

P13-2025-13

Е. П. Шабалин

ВЛИЯНИЕ ЗАВИСАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК
НА ХАРАКТЕР МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ РЕАКТОРЕ

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.
Серия: Физика ядерных реакторов»

Влияние зависания топливных таблеток
на характер мощностной обратной связи в пульсирующем реакторе

Опыт эксплуатации пульсирующих реакторов типа ИБР-2 показывает, что обратная связь мощность–реактивность ослабевает в процессе рабочей кампании. В работе постулируется ранее неизвестная причина ускорения деградации мощностного эффекта — *зависание (блокировка) таблеток* ядерного топлива в оболочке тепловыделяющих элементов. Вследствие зависания деградация мощностного эффекта имеет скачкообразный и ступенчатый характер, а вероятность возникновения автоколебаний мощности реактора увеличивается.

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

Impact of Fuel Pellets Sticking on the Nature
of Power Feedback in Pulsed Reactor

Experience of operating the IBR-2-type pulsed reactors shows that the power feedback weakens during nuclear fuel burn-up. The paper postulates a previously unknown reason for the accelerated degradation of power-reactivity effect, which is based on *sticking fuel pellets* in the shell of fuel elements. Due to pellets sticking, the behavior of power-reactivity degradation is stepwise and spasmodic, and probability of oscillatory instability is increased.

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

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость работы ядерного реактора является важнейшим критерием качества установки, а пульсирующие реакторы с их повышенной чувствительностью к колебаниям реактивности требуют особого внимания [1]. Опыт эксплуатации пульсирующих реакторов типа ИБР-2 показывает, что обратная связь мощность–реактивность ослабевает в процессе рабочей кампании. Известно несколько причин положительной составляющей мощностного эффекта реактивности, но и их совокупность не объясняет возникновения автоколебаний в определенные периоды кампании выгорания ядерного топлива. В работе постулируется ранее неизвестная причина ускорения деградации мощностного эффекта — зависание (блокировка) таблеток ядерного топлива в оболочке тепловыделяющих элементов. Вследствие зависания деградация мощностного эффекта имеет скачкообразный и ступенчатый характер, а вероятность возникновения автоколебаний мощности реактора увеличивается.

КАЧЕСТВЕННОЕ РАССМОТРЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗАВИСАНИЯ ТАБЛЕТОК ТОПЛИВА

Полагаем, что конструкция активной зоны пульсирующего реактора общепринятая, т. е. с тепловыделяющими элементами (ТВЭлами), и в каждом ТВэле таблетки ядерного топлива помещены в цилиндрическую стальную оболочку с определенным зазором. При работе на мощности таблетки свободно перемещаются внутри оболочек согласно температуре, обеспечивая отрицательный эффект реактивности при возрастании мощности и устойчивость реактора. В процессе выгорания топлива таблетки распухают [2, 3] (осколки деления занимают больший объем, чем атом разделившегося ядра) и зазор между таблетками и оболочкой уменьшается. При определенном выгорании зазор исчезает, и тепловому перемещению таблеток начинает препятствовать трение, вплоть до их блокирования внутри оболочки. Действительно, если сила трения покоя при тепловом расширении столба таблеток превысит силу сжатия пружины, предназначенной воспрепятствовать разлету верхних таблеток топлива после импульса мощности (обязательный элемент конструкции ТВэла в пульсирующих реакторах типа ИБР), то возвращение таблеток в исходное состояние после теплового расширения окажется невозможным. Прежде всего, прижатыми к оболочке

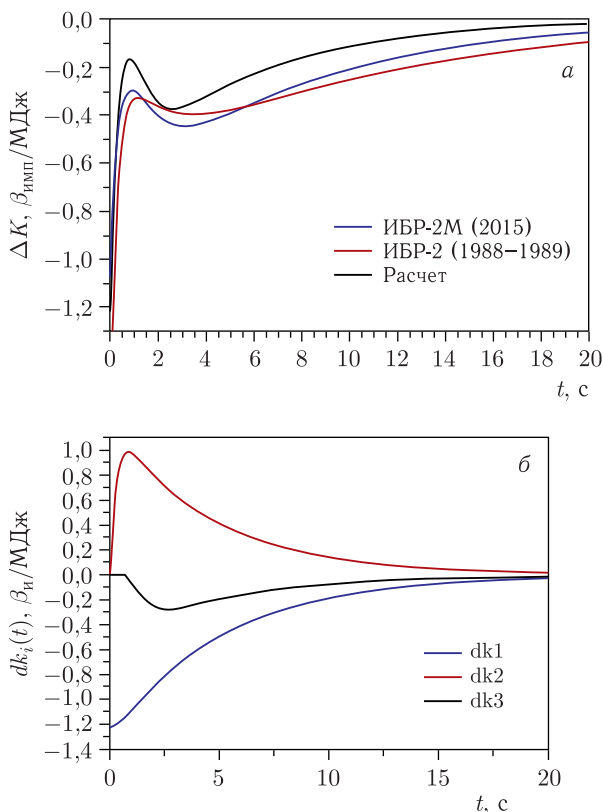


Рис. 1. а) Функции импульсной характеристики обратной связи (ИХОС) для реакторов ИБР-2, ИБР-2М (эксперимент), ИБР-2М (расчет по физически обоснованной модели). б) Три компоненты расчетной ИХОС ИБР-2М

окажутся таблетки, близкие к медианной плоскости, где выше плотность потока нейтронов и, соответственно, сильнее выгорание. Очевидно, эффекты реактивности и обратная связь при этом изменятся, а прежде всего — отрицательная компонента импульсной характеристики обратной связи (ИХОС), которая связана с нагревом сердечника твэлов (рис. 1) [4].

Предположим, что блокируется только одна таблетка в твэле, именно та, что расположена в медианной плоскости. Таблетки, расположенные выше медианной плоскости, будут по-прежнему свободно перемещаться, но на длину в два раза меньше, чем до блокировки центральной таблетки.

А что будет происходить с таблетками в нижней части твэла? Так как в пульсирующем реакторе неизбежны значительные флуктуации энергии импульсов мощности [5,6], то блокировка центральной таблетки скорее всего произойдет после импульса мощности, наибольшего в некотором промежутке времени работы реактора. В череде последующих импульсов

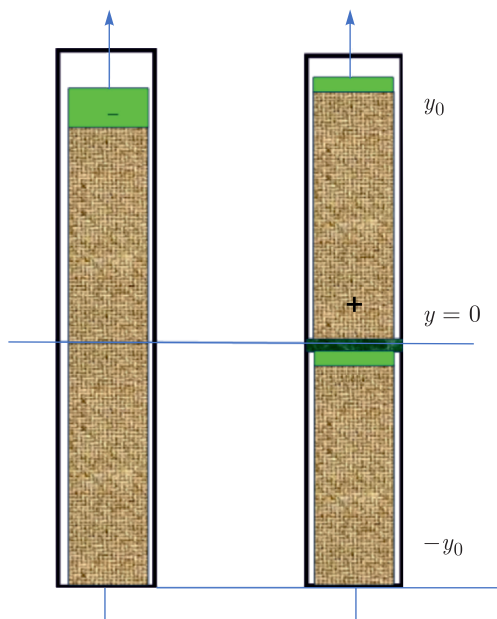


Рис. 2. Эффект зависания на упрощенной модели твэла. Слева — твэл без зависшей таблетки; справа — твэл с зависшей в центре столба таблеткой (черный цвет), в этом случае тепловое расширение нижней половины столба дает положительную реактивность (области теплового расширения столба таблеток отмечены зеленым цветом)

образуется зазор между верхним краем столба таблеток ниже медианной плоскости и заблокированной («зависшей») таблеткой, который сохранится до того момента, когда один из очередных импульсов превзойдет по энергии прежний большой импульс (см. рис. 2). Фактически зазор будет существовать всегда после достижения выгорания, при котором сила трения превосходит силу, предназначенную для возвращения расширяющегося столба в исходное состояние. Хотя этот зазор невелик (порядка величины теплового расширения столба от самого мощного импульса за рассматриваемое время), его наличие приводит к положительному эффекту реактивности от теплового расширения нижней половины столба таблеток — ведь все таблетки этой половины столба приближаются к центру зоны при нагреве, в отличие от верхней половины, которая дает отрицательный эффект реактивности. Интересно, что суммарный эффект реактивности относительно состояния без зависания всегда положительный, см. следующий раздел. Он постепенно снижается при возрастании числа «зависших» в данном твэле таблеток, переходит от положительного к отрицательному и в пределе блокировки всех таблеток твэла принимает значение, определяемое уже только удлинением оболочки.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАВИСАНИЯ ТАБЛЕТОК ТОПЛИВА

Изменение реактивности i -го твэла реактора в результате нагрева топливного сердечника за один импульс мощности (или вклад в амплитуду ИХОС) при отсутствии блокировки удлинения столба топлива можно описать следующим соотношением, основанным на принципе возмущения первого порядка [7]:

$$\Delta k_1 \approx -\frac{\alpha \Delta T_m^i}{y_0} L \int_0^{y_0} \cos y (R(y) - R(y_0)) dy. \quad (1)$$

Здесь α — коэффициент линейного расширения ядерного топлива; ΔT_m^i — нагрев топлива за импульс в максимуме энерговыделения; L — длина твэла; $R(y)$ — удельная (на единицу длины) реактивность на безразмерной координате y от центра; y_0 — приведенная безразмерная координата, соответствующая границе активной зоны с отражателем по вертикали и подчиняющаяся уравнению $y_0 / \sin y_0 = k_z$, где k_z — коэффициент неравномерности энерговыделения по длине твэла. Например, для реактора ЛНФ ИБР-2М $k_z = 1,25$, $y_0 = 1,15$. Медианной плоскости соответствует значение переменных $y = 0$.

Основываясь на формуле (1) и используя зависимость $R(y) \approx R(0) \cos^2(y)$ (достаточно хорошее приближение для описания удельной реактивности в реакторах на быстрых нейтронах с малой активной зоной типа ИБР-2), нетрудно рассчитать эффекты реактивности при «зависании» любого числа таблеток. Рассмотрим случай блокировки одной таблетки в медианной плоскости реактора, обсужденный выше качественно. Изменение реактивности верхней половины i -го блокированного твэла реактора после импульса мощности будет описываться соотношением (1) при вдвое уменьшенной длине. Изменение реактивности нижней половины i -го блокированного твэла реактора после импульса мощности описывается тем же соотношением (1) с заменой в подынтегральном выражении удельной реактивности на границе зоны $R(y_0)$ на максимальную удельную реактивность $R(0) = R_m^i$ с уменьшением длины твэла в 2 раза:

$$\Delta k_2 \approx -\frac{\alpha \Delta T_m^i}{2y_0} L \int_0^{y_0} \cos y (R(y) - R_m^i) dy. \quad (2)$$

Теперь изменение реактивности вследствие зависания твэла будет равно

$$\Delta k = \Delta k_2 - \Delta k_1 / 2 = \frac{\alpha \Delta T_m^i}{2y_0} R_m^i L \sin^2 y_0, \quad (3)$$

где R_m^i — удельная реактивность твэла на координате $y = 0$. Из (3) следует, что изменение эффекта реактивности от нагрева за один импульс мощности вследствие «зависания» таблетки в одном твэле всегда положительно.

Оценим возможный эффект зависания таблеток в действующем реакторе ИБР-2М. Для наиболее напряженного твэла [8] параметры формулы (3) таковы: $R_m^i L \sim 18\beta_{\text{имп}}$, $\Delta T_m \approx 66$ К (для импульса с энерговыделением 1 МДж на всю загрузку диоксида плутония), $\alpha \approx 1,1 \cdot 10^{-5}$, $y = 1,15$. Соответственно $\Delta k \approx +0,0034\beta_{\text{имп}}$, а эффект от нагрева без зависания таблетки $\Delta k_1 \approx -0,0065\beta_{\text{имп}}$. Таким образом, снижение отрицательного эффекта от нагрева за импульс при зависании центральной таблетки составит величину $\Delta k_1 + \Delta k \approx -0,003\beta_{\text{имп}}$, т. е. обратная связь по температуре топлива ослабляется примерно в два раза.

Так как эффект зависания таблеток суть добавка к амплитуде отрицательной составляющей импульсной характеристики обратной связи, можно утверждать, что зависание вызывает более раннее (т. е. при меньшем выгорании) возникновение колебательной неустойчивости реактора. Это можно ожидать в реакторе ИБР-2М при достижении выгорания в среднем по активной зоне около 2–2,5 %, когда в центральных твэлах исходный зазор между таблетками топлива и оболочкой исчезает [9].

Можно отметить еще одно следствие эффекта зависания: изменение ИХОС сильнее будет проявляться в период снижения мощности реактора. Суть в том, что положение зависших таблеток в этом случае выше, чем должно быть при текущем значении мощности, и, соответственно, больше зазор между зависшей таблеткой и нижним столбом таблеток.

О СКАЧКООБРАЗНОМ И ВЕРОЯТНОСТНОМ ХАРАКТЕРЕ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПРИ ЗАВИСАНИИ ТАБЛЕТОК ТОПЛИВА

Выгорание ядерного топлива происходит неравномерно по объему реактора: быстрее оно выгорает в твэлах, расположенных ближе к центру активной зоны, и в участках твэлов в районе медианной плоскости. Например, в реакторе ИБР-2, где в активной зоне находится около 450 твэлов, неравномерность их выгорания вдоль оси равна 1,24 (отношение максимального к среднему), а неравномерность на медианной плоскости — 1,32 [8]. На рис. 3 (диаграмма плотности энерговыделения по твэлам) видно, что различие энерговыделения и, соответственно, степени выгорания от твэла к твэлу дискретно — примерно от 0,1 до 1 %, и, соответственно, дискретными будут и последовательные акты зависания твэлов. Нетрудно вычислить, что после среднего выгорания 2,3–2,5 % (когда становится возможным зависание таблеток) и при относительной разнице в выгорании 1 % акты последовательных зависаний (иначе говоря, «ступеньки» возрастания амплитуды обратной связи, определенной выше) можно ожидать в среднем каждые 10 сут работы реактора, а при разнице в выгорании 0,1 % — ежедневно. Эти кванты всплеска амплитуды ИХОС трудно заметить на фоне случайных флуктуаций реактора ИБР-2 порядка $0,05\beta_{\text{имп}}$ [5], но возникающее вследствие зависания центральных твэлов постепенное уменьшение амплитуды импульсной характеристики обратной связи — примерно 3–5%-е за 10 сут — безусловно измеряемо. Отдавая

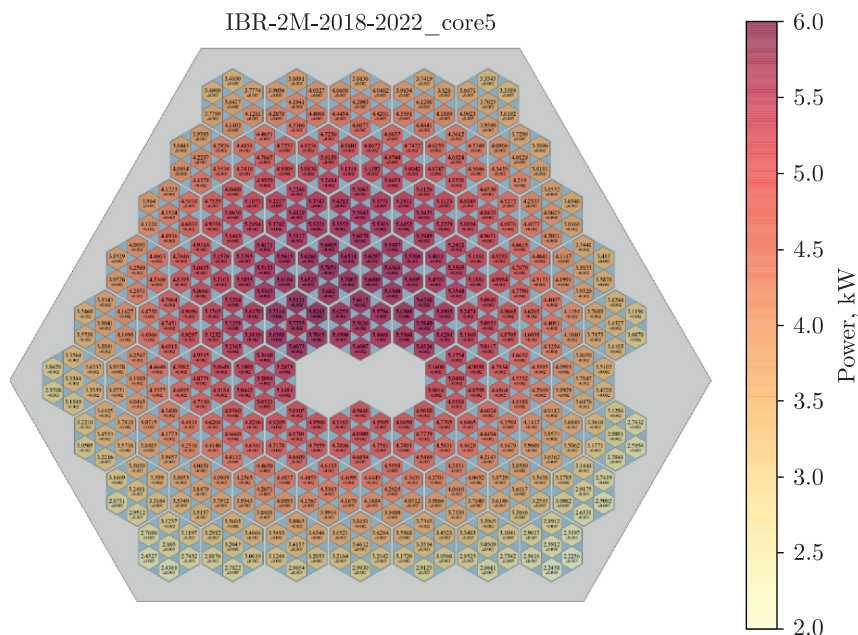


Рис. 3. Энерговыведение в твэлах реактора ИБР-2М [8]

должное 100-летней годовщине квантовой механики в 2025 г., можно в шутку назвать эти всплески «ихоквантами».

К сказанному выше следует добавить, что скачки амплитуды ИХОС не детерминированы по времени. Необходимое условие «свободный диаметр таблетки равен внутреннему диаметру оболочки» нельзя рассматривать как достаточное для зависания таблетки; фигурируют и другие обстоятельства, такие как контактные силы сцепления (или отталкивания) материалов таблетки и оболочки, не строго цилиндрическая форма таблетки и оболочки, ориентация оси таблетки, наличие не связанных с таблеткой элементов (зерна диоксида, пыли и т.п.). Вследствие этого состояние таблетки как зависшей — вероятностный факт; удовлетворяя вышесказанному геометрическому условию (которое и само только примерно определено), таблетка может находиться в свободном состоянии, но всегда готовая «зависнуть». Можно назвать это метастабильным состоянием зависания, а таблетку — квазизависшей. Вследствие этого и время между последовательными скачками ИХОС будет флуктуировать, но при этом сами скачки ИХОС детерминированы по амплитуде.

Такой вероятностный подход к зависанию таблеток может объяснить эффект циклического повторения деградации быстрой мощностной обратной связи, впервые обнаруженный на реакторе ИБР-2М в 2020 г. [10]. Тогда в течение каждого реакторного цикла (10 дней) быстрая обратная связь линейно уменьшалась с восстановлением в следующем цикле работы

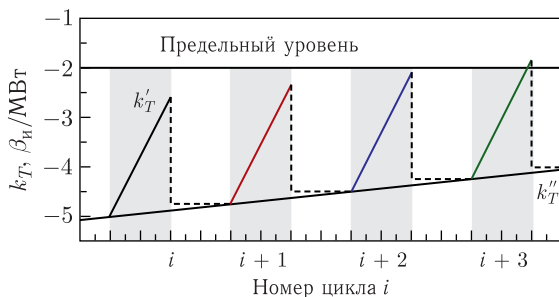


Рис. 4. Изменение быстрого мощного эффекта реактивности в четырех последовательных реакторных циклах реактора ИБР-2М при мощности 1,75 МВт (из работы [10])

реактора после выдержки на нулевой мощности (см. рис. 4). Происходило это при среднем выгорании двуокиси плутония 2,2–2,3 % (около 3,7 % для центральных твэлов). Используя расчетную кривую ИХОС для ИБР-2М (рис. 1), нетрудно получить, что подобный сценарий динамики обратной связи возможен при времени метастабильного состояния центральных таблеток более 1 года (в пересчете на выгорание $\sim 0,25$ %). В этом случае каждая однажды зависшая таблетка в каждом последующем 10-сут цикле в течение года постепенно возвращается в состояние зависания.

ВЫВОДЫ

Явление зависания таблеток ядерного топлива в пульсирующем реакторе при значительном выгорании заметно влияет на ход и характер изменения обратной связи мощность–реактивность. Влияние начинается с момента достижения того выгорания, когда исчезает зазор между самой нагруженной таблеткой топлива и оболочкой. Тогда в этом втором периоде выгорания явление зависания начинает быстро ослаблять отрицательную обратную связь, но не монотонно, а скачкообразно, ступеньками, вплоть до определенного минимального значения.

Явление зависания таблеток ядерного топлива во втором периоде выгорания может раньше времени привести пульсирующий реактор к режиму неустойчивых автоколебаний. Вследствие этого необходимы периодические измерения импульсной характеристики обратной связи и непрерывный контроль флуктуаций мощности. Оценено, что в реакторе ИБР-2М второй период выгорания начинается с ~ 2 –2,5 % (в среднем по активной зоне); в этот период рекомендуется еженедельный цикл периодичности измерений ИХОС на работающем реакторе.

Благодарности. Автор признателен В. Л. Аксенову, М. М. Подлесному, А. Е. Верхоглядову и Я. А. Вдовину за полезные дискуссии при выполнении этой работы, а также благодарен персоналу реактора ИБР-2М за тщательный и внимательный контроль состояния этой уникальной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
2. *Бойко В. И., Колпаков Г. Н., Селиваникова О. В.* Топливные материалы в ядерной энергетике: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2008. 186 с.
3. *Баранов В. Г., Годин Ю. Г., Тенишев А. В., Хлунов А. В., Новиков В. В.* Ядерные топливные материалы // Учебн. для вузов «Физическое материаловедение». Т. 7. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 640 с.
4. *Верхоглядов А. Е., Шабалин Е. П.* Модель динамики реактора ИБР-2 на основе двухкомпонентной мощностной обратной связи // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов (направлено).
5. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
6. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующих реакторов. Препринт ОИЯИ Р13-2022-36. Дубна, 2022.
7. *Абрамов Б. Д.* Некоторые методы расчета возмущений в ядерных реакторах // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 4.
8. *Вдовин Я. А.* Расчетная модель и статические параметры реактора ИБР-2М // Изв. вузов. Сер.: Ядерная энергетика (направлено).
9. *Краснояров Н. В., Никольский Р. В., Ефимов И. А.* Исследование мощностных эффектов в реакторе БР-5 // АЭ. 1965. Т. 18, вып. 5.
10. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2021-11. Дубна, 2021.

Получено 17 марта 2025 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 09.04.2025.

Формат $60 \times 90/16$. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,77. Тираж 110 экз. Заказ № 61082.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/