

Основные эксплуатационные характеристики реакторной установки второго блока Ново-Воронежской АЭС*

Л. М. ВОРОНИН, Ф. Я. ОВЧИННИКОВ, С. Н. САМОЙЛОВ, Ю. В. МАЛКОВ, В. К. СЕДОВ,
Ю. В. МАРКОВ, А. С. ДУХОВЕНСКИЙ, А. И. БЕЛЯЕВ (СССР)

УДК 621.311.2:621.039

Часть 1. ПУСК ВТОРОГО БЛОКА НОВО-ВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

В декабре 1969 г. введен в строй второй блок Ново-Воронежской АЭС. По принципиальным тепловым схемам, конструктивным решениям и типам основного оборудования второй блок имеет много общего с первым блоком. Вместе с тем этот блок является новым этапом развития АЭС с реакторами ВВЭР. Ниже приведены основные параметры второго блока:

Тепловая мощность реактора	1320 Мвт
Электрическая мощность	365 Мвт
Число петель первого контура	8
Давление в первом контуре	105 кг/см ²
Средняя температура теплоносителя первого контура	260° С
Давление сухого насыщенного пара, получаемого в парогенераторах	32 кг/см ²
Число турбогенераторов	5
Длительность первой кампании	195 эфф. суток

Состав первой топливной загрузки и ее ядернофизические характеристики приведены в табл. 1, 2.

Состав первой загрузки

Таблица 1

Обогащение урана, %	Число кассет	
	рабочих	АРК
1,0	36	19
1,5	51	15
2,0	93	27
3,0	96	12
Всего	276	73

Примечание. АРК — кассеты системы автоматического регулирования и компенсации избыточной реактивности.

* Часть 1 настоящего доклада написана Л. М. Ворониным, Ф. Я. Овчинниковым, С. Н. Самойловым, Ю. В. Малковым, В. К. Седовым, часть 2 — Ю. В. Марковым, А. С. Духовенским, А. И. Беляевым.

Увеличение тепловой мощности почти на 80% по сравнению с первым блоком достигнуто при одном и том же диаметре корпуса реактора за счет лучшего использования активной зоны: применения в рабочих кассетах твэлов меньшего диаметра (9,1 мм вместо 10,2 мм), уменьшения неравномерности энерговыделения в активной зоне. Все это существенно повысило ее энергонапряженность.

Аналогичным путем увеличена производительность парогенераторов: в корпусе парогенератора такого же диаметра, как и на первом блоке, применены U-образные трубки меньшего диаметра (Ø16 × 1,4 мм вместо Ø21 × 1,5 мм).

Запасы и эффекты изменения реактивности

Таблица 2

Параметры	ρ, %	Δρ, %
Запас реактивности:		
при 20° С	13,77	—
при 260° С	10,16	—
Температурный эффект (20—260° С)		—3,61
Мощностной эффект (0—100%)	—	—1,61
Стационарное отравление Xe ¹³⁵ *	—	—2,80
Стационарное отравление Sm ¹⁴⁹ *	—	—0,58
Запас реактивности на выгорание *	5,17	—
Эффективность системы АРК:		
при 20° С	—	20,61
при 260° С	—	26,71
Начальная подкритичность зоны:		
при 20° С	6,73	—
при 260° С	16,55	—

* При мощности 100%.

Это на 40% увеличило поверхность теплообмена и соответственно паропроизводительность.

Из принципиально новых решений, принятых в проекте второго блока, по сравнению с первым следует отметить такие, как применение самохода кассет СУЗ для аварийной защиты реактора; очистка продувочной воды первого контура на ионообменных установках; компенсация колебаний давления первого контура при помощи паровых компенсаторов объема; применение «сухой» системы перегрузки реактора и термического гайковерта для уплотнения крышки реактора; осуществление контроля за работой оборудования паропроизводительной установки при помощи информационных машин ИВ-500; расхолаживание реактора и снятие остаточного тепловыделения за счет естественной циркуляции по первому контуру и принудительной циркуляции воды по второму контуру.

Работа первого блока во время пуска второго блока облегчила выполнение многих операций по промывке и обкатке оборудования. Так, все турбогенераторы второго блока опробовались в работе на мощности 40—60 Мвт на паре от парогенераторов первого блока, что позволило осуществлять независимо пусковые работы по реакторному отделению.

Пусковые работы в реакторном отделении АЭС включали следующие операции: после-монтажную промывку первого и второго контуров, а также всех вспомогательных систем; горячую промывку первого контура и обкатку вспомогательных систем; загрузку подкритичной зоны, горячую обкатку первого контура, комплексную наладку СУЗ; ревизию внутрикорпусных устройств реактора и оборудования первого контура после горячей обкатки; загрузку активной зоны первой кампании; физический пуск реактора, выход на мощность 40%, комплексное опробование оборудования и технологических схем на мощности; постепенный вывод реактора на номинальную мощность.

Эти этапы имели место и при пуске первого блока Ново-Воронежской АЭС. Однако на втором блоке эти работы были выполнены в более сжатые сроки.

Промывка вспомогательных систем. После-монтажная промывка различных систем реактора проводилась сразу же по окончании монтажа каждой отдельной системы. Проведение этих работ облегчалось тем, что имелась возможность подать химически обессоленную воду в достаточном количестве от установки первого блока.

Четкие взаимоотношения между эксплуатационным и монтажным персоналом позволяли оперативно устранять выявленные дефекты, монтировать временные перемычки для промывки и обкатки и приводить системы в рабочее состояние сразу же после окончания промывки.

В итоге все вспомогательные системы первого контура были подготовлены к работе перед началом отмывки циркуляционных петель и реактора.

Опрессовка первого контура. В целях сокращения сроков проведения пуско-наладочных работ была проведена предварительная опрессовка первого контура при давлении 150 кг/см² (без электрической части главного циркуляционного насоса ГЦН, штатного верхнего блока и внутрикорпусных устройств реактора). Улитки ГЦН были уплотнены временными крышками, а корпус реактора — стендовой крышкой.

Корпус реактора разогревался до 100° С за счет подачи пара давлением 5,3 кг/см² от паровой магистрали первого блока.

Промывка первого контура. До начала промывки внутри корпуса реактора была смонтирована металлическая конструкция, разделяющая внутренний объем реактора на две части. Это позволяло промывать все циркуляционные петли одним насосом. Циркуляция теплоносителя осуществлялась по следующему тракту (см. рисунок): с напора ГЦН-12 теплоноситель подавался под шахту реактора, затем через холодную нитку промываемой петли, улитку ГЦН, парогенератор и открытую задвижку на горячей нитке поступал в верхний объем реактора и через горячую нитку петли 12 и парогенератор 12 — на всас ГЦН-12. Гидравлическое сопротивление такого тракта теплоносителя обеспечило работу ГЦН в расчетном режиме. Перепад давления ГЦН-12 при температуре воды первого контура 32° С составлял 5 кг/см², а при температуре 180° С — 6,1 кг/см².

Разогрев и поддержание стабильной температуры во время промывки осуществлялись за счет подачи в корпус реактора через крышку питательной воды второго контура первого блока с температурой до 195° С.

Следующая промываемая петля подключалась без отключения ГЦН-12. Промывка осуществлялась при давлении в реакторе 39—44 кг/см², причем компенсаторы объема полностью заполнялись водой, а поскольку первый контур был соединен трубопроводом диаметром 50 мм со вторым контуром первого работающего блока, то давление первого контура соответствовало

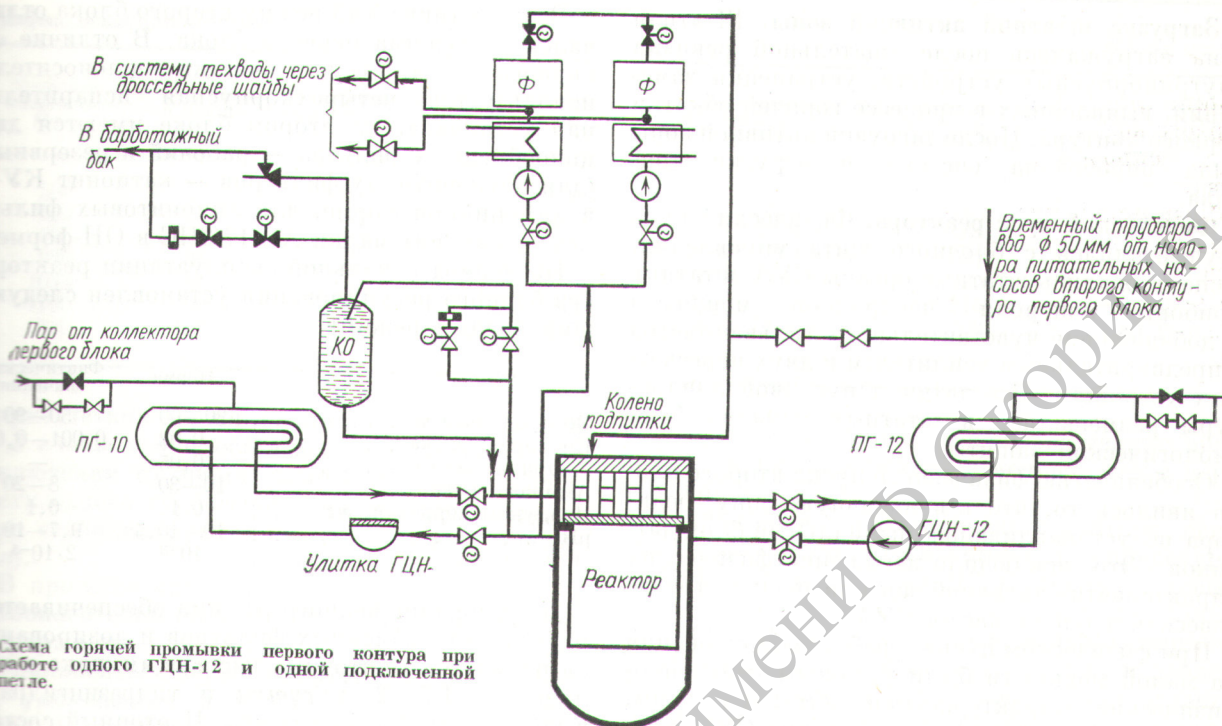


Схема горячей промывки первого контура при работе одного ГЦН-12 и одной подключенной петле.

напору питательных насосов первого блока. Промытая петля отключалась от общей части первого контура запорными задвижками; в улитку ГЦН устанавливался статор насоса. Промывка первого контура была проведена до окончания монтажа всех ГЦН, что ускорило пуск второго блока примерно на два месяца.

Горячая обкатка оборудования первого контура. Подкритическая активная зона собиралась из штатных рабочих кассет, штатных кассет системы управления и защиты (СУЗ). Дополнительно загружалось 76 бористых поглощающих вставок вместо рабочих кассет для обеспечения возможности взвода всех 73 штатных кассет СУЗ для проверки и наладки системы.

После загрузки подкритической зоны (с 6 по 28 октября 1969 г.) была установлена и уплотнена штатная крышка реактора со всеми приводами СУЗ. Предварительно схема управления механизмами СУЗ была налажена и опробована во время нахождения крышки в шахте ревизии. Горячая обкатка оборудования первого контура проводилась с 4 по 17 ноября 1969 г. В этот период было опробована работа всех ГЦН в различных режимах (от одного работающего ГЦН до восьми); температура первого контура изменялась в пределах 60—220° С. В это же время проводилась комплексная наладка СУЗ, системы контроля и автоматики перво-

го контура. Также измерялись параметры оборудования.

Фактическое гидравлическое сопротивление первого контура оказалось меньше расчетного. Это позволило достичь проектного расхода теплоносителя при работе семи петель (проектный расход составлял 48 000 м³/ч при напоре ГЦН 5,2 кг/см², а на семи петлях получен расход 49 000 м³/ч при напоре ГЦН 4,3 кг/см² в пересчете на температуру — 250° С).

При работе восьми петель расход теплоносителя через реактор достигал 53 000 м³/ч (в пересчете на проектные параметры), что на 8,3% превышало расчетное значение.

В результате горячей обкатки было установлено, что для обеспечения проектной мощности активной зоны и необходимой паропроизводительности блока достаточно семи циркуляционных петель парового контура.

Было принято решение о работе второго блока на номинальной мощности при семи ГЦН, восьмая петля оставлена резервной.

Ревизия внутрикорпусных устройств. После горячей обкатки первого контура крышка реактора была снята, активная зона выгружена, извлечены внутрикорпусные устройства, вскрыты коллекторы парогенераторов. Осмотр оборудования не выявил каких-либо серьезных замечаний и дефектов.

Загрузка штатной активной зоны. Штатная зона загружалась после тщательной ревизии внутрикорпусных устройств, устранения замечаний, выявленных в процессе горячей обкатки первого контура. После загрузки активной зоны была опробована система перегрузки топлива.

Физический пуск реактора. Физический пуск осуществлялся с блочного щита управления. Использовались штатные органы СУЗ, штатные приборы контроля нейтронной мощности с добавлением чувствительного гальванометра с предварительным усилителем и двух пересчетных устройств. Все датчики пусковой аппаратуры размещались в штатных каналах бака биологической защиты.

Особенностью физического пуска второго блока явилось то, что в активную зону реактора не устанавливался специальный блок датчиков. Это исключило искажение физических характеристик активной зоны, позволило точнее взвесить группы кассет СУЗ.

При физическом пуске и работе оборудования на малой мощности были уточнены нейтронно-физические характеристики активной зоны, проведена дополнительная проверка СУЗ, контрольно-измерительных приборов и аппаратуры, блокировок, герметичности первого контура, схем надежного электропитания, работы ГЦН и вспомогательных систем при проектном давлении и температуре воды 240°С.

Синхронизация первого турбогенератора второго блока с энергосистемой была осуществлена 27 декабря 1969 г.

Энергетический пуск. Комплексное опробование систем и оборудования проводилось при тепловой мощности реактора 500 Мвт. На этой мощности проверялась работа турбогенераторов на номинальных параметрах, налаживался первоначальный водно-химический режим первого контура, исследовались распределение тепловыделения в объеме активной зоны, мощностью эффект и эффект отравления реактора, устойчивость работы блока в энергосистеме.

Мощность реактора второго блока осваивалась последовательно на уровнях 5; 38; 50; 60; 75; 80; 90; 100%. Во время работы на фиксируемом уровне мощности проводились различные эксперименты по уточнению динамических характеристик первого и второго контуров. Одновременно отрабатывалось поддержание заданного водного режима, а начиная с мощности 500 Мвт осваивалась эксплуатация первого контура с борным теплоносителем при концентрации борной кислоты до 3 г/кг.

Водно-химический режим второго блока отличался от режима первого блока. В отличие от первого блока, где для очистки теплоносителя используется четырехкорпусная испарительная установка, на втором блоке имеются два ионообменных фильтра — рабочий и резервный (для катионитовых фильтров — катионит КУ-2 в аммонийной форме, для анионитовых фильтров — анионит марки АВ-17-8ЧС в ОН-форме).

На период начальной эксплуатации реактора без борного регулирования установлен следующий водный режим:

	Норма	Фактические значения
Водород, н.м.л/кг	30—60	50—90
Кислород, мг/кг	0,02	0,001—0,02
Хлориды, мг/кг	0,05	—
Аммиак, мг/кг	10—30	8—20
Продукты коррозии, мг/кг	0,1	0,1
pH	10—10,5	9,7—10,2
A, кюри/л	10 ⁻³	2·10 ⁻⁵

Поддержание водного режима обеспечивается работой ионообменных фильтров и дозированием на всасе подпиточных насосов аммиака в количестве 1,5—2 кг/сутки и гидразингидрата в количестве 30—40 г/сутки. Изотопный состав теплоносителя: F¹⁸ 1·10⁻⁵ кл; радиоактивные благородные газы (Xe¹³³, ¹³⁵) 2·10⁻⁷; A⁴¹ до 1·10⁻⁵; следы Na²⁴ (при переходном режиме до 3·10⁻⁵ кл); следы Mn⁵⁶ (при переходном режиме до 3·10⁻⁵ кл).

С 7 марта 1970 г. второй блок начал работать на мощности в режиме борного регулирования при концентрации борной кислоты в теплоносителе ~2,0 г/л. Нормы водного режима практически оставались без изменений, кроме показателя pH, который составлял 7,5—10,0.

Наличие борной кислоты в теплоносителе изменяет некоторые физические характеристики активной зоны реактора. Так, энерговыделение в активной зоне стало на ~15% равномернее. С другой стороны, применение теплоносителя с бором значительной концентрации изменяет динамику реактора. Опыты, проведенные на втором блоке, показали, что температурный коэффициент реактивности при работе с борной кислотой (концентрация 2,9 г/кг) уменьшился почти в 2,5 раза: с чистой водой температурный коэффициент при рабочей температуре составлял 4,3·10⁻⁴ 1/°С, а в присутствии бора (указанной концентрации) он стал равным 1,7·10⁻⁴ 1/°С.

Снижение величины температурного эффекта реактивности уменьшает саморегулирование реактора, но на втором блоке саморегулирование

График освоения мощности

Таблица 3

Тепловая мощность, <i>Мвт</i>	Процент от номинальной мощности	Электрическая мощность, <i>Мвт</i>	Дата подъема мощности	Дата конца работы на данном уровне мощности	Число часов работы на данной мощности	Число эффективных суток на данной мощности
500	38	130	29/XII 1969 г.	24/I 1970 г.	615	9,76
660	50	182	27/I 1970 г.	10/III 1970 г.	802	27,3
795	60	220	10/III 1970 г.	24/III 1970 г.	347	35,84
990	75	275	24/III 1970 г.	27/III 1970 г.	90	38,48
1055	80	290	1/IV 1970 г.	9/IV 1970 г.	216	44,62
1190	90	325	9/IV 1970 г.	14/IV 1970 г.	102	50,14
1320	100	365	14/IV 1970 г.			

в присутствии борной кислоты с концентрацией до 3 г/кг сохранилось в достаточной мере (при отключении во время работы на полной мощности одного турбогенератора параметры реактора стабилизируются за счет саморегулирования).

В процессе наладки работы блока с борным теплоносителем был освоен режим длительного поддержания заданной концентрации бора в теплоносителе первого контура, а также режимы уменьшения и увеличения концентрации бора. В результате этого стало возможным держать кассеты СУЗ в таком положении, при котором обеспечивается минимальный коэффициент неравномерности тепловыделения по объему активной зоны реактора. Наименьший коэффициент неравномерности тепловыделения достигается при размещении 12-й группы АРК в среднем по высоте активной зоны положения (в реакторе 12 групп АРК, которые при пуске реактора извлекаются в порядке их нумерации). Это позволило в течение всей кампании эксплуатировать реактор с минимальным коэффициентом неравномерности тепловыделения.

Применение паровых компенсаторов объема для компенсации изменения давления первого контура позволило отказаться от ввода азота в компенсаторы объема и в целом упрощает эксплуатацию. Снятие динамических характеристик паровых компенсаторов на втором блоке показало их хорошую компенсирующую способность. Давление первого контура в переход-

ных процессах, таких, как срабатывание аварийной защиты, изменяется меньше, чем в первом блоке.

Номинальное давление первого контура, равное 105 кг/см², поддерживается при температуре в компенсаторах объема 313° С. В случае повышения давления первого контура выше номинального автоматически открывается впрыск с напора ТЦН в компенсатор объема и давление за счет охлаждения паровой фазы падает. Температура в компенсаторе объема (а следовательно, и давление первого контура) поддерживается автоматически регулятором температуры, который воздействует на трансформатор, питающий рабочую группу электронагревателей. Напряжение автотрансформатора может изменяться в пределах 0—380 в.

Второй блок был выведен на 100%-ную мощность (365 *Мвт* эл.) 14 апреля 1970 г. (табл. 3).

Полный сброс нагрузки блока в пусковой период был только один раз из-за неполадки в схеме электропитания СУЗ.

В результате проведенных пуско-наладочных работ были выявлены некоторые недостатки в проектных схемах и оборудовании, которые были устранены до вывода блока на 100%-ную мощность (в частности, устранены дефекты в узлах уплотнения чехлов СУЗ на крышке реактора и в нагревательных элементах компенсаторов объема, повышена надежность работы схемы электропитания СУЗ, устранена нестабильность показаний информационно-вычислительных машин).

Часть 2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В конце декабря 1969 г. в энергосистему Европейской части СССР был включен второй блок Ново-Воронежской АЭС электрической мощностью 365 *Мвт*. Среди действующих и созда-

ваемых ВВЭР этот блок занимает особое место. Такое положение обусловлено тем, что реактор второго блока (В-3М) является, с одной стороны, дальнейшим развитием технических идей, поло-

женных в основу реактора первого блока станции (В-1), и в этом смысле может рассматриваться как его модернизация, а с другой стороны, активная зона реактора В-3М по своим техническим характеристикам и конструктивным решениям мало отличается от активных зон проектируемых и сооружаемых реакторов электрической мощностью 440 Мвт (В-440). В этом отношении реактор В-3М является прототипом второго поколения ВВЭР.

Концепция, положенная в основу разработки второго блока, заключалась в том, чтобы на базе проверенных технических решений и освоения производства оборудования (в то время уже имелся опыт проектирования и изготовления в связи с сооружением первого блока НВАЭС и АЭС «Райнсберг» в ГДР) создать реактор существенно большей (на ~75%) мощности, чем мощность первого блока. Такое увеличение мощности должно было быть достигнуто в активной зоне прежних размеров ($2,5 \times 3$ м) за счет повышения удельной энергонапряженности при длительности рабочего периода между частичными перегрузками горючего (в среднем три за кампанию) ~6500 эфф. ч.

Возможность увеличения теплосъема с активной зоны обеспечивалась в основном двумя средствами: развитием поверхности теплообмена (349 кассет, в каждой из которых содержится по 126 стержней диаметром 9,1 мм) и приближением средних значений тепловых параметров к максимальным, достигаемым выравниванием поля энерговыделения в объеме реактора. Выравнивание поля энерговыделения достигнуто благодаря размещению горючего с повышенными размножающими свойствами на периферии активной зоны и дополнительно применением раствора борной кислоты в теплоносителе первого контура, что позволило иметь в активной зоне минимально необходимое количество частично введенных поглотителей системы компенсации реактивности. Использование жидкостного регулирования реактивности при наличии системы механических регуляторов (общим числом 73), способных обеспечить подкритичность разогретого реактора в холодном состоянии без бора в теплоносителе, позволяет накопить промышленный опыт применения борной кислоты в условиях, облегченных с точки зрения выполнения требований ядерной безопасности.

Начавшееся в декабре 1969 г. поэтапное освоение мощности второго блока завершилось 14 апреля 1970 г. выводом его на проектные параметры. Назначение каждого этапа обуслов-

ливалось программой испытаний оборудования и освоения мощности блока. Ниже рассмотрены те испытания и их результаты, которые определяли режимы штатной эксплуатации блока и были связаны с применением в теплоносителе раствора бора.

* * *

При определении допустимых режимов эксплуатации реактора исходят из требований обеспечения безопасных условий работы твэлов не только в стационарных, но и в ожидаемых нестационарных или аварийных режимах. При этом предел мощности определяется в соответствии с требованием того, чтобы тепловой поток или максимальное приращение энтальпии не достигали таких значений, при которых возникают условия кризиса теплообмена на поверхности твэла. Одновременно должно отсутствовать значительное проплавление центральной части твэла, чтобы исключить распухание горючего или разрушение оболочки элемента.

В ВВЭР, использующих в первом контуре малоинерционные насосы с электроснабжением от основных генераторов, возможные эксплуатационные нарушения режима охлаждения активной зоны обуславливаются главным образом авариями во внешних электрических цепях станции. При этом даже кратковременные (длительностью до 1 сек) нарушения электроснабжения оказываются заметными для малоинерционных насосов и вызывают значительное сокращение их производительности. Из-за применения в качестве горючего двуокиси урана процесс отвода тепла от твэлов к теплоносителю весьма инерционен и скорость изменения мощности реактора даже при аварийном его останове оказывается существенно меньше скорости аварийного сокращения расхода теплоносителя.

В связи с указанными особенностями определяющими для выбора безопасных параметров стационарной эксплуатации ВВЭР являются режимы нестационарной циркуляции. Протекание же таких процессов зависит не только от гидравлических характеристик контура циркуляции, но и от динамических характеристик главных циркуляционных насосов (ГЦН). С целью получения достоверных сведений о них в период пуска второго блока была выполнена серия экспериментов, согласованных в своей постановке с излагаемой ниже схемой расчетного анализа процесса.

Для описания процесса нестационарной циркуляции использовали соотношения:

$$\tau_i \frac{dG_i}{dt} = \Delta P_i - \zeta_i G_i |G_i| - \Delta P_0 - \text{изменение}$$

расхода теплоносителя в циркуляционной петле (i -й); $\tau \frac{G}{dt} = \Delta P_0 - \zeta_0 G |G|$ — изменение расхода теплоносителя в реакторе. Здесь $\tau_i = \sum_j \frac{L_j}{S_j g} (L_j - \text{длина участка контура с проходным сечением } S_j); \tau = \frac{L}{S g} (L - \text{длина общей части контура с эффективным проходным сечением } S); G = \Sigma G_i; \zeta_i, \zeta_0$ — эффективные коэффициенты гидравлического сопротивления петель и их общей части.

Напор, развиваемый насосом, как функция скорости вращения его ротора ω_i и расхода G_i представляется в виде $\Delta P_i = A \omega_i^2 - B \omega_i G_i - C G_i |G_i|$. Скорость вращения ротора связана с динамическими характеристиками насоса соотношением

$$\mathcal{J} \frac{d\omega_i}{dt} = M_{врi} - M_{сi},$$

где $M_{врi} = f(U_i, \omega_i)$ — момент вращения, зависящий от напряжения U_i и оборотов; $M_{сi} = f(\omega_i)$ — момент сопротивления; $\mathcal{J} = \text{const}$ — момент инерции вращающихся частей насоса. Таким образом, зависимости $M_{врi} = f(U_i, \omega_i)$ и $M_{сi} = f(\omega_i)$ могут быть найдены, если зарегистрировать выбег насоса (изменение числа его оборотов после отключения питания электродвигателя) и определить изменение числа оборотов насоса при его пуске. Зависимость $\Delta P_i = f(\omega_i, G_i)$ может быть найдена, если зафиксировать во времени изменение напора, развиваемого насосом, а связь напора с расходом может быть найдена, если известно изменение во времени перепада давления на каком-либо участ

Рис. 2. Сравнение результатов расчета режима короткого замыкания на линии 220 кВ на двух насосах при шести работающих с фактическими данными ($\times$) по изменению напряжения (ω), числа оборотов насосов (δ), расхода теплоносителя (α) и перепадов давления ($\Delta P_{нас}$) на насосах ($\Delta P_{нас}$) и на парогенераторах ($\Delta P_{пг}$):

— расчетные кривые; 1 — расход в петлях четырех насосов; 2 — расход в реакторе; 3 — расход в петлях двух насосов.

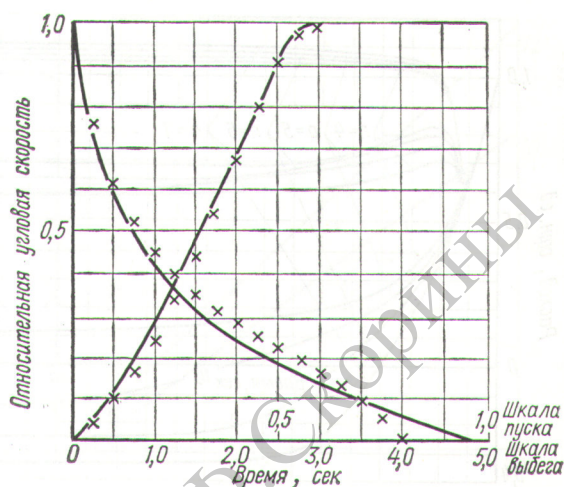
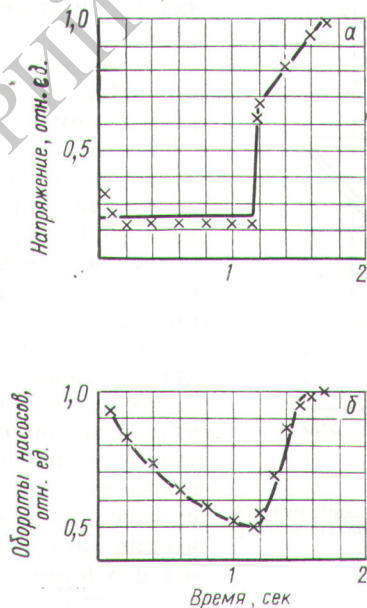
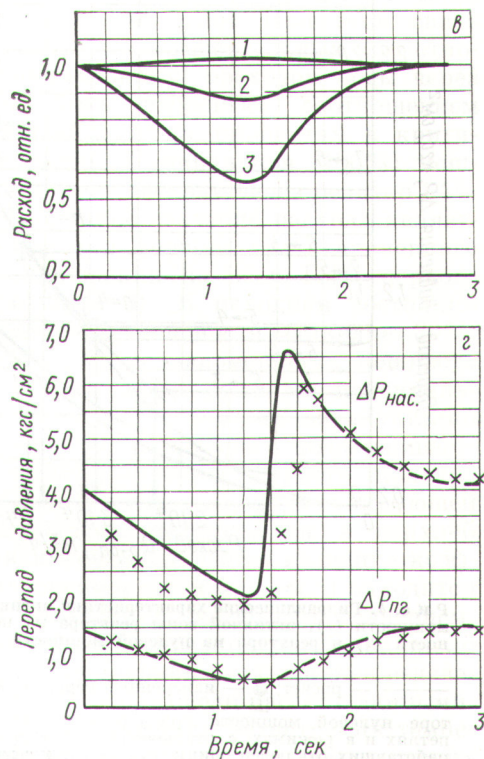


Рис. 1. Сравнение расчетных кривых выбега и пуска насоса с результатами эксперимента на реакторе:

— расчетные кривые; $\times$ — экспериментальные точки.

стке циркуляционной петли. С этой целью в процессе испытаний производилось осциллографирование следующих параметров: $U = f(t)$ — питающее напряжение ГЦН; $I = f(t)$ — ток в фазе электродвигателя ГЦН; $n = f(t)$ — обороты ротора насоса; $\Delta P_n = f(t)$ — напор насо-



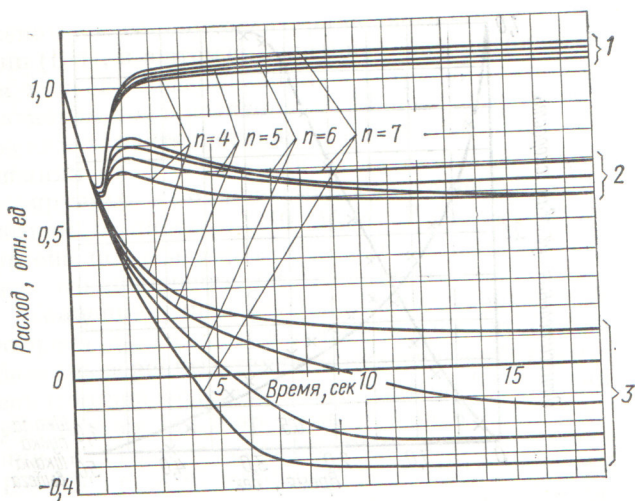


Рис. 3. Изменение расхода в реакторе и петлях в режиме обесточивания всех насосов при коротком замыкании на время $\Delta t = 1,0$ сек с последующим восстановлением оборотов на всех ГЦН, кроме двух:

1 — расход в петлях с насосами, восстанавливающими свои обороты; 2 — расход в реакторе; 3 — расход в петлях с насосами, не восстанавливающими свои обороты.

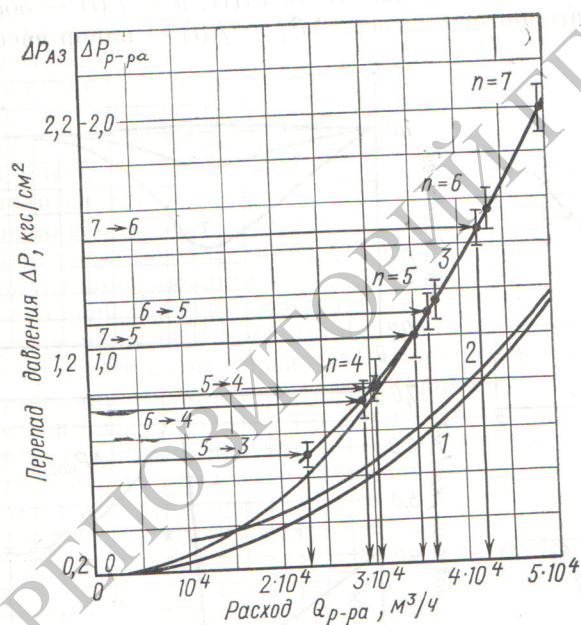


Рис. 4. Гидравлические характеристики активной зоны нулевой мощности (1), активной зоны реактора на номинальной мощности (2) и реактора на нулевой мощности (3):

— расчет; ● — измеренный перепад давления на реакторе нулевой мощности при n работающих циркуляционных петлях и в режимах с отключением насосов (7 → 6 — из семи работавших отключен один); $P_{1к} = 105$ кгс/см²; $T_{вх} = 250^\circ \text{C}$.

са; $\Delta P_{пр} = f(t)$ — перепад давления на парогенераторе циркуляционной петли с испытывавшимся насосом.

На рис. 1 приведено сравнение расчетных и измеренных кривых выбега и пуска ГЦН, которое подтверждает возможность расчетного описания действительного процесса при пуске и выключении насосов.

Справедливость распространения полученных в этих опытах динамических характеристик насоса на другие случаи нестационарной циркуляции и правильность описания изменения расхода теплоносителя в первом контуре иллюстрируется рис. 2, где представлено сравнение результатов расчета и эксперимента с трехфазным коротким замыканием на линии 220 кВ длительностью 1 сек. Изменение напора насоса и расхода в циркуляционной петле как функций перепада давления на парогенераторе фиксировалось малоинерционными тензометрическими датчиками давления.

Полученные результаты подтвердили правильность расчетного описания процессов нестационарной циркуляции в первом контуре в вероятных эксплуатационных ситуациях, вызванных нарушением электроснабжения ГЦН и оказывающих решающее влияние на величину допустимой мощности при стационарной работе реактора. Определяющим для выбора параметров стационарной эксплуатации второго блока является возможный аварийный режим снижения напряжения одновременно на всех насосах с последующим (за счет отключения повреждения и работы насосов на выбеге турбогенераторов) восстановлением циркуляции на всех ГЦН, кроме двух *.

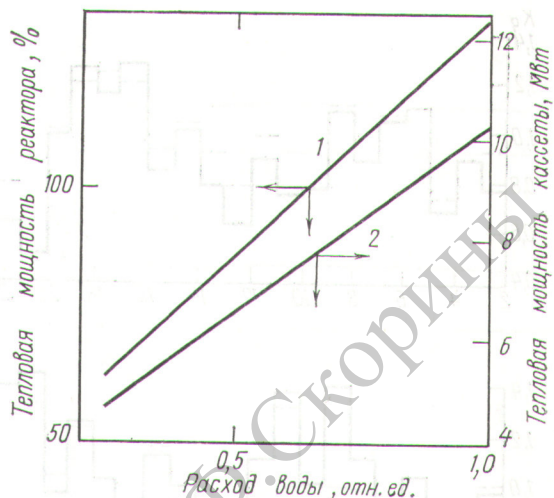
Расчеты изменения расхода в таком режиме представлены на рис. 3. Сопоставление расчетных значений расхода в установившемся режиме с полученными по результатам измерений перепада давления на реакторе можно проинтерпретировать, используя данные рис. 4. Сравнение кривых 1 и 2 рис. 4 показывает, в частности, слабое влияние на гидравлическое сопротивление активной зоны мощности реактора при характерном для активной зоны ее распределении среди тепловыделяющих кассет. Это обстоятельство позволило в расчетах использовать постоянное значение коэффициента гидравлического сопротивления активной зоны. (Гидравлические характеристики активной зоны построены с учетом веса столба воды высотой 2,5 м.)

* При этом предусматривается возможность длительной и незамеченной неисправности одного из генераторных выключателей.

Как уже отмечалось, исходная мощность реактора выбирается такой, чтобы в процессе ожидаемого аварийного сокращения расхода теплоносителя в первом контуре не могли реализоваться условия кризиса теплообмена на поверхности твэла в любом участке активной зоны. Схема решения задачи сводится к следующему. По известному изменению расхода теплоносителя через активную зону из условия равенства перепада давления на параллельных каналах определяются достигаемые в аварийном процессе значения расхода воды через тепловыделяющие кассеты в соответствии с их гидравлическими характеристиками, зависящими от мощности. Далее на основании соотношений, характеризующих условия кризиса теплообмена, определяется количественная связь между мощностью кассеты и минимальным значением расхода теплоносителя в ней, при котором в рассматриваемом аварийном процессе возникает расчетный кризис теплообмена на поверхности твэла в наиболее теплонеприятных участках пучка твэлов кассеты.

Ориентация на минимальные значения расхода теплоносителя оправдывается, на наш взгляд, следующими соображениями. Рассматривая задачу нестационарной теплопроводности твэла в упрощенной модели (подобно тому, как это делается в работе [1]), предполагающей мгновенное сокращение теплоотдачи в начальный момент и такое же мгновенное ее восстановление через некоторый интервал времени, можно получить аналитическое решение временного поведения температуры оболочки твэла. Такой анализ показывает, что возникшие условия повышенной температуры оболочки сохраняются еще довольно длительное время даже после восстановления исходной теплоотдачи к теплоносителю. В связи с этим можно ожидать, что восстановление расхода теплоносителя в условиях повышенной температуры оболочки не сразу устранит начавшийся кризис теплоотвода и неблагоприятный процесс еще более затянется.

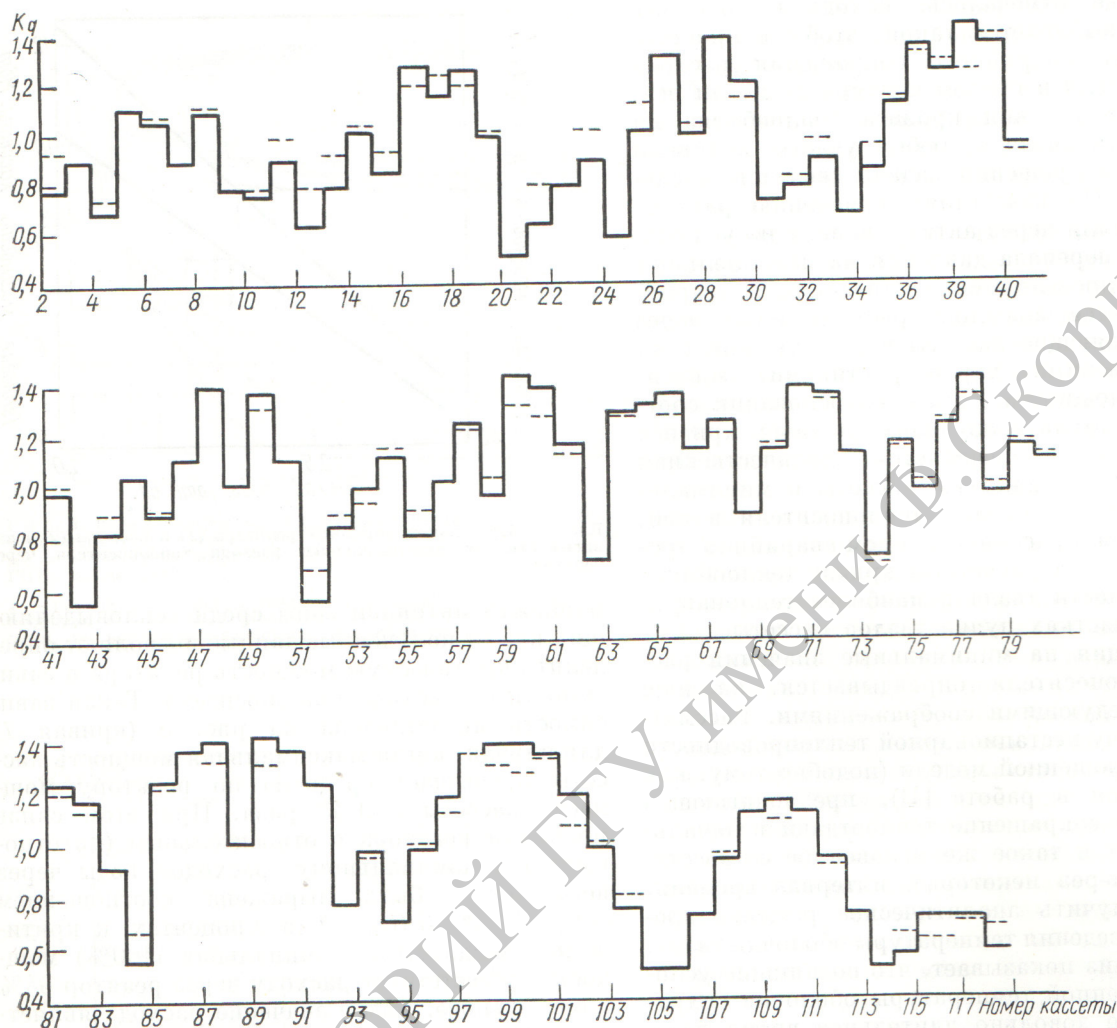
Использованная при определении допустимых условий эксплуатации реактора зависимость критической мощности тепловыделяющей кассеты (т. е. мощности, при которой возникает кризис теплоотдачи на поверхности твэлов) от расхода теплоносителя через реактор, основанная на результатах экспериментов с полномасштабными по длине пучками стержней реактора второго блока, представлена на рис. 5 (кривая 2). При известных коэффициентах запаса и неравномерности распределения



Р и с. 5. Предельная мощность реактора (1) и кассеты (2) в зависимости от относительного расхода теплоносителя через реактор.

мощности активной зоны среди тепловыделяющих кассет полученные данные позволяют определить критическую мощность реактора в зависимости от расхода теплоносителя. Такая зависимость представлена на рис. 5 (кривая 1) для случая, когда максимальная мощность кассеты превышает среднюю по реактору мощность кассеты в 1,43 раза. При этом связь мощности реактора с относительным (по отношению к номинальному) расходом воды через него может быть выражена соотношением $Q/Q_{кр} = 130 (G/G_{ном})^{0,6}$ (в процентах к критической мощности). Номинальная (100%) мощность соответствует расходу через реактор 64% номинального. Такое значение расхода является минимальным в режиме кратковременного снижения напряжения на всех ГЦН первого контура (см. рис. 3). В исходном состоянии запас до критической мощности составляет 30%.

Указанная выше неравномерность мощности тепловыделяющих кассет является максимальной для номинального режима эксплуатации реактора, критичность которого поддерживается бором в теплоносителе первого контура и поглотителями лишь одной регулирующей группы, нормально находящейся в верхней половине активной зоны. Такая величина коэффициента неравномерности мощности находится в хорошем согласии с расчетным значением, о чем свидетельствуют представленные на рис. 6 результаты сопоставления расчетов распределения мощности реактора среди кассет с данными, полученными на основании регистрации температуры воды на выходе из тепловыделяющих



Р и с. 6. Относительное распределение мощности по кассетам K_q активной зоны реактора второго блока НВ АЭС при извлечении стержней рабочей группы СУЗ на 100 см:

— — — — среднее по результатам измерений значение по секторам симметрии.

кассет. Относительная мощность кассеты при этом определялась из соотношения

$$K_{qi} = \frac{\frac{\sum_j t_{j\text{пет}}^{\text{ВХ}} G_j}{\sum_j G_j} \cdot \frac{g_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i}}{\frac{\sum_i t_{ik}^{\text{ВЫХ}} g_i}{\sum g_i} - \frac{\sum_j t_{j\text{пет}}^{\text{ВХ}} G_j}{\sum G_j}},$$

где $t_{ik}^{\text{ВЫХ}}$ — температура воды на выходе из рассматриваемой кассеты; $t_{j\text{пет}}^{\text{ВХ}}$, G_j — температура воды на входе циркуляционной петли в реактор и расход теплоносителя через нее соответственно;

но; g_i — относительный расход воды через кассету.

Использование бора для компенсации запаса реактивности способствовало выравниванию поля энерговыделения в реакторе; такой режим является основным при эксплуатации второго блока. В то же время присутствие бора в теплоносителе первого контура оказывает влияние на такое важное свойство реактора, как устойчивость его работы на мощности.

Устойчивость работы реактора на мощности в значительной мере определяется его саморегулированием, возможным благодаря отрицательным коэффициентам реактивности по мощ-

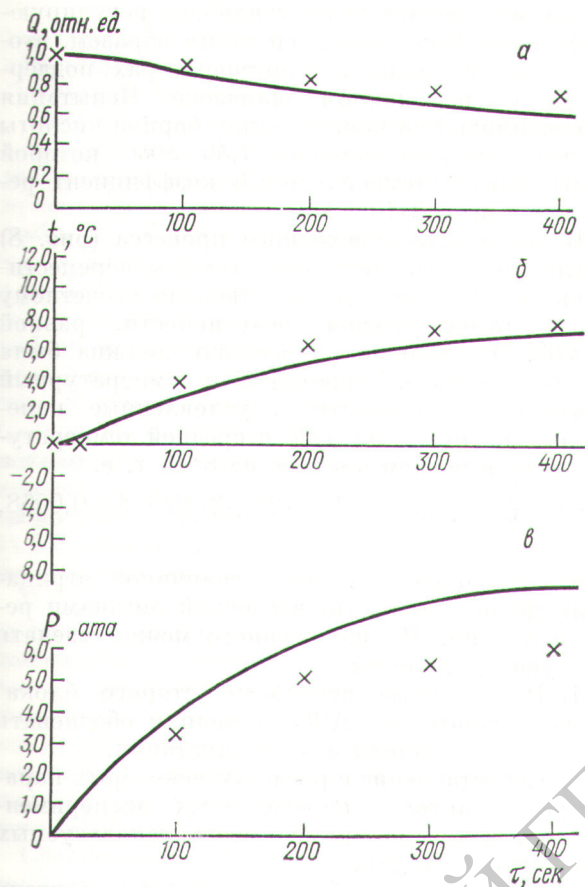


Рис. 7. Изменение основных параметров реактора второго блока НВ АЭС при сбросе нагрузки в режиме саморегулирования ($C_{H_3BO_3} = 2,9$ г/кг):

a — изменение мощности реактора; b — отклонение средней температуры первого контура от начального значения; c — отклонение давления в парогенераторах от начального значения; — — расчет; $\times$ — эксперимент.

ности и температуре теплоносителя. При наличии же борной кислоты температурный коэффициент реактивности становится менее отрицательным, т. е. реактор становится менее устойчивым к возмущениям внешней нагрузки.

В целях проверки саморегулируемости реактора и влияния на нее борной кислоты были проведены специальные испытания, в которых возмущения внешней нагрузки отрабатывались без вмешательства органов компенсации реактивности. Опыты проводились как в присутствии борной кислоты в первом контуре, так и без нее, причем по возможности в одинаковых условиях. Полученные результаты позволили также оценить величину температурного коэффициента реактивности и влияние на нее бора. Последнее возможно, если воспользоваться ба-

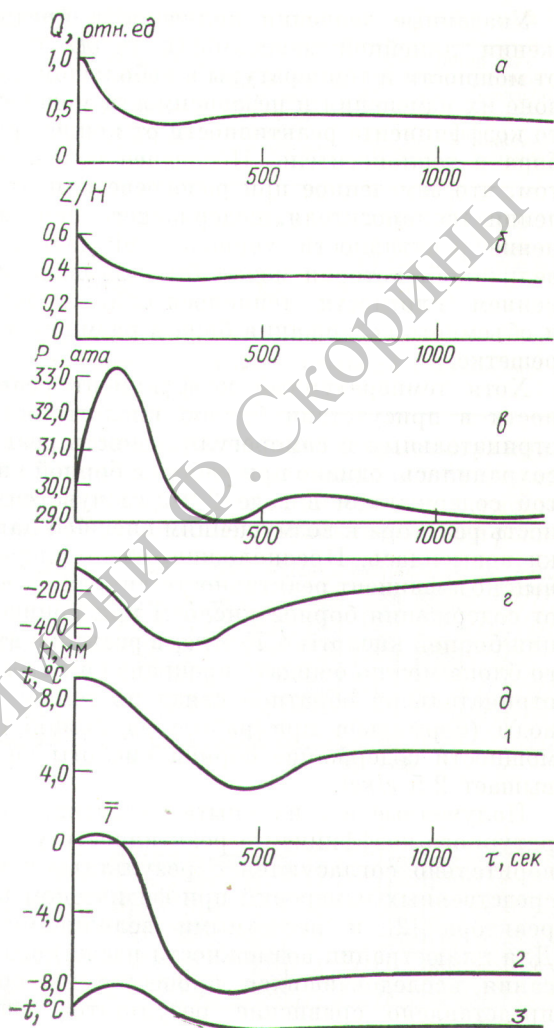


Рис. 8. Изменение основных параметров реактора второго блока НВ АЭС при сбросе электрической нагрузки с 270 до 150 Мвт и работе автоматического регулятора мощности:

a — изменение мощности реактора; b — изменение положения рабочей группы СУЗ; c — изменение давления в парогенераторах; d — изменение уровня воды в компенсаторе объема; e — отклонения от начального значения: температуры воды на входе в парогенератор (1), средней температуры воды в первом контуре (2), температуры воды на входе в реактор (3).

лансом реактивности для двух состояний: до внесения возмущения по нагрузке и после стабилизации переходного процесса, т. е. $\alpha_N (\bar{t}_2 - \bar{t}_1) + \alpha_U (Q_2 - Q_1) = 0$. При мощностном коэффициенте реактивности $\alpha_U = 1,5 \times 10^{-4}$ 1/% среднее значение температурного коэффициента реактивности было получено равным $-4,3 \cdot 10^{-4}$ 1/°C для чистой воды рабочих параметров и $-1,7 \cdot 10^{-4}$ 1/°C при концентрации борной кислоты в воде 2,9 г/кг (при рабочих параметрах).

Указанные значения получены в предположении линейной зависимости $\partial \rho / \partial Q$ и $\partial \rho / \partial t$ от мощности и температуры в небольшом диапазоне их изменения и независимости мощностного коэффициента реактивности от концентрации бора в теплоносителе. Последнее основано на том, что замеченное при разогреве или охлаждении теплоносителя, содержащего бор, изменение реактивности хорошо совпадает с той величиной, которая может быть вызвана изменением плотности теплоносителя, а значит, и объемного содержания бора в размножающей решетке.

Хотя температурный коэффициент реактивности в присутствии борной кислоты остался отрицательным и саморегулируемость реактора сохранилась, однако при работе с борной кислотой содержанием в воде 2,9 г/кг чувствительность реактора к возмущениям внешней нагрузки повысилась. Предположив, что температурный коэффициент реактивности линейно зависит от содержания борной кислоты при концентрации борной кислоты 4,75 г/кг, в реакторе второго блока можно ожидать прекращения действия отрицательной обратной связи по температуре воды (нормально при работе на номинальной мощности содержание борной кислоты не превышает 2,5 г/кг).

Полученные в этих опытах значения температурного коэффициента реактивности удовлетворительно согласуются с результатами непосредственных измерений при физическом пуске реактора [2] и расчетными величинами [3]. Для иллюстрации возможности расчетного описания исследовавшихся процессов на рис. 7 представлено сравнение результатов расчета и эксперимента по саморегулированию реактора при сбросе нагрузки (расчетная величина температурного коэффициента реактивности $\alpha_n = 2,0 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$).

Полученные в этих опытах данные позволили наладить и испытать работу автоматического регулятора мощности при быстром сбросе электрической мощности блока с 270 до 150 Мвт (на 30% от номинального значения). Отра-

ботка возмущения осуществлялась регулирующей группой поглотителей таким образом, чтобы давление пара в парогенераторах поддерживалось в заданном диапазоне. Испытания проводились при концентрации борной кислоты в воде первого контура 1,46 г/кг, которой соответствует температурный коэффициент реактивности $-3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$.

В результате переходного процесса (рис. 8) поглотители регулирующей группы переместились на 46 см, что соответствовало расчетному вводу отрицательной реактивности, равной 0,0063. Эта величина, очевидно, должна была скомпенсировать мощностной и температурный эффекты реактивности, обусловленные изменением нагрузки на 30% и средней температуры воды в первом контуре на 8°C , т. е.

$$\Delta \rho = \Delta \rho_T + \Delta \rho_n = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 0,0068,$$

что хорошо согласуется с величиной отрицательной реактивности, введенной органами регулирования. Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные испытания второго блока Ново-Воронежской АЭС позволили обосновать безопасные условия его эксплуатации.
2. Сопоставление с расчетом некоторых параметров реактора, определенных экспериментально, доказало применимость используемых расчетных методик.
3. Введение борной кислоты в теплоноситель способствовало выравниванию энерговыделения в активной зоне при сохранении устойчивости работы реактора в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. T o n g. Nucl. Engng and Design, 6, 301 (1967).
2. А. Н. Камышан и др. «Экспериментальное исследование физических характеристик второго блока НВ АЭС». Доклад на конференции СЭВ (Ульяновск, 5—9 октября 1970 г.).
3. А. Н. Новиков и др. «Сопоставление результатов физических расчетов с данными предпусковых и пусковых испытаний реактора второго блока НВ АЭС». Там же.

Опыт эксплуатации АЭС в Райнсберге

С. МЕНЦЕЛЬ (ГДР)

Первая в ГДР Райнсбергская АЭС введена в эксплуатацию 9 мая 1966 г. [1]. В результате четырехлетней эксплуатации станции можно сделать вывод, что в целом она работает весьма успешно и что по сравнению с проектом имеются

определенные резервы, позволяющие повысить выработку электроэнергии. За этот период накоплен большой опыт по всем технологическим операциям. К концу четырехлетней эксплуатации выработано более 1,5 млрд кет.ч.

УДК 621.311.25