

УДК 621.039.50

ИСПЫТАНИЯ ВВЭР-1200 В РЕЖИМЕ СУТОЧНОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ НА 1-М ЭНЕРГОБЛОКЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС-2

Филимонов П.Е., Семченков Ю.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Мезенцев П.П. (АО «Атомтехэнерго», г. Москва), Ширванянц А.Э. (АО «Атомэнергoproject»,
г. Санкт-Петербург), Еремеев С.А. (АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск),
Калинников А.В. (Ленинградская АЭС, г. Сосновый Бор)
e-mail: filimonov_pe@nrcki.ru

В испытаниях ВВЭР-1200 6-го энергоблока Нововоронежской АЭС в суточном графике нагрузки [1] управление реактором осуществлялось по алгоритму локализации ксеноновых процессов, основанному на принципе снижения мощности реактора в верхней половине активной зоны в сочетании с «мягким температурным регулированием» — воздействием на реактивность путем изменения температуры теплоносителя первого контура за счет изменения давления пара во втором контуре [2].

В настоящей статье рассматриваются аналогичные испытания на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС-2, которые проводились в два этапа: в начале третьей кампании с 28 апреля по 8 мая 2021 г. (105—114 эф. сут) и в конце кампании с 29 октября по 8 ноября 2021 г. (282—291 эф. сут). На каждом этапе было выполнено 10 циклов: пять циклов изменения мощности реактора W_p по суточному графику 100—77—100% $W_{ном.p}$ и 100—50—100% $W_{ном.p}$, при этом электрическая мощность турбины W_t снижалась до 70 и 40% $W_{ном.t}$ соответственно. Здесь $W_{ном.p}$ — номинальная мощность реактора 3200 МВт, $W_{ном.t}$ — номинальная электрическая мощность турбины 1200 МВт.

При работе в суточном графике 100—77—100% $W_{ном.p}$ управление реактором осуществлялось аналогично испытаниям на Нововоронежской АЭС по алгоритму локализации ксеноновых процессов. В суточном графике 100—50—100% $W_{ном.p}$ управление в отличие от испытаний на Нововоронежской АЭС осуществлялось по

алгоритму минимизации отклонения офсета, основанному на принципе поддержания аксиального офсета энерговыделения (АО) в рекомендуемой области офсет-мощностной диаграммы [3].

Указанные алгоритмы управления сочетались с расширением диапазона давления пара (мягкое температурное регулирование). Диапазон увеличивался до 0,4 МПа — в 4 раза по сравнению со штатным диапазоном 0,1 МПа («жесткое температурное регулирование»). Соответствующим образом были настроены регуляторы мощности реактора (АРМР) и турбины (ЭЧСР). Заданный график изменения электрической мощности турбины поддерживался автоматически с помощью ЭЧСР, мощность реактора автоматически изменялась, следуя за мощностью турбины, в результате перемещения в активной зоне групп ОР СУЗ под управлением АРМР в режиме поддержания давления пара в штатном (режим Т) или расширенном диапазоне (режим С). Оператор имеет возможность корректировать движение групп ОР СУЗ непосредственно или за счет водообмена — подачи в первый контур чистой воды (дистиллята) или концентрата борной кислоты (концентрата).

До начала испытаний была модернизирована система борного регулирования для обеспечения малой автоматически регулируемой скорости водообмена. Для этого в систему добавлен дополнительный трубопровод (линия тонкого впрыска) и разработана программа ЕС008, позволяющая управлять водообменом в ручном и

автоматическом режиме. В ручном режиме количество M вводимого дистиллята/концентрата и скорость ввода dM/dt (расход) задает оператор. В автоматическом режиме дистиллят или концентрат вводится с непрерывно изменяющимся расходом, компенсируя соответственно отравление или разотравление реактора ксеноном. Расход автоматически рассчитывает программа Имитатор реактора (ИР) в системе внутриреакторного контроля (СВРК). При этом оператор имеет возможность корректировать расход. Программа ИР использовалась также для информационной поддержки оператора в режиме оперативного прогнозирования работы реактора.

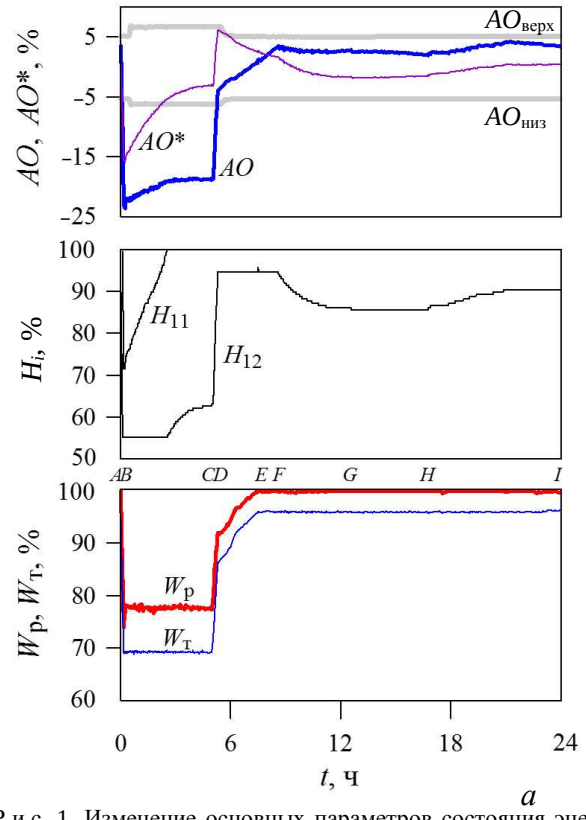
В ходе испытаний отрабатывались алгоритмы управления реактором, которые обеспечивали минимальное количество радиоактивного теплоносителя, выводимого из первого контура в результате операций водообмена (алгоритм локализации ксеноновых процессов), или максимально допустимую скорость увеличения мощности (алгоритм минимизации отклонения офсета). Также проводились испытания программы автоматического управления водообменом ЕС008, а также измерялся коэффициент эффективности мягкого температурного регулирования:

$$K = \Delta W_p / \Delta T,$$

где ΔW_p , ΔT — изменение мощности реактора и температуры теплоносителя на входе в реактор при фиксированных положении групп и концентрации борной кислоты в теплоносителе соответственно.

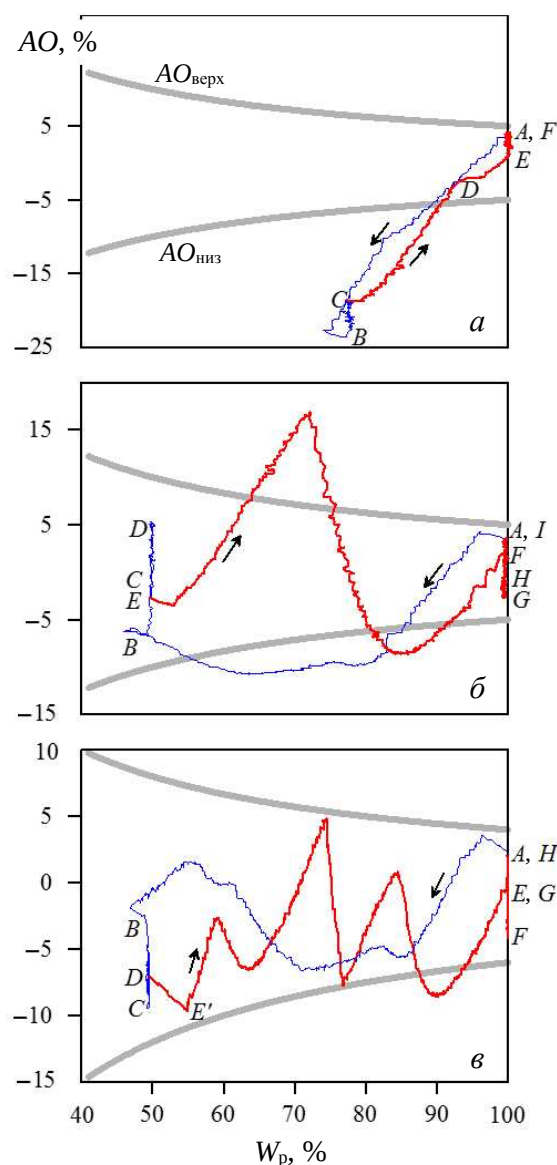
В каждой серии из пяти суточных циклов первые четыре выполнялись с мягким, пятый с жестким температурным регулированием — полученное изменение (увеличение) количества выведенного за сутки теплоносителя также характеризует эффективность мягкого температурного регулирования.

Испытания в начале кампании. На рис. 1, 2, а, 3, а показана работа энергоблока в начале кампании на разных этапах четвертого и пятого суточных циклов — изменение основных параметров управления, включая положение 12-й (H_{12}) и 11-й группы (H_{11}) ОР СУЗ, а также офсет-мощностная фазовая диаграмма в координатах мощность—аксиальный офсет и фазовая диаграмма в координатах мощность—давление пара (W -диаграмма).



Р и с. 1. Изменение основных параметров состояния энергоблока в четвертом суточном цикле (начало кампании)

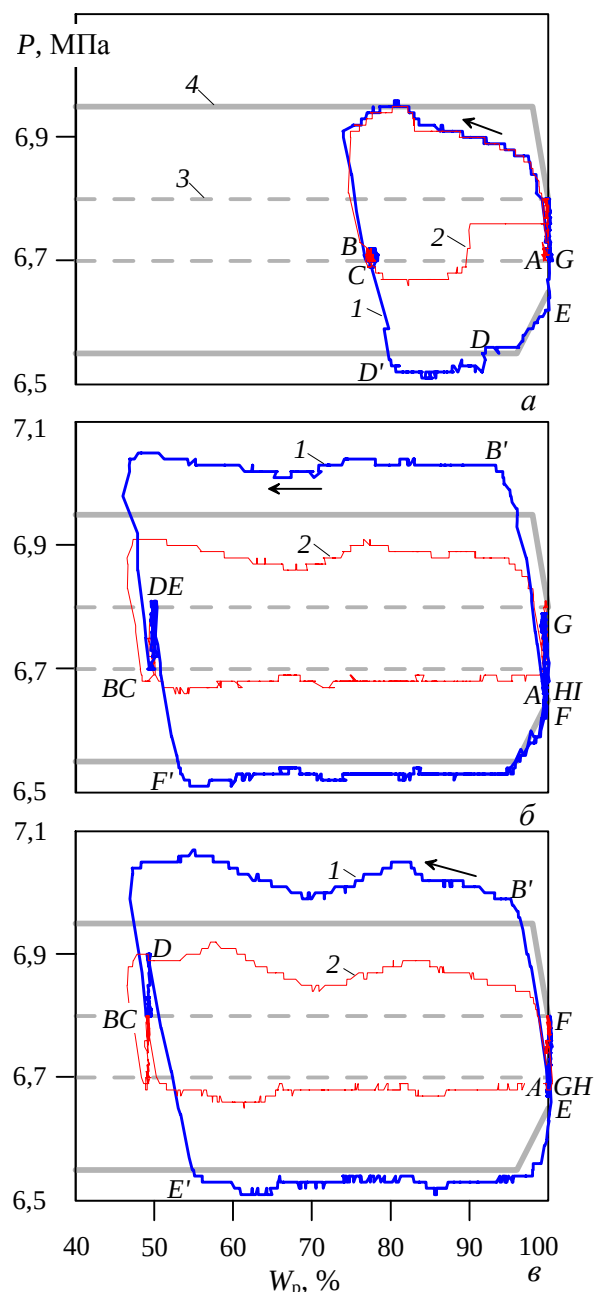
Снижением мощности турбины под управлением ЭЧСР выполняли разгрузку энергоблока до $70\% W_{\text{ном.т}}$ со скоростью $3\% W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин (этап А—В). При этом АРМР, поддерживая давление пара в штатном диапазоне (режим Т), снижал мощность реактора погружением ОР СУЗ. По достижении группой № 12 положения 55% высоты активной зоны оператор переключил АРМР на управление группой № 11, которая к окончанию разгрузки достигла положения 71%. Текущая точка офсет-мощностной диаграммы вышла за пределы рекомендуемой области (см. рис. 2, а, $AO_{\text{верх}}$, $AO_{\text{низ}}$ — границы рекомендуемой области), возбудилась нисходящая фаза аксиальных ксеноновых колебаний с амплитудой не менее 8%, судя по отклонению офсета от равновесного (AO^*) (см. рис. 1). Таким образом, мощность реактора снизилась в основном за счет верхней половины активной зоны в соответствии с алгоритмом локализации ксеноновых процессов. Как видно на рис. 3, а, при снижении мощности давление пара вышло за верхнюю границу штатного диапазона, что допускается кратковременно на стадии изменения мощности. В ходе работы на пониженной мощности в течение 5 ч (этап В—С) отравление ре-



Р и с. 2. Офсет-мощностная диаграмма: *a*, *б* — начало кампании, четвертый и девятый суточный цикл соответственно; *в* — конец кампании, девятый суточный цикл (*в*)

актора ксеноном компенсировали извлечением групп ОР СУЗ под управлением АРМР, поддерживающим давление пара в штатном диапазоне. Группа № 11 извлекалась полностью, группа № 12 — до положения 63%, что также подавляло нисходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний и поддерживало офсет в диапазоне от -24 до -19% .

Перед началом нагрузки энергоблока переключали АРМР в режим *C*. Нагрузку осуществляли последовательно в два этапа. На начальном этапе (этап *C—D*) энергоблок нагружали со скоростью $1\% W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин за счет увеличения мощности турбогенератора под управлением ЭЧСР. При этом сначала мощность реактора



Р и с. 3. *WP*-диаграмма: *a* — начало кампании, четвертый (1) и пятый суточный цикл (2); *б* — начало кампании, девятый (1) и десятый суточный цикл (2); *в* — конец кампании, девятый (1) и десятый суточный цикл (2); 3, 4 — границы штатного и расширенного диапазона давления пара соответственно

увеличивалась в режиме мягкого температурного регулирования в результате снижения давления пара — эффект саморегулирования (см. рис. 3, *a*, этап *C—D'*), затем АРМР, поддерживая давления пара в расширенном диапазоне, увеличивал мощность реактора извлечением группы № 12, что одновременно возвращало текущую точку офсет-мощностной диаграммы в рекомендуемую область и возбуждало восходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний.

На следующем этапе (этап $D—E$) по достижении группой № 12 положения 95% отключали АРМР. При этом ЭЧСР автоматически переключался в режим поддержания постоянного давления пара в расширенном диапазоне, мощность реактора продолжала увеличиваться в результате разотравления (выгорания ксенона). Для ускорения нагрузки ввели в первый контур 1,1 т дистиллята в ручном режиме, используя программу ЕС008. Средняя скорость нагрузки на этапе $D—E$ составила 0,07% $W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин, средняя скорость за весь период нагружения — 0,18% $W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин.

На начальном этапе работы энергоблока на номинальной мощности (этап $E—F$) разотравление реактора компенсировали в режиме мягкого температурного регулирования в результате увеличения давления пара в пределах расширенного диапазона. При этом на восходящей фазе аксиальных ксеноновых колебаний офсет достиг верхней границы рекомендуемой области. На следующем этапе (этап $F—G$) разотравление компенсировали погружением группы № 12 в темпе, обеспечивающем подавление восходящей фазы аксиальных ксеноновых колебаний с поддержанием офсета вблизи верхней границы рекомендуемой области.

Отравление реактора сначала компенсировали в режиме мягкого температурного регулирования за счет снижения давления пара (этап $G—H$), затем ввода 0,4 т дистиллята в ручном режиме и извлечения группы № 12 в темпе, обеспечивающем подавление нисходящей фазы

аксиальных ксеноновых колебаний с поддержанием офсета вблизи верхней границы рекомендуемой области (этап $H—I$).

Пятый суточный цикл выполняли, в максимальной степени повторяя четвертый, но вместо мягкого использовали жесткое температурное регулирование — давление пара поддерживали в штатном диапазоне (см. рис 3, а), изменение давления пара замещали вводом дистиллята или концентрата.

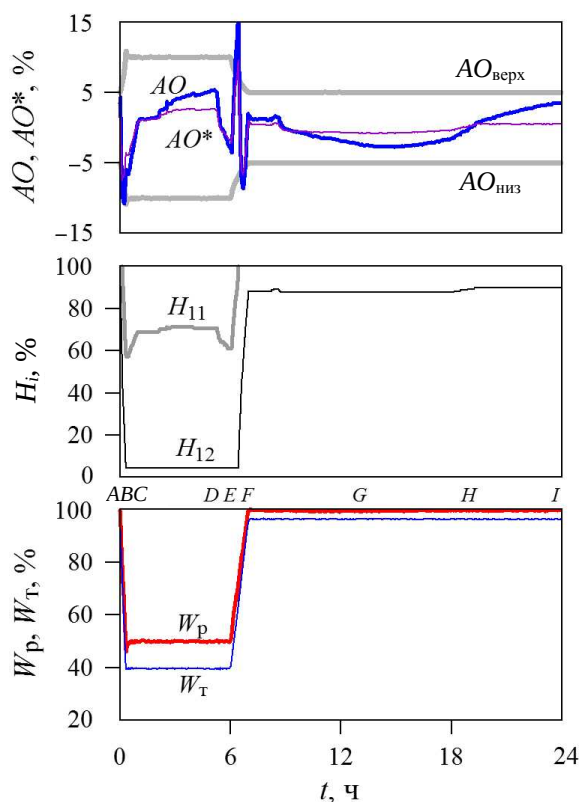
В табл. 1 приведены полученные в ходе испытаний численные параметры, характеризующие маневренные свойства энергоблока: нижний уровень мощности турбогенератора ($W_{\text{т.ниж}}$), средняя скорость увеличения мощности турбогенератора ($dW_{\text{т}}/dt$) и реактора ($dW_{\text{р}}/dt$), количество введенного дистиллята ($M_{\text{д}}$) и концентрата ($M_{\text{к}}$), ширина диапазона изменения давления пара (ΔP), предельное нижнее положение групп ОР СУЗ. Согласно этим данным в пятом цикле по сравнению с четвертым объем вводимого теплоносителя увеличился в 3,7 раза.

В последующих суточных циклах управление реактором осуществлялось по алгоритму минимизации отклонения офсета.

На рис. 2, б, 3, б, 4 показан девятый суточный цикл. Разгрузку энергоблока до 40% $W_{\text{ном.т}}$ (этап $A—B$) выполняли со скоростью 3% $W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин под управлением ЭЧСР, при этом мощность реактора снижалась под управлением АРМР (в режиме C) сначала за счет саморегулирования (см. рис. 3, б, этап $A—B'$), затем погружения ОР СУЗ: группа № 12 погрузилась до

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики маневренности энергоблока ВВЭР-1200

Цикл	$W_{\text{т.ниж}}$, %	$dW_{\text{т}}/dt$, %/мин	$dW_{\text{р}}/dt$, %/мин	$M_{\text{д}}$, т/сут	$M_{\text{к}}$, т/сут	ΔP , МПа	Нижнее положение групп, %		
							№ 12	№ 11	№ 10
Начало кампании									
4	70	0,18	0,15	1,5	—	0,45	55	71	—
5	70	0,18	0,15	4,6	1,2	0,29	55	72	—
9	40	0,88	0,78	24,1	7	0,54	4,5	57	—
10	40	0,88	0,79	28,5	9	0,25	4,5	52	—
Конец кампании									
4	70	0,21	0,18	5	—	0,54	50	59	—
5	70	0,21	0,18	13	—	0,25	50	60	—
9	40	0,77	0,68	124,6	3,3	0,56	4,5	32	87
10	40	0,77	0,68	151,1	6,5	0,27	4,5	28	83

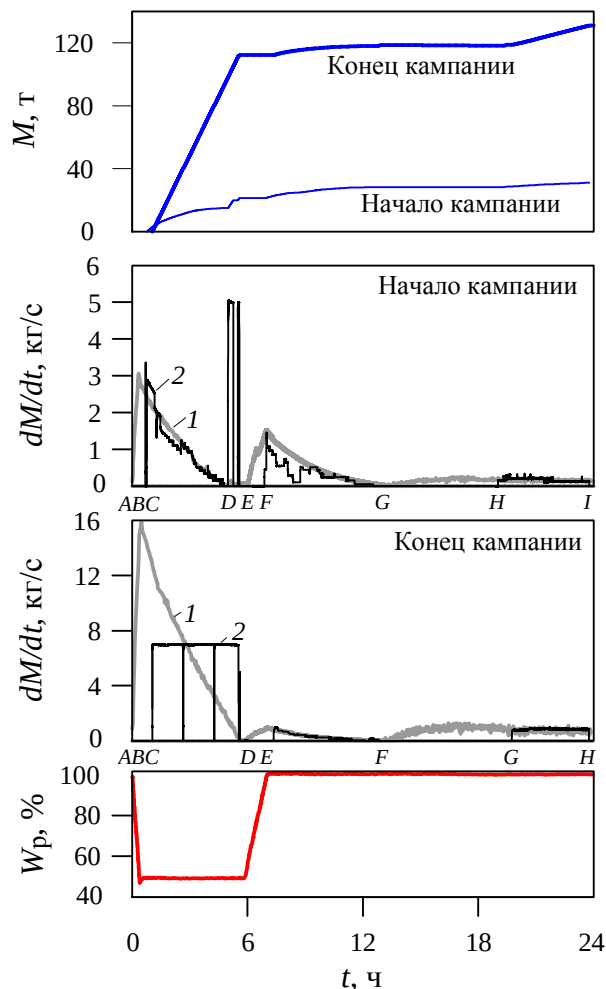


Р и с. 4. Изменение основных параметров состояния энергоблока в девятом суточном цикле (начало кампании)

нижнего предельного положения (4,5%), группа № 11 — до положения 57%. Офсет кратковременно вышел из рекомендуемой области, но к окончанию разгрузки вернулся в рекомендуемую область (см. рис. 2, б).

На начальном этапе работы на пониженной мощности (этап В—С) отравление реактора ксеноном компенсировали извлечением группы № 11 под управлением АРМР в режиме T , что обеспечило смещение офсета в центр рекомендуемой области, на следующем (этап С—D) — вводом дистиллята в автоматическом режиме по программе ЕС008, частично корректируя расчетный расход (рис. 5). На заключительном этапе (этап D—E) ввели 6,3 т дистиллята в ручном режиме, используя программу ЕС008, за счет этого группу № 11 погрузили от 65 до 60% высоты активной зоны для предстоящей нагрузки реактора за счет извлечения групп ОР СУЗ.

Перед началом нагрузки переключили АРМР в режим С. Энергоблок нагружали со скоростью $1\% W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин под управлением ЭЧСР (этап E—F), при этом сначала мощность реактора увеличивалась за счет саморегулирования (см. рис. 3, б, этап E—F'), затем извлечения групп (этап F'—F): группа № 11 извлекалась



Р и с. 5. Водобмен в начале и конце кампании, девятый суточный цикл: 1, 2 — расчетная и заданная скорость ввода дистиллята/концентрата в первый контур соответственно

полностью, группа № 12 до положения 88%. Офсет кратковременно выходил из рекомендуемой области, но к окончанию нагрузки вернулся в рекомендуемую область. На заключительном этапе скорость нагрузки турбины была снижена до $0,17\% W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин для ограничения мощности реактора, средняя скорость за весь период нагрузки составила $0,88\% W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин.

В ходе работы энергоблока на номинальной мощности (этап F—G) разотравление реактора компенсировали посредством увеличения давления пара и ввода концентрата. Концентрат вводили в автоматическом режиме по программе ЕС008, частично корректируя расчетный расход. Одновременно контролировали нисходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний.

Отравление реактора компенсировали сначала за счет снижения давления пара (этап G—H), затем извлечения группы № 12 и ввода дистиллята (этап H—I). Дистиллят вводили в

автоматическом режиме, используя программу ЕС008 (без корректирования расчетного расхода). Одновременно контролировали восходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний.

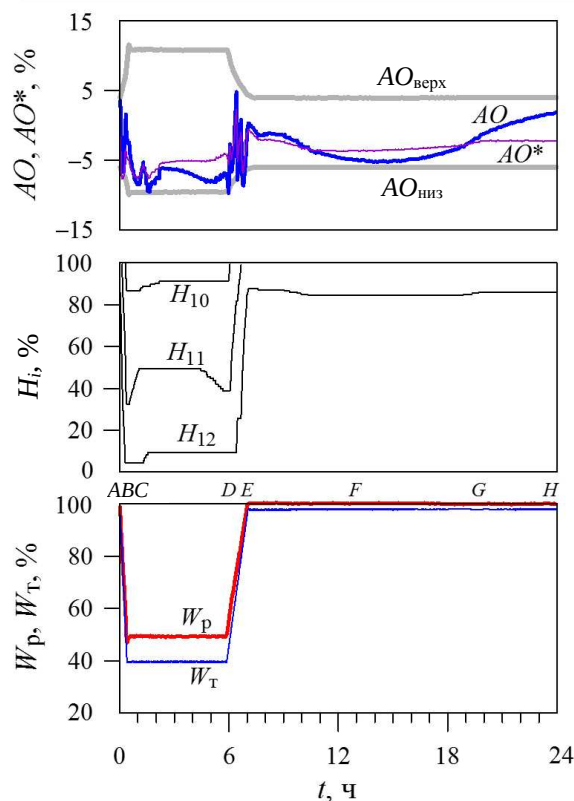
Десятый цикл выполняли, в максимальной степени повторяя девятый, но вместо мягкого использовали жесткое температурное регулирование — давление пара поддерживали в штатном диапазоне (см. рис. 3, б). В десятом цикле по сравнению с девятым объем вводимого теплоносителя увеличился в 1,2 раза.

Испытания в конце кампании. В конце кампании управление энергоблоком на первых пяти суточных циклах с разгрузкой до 70% $W_{\text{ном.т}}$ принципиально не отличалось от управления в начале кампании. Основные отличия заключались в том, что вводили больше дистиллята и не добавляли концентрат. Пятый цикл выполняли, в максимальной степени повторяя четвертый, но поддерживая давление пара в более узком диапазоне. В результате в пятом цикле по сравнению с четвертым объем вводимого теплоносителя увеличился в 2,6 раза.

Следующие пять суточных циклов по способу управления принципиально отличались от аналогичных в начале кампании (см. рис. 2, в, 3, в, 5, 6).

Разгрузку энергоблока до 40% $W_{\text{ном.т}}$ (этап А—В) выполняли со скоростью 2% $W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин под управлением ЭЧСР, мощность реактора снижалась АРМР (в режиме С) сначала за счет саморегулирования (см. рис. 3, в, этап А—В'), затем погружения групп: группа № 12 — до нижнего предельного положения, группы № 11, № 10 — до 32 и 87% соответственно. Офсет оставался в рекомендуемой области (см. рис. 2, в).

На начальном этапе работы на пониженной мощности (этап В—С) отравление реактора ксеноном компенсировали извлечением группы № 11 под управлением АРМР в режиме Т. Группа извлекалась без передачи движения на другие, что обеспечило смещение офсета к нижней границе рекомендуемой области в соответствии с предварительным расчетным прогнозом. На следующем этапе (этап С—D) отравление компенсировали вводом дистиллята. Согласно поступавшим из СВРК расчетным данным для компенсации отравления необходимо было вводить дистиллят начальным расходом 16 кг/с



Р и с. 6. Изменение основных параметров состояния энергоблока в девятом суточном цикле (конец кампании)

(см. рис. 5). Однако по линии тонкого впрыска расход ограничен 8,3 кг/с, поэтому дистиллят вводили постоянным расходом 7 кг/с. Всего ввели 112 т дистиллята в ручном режиме, используя программу ЕС008, что в соответствии с расчетным прогнозом обеспечило компенсацию отравления и поддержание групп в положении, необходимом для предстоящего увеличения мощности реактора.

Перед началом нагрузки переключили АРМР в режим С. Энергоблок нагружали со скоростью 0,83% $W_{\text{ном.т}}$ в 1 мин под управлением ЭЧСР (этап D—E). При этом сначала мощность реактора увеличивалась за счет саморегулирования (см. рис. 3, в, этап D—E'), затем за счет извлечения групп под управлением АРМР. Группы извлекались в режиме с передачей движения до тех пор, пока офсет не достиг верхней границы рекомендуемой области (см. рис. 2, в) — к этому времени группа № 10 была извлечена, группа № 11 достигла положения 81%. Затем извлекали группу № 12 в режиме без передачи движения, до достижения офсетом нижней границы рекомендуемой области, далее группы извлекались в режиме с передачей движения. Та-

ким образом был испытан способ удержания офсета в рекомендуемой области при увеличении мощности реактора (см. рис. 2, б, в).

При работе энергоблока на номинальной мощности (этап $E—F$) разотравление реактора компенсировали за счет увеличения давления пара, погружения группы № 12 и ввода концентрата. Концентрат вводили в автоматическом режиме, используя программу ЕС008 (без корректирования). Одновременно контролировали нисходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний.

Отравление реактора компенсировали сначала за счет снижения давления пара (см. рис. 3, в, этап $F—G$), затем извлечения группы № 12 и ввода дистиллята (см. рис. 5, 6, этап $G—H$). Дистиллят вводили в автоматическом режиме, используя программу ЕС008, с увеличением расчетного расхода на 20%. Одновременно контролировали восходящую фазу аксиальных ксеноновых колебаний.

Как и в начале кампании, десятый цикл выполняли, в максимальной степени повторяя девятый, поддерживая давление пара в более узком диапазоне (см. рис. 3, в), в результате в десятом цикле по сравнению с девятым объем вводимого теплоносителя увеличился в 1,2 раза (см. табл. 1).

Выводы. Испытания подтвердили эффективность применения в суточном графике нагрузки штатных алгоритмов управления энерговыделением реактора в сочетании с мягким температурным регулированием. Мягкое температурное регулирование с расширением диапазона давления пара от 0,1 до 0,4 МПа снизило выход радиоактивного теплоносителя на 20% и до 4 раз при использовании алгоритма минимизации отклонения офсета и алгоритма локализации ксеноновых процессов соответственно. В последнем случае не было необходимости вводить концентрат, что указывает на возможность работы в суточном графике без дополнительного вывода теплоносителя по сравнению с работой на постоянной мощности. Следует отметить недостаток данного способа управления — ограниченная скорость нагрузки.

Согласно данным табл. 2 изменение температуры теплоносителя на 1 °С изменяет мощ-

ность реактора на 2,1—2,4% $W_{\text{ном.р.}}$. Отклонение расчетных коэффициентов эффективности мягкого температурного регулирования от измеренных не превышает 25%, что позволяло выполнять расчетное прогнозирование с удовлетворительной точностью.

Т а б л и ц а 2. Коэффициент эффективности мягкого температурного регулирования, % $W_{\text{ном.р./}^{\circ}\text{C}}$

Момент кампании	Мощность			
	Снижение		Увеличение	
	Измерение	Расчет	Измерение	Расчет
Начало	–2,1	–1,6	–2,05	–1,61
Конец	–2,4	–3	–2,39	–2,59

Испытания подтвердили целесообразность проведенной на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС-2 модернизации системы борного регулирования с внедрением автоматического управления водообменом по сигналам, формируемым СВРК: оператор освобождается от рутинных операций подачи дискретных порций дистиллята/концентрата в ходе длительных ксеноновых переходных процессов.

В целом испытания подтвердили возможность работы энергоблока АЭС-2006 в суточном графике нагрузки как в начале, так и в конце топливной кампании в диапазоне изменения электрической мощности от 40 до 100% $W_{\text{ном.т.}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов П.Е., Семченков Ю.М., Малышев В.В. и др. Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 3, с. 123—129.
2. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000. — Там же, 2010, т. 109, вып. 6, с. 198—202.
3. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А. и др. Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора. — Там же, 2016, т. 121, вып. 3, с. 123—127.

Поступила в Редакцию 14.03.25
Принята к опубликованию 29.04.25