatura Publ., 1954, 458 p. (in Russian).
21. Soodak H., Campbell E.C. *Elementary Pile Theory*. UFN **42** 93–156 (1950); DOI: [10.3367/UFNr.0042.195009g.0093](https://doi.org/10.3367/UFNr.0042.195009g.0093). (in Russian).
22. McLaughlin T.P., Monahan S.P., Pruvost N.L., Frolov V.V., Ryazanov B.G., Sviridov V.I. *A Review of Criticality Accidents*. Los Alamos National Laboratory, LA-13638. 2000. 158 p.; DOI: <https://doi.org/10.2172/760080>.
23. *Terminological Dictionary of Emergency Situations in Nuclear Power Engineering*. Moscow. Nuclear Society of the USSR, 1990, 117 p. (in Russian).
24. *Polytechnic Dictionary*. Moscow. Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1989, 656 p. (in Russian).

Author

Yuferov Anatoly Gennadyevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)
E-mail: anatoliy.yuferov@mail.ru