

11. **Шарапов В.Н.** Расчет изотопного состава горючего в твэлах реактора. — В сб.: 10 лет Первой в мире атомной электростанции СССР. М.: Атомиздат, 1964, с. 58—67.
12. **Орлов В.В.** Взаимная экранировка блоков резонансного поглотителя в «тесной» решетке. — Атомная энергия, 1958, т. 4, вып. 6, с. 531—538.
13. **Орлов В.В., Шарапов В.Н., Ваймугин А.А. и др.** Резонансное поглощение нейтронов в трубчатых твэлах. — Там же, 1974, т. 36, вып. 6, с. 491—496.
14. **Акимов И.С., Минашин М.Е., Шарапов В.Н.** Развитие методов физического расчета ядерных реакторов от Первой в мире АЭС до настоящего времени. — Там же, 1974, т. 36, вып. 6, с. 427—431.

Поступила в Редакцию 14.10.04

УДК 621.039.56

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ БЫСТРОГО РЕАКТОРА В САМОРЕГУЛИРУЕМОМ РЕЖИМЕ И ЕГО ПУСК

*Гольдин В.Я. (Ин-т мат. моделирования РАН),
Троцкий Ю.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова)*

В работах [1—4] рассматривался быстрый реактор, работающий в саморегулируемом режиме. В этом режиме выгорание плутония почти точно компенсируется его образованием с учетом роста поглощения нейтронов продуктами деления. Для поддержания мощности реактора на заданном уровне требуется лишь небольшое управление. Для реализации саморегулируемого режима необходимо: 1) выбрать параметры активной зоны; 2) провести пуск реактора с выводом на мощность (2—3 сут) и накоплением в активной зоне равновесной концентрации ^{239}Np (10—20 сут). Поэтому сначала реактор нужно с помощью управления вывести на мощность и удерживать в этом состоянии. В это время управление существенно интенсивнее, чем в режиме саморегулирования. Управление в режиме как пуска, так и саморегулирования может осуществляться разными способами. В наших расчетах хорошо себя зарекомендовал описываемый в настоящей работе алгоритм.

Отметим, что система управления и защиты существующих реакторов сложная и состоит из нескольких видов устройств [5, 6]. Для управления наиболее существенны системы регулирования мощности, компенсации температурного расширения и изменения реактивности. Предлагаемый алгоритм объединяет часть функций, однако на практике он, по-видимому, реально применим в условиях режима саморегулирования и потребует доработки при пуске.

Постановка задачи. В настоящей статье ограничимся случаем одномерной геометрии (r, t) . Система уравнений, описывающая динамику работы реактора, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\Psi}{\bar{v}} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial(rW)}{\partial r} + \gamma_z \Psi - (N, \Sigma_\Psi) \Psi = (\Lambda_\Psi, C); \\
 & \frac{\partial(D\Psi)}{dr} + \frac{2D + D_z - 1}{r} \Psi + (N, \Sigma_w) W + \zeta \Psi = 0; \\
 & \frac{\partial C}{\partial t} = -\Lambda_C C + \Psi \Sigma_C N; \\
 & \frac{\partial N}{\partial t} = \Lambda_N N + \Psi \Sigma_N N + k(t) N_{\text{упр}}; \\
 & W|_{r=0} = 0; \quad W|_{r=R} = C_R \Psi,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $(N, \Sigma_\Psi) = \sum_l N^l (\sigma_0^l - \sigma_f v_f \beta^l)$; $(\Lambda_\Psi, C) = \sum_l \sum_{i=1}^6 \lambda_i^l C_i^l$; $(N, \Sigma_W) = \sum_l N^l \sigma_i^l W$. Здесь

Ψ — скалярный поток нейтронов; W — поток нейтронов; C — концентрация предшественников запаздывающих нейтронов; N — концентрация химических веществ. Функции $\Psi(r, t)$, $W(r, t)$ являются скалярными, $C(r, t)$, $N(r, t)$ — векторными. Более подробно структура уравнений (1) без учета управления описана в работе [3].

Отметим, что рассматриваются несколько типов стержней (твэлы, воспроизводящие и управляющие элементы), поэтому в векторе $N(r, t)$ один и тот же химический элемент может встречаться несколько раз, например, ^{238}U в твэлах, воспроизводящих и управляющих элементах.

Функция $k(t)$ — скорость движения управляющих стержней. Одно из веществ, входящих в их состав, считается поглотителем (для увеличения реактивности при пуске выводим стержни с ^{10}B , для уменьшения вводим стержни с ^{238}U). Для ввода стержней в реакторе зарезервирован некоторый фиксированный малый объем. Кроме того, предусмотрена возможность экстренного ввода поглощающих элементов в активную зону для аварийного останова реактора. Вектор $N_{\text{уп}}(r)$ учитывает изменение при движении стержней концентрации не только поглотителя, но и других веществ, входящих в состав стержней. Этот вектор остается неизменным до тех пор, пока управление проводится одним и тем же набором стержней. Компоненты, соответствующие твэлам и воспроизводящим элементам, равны нулю, соответствующие управляющим стержням пропорциональны концентрации содержащихся в них веществ. Отметим, что после введения части стержня в реакторе начинаются процессы выгорания, и эти процессы учитываются в уравнениях (1). Однако для простоты при выведении стержня считаем, что вещества выводятся пропорционально их концентрации до облучения. Принципиального значения для описываемого алгоритма управления это не имеет, так как в алгоритме можно использовать вместо концентрации легко измеряемую длину перемещения стержня ΔL , и все коэффициенты алгоритма будут успевать подстроиться под медленно происходящее выгорание. Существенных неточностей в расчеты это также не вносит, так как стержни выводятся, главным образом, при пуске реактора в течение первых 15—20 сут.

В уравнениях присутствуют коэффициенты, определяемые усредненными сечениями ядерных реакций и коэффициентами квазидиффузии. Эти сечения пересчитываются через определенные интервалы времени. Однако при расчете они изменяются постепенно с некоторым запаздыванием [2]. Таким образом, коэффициенты уравнений (1) являются непрерывными кусочно-гладкими медленно меняющимися функциями времени.

Система уравнений (1) нелинейна, однако характерное время изменения скалярного потока нейтронов может быть намного меньше характерного времени изменения концентрации. В этом случае первые два уравнения на небольшом интервале времени являются линейными и определяют экспоненциальную зависимость $\Psi(t) = \Psi_0 \exp(\lambda t)$, где $\lambda(t)$ — показатель времени. Для саморегулируемого режима первые два уравнения уже нельзя считать линейными, так как в этом режиме изме-

нения плотности нейтронов и концентрации химических элементов компенсируют-ся так, что их вклад является величиной одного порядка. Однако и в этом случае по аналогии может быть вычислен показатель времени $\lambda(t) = \Psi'(t)/\Psi(t)$.

Интеграл по объему активной зоны от плотности энерговыделения определяет мощность реактора $Q(t)$. Пусть требуемая мощность равна $\tilde{Q}$. Состояние реактора в данный момент времени t характеризуется с точки зрения алгоритма управления двумя величинами — мощностью $Q(t)$ и временем $\lambda(t)$. Задача управления реактором в режиме саморегулирования состоит в том, чтобы с помощью изменения концентрации веществ $N_{\text{упр}}$, т.е. с помощью функции $k(t)$ поддерживать реактор в состоянии $Q(t) \approx \tilde{Q}$. При пуске необходимо с помощью управления увеличить мощность с $Q \ll \tilde{Q}$ до $Q \approx \tilde{Q}$ и удерживать реактор в этом состоянии до тех пор, пока накопится достаточное количество нептуния и начнется саморегулирование. При этом нужно избежать больших скачков и частого изменения мощности, а также не допускать превышения допустимой мощности.

Описание алгоритма. Выделим последовательные моменты времени $\dots < t_{i-1} < t_i < t_{i+1} < \dots$ и определим $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$. Отметим, что интервалы Δt_i для различных i могут различаться. В регулярном режиме $t_{i+1} - t_i \sim 30$ мин. В моменты времени t_i будем измерять мощность реактора. При этом действия, выполняемые при четных и нечетных значениях i , различны. При нечетных i управляющие стержни остаются неподвижными и исследуются свойства реактора в автономном режиме (интервалы Δt_i таковы, что отсутствие управления не успевает привести к существенным изменениям мощности и времени). При четных i проводится управление (т.е. перемещение управляющих стержней) и исследуется реакция на изменение концентрации управляющего вещества.

В первом приближении изменение показателя времени $\Delta\lambda = \lambda(t + \Delta t) - \lambda(t)$ может быть представлено в виде

$$\Delta\lambda = \delta_i \Delta t + \delta_N \Delta N, \quad (2)$$

где ΔN — изменение концентрации управляющего вещества за время Δt , происходящее в результате движения управляющих стержней; δ_i , δ_N — коэффициенты, которые подбираются в процессе работы реактора.

Отметим, что в регулярном режиме первое слагаемое формулы (2) положительное, второе отрицательное, среднее $\Delta\lambda$ за большое число шагов равно нулю, следовательно, вклад первого и второго слагаемого в среднем одинаков. Перемещение стержня ΔL , изменение концентрации управляющего вещества ΔN и интеграл от функции $k(t)$ пропорциональны:

$$\Delta L \sim \Delta N \sim \int_t^{t+\Delta t} k(t) dt.$$

Поэтому в дальнейшем вместо $k(t)$ и ΔL будем рассматривать ΔN .

Как уже было сказано, при нечетных i управляющие стержни перемещаются на шаге Δt_i , т.е. выбирается $\Delta N_i = 0$. Это позволяет по прошествии времени Δt_i измерить $\Delta\lambda_i$ и определить коэффициент δ_i по формуле $\delta_i = \Delta\lambda_i / \Delta t_i$, получаемой из

уравнения (2) при $\Delta N_i = 0$. Отметим, что измеряются средние на интервале, а не мгновенные значения λ . Таким образом, интервалы времени, соответствующие нечетным значениям i , используются для определения коэффициента δ_i .

При четных i вычисляется требуемый показатель времени (т.е. тот, который нужно получить с помощью движения стержней) по формуле

$$\bar{\lambda}_i = \tilde{\lambda}(1 - Q(t_i)/Q). \quad (3)$$

Здесь $\tilde{\lambda}$ — также коэффициент управления. Все величины в правой части выражения (3) положительны. Если текущая мощность $Q(t_i)$ меньше требуемой $\tilde{Q}$, то $0 < \bar{\lambda}_i < \tilde{\lambda}$, если превосходит требуемую, но не более чем в 2 раза, то $0 > \bar{\lambda}_i > -\tilde{\lambda}$, т.е. $\tilde{\lambda}$ является ограничением сверху абсолютного показателя времени. В наших расчетах $\tilde{\lambda} = 0,0001$ в регулярном режиме и $\tilde{\lambda} = 0,0005$ при пуске.

Вычислив по формуле (3) требуемый показатель времени и зная его текущее значение, можно определить требуемое изменение времени по формуле

$$\Delta \bar{\lambda}_i = \bar{\lambda}_i - \lambda(t_i). \quad (4)$$

Оно должно быть получено на следующем шаге с помощью введения или выведения управляющих стержней. Соответственно по уравнению (2) может быть вычислено требуемое изменение концентрации управляющего элемента по формуле $\Delta N_i = (\Delta \bar{\lambda}_i - \delta_i \Delta t_i) / \delta_N$. При этом используется значение δ_i с предыдущего шага и δ_N , найденное ранее. Далее выполняется регулировка, т.е. движение управляющих стержней. По прошествии времени Δt_i по уравнению (2) определяется новое значение коэффициента

$$\delta_N = (\Delta \lambda_i - \delta_i \Delta t_i) / \Delta N_i. \quad (5)$$

Отметим, что при этом используется уже фактическое $\Delta \lambda_i$, а не требуемое $\Delta \bar{\lambda}_i$ из формулы (4), т.е. алгоритм содержит в себе обратную связь. Далее вновь выполняются действия, соответствующие нечетному i .

Использование алгоритма в реальных расчетах. Для того чтобы формула (2) была близка к истине, а также для того чтобы можно было использовать значения δ_i и δ_N с предыдущих шагов, величина Δt_i должна быть не слишком большой. Как уже было сказано, в саморегулируемом режиме это примерно 30 мин. Управляющие стержни перемещаются только на четных шагах, т.е. примерно один раз в 1 ч. Кроме того, в формуле (5) присутствует операция деления, и соответственно знаменатель не должен быть близок к нулю. Если это не так, то вычисление δ_N пропускается, т.е. сохраняется прежнее значение (в приводимых в настоящей работе расчетах δ_N вычисляется, если $\Delta N_i > 10^{-6}$). Отметим, что для увеличения и уменьшения времени используются разные вещества. Для увеличения времени выводится ^{10}B , для уменьшения вводится ^{238}U . Эти вещества имеют разные сечения поглощения и могут располагаться в разных зонах реактора, т.е. используются не один коэффициент δ_N , а два — один для бора, другой для урана. Таким образом, если в течение длительного времени только выводился бор (или только вводился

уран), то коэффициент, соответствующий урану (или бору), становится неточным и может стать по модулю меньше реального (отметим, что эти коэффициенты отрицательны). С точки зрения безопасности в этом случае целесообразно увеличить коэффициент так, чтобы он стал заведомо больше реального (управление будет соответственно меньше требуемого). Это позволит избежать скачкообразного изменения мощности, вызываемого движением стержня, изменение мощности, связанное с недостаточностью управления, не представляет опасности [1, 4] и будет быстро погашено в результате автоматической подстройки коэффициентов алгоритма.

При таких переключениях, а также в начале работы реактора коэффициент δ_N может заметно отличаться от необходимого. Однако в процессе регулярной работы он не должен значительно меняться от шага к шагу. Если формула (5) приводит к таким изменениям, то это свидетельствует о каких-то сбоях в работе реактора или алгоритма. Поэтому целесообразно вычислять коэффициент δ_N по формуле (5) в том случае, если он отличается от предыдущего не более чем на 1%, иначе менять его на 1% в сторону значения, вычисленного по формуле (5). При переключениях с одних управляющих стержней на другие, а также в начале работы реактора следует предусмотреть возможность изменения коэффициента δ_N , например, до 10%. Однако в настоящей работе для простоты коэффициент δ_N изменяется не более чем на 2%.

Как уже было сказано, сначала нужно вывести реактор на заданную мощность $\tilde{Q}$ и удерживать его в этом состоянии до тех пор, пока не накопится достаточное количество нептуния. В это время управление должно быть существенно более интенсивным, чем в саморегулируемом режиме. Описанный алгоритм осуществляет такой вывод аккуратно при условии, что шаг по времени мал. В наших расчетах во время пуска реактора интервалы Δt существенно уменьшаются (в некоторых случаях до 2 мин). Это связано с применяемым вычислительным методом решения задачи Коши. Кроме того, ставится дополнительное ограничение на шаг в течение первых 10 сут (≤ 7 мин). В интервале от 10 до 15 сут шаг постепенно увеличивается с 7 до 30 мин. При пуске также возникает задача выбора начальных коэффициентов δ_i и δ_N . Коэффициент δ_i естественным образом определяется на первом шаге, для коэффициентов δ_N задаются начальные значения, немного превышающие по модулю реальные (не более чем в 3 раза).

На рис. 1 приведены результаты одного и того же расчета. Слева масштаб по времени мелкий, по остальным переменным крупный, т.е. хорошо видны свойства реактора в регулярном режиме. Справа масштаб по времени более крупный, по остальным переменным более мелкий, т.е. хорошо виден пуск реактора. На начальном этапе в течение некоторого времени проводится постепенный подбор коэффициента δ_N , и мощность реактора начинает увеличиваться. Отметим, что реактор разгоняется немного сильнее, чем нужно, и включаются гасящие стержни (на рис. 1, e виден соответствующий выход управления в положительную область в первые сутки). При этом подбирается коэффициент δ_N для ^{238}U , что удобно, так как мощность реактора в это время еще мала. Однако гарантии, что гасящие стержни включатся именно на малой мощности, нет, поэтому лучше выбирать для них начальный коэффициент δ_N точнее.

Начиная с 5 сут, ежедневно более точно подстраивается мощность с помощью корректировки коэффициента $\tilde{Q}$ по формуле

$$\tilde{Q}_{\text{нов}} = \tilde{Q} \tilde{Q} / Q, \quad (6)$$

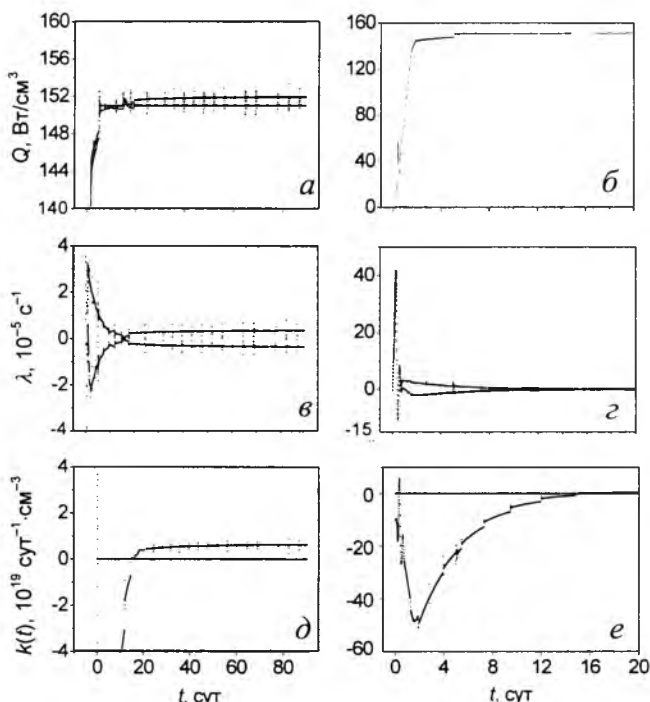
где $\tilde{Q}$ — в действительности требуемая мощность реактора.

На рис. 1, а, б в момент времени 5 сут видно соответствующее этой корректировке изменение мощности. В дальнейшем такое скачкообразное изменение мощности становится незаметным.

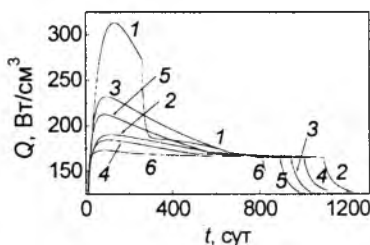
В расчете регулярного режима наблюдается периодическое (1 раз в несколько суток) скачкообразное изменение мощности (см. рис. 1, а, $t > 20$), объясняемое редким пересчетом усредненных сечений реакций и коэффициентов квазидиффузии. Колебания мощности, связанные с алгоритмом управления, находятся в пределах 1—2%.

Для сравнения на рис. 2 приведены результаты расчетов [3], где применялся другой вариант управления. Этот вариант отличается от описанного: коэффициент δ_i тождественно равен нулю, коэффициент δ_N фиксирован. При этом коэффициент δ_N больше реального. Соответственно применение формулы (6) в этом случае существенно, в то время как при использовании описанного в настоящей работе алгоритма мощность оказывается близкой к $\tilde{Q}$ и при $\tilde{Q} = \tilde{Q}$. Кроме того, на этапе пуска приходится увеличивать коэффициент $\tilde{Q}$ настолько заметно, что впоследствии реальная мощность по инерции становится заметно выше требуемой. Но функция мощности $Q(t)$ в этом случае гладкая.

Заключение. Каждый описанный алгоритм управления [1—4] имеет свои преимущества и недостатки. При использовании алгоритма [1, 2] быстрый выход на мощность при пуске реактора требует дополнительной разработки. Кроме того, в этом случае периодически нужно корректировать коэффициент δ_N , чтобы не возникали колебания мощности, т.е. фактически требуется несколько алгоритмов управления для различных режимов работы реактора. Алгоритм настоящей работы позволяет осуществлять



Р и с. 1. Мощность реактора (а, б), время (в, г) и изменение концентрации $^{10}\text{В}$ в первые 15—20 сут, затем ^{238}U (д, е) при изменении времени от –5 до 100 сут (слева) и от –1 до 20 сут (справа): — скопление большого числа точек



Р и с. 2. Мощность реактора для нескольких вариантов начальной загрузки из работы [3]

как быстрый, так и медленный выход на мощность. Его преимуществом является также пригодность как для пуска, так и для управления в саморегулируемом режиме. Для применения алгоритмов на практике требуются дополнительные исследования их надежности и безопасности и, возможно, их комбинированное использование. В частности, в обоих случаях возможны колебания мощности от шага к шагу и, может быть, даже бифуркации, поэтому необходимо предусмотреть невозможность выхода мощности реактора и амплитуды колебаний за допустимые пределы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, код проекта 03-01-00443-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин В.Я., Трошиев Ю.В., Пестрякова Г.А. Об управлении реактором на быстрых нейтронах в саморегулируемом нейтронно-ядерном режиме 2-го рода. — ДАН, 1998, т. 358, № 6, с. 747—748.
2. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трошиев Ю.В. Усовершенствование математической модели саморегулируемого реактора. — Мат. моделир., 2002, т. 14, № 12, с. 39—47.
3. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трошиев Ю.В., Аристова Е.Н. Саморегулируемый нейтронно-ядерный режим в реакторе с жестким спектром и карбидным топливом. — Там же, 2002, т. 14, № 1, с. 27—40.
4. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трошиев Ю.В. Управление быстрым реактором с оксидным уран-плутониевым топливом в саморегулируемом режиме без запаса реактивности. — Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 1, с. 3—9.
5. Усынин Г.Б., Карабасов А.С., Чирков В.А. Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1981. 232 с.
6. Лейпунский А.И., Африкантов И.И., Головин И.С. и др. Атомная электростанция с реактором БН-600. — Атомная энергия, 1968, т. 25, вып. 5, с. 403—408.

Поступила в Редакцию 1.10.04

УДК 621.039.533:621.313:621.039.52.034.3

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ БЛОКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ С ГАЗОТУРБИНЫМ ЦИКЛОМ В СОСТАВЕ АЭС С ВТГР

Васяев А.В., Головкин В.Ф., Дмитриева И.В., Кодочигов Н.Г., Кузавков Н.Г., Рулев В.М. (ОКБМ им. И.И. Африкантова)

Перспективы ВТГР определяются их использованием в качестве источника высокопотенциального тепла с уровнем температуры до 1000 °С как для производства электроэнергии, так и для снабжения теплом высокотемпературных технологических процессов, включая производство водорода из воды. Такая температура не может быть достигнута в других типах реакторных установок.

На ранней стадии разработки и создания ВТГР их применяли для производства электроэнергии с отработанным и проверенным паротурбинным циклом (с первых шагов ядерная энергетика базировалась на паротурбинном цикле). Опыт эксплуатации подтвердил их надежность, однако невысокие экономические показатели