

быстрых нейтронах и использованию ядерного топлива для выработки теплоэнергии».

«В энергетическом машиностроении обеспечить значительное наращивание производства оборудования для атомных, гидро- и тепловых электростанций, в том числе атомных реакторов мощностью 1—1,5 млн. киловатт и энергоблоков мощностью 500—800 тыс. киловатт для тепловых электростанций, работающих на низкосортных углях. Изготовить и поставить первые атомные реакторы для теплоснабжения крупных городов. Разработать новые конструкции энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах мощностью 800—1600 тыс. киловатт, оборудования высокоманевренных энергоблоков мощностью 500 тыс. киловатт».

«В Российской Советской Федеративной Социалистической Республике увеличить производство промышленной продукции на 24—27 процентов.

Ввести в действие мощности на Смоленской, Калининской, Курской АЭС».

«В Украинской ССР увеличить производство промышленной продукции на 20—23 процента.

Довести в 1985 году выработку электроэнергии до 280—290 млрд. киловатт-часов, получить основной ее прирост за счет атомных электростанций. Ввести в действие мощности на Южно-Украинской, Хмельницкой, Запорожской, Крымской, Чернобыльской, Ровенской АЭС и Одесской атомной ТЭЦ».

«В Литовской ССР увеличить производство промышленной продукции на 21—24 процента, электроэнергии в 2 раза.

Обеспечить ввод в действие первой очереди Игналинской АЭС, Вильнюсской ТЭЦ-3, второй очереди Мажейского нефтеперерабатывающего завода».

Широкое внедрение атомной энергии в народное хозяйство влечет за собой важнейшие технические, экономические и социальные последствия, значение и содержание которых не исчерпывается долей АЭС в структуре генерирующих мощностей и энерговыработке на современном этапе. Массовое строительство АЭС ведет к коренному перестроению структуры производства во всем топливно-энергетическом комплексе, включая добычу и транспорт, на основе современной технологии и последних научно-технических достижений, обеспечивающих значительный экономический народнохозяйственный эффект, существенно более высокую производительность труда в топливно-энергетических отраслях.

Наряду с высокой экономичностью и эффективностью использования трудовых ресурсов ядерная энергетика создает условия для лучшего сохранения окружающей среды, сокращения затрат на транспортировку энергии и топлива, приближения центров производства и потребления энергии, а также предпосылки для ликвидации угрозы так называемого «энергетического голода».

УДК 621.039.524

Опытная атомная станция теплоснабжения на базе реактора АРБУС

ЦЫКАНОВ В. А., ЧЕЧЕТКИН Ю. В., КОРМУШКИН Ю. П., ПОЛИВАНОВ И. Ф., ПОЧЕЧУРА В. П.,
ЯКШИН Е. К., МАКИН Р. С., РОЖДЕСТВЕНСКАЯ Л. Н., БУНТУШКИН В. П.

Реакторы, в которых в качестве теплоносителя используются органические жидкости, например, гидротерфенил, дитолилметан и др., обладают уникальными возможностями по обеспечению необходимых требований безопасности при использовании их для теплоснабжения. В таких реакторах из-за низкой коррозионной активности теплоносителя можно использовать в контурах нефтехимическое оборудование, обычные углеродистые стали. Наведенная активность теплоносителя и отложений в них низка, что обеспечивает доступ к оборудованию при его обслуживании. Высокая температура кипения и низкая упругость паров теплоносителя позволяют рассчитывать все оборудование первого контура на давление не выше 1 МПа. Это практически исключает аварии с разрывом корпуса или трубопроводов. В таких реакторах максимальная температура поверхности твэлов ниже температуры кипения теплоносителя.

Следовательно, при потере давления в корпусе реактора исключено закипание теплоносителя в твэлах. Однако теплофизические свойства органических жидкостей хуже, чем у воды. Преимущества органических жидкостей способствуют значительному снижению капитальных затрат. Поэтому следует ожидать, что мощностью порог конкурентоспособности этих реакторов с обычными котельными будет значительно ниже, чем у водяных реакторов. Потребность же в атомных станциях теплоснабжения (АСТ) мощностью 50 МВт и выше очевидна. Особенно необходимы такие источники энергии в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока.

У органических теплоносителей есть специфические особенности и недостатки. Под действием излучения и высокой температуры в теплоносителе протекают процессы, аналогичные крекингу нефтепродуктов. В результате безвозвратные потери

органического теплоносителя в реакторе составляют ~ 1 кг на 1 МВт·ч выработанной тепловой энергии. При использовании инородного замедлителя (графит, тяжелая вода и т. п.) потери органического теплоносителя снижаются до 0,1—0,2 кг/МВт·ч. Продукты радиационно-термического крекинга (ПРТК) накапливаются в теплоносителе, и для поддержания его качества требуется постоянное выведение их и постоянная подпитка первого контура. Продукты разложения могут осаждаться на нагретых поверхностях, что приводит к образованию на твэлах смолистых отложений, ухудшающих их охлаждение. Скорость этого процесса может быть минимальной за счет постоянного выведения из теплоносителя ПРТК и примесей, инициирующих рост отложений. К примесям относятся хлор, железо, кислород, органические и неорганические частицы, некоторые составляющие высокомолекулярных продуктов терморрадиолиза теплоносителя.

Таблица 1
Характеристики установки АРБУС

Параметр	АЭС	АСТ
Тепловая мощность, МВт	5	12
Число циркуляционных петель	2	2
Теплоноситель первого контура	ДТМ	ДТМ
Температура теплоносителя, К		
на входе в реактор	513	453
на выходе из реактора	523	480
Расход теплоносителя через реактор, м ³ /ч	950—1200	950—1200
Давление на напоре циркуляционного насоса, МПа	0,43—0,56	0,43—0,56
Давление в компенсаторе объема, МПа	0,28	0,28
Максимальная температура оболочки твэлов, К	548—563	548
Средняя тепловая нагрузка твэлов, кВт/м ²	50	130
Кампания (по запасу реактивности), эф. сут	360	180
Теплоноситель второго контура	Пар	Пар
Давление пара в парогенераторах, МПа	2,5	0,6
Производительность парогенераторов, т/ч	7,6	21
Температура пара в парогенераторе, К	496	431
Теплоноситель третьего контура	—	Вода
Расход сетевой воды, м ³ /ч	—	150—230
Давление воды в бойлере, МПа	—	0,95
Температура сетевой воды в бойлере, К	—	323—373
на входе	—	423
на выходе	—	

С 1963 г. в НИИАР эксплуатируется установка АРБУС (табл. 1) с органическим теплоносителем, задуманная и спроектированная как АЭС небольшой мощности для удаленных районов. Она имеет технологическую схему обычной конденсационной АЭС. Реактор охлаждается органической жидкостью, циркулирующей по двум петлям, имеющим циркуляционные насосы и парогенераторы. Вырабатываемый в парогенераторах насыщенный пар поступает на турбогенератор, конденсат возвращается в парогенераторы.

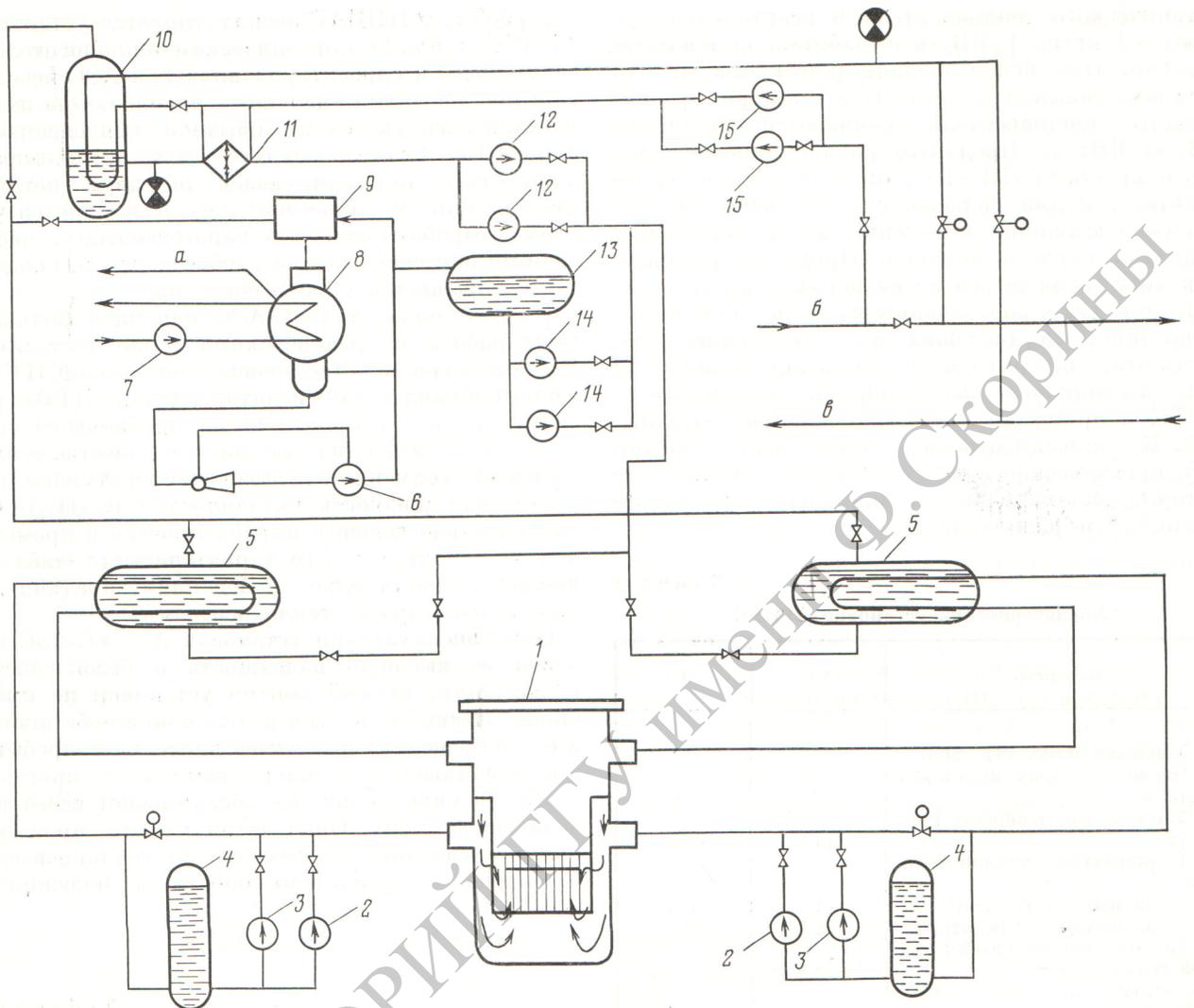
На установке АРБУС-АЭС накоплен большой опыт работы с органическими теплоносителями. Испытаны три вида теплоносителей: газойль (ГСГ), гидротерфенил (ГТФ) и дитолилметан (ДТМ), решены основные технологические проблемы их применения. С 1975 г. на установке в качестве теплоносителя применяется высокотемпературная органическая жидкость дитолилметан (C₁₅H₁₆). Он сравнительно дешев и вырабатывается в промышленных масштабах. Его характеристики (табл. 2) вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к реакторным теплоносителям.

Опыт эксплуатации установки АРБУС-АЭС показал ее высокую надежность и безопасность; в частности, первый контур установки не имеет биологической защиты и радиационная обстановка в его помещениях допускает длительное пребывание там людей. Установка компактна, проста и удобна в управлении. Ее обслуживают всего три человека в смену. Опыт эксплуатации, проведенные исследования по технологии теплоносителя, безопасности, работоспособности и надежности

Таблица 2
Основные характеристики теплоносителей

Параметр	ГСГ	ГТФ	ДТМ
Плотность (при 293 К), г/см ³	0,856	0,997	0,982
Кинематическая вязкость (при 293 К), сСт*	4,17	34	5,27
Средняя молекулярная масса	248	284	196
Атомарное отношение, Н/С	1,8	1,2	1,07
Температура, К			
начало кипения	488	523—553	565
конец кипения	613	653	569
затвердевание	213	262—258	237
Пороговая температура радиационно-термического крекинга, К	603	633—653	608

* 1 сСт = 10⁻⁴ м²/с.



Р и с. 1. Принципиальная схема установки АРБУС-АСТ: 1 — реактор; 2 — ГЦН; 3 — аварийные циркуляционные насосы; 4 — компенсаторы объема; 5 — парогенераторы; 6 — конденсатный насос; 7 — насос технической воды; 8 — технологический конденсатор; 9 — редукционное охлаждающее устройство; 10 — подогреватель сетевой воды; 11 — охладитель конденсата; 12 — питательные насосы парогенераторов; 13 — бак подпитки; 14 — подпиточные насосы; 15 — сетевые насосы; а — на эжектор; б — обратная магистраль теплосети; в — к потребителям

стандартного оборудования из углеродистых сталей и другим вопросам убеждают в перспективности таких установок.

Однако применительно к АСТ требуется проверка работы установки в переменном графике нагрузок, совместная работа с другими источниками тепла, решение технологических задач по системам предварительной очистки и поддержания необходимого состава теплоносителя, обоснования параметров и технологических режимов эксплуатации. Кроме того, тепловые нагрузки твэлов АРБУС-АЭС примерно в 3 раза меньше нагрузки твэлов проектируемых АСТ. Поэтому было принято решение о переводе АРБУС в режим АСТ с повышением мощности реактора. Для этого в технологическую схему были внесены измене-

ния — отключен и демонтирован турбогенератор, смонтированы сетевые насосы и подогреватель сетевой воды (рис. 1). Реактор и первый контур не были изменены. Пар из парогенераторов подается в бойлер, где конденсируется, подогревая сетевую воду. Основная характеристика установки АРБУС-АСТ приведена в табл. 1. Средняя температура теплоносителя в активной зоне снижена примерно на 50 К, что позволило поднять мощность реактора почти в 2,5 раза. В соответствии с параметрами первого контура выбраны параметры теплоносителя второго контура. Давление пара в парогенераторах не превышает 0,6 МПа. Это вполне достаточно для получения необходимых параметров сетевой воды. Таким образом, установка АРБУС-АСТ на основе реак-

тора с органическим теплоносителем представляет собой трехконтурную систему, в которой градиент давления теплоносителей в контурах направлен от первого контура к третьему. Это исключает проникновение радиоактивных продуктов в отопительную сеть.

Второе рождение — теперь в качестве АСТ — установка пережила 19 ноября 1979 г. В этот день она выведена на мощность 5 МВт и дала тепло для отопления зданий института. Впоследствии мощность установки была поднята до 8,1 МВт. Ограничение мощности вызвано низкой производительностью существующей системы очистки теплоносителя от ПРТК. Работа на мощности до 8 МВт показала, что все характеристики реактора и основного оборудования соответствуют проектным значениям. После замены системы очистки теплоносителя на более производительную станция будет выведена на проектную мощность. Первый опыт работы установки АРБУС-АСТ показал простоту и удобство ее эксплуатации, в том числе в переменном графике нагрузок и при параллельной работе с ТЭЦ института.

На первом этапе особое внимание уделялось изучению радиационной обстановки. Установлено, что радиоактивность теплоносителя обусловлена в основном активацией примесей, поступающих с исходным (подпиточным) теплоносителем и активированными продуктами коррозии конструкционных материалов. На выходе работающего реактора суммарная радиоактивность короткоживущих радионуклидов (^{16}N , ^{38}Cl , ^{56}Mn , ^{28}Al и др.) достигает $4 \cdot 10^6$ Бк/кг. Примерно половина приходится на ^{16}N , концентрация которого на три-четыре порядка ниже, чем в ВВЭР.

Несмотря на то, что технологический контур установки АРБУС изготовлен из углеродистой стали, радиоактивность долгоживущих продуктов коррозии (^{59}Fe , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{65}Zn) близка к значениям, регистрируемым в первом контуре водородных реакторов. Однако поверхности трубопроводов и оборудования вне активной зоны имеют низкий уровень радиоактивности. Это важная особенность органического теплоносителя. Радиоактивность отложений на установке АРБУС на два порядка ниже, чем в ВВЭР. Она составляет по каждому радионуклиду от 4 до 30 Бк/см². Радиоактивность оборудования не вызывает затруднений при ремонтных операциях практически сразу после остановки. Мощность дозы γ -излучения от оборудования установки, работающей на мощности 8 МВт, не превышала, например, на циркуляционных насосах, на проточных компенсаторах объема и трубопроводах $6 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг·ч. Поля излучения от работающего оборудования изменялись пропорционально мощности реактора. Радиоактивность газовых выбросов установки во внешнюю среду не превышает $2 \cdot 10^8$ Бк/сут и обусловлена преимущественно ^{41}Ar .

Таблица 3

Параметры установки АРБУС-АСТ на различных уровнях мощности

Параметр	3,0 МВт	5,2 МВт	6,4 МВт	8,1 МВт
Температура ДТМ на входе в реактор, К	441	446	449	451
Подогрев теплоносителя в активной зоне реактора, К	6,4	10,9	13,4	17,0
Температура сетевой воды в бойлере, К				
на входе	338	330	337	336
на выходе	383	380	383	383
Расход сетевой воды через бойлер, м ³ /ч	50	70,5	100	125

Примечание: Расход теплоносителя через реактор 1000 м³/ч, давление на напоре циркуляционного насоса 0,48 МПа, в парогенераторе 0,6 МПа, в бойлере 0,95 МПа.

Значения основных технологических параметров установки АРБУС-АСТ на разных уровнях мощности приведены в табл. 3. В процессе вывода реактора на мощность были определены его физические характеристики (табл. 4). Из приведенных данных следует, что по сравнению с энергетическим режимом работы реактора существенно изменился температурный эффект реактивности — с 4 до 2,45% (на мощности 5 МВт). Это связано с уменьшением средней температуры теплоносителя. Подтверждены проектные данные по эффективности органов СУЗ (КС, РР и АР).

При переводе установки АРБУС в режим АСТ с повышением мощности существенно изменяется тепловой режим штатных поглощающих стержней. В реакторах с органическим теплоносителем целесообразно использовать «сухие» стержни СУЗ, когда тепло от них отводится через промежуточную гильзу, предохраняющую стержень от воздействия теплоносителя. В связи с этим обоснование применимости такого конструктивного решения приобретает важное значение. На рис. 2 показано, как зависит максимальная температура на поверхности поглощающего стержня от мощности

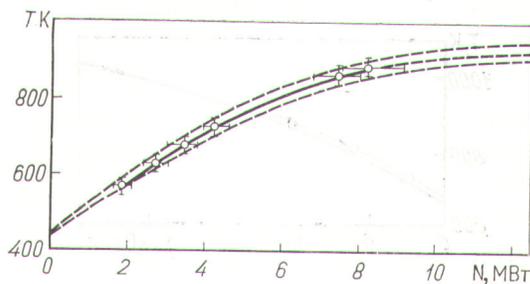


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры на поверхности стержня от мощности реактора: — — — верхний и нижний пределы погрешности измерений

Основные характеристики реактора на различных уровнях тепловой мощности

Параметр	АСТ					АЭС
	5 МВт, расчет	5 МВт, эксперимент	8 МВт, расчет	8 МВт, эксперимент	12,5 МВт проект	5 МВт
Число ТВС	69	68	69	68	69	69
Загрузка ^{235}U , кг	23,6	22,0	23,6	22,0	23,6	23,2
Выработка энергии на момент пуска в режиме АСТ, МВт·сут	—	275	—	275	—	—
Полный запас реактивности «холодной неотравленной» системы, %	19,0	14,4	19,0	14,4	19,0	19,0
Температурный эффект реактивности, %	-2,25	-2,45	-2,75	-2,8	-2,85	-4,0
Эффект стационарного отравления, %	-1,35	-1,66	-1,90	-2,03	-2,40	-1,55
Эффективность стержней*, %	23,0	23,3	23,0	23,0	23,0	22,0
КС, РР и АР	2,20	2,90	2,2	2,85	2,20	2,35
АЗ	—	—	—	—	—	—
Максимальная эффективность одного стержня СУЗ, %	1,30	1,27	1,3	1,25	1,30	1,20
Коэффициент неравномерности энергораспределения:						
по высоте реактора	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
по радиусу реактора	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Полный запас на выгорание, %	13,39	8,52	12,48	7,79	11,96	10,10
Темп падения реактивности, 10^{-3} %/МВт·сут	5,4	5,0	5,4	5,0	5,4	5,4
Кампания (по запасу реактивности), сут	495	340**	290	195**	180	360

* КС — компенсирующие стержни, РР — стержни ручного регулирования, АР — стержни автоматического регулирования, АЗ — стержни аварийной защиты.
** Значение определено из экспериментальных данных по запасу реактивности на выгорание и среднему темпу потери реактивности.

реактора. Эта зависимость, экстраполированная на мощность 12 МВт, дает максимальную температуру, не превышающую 1073—1123 К. Тем самым подтверждена работоспособность органов СУЗ на номинальной мощности в «сухом» исполнении. Те же экспериментальные данные, но в зависимости от среднего удельного энерговыделения активной зоны, приведены на рис. 3. Отметим, что среднее удельное энерговыделение для реактора при мощности 12 МВт составляет 22,2 кВт/л и превышает соответствующие значения (см. статью Ю. И. Токарева и др. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника реакторов, 1978,

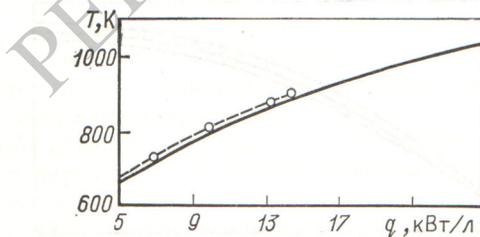


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры на поверхности стержня от удельного энерговыделения: — — — эксперимент; — — — расчет

вып. 1 (21), ч. 1, с. 112) для проектируемых установок.

Заключение. Результаты успешной эксплуатации АРБУС-АЭС и первого этапа опытной эксплуатации этой установки в режиме АСТ с органическим теплоносителем показали следующее:

установка проста и удобна в эксплуатации, позволяет быстро набирать и сбрасывать нагрузки, не требует многочисленного обслуживающего персонала;

основой для разработки оборудования установки может быть стандартное оборудование и арматура, используемые в нефтехимической промышленности;

низкая упругость паров теплоносителя и его слабая коррозионная активность позволяют успешно применять для первого контура тонкостенные трубы и оборудование из углеродистой стали;

технологический режим АСТ на мощности обеспечивает высокую степень стабильности и безопасности установки и гарантирует непопадание активного теплоносителя в наружную теплосеть за счет реализации принципа понижения давления от теплосети к реактору;

процесс радиационно-термического разложения органического теплоносителя, сопровождающийся

осаждением высококипящих продуктов поликонденсации на твэлах активной зоны реактора, определяет длительность кампании установок. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для обеспечения бесфаулинговых режимов работы реактора;

очистка теплоносителя в процессе подготовки и эксплуатации станции приобретает первостепенное значение и требует дальнейших исследований; уровень полей излучения от оборудования при

работе и остановке станции незначителен и не создает дополнительных трудностей при обслуживании и проведении ремонтных работ.

Опытная установка АРБУС-АСТ позволяет изучать различные технологические режимы и испытывать оборудование. Она служит базой для исследований по безопасности таких установок, а также для испытания твэлов и отработки технологии теплоносителя.

Поступила в Редакцию 15.07.80

УДК 621.039.514:621.039.519

Исследование паровых эффектов и коэффициентов реактивности реакторов Белоярской АЭС

АНДРЕЕВ В. П., БОНДАРЕНКО А. В., ВИКУЛОВ В. К., КОЗЫРЕВ В. Д., КРАСНОГОРОВ Ф. М., ЛЮБЧЕНКО В. Ф., МАЛЫЦЕВ В. В., МИТЯЕВ Ю. И., ОВЕШКОВ А. С., СНИТКО Э. И., ШЕЙНМАН А. Г., ШИРОКОВ С. В.

Одной из важных характеристик, определяющих условия эксплуатации канальных водографитовых реакторов, является паровой коэффициент реактивности. В общем случае он определяется соотношением

$$\alpha_{\varphi} = \Delta k / \Delta \varphi, \quad (1)$$

где $\Delta \varphi$ — изменение истинного объемного паросодержания φ теплоносителя в центральной трубке твэлов; Δk — изменение реактивности реактора, вызванное изменением объемного паросодержания.

На Белоярской АЭС (БАЭС) паровые эффекты реактивности экспериментально изучаются с 1974 г., после того как с изменением загрузки активной зоны обоих реакторов паровой коэффициент начал увеличиваться и стал положительным, что проявилось в заметном изменении реактивности при отключении главных циркуляционных насосов (ГЦН) во время изменения мощности реактора. В настоящей работе рассмотрены некоторые результаты этих исследований (с 1976 г.), когда измерения проводились наиболее тщательно по отработанной методике.

Главной причиной появления и роста положительного парового коэффициента реактивности следует считать загрузку в реактор топливных каналов (ТК) с относительно меньшим поглощением нейтронов в топливной композиции и с большим количеством воды, относительный вклад которой в поглощении нейтронов выше, чем в ТК, составлявших ранее основную загрузку реактора.

Существенное влияние на рост парового коэффициента оказало относительное увеличение в активной зоне ^{239}Pu . Та же причина привела к уменьшению эффективной доли запаздывающих нейтронов ($\beta_{\text{эф}}$).

Паровой коэффициент реактивности α_{φ} измеряли на обоих реакторах до и после плановых перегрузок топлива. Ввиду большого разнообразия ТК (до 18 типов), различающихся назначением, конструкцией, топливной композицией, обогащением и выгоранием урана, основное внимание было уделено экспериментальному определению α_{φ} . При этом в экспериментах варьировался расход циркуляционной воды что, влияя на φ , приводило к минимальному изменению других параметров, сказывающихся на реактивности (температуры топлива, графита и т. д.).

Паросодержание, усредненное по высоте активной зоны, до и после изменения расхода рассчитывали по замеренным теплотехническим параметрам реактора с использованием уравнений теплового и материального баланса, с учетом взаимного скольжения фаз в пароводяной смеси и фактического энергораспределения по высоте реактора. Эффект реактивности Δk в эксперименте измеряли непосредственно с помощью реактиметров и по отработке предварительно градуированных стержней автоматического регулирования (АР). Градуировку стержней АР проводили также с помощью реактиметров, погрешность определения градуировочного коэффициента составила 10%.

Для получения наиболее полного представления о возможных режимах работы реакторов опыты проводили как при быстром, так и при медленном снижении расходов до различных уровней. Быстрое снижение расхода вызывалось отключением одного или одновременно двух ГЦН из имеющихся четырех на каждом реакторе. Так как ГЦН на БАЭС из-за отсутствия маховых масс не имеют инерционного выбега, расход теплоносителя при их отключении падает до минимума за