

Опыт пуско-наладочных работ и энергопуска реактора БН-350

ЛЕЙПУНСКИЙ А. И. , МИТЕНКОВ Ф. М., ОРЛОВ В. В., ЮРЧЕНКО Д. С., ШИРЯЕВ В. И., АРХИПОВ В. М.,

БАГДАСАРОВ Ю. Е., БАКЛУШИН Р. П., БЛАГОВОЛИН С. М., ВАСИЛЕНКО К. Т., ГРИБАНОВ Ю. И., ДЕМЬИН А. А., КАРАБАШ А. Г., КАРПОВ А. В., КИСЕЛЕВ Г. В., КОЗЛОВ Ф. А., КОЧЕТКОВ Л. А., КУЗНЕЦОВ И. А., ПАХОМОВ В. В., ПОПЛАВСКИЙ В. М., РИНЕЙСКИЙ А. А., УШАКОВ А. В.

УДК 621.039.526

Описание АЭС БН-350, вопросы проектирования и экспериментального обоснования оборудования рассматривались ранее [1—4]. К концу 1971 г. на БН-350 были завершены основные строительно-монтажные работы. К маю 1972 г. были введены в эксплуатацию вспомогательные системы, обеспечивающие работу основных контуров установки: натрий-калиевая система охлаждения холодных ловушек I и II контуров, система охлаждения замораживающих поясов задвижек I контура, системы электрообогрева оборудования и трубопроводов и газового обогрева корпуса реактора, системы охлаждения биологической защиты реактора и боксов I контура. К этому же времени было подготовлено и очищено $\sim 700 \text{ м}^3$ натрия для заполнения I и II контуров. К октябрю 1972 г. были проведены пуско-наладочные работы на основных контурах, опробованы и налажены все важнейшие узлы, механизмы, оборудование и системы установки в целом. Во всех работах на БН-350 эффективно использовался опыт пуска и эксплуатации реакторов БР-5 и БОР-60. В этот важный и весьма ответственный период, завершение которого позволило перейти к физическому пуску реактора, было проверено большинство проектных и конструкторских решений, работоспособность больших натриевых контуров и основного оборудования реактора.

В июле прошлого года в г. Шевченко был осуществлен энергетический пуск первой промышленной АЭС с быстрым реактором БН-350. После выхода на номинальную мощность 1000 Мвт реактор БН-350 вырабатывает 150 Мвт электрической энергии и 120 $\text{м}^3/\text{сутки}$ пресной воды. В этом номере журнала редакция публикует четыре статьи, в которых изложены основные результаты пуско-наладочных работ на реакторе БН-350, а также итоги исследования радиационной обстановки в районе реактора. Они были доложены на Втором симпозиуме стран — членов СЭВ по быстрым реакторам, состоявшемся в г. Обнинске (СССР) 1—5 октября 1972 г. Сообщение об итогах симпозиума напечатано на стр. 148 данного выпуска журнала.

29 ноября 1972 г. осуществлен физический пуск реактора БН-350. На заключительном этапе — энергетическом пуске реактора, законченном 16 июля 1973 г. пуском турбины под нагрузкой, были получены дополнительные и важные сведения о работоспособности основного оборудования АЭС.

Ниже приводится описание и результаты важнейших этапов пуско-наладочных работ и энергопуска установки БН-350.

Подготовка теплоносителя для I и II контуров

Транспортировка натрия с завода-изготовителя проводилась в специальных контейнерах объемом 1 м^3 под слоем аргона. В системе приготовления теплоносителя имелось шесть электропечей, что позволяло работать одновременно с шестью транспортными емкостями с натрием.

Хотя на заводе-изготовителе принимались меры по предотвращению попадания в натрий парафина, однако некоторое количество парафина в натрии все же осталось. Как показал дальнейший опыт, оно составило 0,1—3 кг парафина на транспортную емкость. Для удаления парафина каждая транспортная емкость перед перекачиванием подвергалась отгонке парафина при нагреве под вакуумом. Опыт подготовки теплоносителя для установки БОР-60, а также серия специальных экспериментов позволили выбрать наиболее оптимальный режим удаления парафина: натрий в транспортной емкости разогревался до температуры 230—240° С, после чего начиналась отгонка паров парафина под вакуумом в специальную ловушку, охлаждаемую воздухом. Через 3 ч такой отгонки ловушку осматривали, и, если количество парафина не превышало 1,5 кг, натрий из транспортной емкости перекачивался через сетчатый фильтр в накопительную емкость объемом 50 м^3 для отстаивания. Если же количество парафина в ловушке было больше 1,5 кг, цикл отгонки продолжался еще 2 ч. Как

показала практика, этого времени было достаточно для удаления парафина. Отстаивание в баке-накопителе продолжалось несколько суток, чтобы дать возможность парафиновым включениям, которые не были удалены под вакуумом, всплыть в верхние слои. Из бака-отстойника натрий перекачивался в приемный бак емкостью также 50 м^3 для очистки холодной ловушкой. Перекачка всегда проводилась так, чтобы в баке-отстойнике уровень натрия оставался на $\sim 500 \text{ мм}$ выше среза заборной трубы бака во избежание попадания парафиновой пленки, если она имела, в приемный бак.

Натрий очищали посредством принудительной циркуляции через холодную ловушку примесей. При этом с помощью пробкового индикатора окислов периодически измеряли концентрацию примесей в натрии, которая перед началом очистки соответствовала температуре забивания пробкового индикатора $210\text{--}220^\circ \text{C}$, после очистки — $120\text{--}150^\circ \text{C}$. В системе приготовления имелся универсальный пробоотборник-дистиллятор, который позволял отбирать пробы для химических анализов натрия на содержание металлических и неметаллических (углерода, кислорода, азота и т. п.) примесей. Пробы можно было отбирать как при передавлении натрия из транспортных емкостей в бак-накопитель, так и в процессе очистки натрия в приемном баке. После очистки натрий перекачивался в сливные баки I и II контуров. Поскольку теплоноситель готовился заранее, то в сливных баках I и II контуров натрий отстаивался в течение нескольких месяцев. Содержание основных примесей в натрии, подготовленном для заполнения I и II контуров (в частях на миллион): 50 калия, 25 кальция, 20 углерода, 7 кислорода, 5 водорода, 4 азота [5]. В той же системе был подготовлен теплоноситель для охлаждения фильтров-ловушек и барабана отработанных накетов — эвтектический сплав натрий — калий.

Пуско-наладочные работы на I контуре

Пуско-наладочные работы на I контуре включали следующие основные процессы:

- проверку герметичности контура;
- сушку контура вакуумированием и разогревом;
- проверку всех механизмов, арматуры, контрольно-измерительных приборов;
- заполнение контура натрием;
- отработку режимов запуска циркуляции и совместной работы насосов;

очистку натрия в контуре и обкатку насосов; исследование гидравлических характеристик контура.

Герметичность I контура проверялась его вакуумированием и поиском течей гелиевым течеискателем. Предельный вакуум, достигнутый в I контуре, $5 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$, натекание $4 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст./ч}$. Разогрев контура осуществлялся электрообогревом оборудования и трубопроводов и газовым обогревом корпуса аппарата при одновременной циркуляции газа по контуру штатными насосами. Температуру поднимали со скоростью $5\text{--}6^\circ \text{C/ч}$ ступенями по 20°C с выдержкой на каждой ступени $10\text{--}15 \text{ ч}$.

В процессе разогрева контура контролировали показания тензометров и перемещение реперных точек, установленных на корпусе аппарата, оборудования и трубопроводах. Максимальная температура корпуса и внутрикорпусных устройств реактора была достигнута через 10 суток и составила $200\text{--}250^\circ \text{C}$.

Заполнялся I контур натрием, предварительно разогретым в сливных баках до температуры $\sim 250^\circ \text{C}$. Для дополнительной очистки натрий перед подачей в контур прокачивался через штатную фильтр-ловушку I контура, которая играла роль механического фильтра. Заполнение контура прошло спокойно, без существенных температурных напряжений в оборудовании. Объем натрия в I контуре составил $\sim 500 \text{ м}^3$.

I контур реактора БН-350 — сложная гидравлическая схема с большим числом свободных уровней натрия (в реакторе, шести баках насосов и шести баках слива протечек). В связи с этим режим запуска циркуляции по I контуру отрабатывался последовательно, начиная с пусков отдельных насосов на 250 и 1000 об/мин и запуска насосов в параллельную работу при 250 об/мин. Были проверены стабильность работы насосов при различных сочетаниях, поведение уровней натрия и обратных клапанов в режимах пуска и остановки насосов. В процессе обкатки I контура съем тепла осуществлялся одним парогенератором.

Проведенные исследования показали, что гидравлические характеристики I контура хорошо совпадают с расчетными. Отклонения по отдельным петлям незначительны. При любом сочетании параллельно работающих насосов обеспечивается их нормальная работа как на 250, так и на 1000 об/мин. Обеспечивается стабильность уровней натрия во всех емкостях контура. Вибрация оборудования и трубопро-

водов незначительна. Кавитационные запасы насосов соответствуют проектным данным: отключение и включение насосов вызывает плавное изменение уровней натрия.

На основании проведенных испытаний был выбран следующий порядок запуска циркуляции по I контуру:

1) приоткрываются до пускового положения напорные задвижки трех выбранных для включения петель (напорные задвижки трех оставшихся петель закрыты);

2) поочередно с интервалом 1—3 мин включаются три выбранных насоса на 1000 об/мин;

3) приоткрываются напорные задвижки и поочередно с интервалом 1—3 мин включаются четвертый и пятый насосы;

4) одновременно полностью открываются напорные задвижки всех работающих насосов.

Очистка натрия I контура от примесей велась непрерывно в процессе наладки контура с помощью сетчатых фильтров, установленных в хвостовиках всех пакетов-имитаторов, стоящих в реакторе, а также с помощью холодных ловушек. Попытка ввести в работу холодные ловушки при действии насосов на 250 об/мин не увенчалась успехом из-за слишком малых расходов натрия через ловушки. Поэтому первоначальная очистка натрия в контуре осуществлялась циркуляцией через ловушки электромагнитными насосами бакового хозяйства. Основная очистка проводилась при работе насосов на 1000 об/мин с циркуляцией натрия через три-четыре холодные ловушки.

Первый замер содержания окислов в I контуре был проведен после 100 ч циркуляции натрия через ловушки. Температура забивания пробкового индикатора составляла 185° С. После 30-кратной прокачки объема натрия через холодные ловушки температура забивания индикатора снизилась до 120° С. Результаты химического анализа проб теплоносителя, периодически отбираемых из I контура с помощью пробоотборника-дистиллятора, указали на снижение содержания примесей натрия в процессе его очистки холодными ловушками: содержание углерода снизилось с 25 до 10, кислорода — с 2 до 2,5 частей на миллион.

После окончания обкатки I контура были извлечены 10 пакетов-имитаторов. При осмотре их сетчатых фильтров каких-либо механических включений обнаружено не было. Это свидетельствовало о том, что принятые меры по поддержанию чистоты контура в процессе его монтажа и пуско-наладочных работ были достаточно эффективны.

Пуско-наладочные работы на II и III контурах

Пуско-наладочные работы на II и III контурах проводились в соответствии с намеченными этапами физического и энергетического пусков установки. На этапе обкатки I контура и физического пуска установки были подготовлены и функционировали по одной петле II и III контуров; на этапе энергопуска — по три петли.

Последовательность пуско-наладочных работ на II контуре:

1) достижение общей герметичности контура;

2) проверка плотности запираания арматуры;

3) снятие нулевых замеров системы тензометрирования и реперов;

4) продувка контура и его узлов азотом;

5) вакуумирование и сушка;

6) разогрев жидкометаллического контура (во время разогрева снимались показания системы тензометрирования, а также фиксировалось положение реперов);

7) заполнение петли натрием без системы индикации и фильтрации;

8) вывод вспомогательных систем на рабочий режим;

9) запуск циркуляции при работе насосов на 250 об/мин;

10) измерение вибрации трубопроводов;

11) заполнение натрием системы индикации и фильтрации;

12) определение содержания окислов в натрии;

13) запуск холодной ловушки и предварительная очистка натрия;

14) запуск насосов на 1000 об/мин и обкатка контура на номинальных оборотах;

15) измерение вибрации трубопроводов;

16) окончательная очистка натрия при работе насосов на 1000 об/мин;

17) химический анализ натрия;

18) определение характеристик систем II контура.

Пуско-наладочные работы на II контуре проводились при температуре натрия 150—250° С.

Трудности достижения герметичности второго контура были связаны с большими вакуумируемыми объемами (80—100 м³), разветвленностью трактов, большим количеством сварных швов, отделяющих полость II контура от окружающей среды. Наибольшие трудности встретились в связи с выявившимися неплотностями в трубных пучках парогенераторов и в одном из теплообменников. Тем не менее

в конечном итоге была достигнута весьма высокая герметичность: предельное значение вакуума составило 10^{-2} мм рт. ст. Контур считался герметичным, если натекание (падение вакуума) не превышало 10 мм/ч. В процессе вакуумирования проводилась также предварительная (в холодном состоянии) проверка герметичности заполненного водой парогенератора. По величине предельного вакуума и появлению следов влаги в пробах газа II контура можно было судить о герметичности парогенератора после монтажных операций.

В качестве критериев использовались следующие ориентировочные расчетные характеристики параметров контура при вакуумировании в зависимости от величины течи воды в соединениях парогенератора:

Величина течи, г/ч	0,7·10 ⁻⁶ ;	10;	1220
Скорость натекания, мм/сек	0;	0,6·10 ⁻² ;	0,7
Предельный вакуум, мм рт. ст	10 ⁻² ;	0,15;	1,5
Содержание влаги при давлении, 10 мм рт. ст			
вес. %	0;	0,02;	2,2

Предварительный анализ напряженного состояния элементов II контура показал, что наиболее тяжелый режим при разогреве не заполненного натрием II контура наблюдается на узлах промежуточного теплообменника. Именно он и определяет скорость разогрева всего контура. С целью проверки и отработки процесса разогрева были проведены специальные исследования с тензометрированием конструкции теплообменника, которые показали, что приемлемым является режим разогрева ступенями по 20° С со скоростью 5° С/ч и с выдержкой на каждой ступени в течение 10 ч. Разогрев контура, заполненного натрием, с указанной скоростью не вызывает каких-либо опасений.

Заполнение трубопроводов и оборудования II контура теплоносителем с применением проектной системы дренажей и воздушников не вызвало каких-либо затруднений. Однако изменение давления в газовых полостях на 1 атм приводило к изменениям уровней натрия в системе, что указывало на оставшиеся в отдельных частях контура газовые мешки. Использование циркуляции натрия при работе насосов на 250 об/мин в течение 5—10 ч обычно приводило к полному устранению газовых объемов в контуре.

Вибрационные характеристики основных натриевых трубопроводов контура оказались удо-

влетворительными в режиме работы насосов как на 250, так и на 1000 об/мин при достаточном уровне натрия в испарителях. При снижении уровня натрия в испарителях до 300 мм над осью всасывающего патрубка был замечен интенсивный захват крупных газовых пузырей в сливную трубу испарителей; возникали большие колебания основных циркуляционных трубопроводов с амплитудой до 50—60 мм.

После заполнения II контура натрием содержание примесей в теплоносителе обычно соответствовало температуре закипания $150 \pm \pm 180^\circ \text{C}$ по пробковому индикатору. Включение в работу холодных доушек при действии насосов на 1000 об/мин позволяло в течение 10—15 ч снизить температуру закипания индикатора до 120—130° С.

Для уменьшения коррозионного поражения стали 1Х2М в период предпусковых гидравлических испытаний III контура в дистиллят добавляли гидразингидрат (500—1000 мг/л в расчете на гидразин), который вводился непосредственно в парогенераторы.

С целью обеспечения требуемого качества питательной воды (по кислороду) в период пуско-наладочных работ гидразингидрат вводился в тракт подачи дистиллята непосредственно на стадии его приготовления, что также позволило значительно уменьшить вынос железа в воду из трубопроводов питательной воды.

Заполнение парогенератора водой с температурой 150—160° С проводилось при температуре натрия во II контуре 170—180° С. В процессе пуско-наладочных работ особое внимание уделялось испытанию систем защиты парогенератора и контуров, предназначенных для предотвращения опасных последствий аварийного контакта натрия и воды в случае разрушения теплообменной трубки. Программа испытаний была составлена так, чтобы определить работоспособность систем защиты II (САЗ-II) и III (САЗ-III) контуров до момента одновременного заполнения парогенератора натрием и водой.

II и III контуры при испытании САЗ-II были заполнены инертным газом. Аварийный сигнал на срабатывание системы имитировался повышением давления во II контуре на 0,5 атм. Определялись инерционность системы приводов для принудительного разрушения мембранно-разрывного устройства, давление срабатывания предохранительных устройств на баке-сепараторе второй ступени, проходимость системы сброса и сепарации продуктов реакции и плотность предохранительных клапанов на баке-сепараторе.

Испытание САЗ-III на первом этапе осуществлялось, когда II контур был заполнен инертным газом, парогенератор разогрет до 250—270° С, его паро-водяной объем заполнен водой и за счет электрообогрева в нем поддерживалось давление 30—50 атм.

В электрической цепи имитировался аварийный сигнал о повышении давления в газовой полости II контура (большая течь). В процессе испытаний определялись инерционность быстродействующей арматуры на линии подачи питательной воды и линии аварийного осушения парогенератора, уставки на отключение насосов II контура, время, необходимое для сброса воды и пара из парогенератора, т. е. длительность возможной аварии при течи воды в натрий.

На втором этапе испытание САЗ-III проводилось при заполненном натрием II контуре, работе насосов на 1000 об/мин и генерации пара в парогенераторе.

В основном параметры II и III контуров, характеристики аварийных систем и защиты парогенератора соответствуют проектным.

Экспериментальные исследования динамических характеристик и параметров

В процессе пуско-наладочных работ осуществлена серия экспериментов по исследованию динамики, испытанию и настройке защитных систем, систем сигнализации и автоматического регулирования. Эксперименты были начаты в период обкатки главных циркуляционных насосов и очистки контуров, когда исследовались гидравлические нестационарные процессы, измерялись кавитационные характеристики контуров. Вместо натуральных топливных пакетов в реакторе были установлены стальные пакеты-имитаторы. В этот период провели измерение выбегов насосов на 1000 и 250 об/мин, исследовали нестационарные процессы при отключении одного насоса из четырех и пяти работающих. При работе насосов на 1000 об/мин отключение одного насоса сопровождается четким закрытием обратного клапана. Расход натрия в отключаемой петле падает до нуля за 3—4 сек. Процесс закрытия клапана длится около 2 сек.

Кавитационные характеристики I контура измерялись в наиболее тяжелом из возможных режимов: при работе трех насосов на 1000 об/мин. При этом одновременно снижалось давление газа в аппарате, измерялся расход натрия в петлях и прослушивались насосы. Измерения подтвердили полученные ранее значения кавитационных запасов.

После физического пуска вновь были проведены исследования гидравлики контуров, но в еще более широком масштабе, чем при обкатке насосов. Некоторые эксперименты повторялись для оценки влияния гидравлического сопротивления реактора. Измерения выбегов насосов I контура показали слабое влияние сопротивления на эти процессы. Были измерены скорость вращения насосов, расходы натрия в петлях при нарушениях энергоснабжения отдельных насосов на 1; 2; 3 сек. Полученные результаты понадобятся при расчетном исследовании различных аварий в системе энергоснабжения, которые не могут быть имитированы экспериментально.

Процесс уменьшения расхода в выпшедшей из строя петле при работе насосов на 1000 об/мин с увеличением гидравлического сопротивления реактора протекает с несколько большими скоростями. Эксперименты с отключением одного насоса из пяти работающих повторялись несколько раз. При этом измеряли расходы теплоносителя в петлях, скорости вращения насосов, перемещения трубопроводов. В отдельных экспериментах определяли также гидродинамические эффекты реактивности.

Одновременно с исследованием гидравлических нестационарных процессов проводились испытания и настройка аварийной защиты по изменению расхода натрия в I контуре установки. В наиболее опасных аварийных ситуациях защита должна сработать не позднее, чем через 1—1,5 сек после начала снижения расхода. В связи с этим требования к точности настройки системы аварийной сигнализации и защиты очень высоки. Эксперименты состояли в определении динамических характеристик защитных устройств, вторичных приборов, в имитации аварийных ситуаций с фиксированием всех составляющих запаздывания аварийных сигналов.

В специальных экспериментах проводилась тарировка основных расходомеров, сигналы которых введены в аварийную защиту.

В связи с требованиями безопасности в случае аварий, вызванных нарушением энергоснабжения установки, в систему аварийной защиты наряду с сигналом об изменении расхода натрия в I контуре вводится сигнал о падении напряжения на секциях распределительного устройства, от которых питаются электродвигатели насосов. Сигнал о падении напряжения в наиболее тяжелых ситуациях должен поступить одновременно с сигналом о падении расхода натрия. Такие ситуации имитировались в экс-

периментах. При этом проверялась работа аварийной защиты. Имитировались также такие нарушения в системе энергоснабжения, которые не должны приводить к срабатываниям аварийной защиты, поскольку они должны устраняться путем переключения на резервные источники питания.

При работе реактора на минимально контролируемом уровне мощности измерялись гидродинамические эффекты реактивности — эффекты, связанные с перемещением топливных пакетов реактора при изменении расхода теплоносителя через него. Эффекты определялись в режимах одновременного отключения пяти, четырех, трех насосов I контура, а также в режиме отключения одного насоса из пяти работающих. Максимальная величина эффекта при изменении расхода теплоносителя от номинального значения до нуля составляет 5—6 центов. При меньшем расходе теплоносителя эффект имеет положительный знак (топливные пакеты сближаются к центру активной зоны). Зависимость эффекта от расхода теплоносителя хорошо согласуется с теоретическими представлениями о его механизме. Более точные представления о процессе перемещения топливных пакетов реактора под воздействием изменяющегося давления теплоносителя в зазорах между ними будут получены после подробной математической обработки экспериментальных результатов.

На минимально контролируемом уровне мощности исследовались также барометрические эффекты реактивности, связанные с изменением давления в реакторе, вызывающим выделение газа из натрия и изменение объема газовых пузырьков, уже присутствующих в теплоносителе. Эффекты определяли при изменении избыточного давления в аппарате от 0 до рабочего значения (0,9 атм). В таком диапазоне давлений эффекты реактивности не обнаружены. Это еще раз подтверждает, что эффекты, измеренные при отключении насосов I контура, связаны именно с перемещением топливных пакетов.

Температурный коэффициент реактивности измерялся путем разогрева реактора циркуляционными насосами при минимальном уровне мощности реактора. Эффект был определен на базе 70°С и составил $\sim 3,77 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Большая серия экспериментов была направлена на измерение мощностных эффектов реактивности и на выяснение деталей обратной связи по реактивности. Асимптотический мощностной эффект определялся в режимах медленного

подъема мощности при постоянном расходе теплоносителя по изменению положения поглощающих стержней. Эффект измерялся при различных режимах работы насосов: при работе двух насосов на 250 об/мин, трех — на 1000 об/мин и четырех — на 1000 об/мин.

Механизм обратной связи по реактивности исследовался путем быстрого возмущения реактора по реактивности с последующей записью переходного процесса. Возмущения осуществлялись сбросом одного стержня АЗ с эффективностью $\sim 1\%$, быстрым перемещением стержня АР на 100—150 мм (величина возмущения при этом достигала 0,05%) в режиме саморегулирования и быстрым изменением уставки задатчика мощности в режиме автоматического регулирования. Использовалась также запись естественных шумов всех основных параметров реактора. Предусматриваются эксперименты с применением небольших искусственных возмущений, вносимых по периодическому и псевдослучайному законам. Точность измерений всех эффектов обеспечивалась исходной стабилизацией реактора до такого состояния, когда скорость изменения реактивности не превышала 0,01%/ч. Давление в парогенераторах при этом поддерживалось с точностью $\pm 0,5 \text{ атм}$.

Режимы срабатывания медленной и быстрой аварийных защит исследовались с целью определения тех факторов, которые в первую очередь влияют на величину термических напряжений, возникающих в этих режимах в элементах конструкции. Экспериментальная кривая спада мощности при срабатывании МАЗ хорошо совпадает с расчетной. Это указывает на хорошее определение предусмотренной в расчете зависимости линейной эффективности стержней СУЗ от глубины их погружения в реактор. В режиме срабатывания БАЗ исследовалась эффективность перемешивания натрия в бачке реактора при различных расходах теплоносителя, которая определяет величину термических напряжений в выходных трубопроводах и корпусах промежуточных теплообменников.

Во всех режимах, связанных с изменением температуры натрия, изучались переходные процессы в промежуточных теплообменниках и парогенераторах. Особенно нужно отметить переходные процессы в парогенераторах при запуске насосов II контура, когда происходит быстрое изменение паропроизводительности и давления пара в парогенераторах. Задача эксперимента в этом случае — определение условий, при которых гарантируется безопасность процесса.

Специальные эксперименты были предприняты для изучения процессов, связанных с изменением температуры натрия на входе в реактор. В этих экспериментах исследовалась динамика расширения напорного коллектора реактора и влияние этого расширения на реактивность. Эксперименты будут использованы при построении полной модели обратной связи по реактивности.

Эксперименты по определению эффективной теплоемкости контуров и тепловых потерь в окружающую среду осуществлялись путем разогрева установки главными циркуляционными насосами и последующего ее охлаждения. При этом исследования проводились для различного числа петель; петля II контура в одном из экспериментов разогревалась и охлаждалась изолированно от I контура.

Экспериментальные исследования динамики установки будут продолжены на более высоких уровнях мощности.

Энергопуск установки

С самого начала пуско-наладочных работ на установке БН-350 в соответствующих планах и мероприятиях под энергопуском понимался не какой-то определенный момент достижения заданных параметров, а комплекс работ и ис-

следований. Он включал поэтапный и постепенный подъем мощности и параметров с проведением на каждой ступени запланированных экспериментов, анализом их результатов и результатов эксплуатации оборудования.

16 июля 1973 г. от пара БН-350 заработал один из турбогенераторов, подключенный к энергосистеме; остальное тепло используется для опреснения морской воды для г. Шевченко.

Поступила в Редакцию 22/X 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейпунский А. И. и др. Атомная электростанция БН-350. В кн.: Тр. Симп. стран — членов СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Т. 1. Обнинск, ОНТИ ФЭИ, 1968, с. 123.
2. Лейпунский А. И. и др. Натриевая технология и оборудование реактора БН-350. — «Атомная энергия», 1967, т. 22, с. 13.
3. Лейпунский А. И. и др. Сооружение атомной электростанции с реактором БН-350. — «Атомная энергия», 1967, т. 23, с. 409.
4. Лейпунский А. И. и др. Опыт проектирования и эксплуатации быстрых реакторов в СССР. — «Атомная энергия», 1971, т. 31, с. 344.
5. Баклушин Р. П. и др. Пуско-наладочные работы на основных контурах реактора БН-350. Сообщение на заседании Координационного научно-технического совета по быстрым реакторам. Прага, март 1973 г.

Исследования физических характеристик при пуске реактора БН-350

ОРЛОВ В. В., ПОМЕРАНЦЕВ Г. Б., ЮРЧЕНКО Д. С., ВАСИЛЕНКО К. Т., ДУБОВСКИЙ Б. Г., КАЗАНСКИЙ Ю. А., КИСЕЛЕВ Г. В., КИСИЛЬ И. М., КУЛАКОВСКИЙ М. Я., МАТВЕЕВ В. И., СКОРИКОВ Н. В., ТРОЯНОВ М. Ф., УСЫНИН Г. Б., ГОЛУБЕВ В. И., ВАЙМУГИН А. А., ВОРОПАЕВ А. И., ДУШИН П. Г., ЗИНОВЬЕВ В. П., ЛЮБЧЕНКО В. Ф., МАМОНТОВ В. Ф., ТЮТЮННИКОВ П. Л.

УДК 621.039.526:621.039.52.034.6:621.039.519

Реактор БН-350, сооруженный в г. Шевченко, является первым быстрым реактором промышленного назначения. Пуск этого реактора — важнейший этап освоения быстрых энергетических реакторов в программе развития ядерной энергетики СССР.

Проектная тепловая мощность реактора 1 Гвт. Реактор охлаждается натрием. Горючим является двуокись обогащенного урана. Конструкция реактора описана в работах [1—3].

В 1972 г. были начаты пуско-наладочные работы по отдельным системам реактора и комплексные пусковые работы. 29 ноября 1972 г.

реактор достиг критичности. Затем на реакторе выполнена программа исследований статических физических характеристик, включающая измерения эффективности стержней управления, эффективности топливных пакетов, натриевого пустотного эффекта реактивности, температурного коэффициента реактивности, распределения различных реакций по объему активной зоны и экрана, гидродинамического и барометрического эффектов реактивности.

После выполнения этой программы на реакторе началась подготовка к выходу в энергетический режим работы.