

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕВОДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПОДКРИТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МЕТОДОМ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ

Н. Н. Ошканов, Г. Е. Ваулин, М. А. Метельникова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Цель исследования – определение причин недостижения подкритического состояния ядерного реактора при срабатывании быстрой аварийной защиты (БАЗ). Цепная ядерная реакция (ЦЯР) последовательности нейтронных циклов деления соответствует марковской цепи (процессу), поэтому марковская кинетика соответствует кинетике ЦЯР и позволяет вывести уравнение кинетики последовательным произведением выходных плотностей нейтронов последовательности циклов. Согласно марковской кинетике большой ступенчатый скачок отрицательной реактивности, характерный для срабатывания БАЗ, вызывает резкое снижение плотности мгновенных нейтронов и рост излишка запаздывающих нейтронов из-за медленного распада их предшественников. Их растущий избыток образует устойчивую вторичную цепную реакцию, которая по мере прекращения исходной цепной реакции обеспечивается только запаздывающими нейтронами. Классическая кинетика не отмечает устойчивой вторичной ЦЯР, наоборот, постулирует асимптотическое снижение плотности нейтронов до нуля за счет снижения образования запаздывающих нейтронов. Показано, что параллельная работа систем быстрого и медленного ввода отрицательной реактивности приводит к постепенному снижению общей плотности нейтронов до подкритического состояния.

Ключевые слова: аварийная защита; кинетика реактора; марковская цепь; подкритическое состояние; реактивность.

1. Введение

В данной работе рассматривается поведение мощности ядерного реактора до подкритического состояния при срабатывании быстрой аварийной защиты (БАЗ) ядерного реактора без внешних обратных связей в однорупповом представлении запаздывающих нейтронов (ЗН). Для этого используется вывод и решение нестационарного уравнения кинетики в представлении ЦЯР в модели марковской цепи.

ЦЯР – основополагающий процесс в ядерном реакторе и по определению представляет собой цепь последовательных циклов делений ядер, в каждом из которых образующиеся нейтроны осуществляют взаимодействие с ядрами активной зоны нейтронов. Результат взаимодействия – поглощение нейтронов делящимися ядрами с последующим их делением, образованием тем самым следующего деления. Таким образом, выходная плотность нейтронов предыдущего цикла является входной плотностью нейтронов следующего цикла.

Марковская цепь (процесс) представляет собой последовательность событий, в которой вероятность каждого события зависит только от события, непосредственно предшествующего ему. ЦЯР является последовательностью событий (делений), в которой вероятность нового события (нового деления) зависит только от предшествующего ему события (предшествующего деления). Таким образом, ЦЯР соответствует марковской цепи [1, с. 25, 26, 28].

Кинетика марковской ЦЯР существенно отличается от классической кинетики. В последней ЦЯР рассматривается как единый непрерывный процесс, свидетельством тому является интегрирование уравнения непрерывного переноса нейтронов без учета разрывов, в то время как интегрируемая функция плотности нейтронов имеет такие

разрывы в начале каждого цикла в виде скачкообразного деления ядер. Такое интегрирование недопустимо [2, с. 225–231], но выполнено путем исключения скачков плотности нейтронов при делениях. Поэтому результат интегрирования образует существенно приближенную классическую кинетику, которая может применяться только на начальном участке ЦЯР.

Цель исследования – изучение поведения мощности ядерного реактора после срабатывания БАЗ (скачкообразного быстрого ввода большой отрицательной реактивности) до поддержания подкритического состояния и, как следствие, соответствия БАЗ требованиям правил ядерной безопасности (ПБЯ) [3].

Актуальность исследования определяется аспектами соблюдения ядерной безопасности реактора, т. к. экстренный ввод отрицательной реактивности в результате самоограничения мощности реактора, аналогичного самоограничению при вводе положительной реактивности [4, с. 39–45], может привести к потере функции полного останова реактора.

2. Метод исследования

Исследование проводится, как это принято в кинетике ядерных реакторов, для точечной модели теплового ядерного реактора с топливом уран-235 без внешних обратных связей с однопрупповым представлением ЗН. Такой выбор позволяет учитывать непосредственные нейтронно-физические процессы активной зоны реактора, в котором происходит срабатывание БАЗ [5, с. 9].

Поведение плотности нейтронов в активной зоне реактора изучается с помощью численного эксперимента решения уравнения кинетики марковской цепной ядерной реакции, что позволяет в числовом и графическом исполнении зафиксировать переход между разными процессами в активной зоне.

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Марковская кинетика

В цепной реакции одновременно происходят процессы скачкообразного деления с образованием мгновенных нейтронов (МН) и «новых» предшественников ЗН в каждом коротком цикле, а также медленный, непрерывный в течение многих циклов ЦЯР радиоактивный распад предшественников ЗН с периодом распада, значительно превышающим длительность нейтронного цикла.

В начале первого цикла стационарного режима цепной реакции плотность нейтронов в конце предыдущего цикла n_0 вызывает деление ядер с образованием МН с плотностью $\nu n_0(1 - \beta)$ и «новых» предшественников ЗН плотностью $\nu n_0\beta$, где ν – полное число нейтронов, испускаемых на одно деление; β – эффективная доля запаздывающих нейтронов в полном числе нейтронов деления. Одновременно в цикл поступают запаздывающие нейтроны от нераспавшихся предшественников ЗН предыдущих циклов, концентрация которых к началу каждого цикла составляет $\nu n_0\beta e^{-\lambda t} / (1 - e^{-\lambda \tau})$ [4, с. 39–45], где λ – постоянная радиоактивного распада предшественников (с^{-1}); τ – средняя длительность цикла (с).

Марковская кинетика соответствует кинетике ЦЯР и позволяет вывести уравнение кинетики последовательным произведением выходных плотностей нейтронов последовательности циклов. Поэтому ввод скачка коэффициента размножения k (реактивности) в стационарный режим реактора изменяет стационарную плотность нейтронов и, как показано в [4, с. 39–45], последовательное произведение выходных плотностей нейтронов (как и в марковской ЦЯР) образует сходящуюся геометрическую прогрессию со знаменателем $k(1 - \beta)$. Сумма ее m -членов (циклов) определяется как:

$$\frac{n_m}{n_0} = k^m (1 - \beta e^{-\lambda\tau})^m + \beta e^{-\lambda\tau} \frac{1 - k^{m-1} (1 - \beta e^{-\lambda\tau})^{m-1}}{1 - k(1 - \beta e^{-\lambda\tau})}, \quad (1)$$

где k – эффективный коэффициент размножения нейтронов в активной зоне реактора в конце цикла перед вводом скачка реактивности нового цикла; n_m – выходная плотность нейтронов m -цикла.

Запаздывающие нейтроны начинают формироваться в начале цикла и исчезают (поглощаются) в его конце, т. е. существуют только в течение рассматриваемого цикла [4, с. 39–45].

При вводе отрицательного скачка реактивности $\rho = 1/(1 - k)$ величина $k(1 - \beta e^{-\lambda\tau}) < 1$ для любой вводимой реактивности. Поэтому при отрицательном скачке величина первого члена (1) с увеличением числа циклов m асимптотически стремится к нулю, а второй член стремится к стабилизации плотности нейтронов. Соответственно, асимптотическая относительная плотность нейтронов при $m \rightarrow \infty$ равна:

$$\frac{n_{m \rightarrow \infty}}{n_0} = \frac{\beta e^{-\lambda\tau}}{1 - k(1 - \beta e^{-\lambda\tau})} = \frac{1 - \rho}{1 - \rho/\beta e^{-\lambda\tau}}, \quad (2)$$

а не классическому снижению ее асимптоты до нуля.

Ввод в реактор отрицательной реактивности порядка $0,1\beta$ характерен для рутинной эксплуатации реактора. При таком скачке реактивности точечный реактор в соответствии с (2) снижает свою мощность до уровня саморегулирования 91,6 %.

Ввод реактивности (-1β) характерен для скачкообразного отключения одной из петель теплоотвода реактора, при котором мощность реактора по асимптоте снизится до стационарного уровня 50 %.

Ввод реактивностей $(-5,5\beta)$ и (-11β) характерен для срабатывания аварийной защиты, которая должна перевести реактор в подкритическое состояние.

Ввод гипотетической реактивности (-100β) показывает, что даже ввод отрицательной реактивности такой величины оставляет реактор на уровне 1,6 %, что выше значения β (0,65 %), гарантирующего безопасное состояние реактора.

Таким образом, ввод отрицательного скачка реактивности асимптотически устанавливает постоянный уровень плотности нейтронов. В соответствии с (2) он не может быть ниже β . Поскольку это превышает минимальный контролируемый уровень мощности реактора, то это свидетельствует о том, что реактор по окончании переходного периода после срабатывания аварийной защиты остается в критическом состоянии при ее любой эффективности.

3.2 Быстрый ввод большой отрицательной реактивности

Проведено численное решение (2) в соответствии с марковской кинетикой при вводе большой реактивности $(-5,5\beta)$ в урановую активную зону точечного теплового реактора ($\beta = 0,0065$, $\tau = 0,001$ с, $\lambda = 0,0767$ с⁻¹ [2, с. 15]) и сравнение результата с расчетом по классической кинетике (3), выполненного с обычно применяемыми преобразованиями Лапласа [2, с. 35]:

$$\frac{n_m}{n_0} = \frac{1}{\beta - \rho} \left[\beta \exp\left(\frac{\lambda\rho}{\beta - \rho} t\right) - \beta \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{\tau} t\right) \right]. \quad (3)$$

Результаты расчета приведены на рис. 1, в котором кривая 1 соответствует (1), кривая 3 соответствует (3).

Вследствие отрицательности скачка реактивности реактор переходит в подкритический режим реактора со снижением исходных размножающих свойств активной зоны.

Согласно марковской кинетике после ввода реактивности относительная плотность нейтронов (кривая 1) снижается и к 10-му циклу становится равной 0,737. К

30-му циклу она снижается до 0,400 и к 200-му циклу (0,2 с) стабилизируется на уровне 0,159. Далее она сохраняется на этом уровне.

Согласно классической кинетике снижение общей относительной плотности нейтронов практически совпадает до 80-го цикла с общей относительной плотностью (кривая 2) и с марковской кинетикой (кривая 1). Начиная с 200-го цикла, кривая 2 значительно отличается от кривой 1. К 1000-му циклу разность плотностей нейтронов по (1) и (3) различается уже на 8 %. Далее классическая кривая асимптотически снижается к нулю по экспоненте первого члена (3) с постоянной времени $(\rho - \beta)/\rho\lambda \approx 12$ с (полупериод распада ≈ 8 с), который зависит как от величины постоянной распада предшественников, так и от величины реактивности.

Детальное рассмотрение происходящих процессов обнаруживает следующие явления.

Согласно (1) ввод отрицательной реактивности снижает образование мгновенных нейтронов исходной цепной реакции (кривая 3) и общей плотности нейтронов (кривая 1), т. е. на первом этапе обусловлена быстрым темпом снижения плотности мгновенных нейтронов (кривая 3). Вследствие большого периода полураспада предшественников в сравнении с длительностью цикла (8 с и 0,001 с соответственно) плотность запаздывающих нейтронов (кривая 4) повышается за счет возникающего их избытка из-за невосребованности снижающейся ЦЯР.

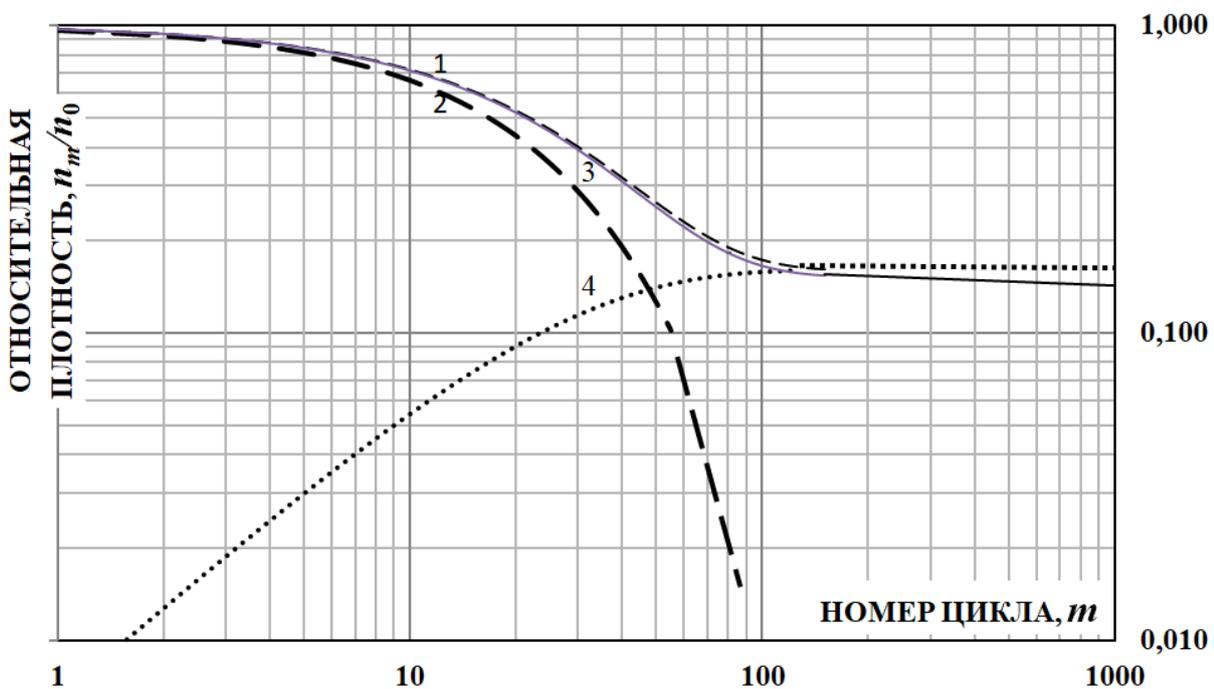


Рис. 1. Поведение относительной плотности нейтронов после ввода отрицательной реактивности ($-5,5\beta$) в урановую активную зону точечного теплового реактора; 1 (пунктир) – марковская кинетика; 2 (пунктир) – мгновенные нейтроны; 3 (сплошная) – классическая кинетика; 4 (точечная) – запаздывающие нейтроны

Постепенно избыток запаздывающих нейтронов замещает выбывающие исходные мгновенные нейтроны, сохраняя ЦЯР. В конце затухающая исходная ЦЯР на мгновенных нейтронах постепенно замещается на затухающую ЦЯР на ЗН (кривая 4). Постепенно, к 200-му циклу (0,2 с), образуется стационарный режим вторичной цепной реакции на ЗН, тем самым подкритический режим прекращается и переходит в критический, что свидетельствует о неполном выполнении требований правил ядерной безопасности [3].

По классической кинетике (3) поведение плотности нейтронов можно оценить только качественно, т. к. формула не содержит явного разделения типа нейтронов, как

это происходит по марковской кинетике. Поведение общей плотности нейтронов ЦЯР по классической кинетике (кривая 3) до момента возникновения новой цепной реакции совпадает с марковской кривой 1. Но, в отличие от (1), вторичная ЦЯР по (3) является затухающей и после 0,2 с (200-го цикла) асимптотически снижается к нулю, имитируя требование правил ядерной безопасности сохранения подкритического режима после срабатывания БАЗ.

Такое отличие результатов ввода реактивности в реактор, очевидно, вызвано приближенным характером вывода и решения уравнений кинетики в классической теории, в т. ч. из-за отсутствия современной компьютерной техники [5, с. 117]. Кстати, в настоящее время применить ее сложно из-за большого числа шагов вследствие малой длительности времени жизни мгновенных нейтронов [5, с. 117]. Марковская кинетика не требует применения сложной компьютерной техники.

Очевидно, что система регулирования мощности реактора в обоих случаях должна иметь дополнительную систему, необходимую для управления цепной реакцией, если БАЗ не обеспечивает перевод реактора в подкритическое состояние [3]. Это может быть медленная система компенсации выгорания топлива, которая по сигналу БАЗ осуществляет медленный ввод реактивности.

Для оценки возможности достижения подкритического состояния проведен численный эксперимент для случая параллельной работы систем быстрого и медленного ввода реактивности.

3.3 Параллельный быстрый и медленный ввод реактивности

Для определенности приняты равными $(-5,5\beta)$ эффективности быстрой системы БАЗ и медленной системы, в которой реактивность вводится в активную зону за 300 с. Также для определенности медленный ввод поглотителей аппроксимирован скачками длительностью 1 с, реактивность каждого из которых представляет ступенчатый скачок реактивности величиной $(-5,5\beta)/300\text{с} = -0,01833\beta/\text{с}$ ($k_N = 0,9999$). В соответствии с (2) система аварийной защиты с эффективностью $(-5,5\beta)$ снижает (рис. 1) за 1 с плотность нейтронов до 0,1594, а каждый секундный скачок медленной системы в соответствии с (1) снижает эту величину последовательными скачками в соответствии с (2) каждый в $1/0,9849 = 1,015$ раз. За 300 с после срабатывания БАЗ уровень 0,1594 ежесекундными скачками медленной системы снизится в $1,015^{300} = 87$ раз, т. е. плотность нейтронов за 300 с снизится с 0,1594 до $0,001832 = 0,28\beta$, что имеет подкритический уровень плотности нейтронов. Для точечного реактора это произойдет именно так, он по определению свободен от действия внешних обратных связей, для компенсации которых в реакторах вводится медленная система. Тем самым параллельно-последовательный ввод отрицательной реактивности обеспечивает подкритический режим точечного реактора.

4. Выводы

В настоящем исследовании установлено что:

1. Ввод ступенчатого скачка отрицательной реактивности любой величины в ядерный реактор в его точечной модели приводит к асимптотическому снижению его мощности до ненулевого стационарного уровня, зависящему от вводимой реактивности и эффективной доли запаздывающих нейтронов.

2. Причина ненулевой мощности реактора при вводе отрицательной реактивности – рост доли запаздывающих нейтронов до уровня, образующего вторичную цепную ядерную реакцию взамен существовавшей до вводе реактивности.

3. Быстрая аварийная защита реактора любой эффективности не обеспечивает задачу поддержания подкритического режима реактора вследствие образования в нем вторичной цепной реакции.

4. Требуемое правилами ядерной безопасности совместное действие быстросрабатывающей аварийной защиты и медленнодействующей системы ввода в

реактор отрицательной реактивности позволяет обеспечить после ввода отрицательной реактивности подкритический режим реактора.

Данные выводы рекомендуется учесть при эксплуатации ядерных реакторов и разработке их систем аварийной защиты.

5. Благодарности

Авторы благодарят С. Е. Щеклеина, заведующего кафедрой атомных станций Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, за поддержку и ценные замечания и дискуссии по выполнению настоящего исследования.

6. Список литературы

1. *Ошканов, Н. Н.* Сравнительный анализ классической кинетики ядерного реактора и кинетики марковской цепной реакции деления / Н. Н. Ошканов, Я. О. Комарова, П. А. Михайлова // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – №3 (7). – С. 25, 26, 28.
2. *Хетрик, Д. Л.* Динамика ядерных реакторов / Д. Л. Хетрик. – М. : Атомиздат, 1972. – С. 15, 31, 35.
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, НП-082-07. Постановление Ростехнадзора от 10.12.2007, пп.2.3.1–2.3.2. М., 2007.
4. *Oshkanov, N. N.* On nonconformity of the classical reactor kinetics to physics of a chain reaction / N. N. Oshkanov // SGEM2018. – 2018. – Vol. 18. – № 4.1. – P. 39–45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1. ISBN 978-619-7408-44-7.
5. *Селезнев, Е. Ф.* Кинетика реакторов на быстрых нейтронах / Е.Ф. Селезнев. – М. : Наука, 2013 – С. 9, 117.

Сведения об авторах:

Ошканов Николай Николаевич, к. т. н., профессор, кафедра атомной энергетики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: nickolai.oshkanov@yandex.ru.

Ваулин Глеб Евгеньевич, студент УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

Метельникова Мария Александровна, студентка УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

SOLVING THE PROBLEM OF TRANSFERRING A NUCLEAR REACTOR INTO SUBCRITICAL MODE BY METHOD OF MARKOV CHAIN

N. N. Oshkanov, G. E. Vaulin, M. A. Metelnikova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

The purpose of the study is to determine the reasons why a nuclear reactor cannot reach subcritical state when the fast emergency protection system (FEPS) is triggered. The nuclear chain reaction (NCR) of a sequence of fission neutron cycles corresponds to a Markov chain (process), so Markov kinetics corresponds to the kinetics of a NCR and allows one to derive the kinetics equation by the sequence product of the output neutron densities of a sequence of cycles. According to the Markov kinetics, the large stepwise jump in reactivity characteristic of FEPS actuation causes a sharp decrease in the density of prompt neutrons and a growing excess of delayed neutrons due to the slow decay of their precursors. Their growing excess forms a stable secondary chain reaction, which, as the initial chain reaction is terminated, is provided only by delayed neutrons. Classical kinetics does not note a stable secondary NCR and, on the contrary, postulates an asymptotic decrease in the neutron density to zero due to a decrease in the formation of delayed neutrons. It is shown that the parallel operation of fast and slow negative reactivity insertion systems leads to a gradual decrease in the total neutron density and puts the reactor into a subcritical state.

Key words: emergency protection; Markov chain; reactivity; reactor kinetics; subcritical state.

References

1. Oshkanov, N. N. Comparative Analysis of the Classical Kinetics of a Nuclear Reactor and Kinetics of a Markov Fission Chain Reaction / N. N. Oshkanov, Ya. Komarova, P. A. Mikhaylova // Research Trajectory – Man, Nature, Technology. – 2023. – №3 (7). – P. 25–26, 28.
2. Hetrick, D. L. Dynamics of Nuclear Reactors. / D. L. Hetrick // M.: Atomizdat. 1972. – P. 15, 31, 35.
3. Nuclear Safety Requirements for Reactor Systems of Nuclear Power Plants, NP-082-07. Order of Rostekhnadzor, 10.12.2007 – pp. 2.3.1–2.3.2. M. : 2007. .
4. Oshkanov N. N. On Nonconformity of the Classical Reactor Kinetics to Physics of a Chain Reaction. / N. N. Oshkanov // SGEM2018. Vol. 18, № 4.1. – P. 39–45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1. ISBN 978-619-7408-44-7.
5. Seleznev, E. F. Fast Breeder Reactor Kinetics / E. F. Seleznev // – M.: Nauka. 2013. – P. 9, 117.