

С Т А Т Ь И

УДК 621.039.5

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ КОНВЕРСИОННОЙ ЗАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ В ОТНОШЕНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

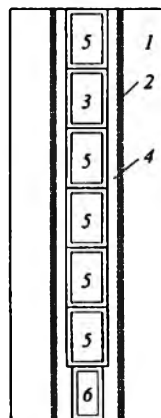
Дегтярев А.М., Мясников А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

В течение последних лет в рамках соглашения между Россией и США велись проектные работы по конверсии остающихся в эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов, которые относятся к первому типу отечественных реакторов, предназначенных для производства оружейного плутония.

Проект преследовал две основные цели: перевод промышленных реакторов в конверсионный режим работы, при котором изотопный состав производимого в реакторах плутония исключал бы возможность его применения в ядерном оружии, и повышение безопасности. Достижение поставленных целей потребовало разработки принципиально новой загрузки активной зоны. Вместе с этим необходимо было адаптировать конверсионный режим к особенностям конструкции и регламенту эксплуатации промышленных реакторов, а также производственным возможностям предприятий-изготовителей. Эти обстоятельства привели к разработке в качестве одного из вариантов проекта активной зоны, которая во многих отношениях представляет оригинальную, не имеющую близких аналогов систему. Ее основу составляют три типа элементов: твэлы дисперсионного типа с ураном 90%-ного обогащения, выгорающие поглощающие элементы (пэлы) с гадолинием для поддержания запаса реактивности между перегрузками реактора и пэлы с карбидом бора, предназначенные для снижения до безопасного уровня пустотного эффекта реактивности. Указанные элементы выполнены по однотипной конструкционной схеме в виде цилиндрического сердечника в оболочке и имеют близкие габаритные размеры. Сердечники твэла и пэла с гадолинием представляют собой матрицу из конструкционного материала, в которой диспергированы микрочастицы полезного материала, занимающие не более 2—3% объема сердечника. Сердечник борного пэла состоит из конструкционного материала и карбида бора в примерно равных объемных долях. В качестве конструкционных материалов используются сплавы алюминия.

Загрузка рабочих каналов состоит из чередующихся твэлов и пэлов, размещающихся по определенным схемам (рис. 1).

Вследствие использования высокообогащенного урана в конверсионной загрузке реактора отсутствует отрицательный температурный эффект по топливу, обусловленный доплеровским расширением резонансов ^{238}U . Более того, как показали расчеты, составляющая быстрого мощностного эффекта реактивности, связанная с разогревом топлива, имеет в конверсионной загрузке положительное, хотя и небольшое по модулю значение, связанное с температурным расширением твэлов. В этих обстоятельствах возникает принципиально значимый с практической точки зрения вопрос о нейтронно-физической устойчивости кон-



Р и с. 1. Аксиальный фрагмент периодичности канала с конверсионной загрузкой (разрез по оси рабочего канала): 1 — графитовый замедлитель; 2 — труба технологического канала; 3 — гадолиниевый пэл; 4 — теплоноситель (вода); 5 — твэлы; 6 — борный пэл

версионной загрузки в отношении быстропротекающих осцилляционных процессов. В настоящей работе выполнено предварительное методически упрощенное исследование указанного вопроса, учитывающее тем не менее основные характеристики загрузки в переходных процессах.

Воспользуемся одноточечной моделью описания реактора. Подобный подход позволяет при усредненном описании активной зоны охватить основные физические закономерности и применяется на практике для оценки устойчивости основной (нулевой) гармоник нейтронного распределения. При этом надо заметить, что устойчивость гармоник распределения нейтронного поля в целом возрастает с увеличением их номера, и в этом смысле одноточечная модель имеет консервативный характер. Проанализируем устойчивость при малых (до $\sim 10\%$) возмущениях нейтронного потока, что представляется наиболее актуальным с практической точки зрения. Быстропротекающий характер процессов позволяет пренебречь ввиду их инерционного характера изменением температуры графита и концентрации ксенона и ограничить рассмотрение теплофизическими обратными связями, обусловленными процессами в рабочих каналах. Кроме температурного расширения твэлов, все эти процессы в виде изменения температуры теплоносителя, температурного расширения пэлов и труб каналов образуют отрицательную обратную связь по изменению нейтронного потока.

Особенности загрузки и характер рассматриваемой задачи о высокочастотной устойчивости с малыми возмущениями нейтронного потока позволяют воспользоваться следующими упрощающими предположениями при описании теплофизических процессов:

собственное энерговыделение в теплоносителе, трубе, пэлах с гадолинием пренебрежимо мало;

поскольку радиальные размеры элементов загрузки намного меньше их высоты, контактным теплообменом на торцах элементов можно пренебречь;

входящие в теплофизические уравнения коэффициенты (теплоемкость, теплопроводность и др.) не зависят от температуры;

температура теплоносителя на входе в канал и графита остается постоянной;

теплоноситель проходит канал за пренебрежимо малое время. Данное предположение занижает скорость изменения температуры теплоносителя и, таким образом, применительно к рассматриваемой задаче имеет консервативный характер;

на границе труба—графит примем адиабатические граничные условия, данное предположение, как и предыдущее, занижает скорость изменения температуры теплоносителя и является консервативным;

поскольку температура трубы технологического канала фактически совпадает с температурой теплоносителя и процесс температурного взаимодействия труба—теплоноситель малоинерционен, при расчете изменения температуры данные объекты удобно объединить.

С учетом малости возмущений нестационарные теплофизические уравнения были приведены к линеаризованному виду относительно изменения температуры и мощности.

Для твэлов и пэлов, составляющих загрузку одиночного канала, указанные уравнения имеют вид

$$m_i c_i \frac{d\delta T_i(t)}{dt} = \varepsilon_i \delta w(t) - (SR)_i [\delta T_i(t) - \delta T_{H_2O, \tau}(t)], \quad (1)$$

где t — переменная времени; m — общая масса элементов данного типа; c — удельная теплоемкость; $\delta T(t)$ — изменение температуры относительно стационарной; ε — коэффициент, связывающий тепловыделение в элементах и среднюю мощность канала (для гадолиниевого пэла этот коэффициент равен нулю); S — общая поверхность теплового контакта между элементами данного типа и теплоносителем; R — тепло-

проводность на участке сердечник элемента—теплоноситель; $\delta T_{H_2O, \tau}(t)$ — изменение температуры теплоносителя и трубы относительно стационарной; i — индекс типа элемента.

Для теплоносителя линеаризованное уравнение выглядит следующим образом:

$$m_{H_2O, \tau} c_{H_2O, \tau} \frac{d\delta T_{H_2O, \tau}(t)}{dt} = -2Gc_{H_2O} \delta T_{H_2O}(t) + \sum_i (SR)_i [\delta T_i(t) - \delta T_{H_2O, \tau}(t)]. \quad (2)$$

Здесь G — расход теплоносителя; индексы « H_2O, τ » и « H_2O » относятся соответственно к объединению труба—теплоноситель и собственно теплоносителю; суммирование в правой части осуществляется по твэлам и пэлам.

Система уравнений (1), (2) описывает динамику изменения температуры компонентов рабочего канала при изменении средней мощности. Численные значения параметров, входящих в эту систему, были приняты исходя из конструктивных характеристик в соответствии со справочными данными [1]. Были привлечены также некоторые результаты нейтронных и теплофизических расчетов конверсионной загрузки в стационарном состоянии на рабочем уровне мощности. Параметры, зависящие от теплофизических условий, определяли применительно к центральной по высоте части активной зоны в области максимальной чувствительности нейтронно-физических характеристик. Их значения таковы:

твэлы — $m = 16$ кг, $c = 0,993$ кДж/(кг·К) (эффективная средняя с учетом топлива и алюминия), $S = 0,607$ м², $R = 17,63$ кВт/(м²·К) (определена по мощности твэлов и температурному перепаду между сердечником твэла и теплоносителем в стационарных условиях), $\varepsilon = 0,905$;

теплоноситель — $G = 1,67$ кг/с, $m_{H_2O, \tau} = 7,88$ кг, $c_{H_2O, \tau} = 1,80$ кДж/(кг·К), $c_{H_2O} = 4,28$ кДж/(кг·К);

борные пэлы — $m = 1,68$ кг, $c = 1,2$ кДж/(кг·К) (эффективная средняя с учетом поглотителя и алюминия), $S = 0,077$ м², $R = 8,8$ кВт/(м²·К) (получена в предположении, что сток тепла из пэла осуществляется через алюминиевый компонент сердечника, плотность которого и соответственно общая теплопроводность сердечника примерно в 2 раза меньше, чем у твэла), $\varepsilon = 0,01$;

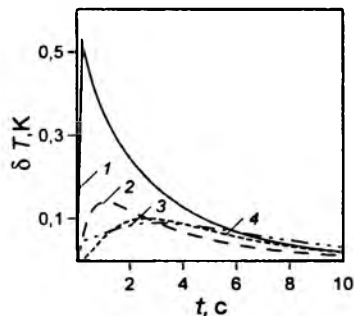
гадолиниевые пэлы (влияние гадолиния ввиду его малой концентрации не учитывалось) — $m = 2,67$ кг, $c = 0,95$ кДж/(кг·К), $S = 0,107$ м², $R = 17,63$ кВт/(м²·К).

Результаты численного решения системы (1), (2) на примере импульсного возмущения мощности представлены на рис. 2. Видно, что температура теплоносителя и пэлов достигает максимальных значений с запаздыванием соответственно ~1 и ~3 с относительно максимальной температуры твэлов.

Реактивность, выделяющаяся в переходных процессах относительно стационарного состояния, выражается как

$$\rho(t) = \sum \alpha_i k_i \Delta T_i(t) + (\gamma_{H_2O} + \alpha_i k_{\tau}) \Delta T_{H_2O, \tau}(t),$$

где знак суммы относится к твэлам и пэлам, α_i , k_i — коэффициенты линейного расширения и реактивности, связанной с изменением размеров; индекс « τ » относится к трубе технологического канала; γ_{H_2O} — температурный коэффициент реактивности по воде.

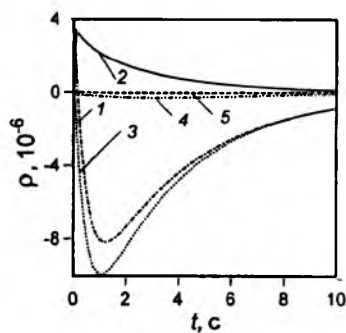


Р и с. 2. Зависимость приращения температуры δT топлива (1), теплоносителя (2), борных (3), гадолиниевых пэлов (4) от времени при импульсном изменении мощности канала в момент времени $t = 0$ (амплитуда импульса 100 кВт, длительность 0,1 с)

Коэффициенты α_i были взяты из справочных данных [1]. Для твэла, пэла с гадолинием и трубы использовали коэффициент α для чистого алюминия, равный $24,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К, для борного пэла с учетом равных объемных фракций карбида бора и алюминия α принимался равным арифметически среднему по этим двум веществам $14,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

Коэффициенты реактивности были рассчитаны по программе MCU-RFFI/A [2]. Вклад изменения геометрических размеров твэлов k_i в реактивность составил 0,24, борных пэлов $-0,24$, гадолиниевых пэлов $-0,025$, трубы $-0,04$. Температурный коэффициент реактивности $\alpha_i k_i$ для твэлов и пэлов, $\gamma_{H_2O} + \alpha_T k_T$ для воды с учетом трубы равен, 1/К: для твэлов $+6 \cdot 10^{-6}$, борных пэлов $-3,5 \cdot 10^{-6}$, гадолиниевых пэлов $-6 \cdot 10^{-7}$, воды с учетом трубы $-7,1 \cdot 10^{-5}$.

Динамика реактивных эффектов при рассмотренном переходном процессе приведена на рис. 3. Сразу после увеличения мощности наблюдается кратковременная (не более 0,2 с) малая положительная реактивность, обусловленная разогревом топлива, после чего она уходит в область стабильных отрицательных значений с преобладанием отрицательных обратных связей.



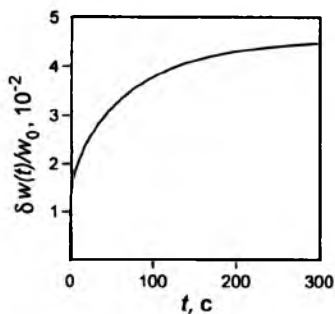
Р и с. 3. Динамика эффектов реактивности $\rho(t)$ при импульсном изменении мощности канала: 1 — общая реактивность; 2—5 — реактивность по топливу, теплоносителю и трубе, борным, гадолиниевым пэлам соответственно

Для исследования нейтронно-физической устойчивости теплофизические уравнения состояния канала были объединены с одnogрупповыми нейтронно-физическими уравнениями реактора точечной кинетики [3] с шестью группами запаздывающих нейтронов. Кинетические показатели — доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ и время жизни мгновенных нейтронов Λ , полученные с учетом специфики конверсионной загрузки, были равны 0,0068 и 10^{-3} с соответственно.

Изменение уровня нейтронного потока входит в теплофизические уравнения через приращение мощности канала $\delta w(t)$, в свою очередь изменение теплофизических характеристик ведет к выделению эффектов реактивности, влияя на нейтронно-физические показатели.

Согласно результатам, представленным на рис. 3, определяющий вклад в общую реактивность вносит температура топлива и теплоносителя. Коэффициенты реактивности этих эффектов имеют статистическую неопределенность, которая для доверительного интервала 1σ равна $1,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К и $5 \cdot 10^{-6}$ 1/К соответственно. Используя консервативный подход, были приняты максимально возможные значения, отвечающие доверительному интервалу 2σ : $9 \cdot 10^{-6}$ 1/К для топлива и $-6,1 \cdot 10^{-5}$ 1/К для воды.

Расчетные исследования, выполненные с учетом взаимосвязи нейтронно- и теплофизических процессов, показали, что в диапазоне мощности от 0 до номинальной реактор сохраняет достаточную устойчивость, типичное поведение реактора в переходных режимах иллюстрирует рис. 4. Видно, после повышения мощности на начальном участке, обусловленного мгновенными нейтронами, мощность реактора плавно увеличивается, асимптотически выходя на новый уровень, при котором



Р и с. 4. Динамика мощности реактора $\delta w(t)$ относительно стационарного уровня w_0 при введении в момент времени $t = 0$ положительной реактивности $0,01\beta$ (начальные условия соответствуют критическому состоянию реактора при работе на номинальной мощности)

мощностной эффект компенсирует введенную реактивность. Подобное поведение отмечалось и при других способах возмущения реактора.

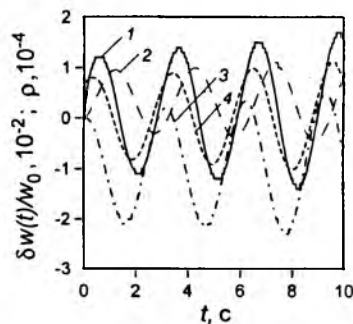
В методических целях была исследована устойчивость реактора на запроектной мощности. За исключением мощности расчеты проводили при тех же исходных данных. Было получено, что с ростом мощности реактора устойчивость постепенно снижается. Первоначально это проявляется в осцилляциях при переходе на новый уровень мощности. Начиная с уровня мощности ~ 40 номинальных значений осцилляции становятся незатухающими, их амплитуда возрастает со временем (рис. 5). Период осцилляций составляет ~ 2 с.

Потеря устойчивости по достижении некоторого критического уровня мощности объясняется тем, что при возмущении размножающей способности вторичная реактивность, вызываемая проявлением обратной связи, при прочих равных условиях растет по модулю с увеличением мощности. При высокой мощности запаздывающая реактивность от изменения температуры теплоносителя за время своего проявления не только компенсирует исходное возмущение, но и приводит к общей реактивности, противоположной по знаку начальному возмущению. При этом положительный эффект реактивности по топливу усиливает начальное возмущение, что увеличивает последующую реактивность, связанную с температурой воды. На мощности выше критического порога общая реактивность превосходит по модулю начальное возмущение, увеличивая тем самым разбаланс. В этих условиях с течением времени происходит развитие близких по фазе и взаимно усиливающихся осцилляций размножающей способности и мощности. Сказанное иллюстрирует рис. 5. Для выявления роли положительного температурного эффекта реактивности по топливу были выполнены расчеты, в которых принималось, что этот эффект отсутствует (равен нулю). Тогда критическая мощность оказалась выше в 2,5 раза, чем при наличии эффекта.

Перейдем к обоснованию устойчивости пространственных гармоник поля энерговыделения в плане и по высоте активной зоны.

При анализе устойчивости радиально-азимутальных гармоник для описания отдельных фрагментов активной зоны в плане используются усредненные по высоте характеристики. В рамках подобного подхода рассмотренная задача эквивалентна задаче об устойчивости нулевой (основной) гармоники реактора с идеальным отражателем. Поскольку устойчивость гармоник повышается с уменьшением размеров активной зоны, сопровождающимся ростом утечки нейтронов, и с увеличением номера гармоник, можно утверждать, что при принятых допущениях радиально-азимутальные гармоники в реакторе с конверсионной загрузкой в отношении быстротекущих процессов являются устойчивыми.

Устойчивость аксиальных гармоник представляет более сложную задачу, так как в этом случае необходимо учитывать различное пространственное распределение обратных связей по температуре топлива и воды. Если положительный эффект реактивности, связанный с топливом, проявляется непосредственно на участке возникновения флуктуации мощности, то реактивность, связанная с разогревом воды, выделяется главным образом ниже этого участка по направлению движения теплоносителя. Устойчивость аксиальных гармоник была изучена на базе тех принципиальных предположений, которые были приняты при одноточечном анализе. Усложнение описания реактора состояло в том, что нейтронный поток и теплофизические характеристики активной зоны рассматривались в одномерном приближении как функции аксиальной координаты. Нейтронный поток представлялся в виде разложения по ряду Фурье с пятью гармониками. Температурные характеристики и источники запаздывающих



Р и с. 5. Динамика характеристик реактора при введении положительной реактивности 0,01 β : 1 — мощность; 2, 3, 4 — реактивность по топливу, теплоносителю и трубе, общая соответственно (на начало процесса мощность реактора отвечает неустойчивому состоянию)

нейтронов описывались кусочно-постоянными функциями, для чего реактор был разделен на девять аксиальных слоев с постоянными в пределах слоя свойствами. Нестационарный расчет температуры по каждому из слоев осуществлялся в соответствии с формулами (1) и (2) с тем уточнением, что первый член в правой части уравнения (2) для учета изменения температуры на входе в участок имел вид $-2Gc_{\text{H}_2\text{O}}[\delta T_{\text{H}_2\text{O}}(t) - \delta T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{вх}}}(t)]$. Величину $\delta T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{вх}}}(t)$ определяли последовательно по участкам в направлении движения теплоносителя как $\delta T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{вх},i+1}}(t) = \delta T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{вх},i}}(t) + 2[\delta T_{\text{H}_2\text{O},i}(t) - \delta T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{вх},i}}(t)]$. При расчете температуры $\delta w_i(t)$ по каждому из участков принималось равным среднему приращению мощности на участке. Реактивность, вызванную действием обратных связей, описывали кусочно-постоянными функциями, соответствующими изменению температуры по аксиальным участкам. Исходное распределение размножающей способности выбирали из условия соответствия нейтронного поля результатам проектных исследований конверсионной загрузки.

Как и в случае одноточечного рассмотрения, устойчивость реактора исследовали в широком диапазоне начальной мощности при различных способах возмущения реактивности. Полученные расчетные данные подтвердили основные результаты одноточечного рассмотрения по отсутствию спонтанных осцилляций мощности и формы поля во времени для рабочего диапазона мощности, а также по уровню мощности, отвечающему появлению таких осцилляций. При возмущении реактивности в устойчивом состоянии мощность реактора переходила на новый стационарный уровень за счет отрицательной обратной связи, главным образом, по температуре воды. Неравномерное по высоте проявление обратных связей приводило к деформации распределения поля нейтронов при выходе реактора на новый уровень мощности. Обратная связь, определяющаяся температурой топлива, преобладала в области, расположенной ближе к входу теплоносителя, в то время как обратная связь по температуре воды доминировала преимущественно в нижней части зоны по ходу движения теплоносителя. Вследствие такой особенности, в частности, при постоянном по высоте начальном возмущении реактивности нейтронное поле смещалось вниз по ходу теплоносителя при отрицательной реактивности и в противоположном направлении в случае положительного знака реактивности. После устранения исходного возмущения реактивности нейтронное поле восстанавливало первоначальную форму. Потеря устойчивости на критическом уровне мощности проявлялась главным образом в возникновении расходящихся колебаний мощности реактора, а не в виде колебаний формы поля, которые говорили бы о неустойчивости гармоник высшего порядка.

Исследование дает основание сделать предварительный вывод о том, что нейтронно-физические свойства данного варианта конверсионной загрузки устойчивы относительно возможности возникновения спонтанных осцилляций высокой частоты.

Авторы статьи благодарят В.М. Федуленко, В.Н. Невского за консультации по теплофизическим вопросам и предоставленные данные для описания теплофизических процессов, О.С. Фейнберг — за данные о доле энерговыделения в твэлах и пэлах, Н.И. Алексеева — за выполненные расчеты по определению эффектов реактивности, Т.Е. Трофимову — за техническую помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Программа MCU-RFFI/A с библиотекой констант DLC/ MCUDAT-1.0. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер ПС в ЦЭП 388 от 16.04.96. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М., 1996.
3. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Атомиздат, 1984.

Поступила в Редакцию 8.10.99

В окончательной редакции 23.03.01