

P13-2022-36

Е. П. Шабалин

ТРИ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Шабалин Е. П.

P13-2022-36

Три особенности динамики пульсирующего реактора

Периодический характер энерговыделения в пульсирующем реакторе существенно изменяет связь (как прямую, так и обратную) между реактивностью и мощностью в сравнении с реакторами непрерывного действия. В работе выделены и обоснованы три специфических динамических свойства пульсирующих реакторов. Одно из них — неизбежность появления положительной реактивности при возникновении периодических колебаний реактивности — ранее не было описано в специальной литературе, хотя его проявляют также реакторы непрерывного действия (но в значительно более слабой мере, чем пульсирующие реакторы).

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022

Shabalin E. P.

P13-2022-36

Three Particular Properties of Periodically Pulsed Reactor Dynamics

Periodic production of energy in pulsed reactors essentially transforms direct impact of reactivity upon power (and feedback as well) as compared to steady-state reactors. In the paper, three specific dynamical properties of a periodically pulsed reactor are formulated and justified. One of them — manifestation of positive reactivity with periodic vibration of any elements inside a reactor — has never been mentioned before in special literature, although it shows itself in steady-state reactors, however, not as markedly as in pulsed reactors.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2022

1. О КЛАССИЧЕСКОЙ КИНЕТИКЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА И ЕЕ ПРИМЕНИМОСТИ

Пульсирующий реактор (далее п. р.) — это реактор, работающий в режиме часто и периодически повторяющихся импульсов мощности, длительность которых много меньше периода их повторения, а период повторения много меньше времени распада самых короткоживущих осколков деления — эмиттеров запаздывающих нейтронов. При этом фоновая мощность (в промежутках между импульсами) много меньше средней мощности п. р. В соответствии с темой данной работы целесообразно привести здесь некоторые соотношения из классической кинетики пульсирующего реактора.

Кинетика п. р. была впервые рассмотрена И. И. Бондаренко и Ю. Я. Стависским [1] для случая отсутствия возмущения реактивности, кроме периодической модуляции, необходимой для осуществления импульсного режима работы с постоянными амплитудой и формой нейтронного импульса. В дальнейшем кинетика п. р. уточнялась другими авторами с целью учета влияния частоты пульсации, отклонения формы модулирующей реактивности от параболы, неточности активной зоны и т.п. (список работ см. в [2]).

Равновесный режим работы п.р. (стабильность энергии импульсов) достигается при определенном значении надкритичности на мгновенных нейтронах в максимуме модуляции реактивности. Соответственно, в равновесном режиме интенсивность запаздывающих нейтронов при развитии импульса мощности одинакова в каждом импульсе и пропорциональна средней мощности реактора. Энергия импульсов Q (для случая, когда импульс развивается в области изменения реактивности во времени по закону параболы) дается выражением

$$Q \approx S \cdot 3,35 (\alpha \varepsilon_m)^{-1/2} \exp \{1,33(\varepsilon_m)^{3/2}(\alpha^{1/2}\tau)^{-1}\}, \quad (1)$$

где S — источник запаздывающих нейтронов; α — коэффициент параболы реактивности модулятора реактивности, с^{-2} ; τ — среднее значение времени жизни поколения нейтронов; ε_m — равновесное (критическое) значение надкритичности на мгновенных нейтронах в максимуме модуляции реактивности, которое подчиняется уравнению

$$Q/S \approx T_m/\beta_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где T_m — период пульсации реактивности, а $\beta_{\text{эф}}$ — классическая величина эффективной доли запаздывающих нейтронов, равная $\sim 0,002k_{\text{эф}}$ для п. р. на плутонии и $\sim 0,001k_{\text{эф}}$ — для нептуниевой зоны (не путать с ниже определенной *импульсной долей* $\beta_{\text{имп}}$).

В классическом понимании устойчивого режима работы п. р. энергия импульсов постоянна и может флукутировать только вследствие воздействия на реактивность внешних факторов. При этом разброс энергии импульсов мощности $\Delta Q/Q$ определяется однозначно флукутациями реактивности $\Delta\rho = \Delta\varepsilon_m$. При малых изменениях реактивности связь Q и ε_m в уравнении (1) обычно сводят к линейной:

$$\Delta Q/Q = \Delta\rho/\beta_{\text{имп}}, \quad (3)$$

где величина *импульсной доли запаздывающих нейтронов* $\beta_{\text{имп}}$ никоим образом не связана с эффективной долей запаздывающих нейтронов и зависит от комплекса двух величин — α и τ :

$$\beta_{\text{имп}} \approx C(\alpha\tau^2)^{1/3} \quad (4)$$

(безразмерный множитель $C \approx 0,5$ слабо зависит от α и τ). При больших надкритичностях ($\Delta\rho > 0,3 - 0,5\beta_{\text{имп}}$) более точное значение энергии импульса дает экспоненциальный закон, вытекающий из разложения в ряд показателя экспоненты в формуле (1):

$$Q \approx Q_{\text{ном}} \exp(\Delta\rho/\beta_{\text{имп}}). \quad (5)$$

Соотношение (5) определяет энергию импульсов мощности с завышением не более 10% при $\Delta\rho < 2\beta_{\text{имп}}$, в то время как линейное приближение (3) занижает энергию импульсов на 10% уже при $\Delta\rho = 0,5\beta_{\text{имп}}$. При характерных для реактора НЕПТУН [3] значениях параметров $\alpha = 6720 \text{ с}^{-2}$ и $\tau = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ $\beta_{\text{имп}} = 7,5 \cdot 10^{-5}$ согласно (4). Для такого $\beta_{\text{имп}}$ флукутации реактивности порядка $\pm 10^{-5} k_{\text{эф}}$ вызовут разброс энергии импульсов мощности на $\pm 13\%$, а при флукутациях реактивности $7,5 \cdot 10^{-5} k_{\text{эф}}$ размах колебаний импульсов мощности достигнет уже $2,5Q_{\text{ном}}$, что можно считать предельно допустимым при оценке динамики пульсирующего реактора. Таким образом, в рабочем диапазоне п. р. использование экспоненциального приближения в аналитических расчетах безусловно предпочтительнее.

Классическое описание кинетики п. р., оправдавшее себя на п. р. ОИЯИ (ИБР, ИБР-30, в бустерном режиме), оказывается неадекватным при повышенных температурных режимах со значительным нагревом ядерного топлива за время импульса порядка десятка градусов (ИБР-2, ИБР-2М, проектируемый НЕПТУН). Динамические процессы в п. р. (т. е. с учетом обратных связей по температуре и мощности) обычно рассчитывают в приближении «размазанного импульса» [2, 4], что позволяет делать аналитические оценки устойчивости п. р. на основе теории реакторов непрерывного действия при низких температурных режимах. Но при этом импульсный характер тепловыделения учитывается некорректно; не принимается во внимание *динамическая деформация* тепловыделяющих элементов. В итоге из расчета исключаются *быстрые процессы воздействия импульсов мощности на последующие*. Классическая теория устойчивого режима работы п. р. оказывается справедливой только в случае очень слабых мощностных эффектов.

Численное моделирование динамических процессов в п.р. с учетом динамических деформаций показывает, что равновесный (установившийся) режим работы в п.р. может проявляться не только как режим постоянной амплитуды импульсов мощности, но и как периодически повторяющаяся последовательность нескольких (или многих) импульсов разной амплитуды. Такой *пакетный* режим автоколебаний возникает вследствие собственных изгибных колебаний тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) или колебаний других элементов реактора, состояние которых зависит от энергии импульсов реактора и само влияет на коэффициент размножения нейтронов. Пакетный режим может быть как устойчивым, так и нестабильным или квазистабильным. В следующих разделах излагаются базовые основы подхода к анализу динамики п.р. значительной мощности, в частности, проектируемого реактора НЕПТУН [3].

2. ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА В ПРОСТЕЙШЕМ СЛУЧАЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Пусть в п.р. существует только мгновенный отрицательный температурный эффект реактивности как следствие теплового расширения столба таблеток топлива в ТВЭлах реактора; других эффектов реактивности не существует. Предполагаем также, что длительность импульса много меньше временного промежутка между импульсами, а тот — много меньше времени жизни запаздывающих нейтронов (эти условия суть определения понятия «пульсирующий реактор»). Здесь и далее реактивность измеряется в единицах $\beta_{\text{имп}} = 0,5(\alpha\tau^2)^{1/3}$, см. (4).

Если реактивность изменилась относительно равновесной надкритичности, определяемой соотношениями (1) и (2), только в одном импульсе на малую величину ρ_0 , то реактивность в следующем импульсе ρ_1 будет определяться изменением температуры и температурным коэффициентом реактивности $\gamma < 0$. В линейном приближении связи энергии импульса и реактивности получим:

$$\rho_1 = \rho_0 \varphi \gamma \Delta T, \quad (6)$$

где $\varphi < 1$ — изменение температуры сердечника ТВЭла за время между импульсами мощности относительно нагрева ΔT за один импульс (значение так называемой *функции Подлесного* при аргументе времени T_m). Реактивности в последующих импульсах, как и отклонение энергии импульсов от номинального, равновесного значения $\Delta Q/Q \approx \rho_n$, будут изменяться по тому же закону:

$$\rho_n = \rho_{n-1} \varphi \gamma \Delta T = \rho_0 (\varphi \gamma \Delta T)^n. \quad (6a)$$

Обратите внимание на *попеременное изменение знака* в каждом последующем периоде пульсации (так как $\gamma < 0$). Наличие случайных (или неслучайных) возмущений реактивности в реакторе очевидно. Значит, *пульсирующий реактор по сути обладает свойством проявлять коле-*

бания импульсов мощности с частотой, в два раз меньше частоты пульсаций модуляции реактивности.

Это есть **первая принципиальная особенность** пульсирующего реактора, обусловленная импульсным периодическим характером энерговыделения.

Переход к экспоненциальному приближению зависимости энергии импульса от реактивности (5) сути не меняет, кроме того, что половинная частота в спектре частот колебаний мощности будет проявляться при меньших флуктуациях реактивности и интенсивнее.

Обозначим знаком Φ комплекс параметров п. р. ($\varphi\gamma\Delta T$). Если значение Φ находится в интервале $[0, 1]$, то после внесения внешней реактивности реактор возвращается к стабильной работе постепенно и монотонно. Если комплекс Φ находится в интервале $[0, -1]$, то реактор возвращается к стабильной работе постепенно, но не монотонно, с увеличением случайных флуктуаций реактивности, которые тем сильнее, чем ближе модуль Φ к единице. При $\Phi < -1$ п. р. после возмущения выходит на режим автоколебаний или расходящихся колебаний (область *импульсной неустойчивости*), а при $\Phi < -2$ — в режим стохастической неустойчивости [5].

Следует учесть, что условие $\Phi > -1$ определяет стабильность реактора «в малом». При возмущениях реактивности более $0,2-0,3\beta_{\text{имп}}$ нелинейность связи реактивности и энергии импульсов мощности приводит к менее стабильному режиму работы.

3. КИНЕТИКА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА С КОЛЕБЛЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Пусть колебания внешней реактивности — периодические и симметричные относительно нулевого значения. Можно показать, что в этом случае колебания всегда эквивалентны *положительному эффекту* реактивности. Причина — в нелинейном характере связи реактивности и энергии импульсов мощности. Действительно, отношение энергии n -го импульса к номинальному определяется экспонентой, см. (5), которую можно представить в виде суммы членов степенного ряда:

$$Q_n/Q_0 \approx \exp(\rho_n/\beta_{\text{имп}}) = \exp(x) = 1 + x + x^2/2 + x^3/6 + \dots, \quad (7)$$

где x — реактивность в n -м импульсе в единицах $\beta_{\text{имп}}$. Сумма членов последовательности (7) четной степени больше, чем нечетной, и, соответственно, в симметричных колебаниях вклад положительной реактивности ($x > 0$) в энергию импульсов будет превалировать над вкладом отрицательной ($x < 0$). В итоге, если частота пульсации мощности, определяемая модулятором реактивности пульсирующего реактора, много выше частоты колебаний внешней реактивности, то симметричные **колебания реактивности приводят к разгону пульсирующего реактора**. При других соотношениях частот модуляции реактивности реактора и колебаний внешней реактивности точное решение определяется биением частот и фазировкой. Нетрудно видеть, что для симметричных колебаний с частотой

в 2 раза меньше, чем частота модуляции реактивности, изменение энергии импульсов за один период при полной синхронизации будет равно $\cosh(x)$, т. е. всегда больше 1; иначе говоря, означает разгон реактора с виртуальной положительной реактивностью, равной

$$\rho = \cosh(x) - 1 \approx x^2/2, \quad (8)$$

с точностью до членов четвертого порядка малости. Нарушение синхронизации сущности не меняет, только разгон идет с бóльшим периодом.

Итак, показано, что *периодически колеблющийся элемент, влияющий на реактивность, вызывает разгон пульсирующего реактора (иными словами — проявляет свойство элемента с положительной реактивностью)*.

Это есть **вторая принципиальная особенность** пульсирующего реактора, обусловленная нелинейным характером связи реактивности и энергии импульсов мощности

Подобный вывод можно получить и для реакторов непрерывного действия, так как период разгона на запаздывающих нейтронах согласно формуле «обратных часов» имеет нелинейный характер относительно реактивности. Однако эффект колебаний в п. р. на несколько порядков выше, чем в реакторах постоянного действия, вследствие малости $\beta_{\text{имп}}$ сравнительно с $\beta_{\text{эф}}$.

4. О ДИНАМИКЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА С ИСТОЧНИКОМ КОЛЕБАНИЙ РЕАКТИВНОСТИ

Наличие обратной связи «мощность–реактивность» приводит к сложному характеру динамического процесса в п. р. Суть в том, что положительный эффект «виртуальной» реактивности от колебаний каких-либо элементов реактора, обсуждавшийся в предыдущем разделе, усугубляется присущими п. р. колебаниями энергии импульсов с частотой, в два раза ниже частоты модуляции реактивности (разд. 2). Результат — возможность возникновения положительной обратной связи. Формально это соответствует тому, что в формуле (6) коэффициент γ следует принять бóльшим по модулю, чем реальный температурный коэффициент. Возникает достаточно парадоксальная ситуация: в реакторе с *отрицательным* коэффициентом обратной связи добавляем *положительную* виртуальную реактивность внешнего осциллятора и получаем дополнительный *отрицательный* эффект реактивности, такой, что стабильный до того аппарат может оказаться в области *импульсной неустойчивости!*

Основной вклад в динамику п. р. вносят эффекты изгиба топливных элементов: твэлов и кассет. Для исследовательских реакторов характерны малые размеры активных зон и сравнительно толстые топливные стержни (твэлы). При этом имеет место заметный градиент температуры в сердечнике твэла и его стальной оболочке в радиальном направлении к центру активной зоны, следствием чего являются изгибы. Важно понимать, что в п. р. существуют как «статический», так и «динамический» изгибы. Под

статическим изгибом подразумевается изгиб оболочки (или сердечника), обусловленный средним энерговыделением по времени. Он смещает положение равновесия для динамического изгиба, а направление дуги изгиба обусловлено способом закрепления концевиков твэла. Им же определяется и вклад в реактивность, который постоянен и изменяется медленно в соответствии со средней мощностью реактора.

Под *динамическим изгибом* понимается нестационарная составляющая изгиба и вызываемые ею колебания оболочки и сердечника и, соответственно, реактивности вследствие периодических импульсов мощности. Величина динамического изгиба невелика, обычно порядка сотых долей миллиметра. Такое изменение реактивности несущественно для реакторов с непрерывным течением цепной реакции деления, где мериллом стабильности мощности является *эффективная доля запаздывающих нейтронов*, но значимо для пульсирующих реакторов с их низким значением *импульсной доли запаздывающих нейтронов*. При динамическом изгибе возникают колебания реактивности со спектром, близким к ритму импульсов, и вследствие прямой зависимости величины изгиба от мощности — положительная обратная связь, независимо от способа подвески колеблющегося топливного элемента (разд. 3).

Итак, **третья особенность** пульсирующего реактора: *поперечные колебания топливных стержней или кассет п. р. всегда дают положительный вклад в обратную связь «мощность–реактивность» независимо от направления градиента энерговыделения.*

Все три особенности пульсирующих реакторов в совокупности определяют сложный характер быстрых динамических процессов.

Автор признателен своим молодым коллегам Максиму Подлесному и Александру Верхоглядову, результаты работы которых по численному моделированию динамических процессов привели его к выводам, сформулированным в этой статье.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Заключение о стабильности режима работы п. р. можно сделать только после детального анализа, скорее всего — численного, на быстрых ЭВМ. Приближенная аналитическая оценка возможна лишь для случая синхронных колебаний топливных элементов. В этом случае условие стабильности пульсирующего реактора относительно быстрых процессов, т. е. при постоянной интенсивности источника запаздывающих нейтронов, можно записать в таком виде (дается без вывода):

$$\varphi e^{\gamma \Delta T} \cosh(k_b \Delta T) < 1.$$

Здесь k_b — функция частоты и времени затухания собственных колебаний топливных элементов; она имеет сложный, немонотонный характер. Остальные обозначения те же, что в основном тексте статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
2. *Шабалин Е.П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976. 248 с.
3. *Аксенов В.Л., Рзянин М.В., Шабалин Е.П.* Исследовательские реакторы ОИЯИ: взгляд в будущее // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, вып. 6. С. 1349.
4. *Попов А.К.* Передаточная функция и устойчивость импульсного реактора периодического действия // АЭ. 1987. Т. 62, вып. 3. С. 195.
5. *Шабалин Е.П.* О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсного реактора // АЭ. 1986. Т. 61, вып. 6. С. 401.

Получено 27 июля 2022 г.

Редактор *Е. В. Калининкова*

Подписано в печать 16.08.2022.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,43. Уч.-изд. л. 0,56. Тираж 190 экз. Заказ № 60482.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/