

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МАНЕВРА МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР

М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса



Предлагается метод сравнительной оценки эффективности алгоритмов маневра мощностью энергоблока с ядерным реактором типа ВВЭР при работе реактора в режиме переменных нагрузок. Показано, что путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки возможно оценивать время эксплуатации оболочки твэла при работе ядерного реактора в режиме многократных циклических изменений мощности.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время повысился интерес к анализу работы украинских ядерных энергоблоков в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы (в режиме переменных нагрузок), что предполагает многократные циклические изменения мощности ядерного реактора (ЯР) [1]. Хотя энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы в базовом режиме, в настоящее время доля АЭС в производстве электроэнергии на Украине составляет более 50%, что ведет к невозможности полного покрытия переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы только за счет ТЭС и ГЭС.

Целью статьи является разработка методики сравнительного анализа эффективности алгоритмов эксплуатации энергоблока в переменной части графика электрической нагрузки для поддержания суточного баланса мощности энергосистемы.

Известны четыре основные программы регулирования (ПР) энергоблоков ВВЭР, характеризующие значения внутренних технологических параметров в стационарных режимах энергоблока [2].

1. ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре (ПР № 1).

Преимущества: наиболее благоприятные условия для работы оборудования первого контура; возможность регулирования реактора за счет температурного эффекта реактивности при минимизации воздействия на органы регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ), что обеспечивает стабильность поля энерговыделения.

Недостатки: повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока, что требует проектирования парогенераторов и главных паропроводов для работы с давлением, превышающим номинальное.

© М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков, 2008

2. ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре (ПР № 2).

Преимущества: наиболее благоприятные условия для работы парогенерирующего оборудования второго контура; возможность использования при номинальном режиме более высоких параметров пара перед турбиной.

Недостатки: ввиду переменной средней температуры теплоносителя в первом контуре требуется компенсатор давления увеличенных размеров; повышенные температурные напряжения в корпусе ЯР, а также в оболочках твэлов; для компенсации изменений реактивности за счет температурного эффекта требуется воздействие на ОР СУЗ, что может привести к изменению поля энерговыделения в активной зоне (АкЗ).

3. Компромиссная ПР с умеренным изменением средней температуры теплоносителя в первом контуре и начального давления пара во втором контуре (ПР № 3).

Преимущества: возможность оптимального выбора параметров как первого, так и второго контуров.

Недостатки: ПР № 3 присущи отмеченные выше недостатки ПР № 1 и 2.

4. Компромиссная ПР с поддержанием постоянного давления во втором контуре при малых нагрузках и постоянной средней температуре теплоносителя в первом контуре при больших нагрузках (ПР № 4); в диапазоне мощности от 100 до 80% блок работает по ПР № 1, а при меньшей мощности используется ПР № 2.

Преимущества: при маневрировании блок работает, главным образом, при постоянной средней температуре теплоносителя в первом контуре, при этом давление пара во втором контуре в случае значительных отклонений от номинальной мощности находится в приемлемых границах.

Недостатки: поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре при маневрировании затруднительно при ограниченности разрешенного диапазона изменения давления в парогенераторе (62–64 бар).

На практике, например, на энергоблоках Запорожской АЭС, реализована ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре (ПР № 2), т.е. в парогенераторах поддерживается давление 62–64 бар, при этом в главном паровом коллекторе (ГПК) давление 58–60 бар. Характерные значения температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и выходе $t_{вых}$ АкЗ при изменении мощности ЯР от 100 до 80% номинальной приведены в табл. 1 (разгрузка 5-го блока Запорожской АЭС 23.03.2008 г. по диспетчерской заявке). Давление в ГПК поддерживалось в пределах 58–60 бар (однако при этом давление после СРК опускалось вплоть до 41,3 бар).

При уменьшении мощности ЯР до 80% в соответствии с ПР № 2 входная температура теплоносителя уменьшается на 2°C по сравнению с номинальным значением (см. табл. 1).

В табл. 2 показана оценка уменьшения КПД-брутто турбоустановки (ТУ) энергоблока с ВВЭР-1000 при уменьшении уровня нагрузки ТУ. Давление пара перед стопорным клапаном принималось неизменным и равным 59 бар.

Таким образом, при выборе оптимального алгоритма суточного маневрирования мощностью, а значит и ПР, необходим учет изменения КПД ТУ в зависимости от уровня мощности ЯР.

Задача перевода тепловой мощности АкЗ с одного уровня на другой сводится к разработке алгоритма, позволяющего контролируемо изменять мощность АкЗ, но при этом не допускать разрушения оболочек твэлов. В эксплуатационной практике применяются следующие основные способы устойчивого управления реактивностью.

1. Введение-выведение твердого поглотителя.

Преимущества: быстрое действие; легкость автоматизации.

Таблица 1

Характерные значения температуры теплоносителя при изменении мощности ЯР по диспетчерской заявке

Точка	Параметр			
	Входная температура теплоносителя $t_{вх}, ^\circ\text{C}$	Выходная температура теплоносителя $t_{вых}, ^\circ\text{C}$	Средняя температура теплоносителя $t_{ср}, ^\circ\text{C}$	Электрическая мощность энергоблока, % (МВт)
1	286,7	317,2	302,0	99,5 (1014)
2	285,5	313,0	299,3	87,2 (889)
3	284,9	310,2	297,6	78,0 (795)
4	284,8	310,1	297,5	77,8 (793)
5	285,1	310,5	297,8	79,6 (811)
6	286,8	316,5	301,7	100,0 (1019)

Таблица 2

Уменьшение КПД-брутто ТУ при уменьшении нагрузки ТУ

Нагрузка ТУ, %	Изменение КПД-брутто ТУ по сравнению с номинальным режимом, %
100 (номинал)	0
90	-2
80	-5

Недостатки: введение ОР СУЗ в АкЗ приводит к искривлению поля энерговыделения, что, в свою очередь, может послужить причиной возникновения ксеноновых колебаний; при движении ОР СУЗ вверх на границе движения в оболочках твэлов, расположенных вблизи ОР СУЗ, из-за скачка мощности возникают значительные напряжения, способствующие разрушению оболочек.

2. Изменение концентрации поглотителя в теплоносителе контура.

Преимущества: не изменяет геометрию поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АкЗ.

Недостатки: низкое быстродействие; образуются дебалансные воды, требующие переработки.

3. Использование температурного коэффициента реактивности.

Преимущества: не изменяется геометрия поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АкЗ.

Недостатки: небольшой диапазон регулирования ограничен допустимым давлением в парогенераторе; температура входа теплоносителя в реактор, растущая при увеличении давления в ГПК, жестко ограничена таблицей допустимых режимов; появляются циклические изменения параметров 2-го контура.

4. Отравление-разотравление реактора.

Преимущества: если правильно выбрать время разгрузки блока, реактивность в процессе отравления-разотравления будет повторять график мощности энергосистемы.

Недостатки: низкое быстродействие.

АЛГОРИТМ СУТОЧНОГО МАНЕВРА

Предлагается следующий алгоритм суточного маневра мощностью АкЗ.

Пусть энергоблок работает на номинальной мощности, ксеноновые колебания подавлены при помощи перемещения регулирующей группы. Первоначальное снижение (до 90%) мощности реакторной установки (РУ) осуществляется вводом раствора борной кислоты при поддержании неизменной температуры теплоносителя на входе в реактор за счет повышения давления в ГПК. Вводом рабочей группы поддерживается оптимальный мгновенный аксиальный офсет (АО) как гарантия невозникновения ксеноновых колебаний.

В дальнейшем снижение мощности происходит за счет отравления. Оптимальный мгновенный АО удерживается за счет изменения положения рабочей группы. Приблизительно через 2–3 ч мощность реактора достигнет 80% и вводом «чистого дистиллята» будет стабилизирована. После прохождения максимума «йодной ямы» мощность РУ частично восстановится за счет разотравления.

Для восстановления номинальной мощности РУ вводится «чистый дистиллят» в контур с одновременным снижением давления в ГПК, что позволяет сохранить постоянной температуру входа. Регулирующая группа ОР СУЗ извлекается из АкЗ для поддержания оптимального мгновенного АО. После достижения номинального уровня мощности автоматический регулятор поддерживает его на заданном уровне. Подавление возникающих ксеноновых колебаний осуществляется перемещением регулирующей группы.

Таким образом, предлагается алгоритм с умеренными изменениями средней температуры первого контура и начального давления во втором контуре в диапазоне мощности от 100 до 80% номинальной, тогда как при мощности менее 80% номинальной используется ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре. Преимущества предлагаемого алгоритма: сравнительно небольшое число переключений, что снижает вероятность ошибочных действий персонала; уменьшение расхода чистого дистиллята и борного концентрата; уменьшенное количество дебалансных вод; улучшение условий работы топлива.

Предлагаемый алгоритм разработан так, что при суточном маневре мощностью в пределах от 100 до 80% номинала поддерживает постоянной входную температуру теплоносителя при изменении давления пара в ГПК в пределах 58–60 бар и имеет описанные выше преимущества ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре. При этом за счет поддержания давления пара в парогенераторе и ГПК в регламентных пределах алгоритм лишен описанных выше недостатков, присущих ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре.

Сравним эффективность двух алгоритмов суточного маневра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000: предлагаемого алгоритма («альтернативного») и алгоритма, прошедшего испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г. («апробированного»).

«Апробированный» алгоритм: снижение мощности до 80% за 1 ч – работа на мощности 80% в течение 7 ч – повышение мощности до номинальной в течение 2 ч.

«Альтернативный» алгоритм: снижение мощности до 90% в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты – дальнейшее снижение мощности до 80% в течение 2,5 ч за счет отравления реактора – работа на мощности 80% в течение 4 ч – повышение мощности до номинальной в течение 2 ч.

С помощью программы «Имитатор реактора» (ИР) [3] выполнено сравнение двух вышеописанных алгоритмов суточного маневра мощностью. В программе ИР используется понятие аксиального офсета, определяющего высотную неравномер-

ность поля энерговыделения и рассчитываемого как процентное отношение разности мощностей верхней P_v и нижней P_n половин АкЗ к полной мощности АкЗ:

$$AO = \frac{P_v - P_n}{P_v + P_n} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Мгновенный АО соответствует текущему распределению концентрации ксенона, а равновесный АО отвечает равновесному распределению концентрации ксенона.

Мощность реактора $P(\tau)$, положение регулирующей группы стержней $H(\tau)$, мгновенный и равновесный АО(τ), рассчитанные в зависимости от времени τ с помощью программы ИР, для «апробированного» и «альтернативного» алгоритмов показаны соответственно на рис. 1 и 2.

Верхняя регламентная граница положения регулирующих стержней для ВВЭР-1000 – 90% от низа АкЗ. Как правило, на номинальной мощности операторы поддерживают именно такое положение регулирующей группы ОР СУЗ. Поэтому для рассматриваемых алгоритмов, показанных на рис. 1–2, маневр начинается при $H = 90\%$ от низа АкЗ.

Нижнее положение регулирующих стержней для «апробированного» алгоритма $H = 78\%$, тогда как для «альтернативного» $H = 84\%$ (см. кривые (2), рис. 1–2). Таким образом, для «альтернативного» алгоритма в два раза уменьшается амплитуда необходимого движения регулирующей группы ОР СУЗ.

Для «апробированного» алгоритма в отличие от «альтернативного» характерна значительная дивергенция мгновенного и равновесного АО. Амплитуда изменения АО в ходе маневра для «апробированного» алгоритма примерно в 10 раз больше, чем для «альтернативного», что является предвестником проблем со стабилизацией поля энерговыделения после окончания маневра (см. кривые 3, 4, рис. 1–2).

Для объективного сопоставления алгоритмов регулирования необходимо принять критерий для сравнения их эффективности, основанный на высоких требо-

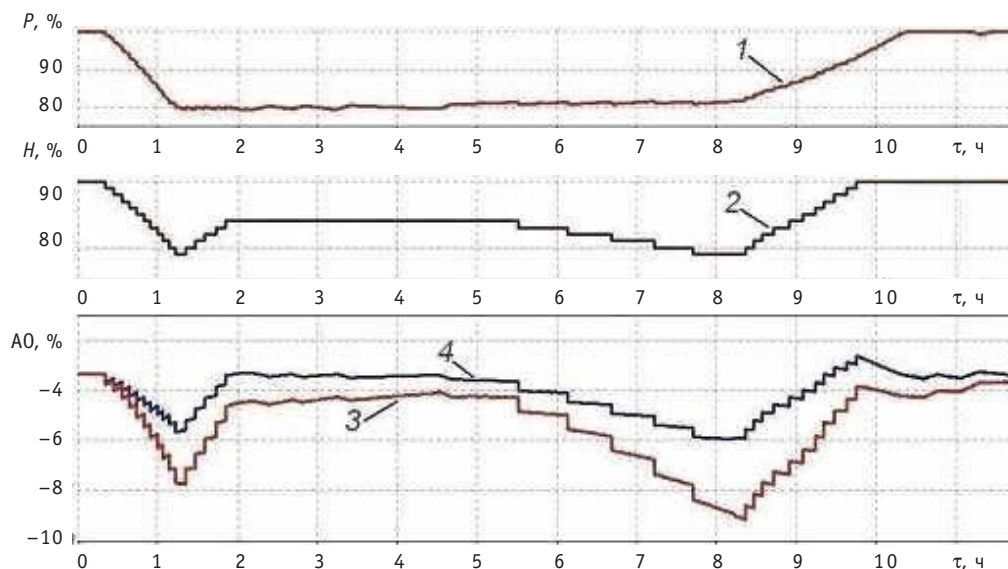


Рис. 1. Мощность ЯР, положение ОР СУЗ, мгновенный и равновесный АО в зависимости от времени τ , ч для «апробированного» алгоритма суточного маневра мощностью: 1 – мощность реактора $P, \%$; 2 – положение регулирующей группы стержней $H, \%$; 3 – мгновенный АО, $\%$; 4 – равновесный АО, $\%$

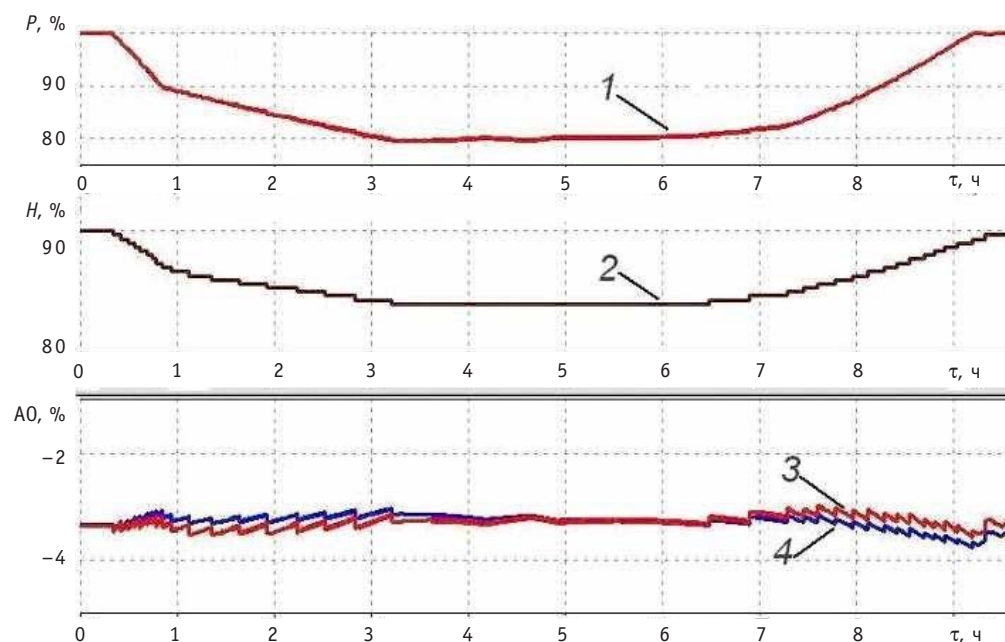


Рис. 2. Мощность ЯР, положение ОР СУЗ, мгновенный и равновесный А0 в зависимости от времени τ , ч для «альтернативного» алгоритма суточного маневра мощностью: 1 – мощность реактора P ,%; 2 – положение регулирующей группы стержней H ,%; 3 – мгновенный $A0$,%; 4 – равновесный $A0$,%

ваниях к надежности и безопасности эксплуатации АЭС. Поскольку самой уязвимой составной частью АкЗ при многократных циклических изменениях мощности РУ являются оболочки топливных элементов (ТВЭлов), критерием эффективности алгоритма суточного маневра мощностью будем считать накопленную в процессе маневров остаточную деформацию оболочек ТВЭлов. Чем она меньше, тем более эффективен алгоритм и тем большее количество циклов нагружения-разгружения в период эксплуатации ТВЭлов можно выполнить без нарушения регламентных характеристик эксплуатации оболочек ТВЭлов. Для оценки времени эксплуатации оболочки ТВЭла в режиме переменных нагрузок используется метод, предложенный в [4].

МЕТОД АНАЛИЗА ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА

Эксплуатация ТВЭла ЯР характеризуется длительным воздействием высоких уровней температурно-силового нагружения, обуславливающих развитие неконтролируемых процессов ползучести конструкционного материала оболочки ТВЭла, которые в определенный момент времени приводят к ее разрушению с выходом продуктов деления в контур.

Сложность оценки времени целостности оболочки ТВЭла в режиме переменных нагрузок РУ состоит в том, что реализация эксперимента по изучению ползучести материала оболочки на модели ТВЭла в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам переменных нагрузок, затруднительна или невозможна, поскольку продолжительность таких испытаний может составлять несколько лет. Экспериментальные данные по ползучести материала оболочки в условиях стационарных и аварийных режимов невозможно перенести на оболочку ТВЭла ЯР, работающего в режиме переменных нагрузок, поскольку необходимо учитывать всю историю нагружения материала оболочки.

Без учета аварийных режимов, приводящих к пластической деформации оболочки ТВЭла, для оценки времени эксплуатации оболочки при многократных цик-

лических изменениях мощности ЯР достаточно ограничиться вычислением работы, накопленной в процессе ползучести к моменту разрушения и затраченной на разрушение конструкционного материала оболочки [5].

Работа, затраченная на разрушение конструкционного материала, в энергетическом варианте теории ползучести [6] называется удельной энергией рассеяния $A(\tau)$.

Предлагаемый метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ЯР в режиме переменных нагрузок основан на некоторых допущениях энергетического варианта теории ползучести: процессы ползучести и разрушения протекают совместно и влияют друг на друга; интенсивность процесса ползучести в любой момент времени τ оценивается удельной мощностью рассеяния $W(\tau)$, а интенсивность повреждения – накопленной за время τ удельной энергией рассеяния $A(\tau)$

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) \cdot d\tau. \quad (2)$$

Вводится параметр поврежденности материала оболочки

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (3)$$

где A_0 – удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м³; $\omega = 0$ для неповрежденного материала, $\omega = 1$ для поврежденного материала.

Входящая в (2) удельная мощность рассеяния $W(\tau)$ определяется из следующего выражения:

$$W(\tau) = \sigma_e \cdot \dot{\rho}_e, \quad (4)$$

где σ_e – эквивалентное напряжение, Па; $\dot{\rho}_e$ – скорость эквивалентной деформации ползучести, с⁻¹.

Из (2)–(4) следует условие разрушения оболочки твэла

$$\omega(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{\sigma_e \cdot \dot{\rho}_e}{A_0} d\tau = 1. \quad (5)$$

Эквивалентное напряжение σ_e и скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{\rho}_e$ рассчитываются методом конечных элементов по модели, заложенной в программный код FEMAXI [7], моделирующий изменения в термическом, механическом и химическом состояниях компонентов отдельного твэла, а также характеристики взаимодействия компонентов твэла для заданной истории уровней мощности и параметров теплоносителя реактора типа ВВЭР.

Математическая модель, заложенная в код, применима для анализа поведения твэла ЯР типа ВВЭР в области глубоких выгораний (свыше 40–50 МВт·сут/кг U) не только в стационарных условиях, но и в переходных процессах, характерных для работы ЯР в режиме переменных нагрузок.

Расчет температуры топлива выполнялся с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1%. Амплитуда численной ошибки, возникающей в виде остатка от итеративного расчета ползучести на каждом шаге по времени, не оценивалась ввиду того, что в большинстве случаев эта погрешность перекрывается другими неопределенностями, в первую очередь, погрешностью модели теплопроводности [7].

Рассмотрим метод анализа на примере суточного цикла нагружения, согласно которому ЯР в течение 16 ч работает на 100% мощности, затем в течение 1 ч ЯР

переводится на уровень мощности $k \cdot 100\%$, $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$. Далее ЯР в течение 6 ч работает на мощности $k \cdot 100\%$, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100%. Такой режим работы ЯР в дальнейшем будет называться суточным циклом нагружения (16 ч – 100%, 6 ч – $k \cdot 100\%$).

На рис. 3 представлена зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$, МДж/м³ для циркаловой оболочки твэла ЯР типа ВВЭР (циркалой – разгруженный по напряжениям) от числа суточных циклов нагружения N для суточного цикла нагружения (16 ч – 100%; 6 ч – $k \cdot 100\%$), $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$.

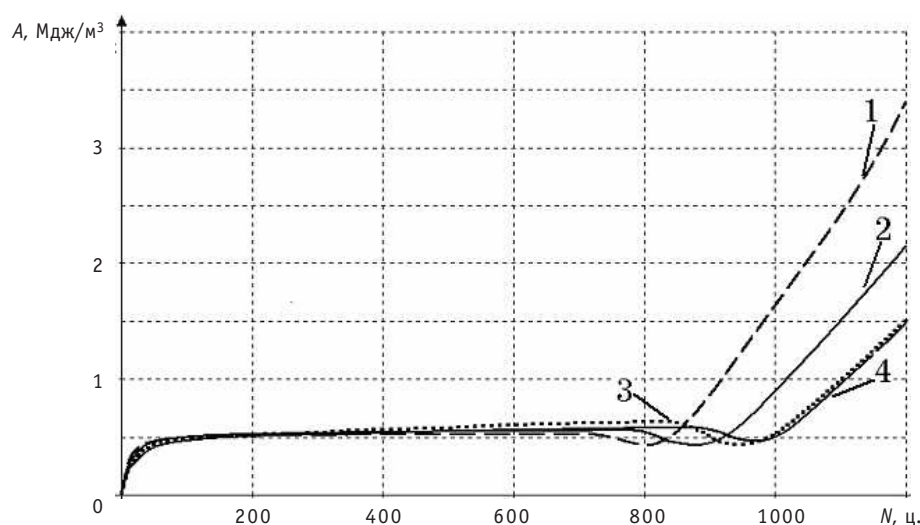


Рис. 3. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от числа суточных циклов нагружения N :
1 – стационарная работа на 100% мощности; 2 – суточный цикл (16 ч – 100%; 6 ч – 75%);
3 – суточный цикл (16 ч – 100%; 6 ч – 50%); 4 – суточный цикл (16 ч – 100%; 6 ч – 25%)

В общем случае явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий: неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести (последняя стадия – стадия предразрушения) [5]. Границы характерных стадий ползучести для кривых (1)–(4) приведены в табл. 3.

Для случая стационарной работы ЯР на 100% мощности (см. кривая 1, рис. 3) удельная энергия рассеяния $A_1(N)$ резко возрастает в диапазоне изменения числа суточных циклов нагружения N от 0 до 100 ц., тогда как при $100 \text{ ц.} < N < 702 \text{ ц.}$ величина $A_1(N)$ увеличивается с течением времени сравнительно медленно. Таким образом, в диапазоне значений N от 0 до 100 ц. наблюдается стадия неустановившейся ползучести материала оболочки, а в диапазоне значений N от 100 до 702 ц.

Таблица 3

Характерные стадии ползучести

Кривая	Стадия ползучести циркаловой оболочки		
	Неустановившаяся ползучесть	Установившаяся ползучесть	Ускоренная ползучесть
1	$A_1(0) - A_1(100)$	$A_1(100) - A_1(702)$	$A_1(702) - A_1(1200)$
2	$A_2(0) - A_2(100)$	$A_2(100) - A_2(760)$	$A_2(760) - A_2(1200)$
3	$A_3(0) - A_3(100)$	$A_3(100) - A_3(820)$	$A_3(820) - A_3(1200)$
4	$A_4(0) - A_4(100)$	$A_4(100) - A_4(860)$	$A_4(860) - A_4(1200)$

– стадия установившейся ползучести (см. табл. 3). При $N > 702$ ц. удельная энергия рассеяния $A_1(N)$ сначала временно уменьшается (гистерезис), после чего начинается резкий рост величины накопленной энергии необратимых деформаций ползучести, приводящий к разрушению оболочки. Для стационарной работы ЯР на 100% мощности диапазон $N > 702$ ц. в табл. 3 называется стадией ускоренной ползучести. Величина накопленной энергии необратимых деформаций ползучести рассчитывалась вплоть до $N = 1200$ ц.

Аналогично определяются границы характерных стадий ползучести для линий 2, 3, 4, показывающих накопление энергии необратимых деформаций ползучести со временем для циклов нагружения (16 ч – 100%; 6 ч – 75%), (16 ч – 100%; 6 ч – 50%), (16 ч – 100%; 6 ч – 25%) соответственно (см. рис. 3).

Эквивалентная деформация ползучести p_e циркаловой оболочки для всех режимов суточного цикла нагружения, показанных на рис. 3, постепенно увеличивается с течением времени, причем на последней стадии ползучести наблюдается характерное гистерезисное снижение p_e , после чего наступает быстрый рост p_e с достижением недопустимо больших значений с точки зрения надежности твэла. В результате построения зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации ползучести $\sigma_e(p_e)$ получено, что в начале стадии ускоренного роста ползучести тенденция падения σ_e сменяется тенденцией роста, при этом временно уменьшается p_e , проходя через сильно выраженный локальный экстремум (минимум). Данное гистерезисное явление, при котором эквивалентная деформация ползучести $p_e(N)$ отстает от эквивалентного напряжения $\sigma_e(N)$ по фазе, является причиной временного снижения удельной энергии рассеяния $A(N)$ в начале стадии ускоренного роста ползучести (см. рис. 3).

Примем, что коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ЯР в течение времени T определяется (без учета времени ремонта) как

$$\text{КИУМ} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot P_i)}{T \cdot P}, \quad (6)$$

где $\Delta\tau_i$ – время работы ЯР на мощности P_i ; T – суммарное время работы ЯР,

$T = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i$; P – номинальная мощность ЯР (100%).

С учетом рассчитанного по (6) КИУМ число суточных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренного роста ползучести в пересчете на эффективные сутки определяется как

$$N_{e,0} = N_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (7)$$

где N_0 – число календарных суточных циклов нагружения до начала стадии ускоренного роста ползучести.

Эквивалентная деформация ползучести p_e , коэффициент использования установленной мощности КИУМ, накопленная удельная энергия рассеяния перед наступлением стадии ускоренной ползучести A_0 , числа N_0 и $N_{e,0}$ для кривых (1)–(4) приведены в табл. 4.

Согласно табл. 4, для случая стационарной работы ЯР на 100% мощности эквивалентная деформация ползучести материала оболочки p_e , накопленная в результате выполнения 1200 суточных циклов нагружения, достигает величины 6,75%, что превышает аналогичные значения для циклов нагружения (16 ч – 100%; 6 ч – $k \cdot 100\%$), $k = 0,75; 0,5; 0,25$. Число календарных суточных циклов нагружения до начала стадии ускоренного роста ползучести N_0 определяется как число суточных

Таблица 4

Характеристики суточных циклов нагружения

Кривая	$\rho_e, \%$ (после 1200 сут циклов)	КИУМ	$A_0, \text{МДж/м}^3$	$M, \text{сут}$	$N_{e0}, \text{эфф. сут}$
1	6,75	1	0,522	702	702
2	4,56	0,93	0,559	760	704
3	3,25	0,85	0,639	820	700
4	2,84	0,78	0,585	860	672

циклов нагружения, при котором достигается величина накопленной удельной энергии рассеяния A_0 . Величина накопленной удельной энергии рассеяния перед наступлением стадии ускоренной ползучести A_0 , определяемая как максимальное значение удельной энергии рассеяния $A(N)$, достигаемое непосредственно перед началом третьей характерной стадии ползучести (см. табл. 3), позволяет определить, используя (3), параметр поврежденности материала оболочки.

На основании данных, приведенных в табл. 4, можно сделать выводы: время эксплуатации оболочки, выраженное с помощью (7) в эффективных сутках, при работе по суточному циклу (16 ч – 100%; 6 ч – 75%) несколько продлевается (кривая 2), вместе с тем время эксплуатации оболочки при работе по циклу нагружения (16 ч – 100%; 6 ч – 25%) значительно уменьшается (кривая 4) по сравнению со стационарной работой ЯР на 100% мощности (кривая 1).

Получено, что для случая работы ЯР по суточному циклу нагружения (16 ч – 100%; 6 ч – $k \cdot 100\%$), $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$ увеличение числа точек истории нагружения от 4 до 8 в сутки изменяет расчетное время эксплуатации оболочки до начала стадии ускоренного роста ползучести не более, чем на 0,5%. Следовательно, при работе ЯР по суточному циклу нагружения задание 8 точек истории нагружения в сутки позволяет рассчитать время эксплуатации оболочки с достаточной точностью.

Расчеты показали, что накопленная удельная энергия рассеяния $A(N)$ циркуляционной оболочки твэла ЯР типа ВВЭР, работающего в переменном режиме нагружения, зависит от ряда режимных характеристик ЯР. Например, с уменьшением среднего по длине твэла линейного теплового потока $\langle q_l \rangle$ остальные режимные характеристики не меняются, время наступления стадии ускоренного роста ползучести материала оболочки значительно сдвигается вправо по шкале числа циклов нагружения.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХ АЛГОРИТМОВ МАНЕВРА МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГООБЛОКА С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР

На основании предлагаемого метода оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок получена зависимость накопленной энергии необратимых деформаций ползучести циркуляционной оболочки твэла ЯР типа ВВЭР от числа суточных циклов нагружения для двух вышеописанных алгоритмов суточного маневра мощностью (см. рис. 4).

Результаты сравнительного анализа эффективности «апробированного» и «альтернативного» алгоритмов суточного маневра мощностью приведены в табл. 5.

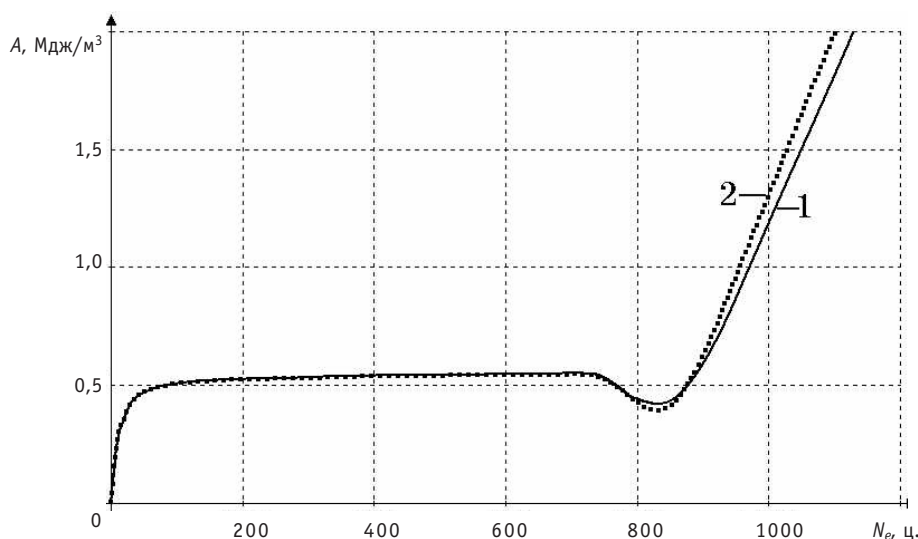


Рис. 4. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N_e)$ от числа суточных циклов нагружения N_e в пересчете на эффективные сутки: 1 – «апробированный» алгоритм суточного маневра мощностью; 2 – «альтернативный» алгоритм суточного маневра мощностью

Таблица 5

Сравнение эффективности двух алгоритмов суточного маневрирования

Алгоритм	Легкость стабилизации поля энерговыделения ЯР		КИУМ	Число суточных циклов нагружения до начала стадии ускоренного роста ползучести N_{e0} , эфф. сут
	Дивергенция графиков мгновенного и равновесного АО	Амплитуда изменения АО в ходе маневра		
«Апробированный»	Значительная дивергенция	Значительная амплитуда изменения АО	0,929	704,6
«Альтернативный»	Незначительная дивергенция	Амплитуда изменения АО в 10 раз меньше, чем для «апробированного»	0,942	705,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагаемый метод сравнительного анализа эффективности алгоритмов суточного маневра мощностью при работе ЯР в режиме переменных нагрузок может оказаться полезным ввиду затруднительности получения аналогичных выводов путем точного аналитического решения задачи о ползучести материала оболочки и путем эксперимента.

2. Принимая во внимание меньшее число переключений для ввода жидкого поглотителя и чистого дистиллата во время маневра, незначительную дивергенцию графиков мгновенного и равновесного АО, меньшую амплитуду изменения линейной мощности в ходе маневра (см. рис. 1, 2), более высокий КПД-брутто ТУ для «альтернативного» алгоритма, соответствующий более высокому КИУМ (см. табл. 2), а также неменьшее прогнозируемое время эксплуатации оболочки твэла по «альтернативному» алгоритму, можно заключить, что «альтернативный» алгоритм суточного маневра мощностью более предпочтителен по сравнению с «апробированным» (см. табл. 5).

Литература

1. Максимов М.В., Маслов О.В., Фридман Н.А. Определение критерия эффективности эксплуатации АЭС с ВВЭР в переменной части графика электрической нагрузки/Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2001. – Вып. 2 (14). – С. 78-80.
2. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов. – СПб: ЭАИ, 1994. – 380 с.
3. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000//Атомная энергия. – 1998. – Т. 84. – Вып. 6. – С. 560-563.
4. Максимов М.В., Пелых С.Н., Баскаков В.Е. Метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ядерного реактора в режиме переменных нагрузок/Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2008. – Вып. 1 (29). – С. 58-62.
5. Немировский Ю.В. Об оценке времени безопасной эксплуатации конструкций и сооружений/Труды международной конференции «RDAMM-2001». – Новосибирск, 2001. – Т. 6. – С. 328-333.
6. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. – Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986. – 95 с.
7. Motoe Suzuki. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). – Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 285 p.

Поступила в редакцию 16.07.2008

shift rigidity (Timoshenko S.P.'s beam) is developed. On the basis of the calculations spent within the limits of this model with use of experimentally received non-stationary hydrodynamic loadings possibility of excitation of intensive vibrations in area of a fuel rods beam close to the bottom basic lattice is shown. Experimental data on vibrations displacements of a fuel rods beam will well be coordinated with settlement values that confirms justice offered.

УДК 621.039.548

Effective Heat Conductivity of Rod and Tube Bundles with Random Deviation from Regular Lattice \ V. Fedotovskiy, A. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 12 illustrations. – References, 8 titles.

Effective heat conductivity of rod and tube bundles is one of thermophysical properties necessary for calculation of thermo hydraulic characteristics of heat producing devices, heat exchange devices and steam generators. This report introduces results of mathematical modeling of effective heat conductivity of transversally anisotropic rod bundles in solid conductive medium formed by cylindrical rods in rectangular and triangular grids compressed or stretched in heat flow direction. Similar numerical modeling was performed for anisotropic bundles of elliptic cylinders and also for disperse-armed materials with spherical and ellipsoidal inclusions. On the basis of quite precise numerical solutions of stationary heat conductivity problems in representative cells by finite elements method dependencies for components of effective heat conductivity tensor in principal axes were received and comparison with formulas received analytically for heterogeneous mediums of various structure was performed. Effective heat conductivity of rod bundles with random deviation from regular grid was also considered. Deviation values were set as deviation matrix that was randomly generated by the normal distribution software randomizer. As a result of comparison limits of application of various analytic formulas and methods of their specification were determined.

УДК 621.039.56

Optimization of a Network Diagrams for Replacement of Steam- and Gas Generators of NPP with VVER-1000 using the Method of Nonlinear Mathematical Programming \ N.I. Yevzhik, A.N. Sesekin, O.L. Tashlykov, S.Ye. Sheklein, A.A. Kadnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

Ways of time reduction of replacement of steam and gas generators nuclear energy station with VVER-1000 are shown. Necessity of time minimization of the power unit is proved. Development of algorithm and the program settlement a critical way and optimization of the network diagram on replacement of four steam and gas generators is described. The example of time replacement optimization generators is given.

УДК 621.039.548

A Method to estimate efficiency of a nuclear power unit capacity maneuver algorithm for the case of WWER reactors \ M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 12 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 7 titles.

A nuclear power unit capacity maneuver algorithm efficiency estimation technique for a WWER reactor working in the mode of variable loadings is offered. It is shown, that fuel rod cladding material operation time under multiple cyclic nuclear reactor power changes can be estimated by calculation of the accumulated energy of irreversible cladding material creep deformations.

УДК 621.039

About an Optimal SPTE Number Search Model \ A.P. Unshchikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 6 titles.

This paper considers the mathematical optimization model of an SPTE number search at a storage facility of some NPP subsystem. This model can help to calculate a number of SPTE to be bought with