

Опыт эксплуатации реактора БР-5 за период 1959—1966 гг.

А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. ОРЛОВ, М. С. ПИНХАСИК,
Н. Н. АРИСТАРХОВ, И. А. ЕФИМОВ, Б. С. ТЫМОШ

УДК 621.039.526:621.039.56

В январе 1967 г. исполнилось восемь лет со дня пуска реактора БР-5. Большую часть этого времени реактор работал на максимальной мощности 5000 *квт*, основные параметры были близкими к параметрам крупных энергетических реакторов: удельная мощность активной зоны в среднем 360 *квт/л* (максимальное значение 500 *квт/л*); температура теплоносителя на выходе из реактора 500° С. Опыт, накопленный в результате эксплуатации реактора, свидетельствует о том, что задачи, поставленные при сооружении установки БР-5, успешно решены и тем самым оправдались надежды на возможность создания уже в настоящее время АЭС с быстрым реактором достаточно большой мощности.

Весьма удачным оказался выбор окисного торючего, сделанный еще в 1957 г. В твэлах реактора был предусмотрен свободный объем из расчета выгорания 2%, фактическое выгорание достигло 7%. В результате осмотра было отмечено удовлетворительное состояние оболочек большей части твэлов. Исследования показали, что вполне достижимы выгорания около 10% при значительных тепловых потоках, достигающих $(1 \div 2) \cdot 10^6$ *ккал/м²·ч*, и удельной мощности активной зоны 500 *квт/л*. Мы считаем, что окисное топливо, несмотря на низкую плотность и теплопроводность, наиболее перспективно для ближайшего будущего. Применение монокарбидов урана и плутония в активных зонах значительно улучшает физические и экономические характеристики (вследствие большой плотности монокарбидов и лучшей по сравнению с окисями теплопроводности), поэтому с мая 1965 г. реактор БР-5 загрузили твэлами с монокарбидом урана; к 1 марта 1967 г. в них было достигнуто выгорание около 2%. Мы надеемся, что в ближайшие несколько лет будут получены сведения, необходимые для использования монокарбидов в быстрых реакторах.

Задачи, возникшие в связи с применением натрия в качестве теплоносителя первого и промежуточного контуров, в основном решены. В таких контурах с успехом используются аустенитные стали; коррозия их незначительна, если натрий хорошо очищен от окислов. Применяемые на БР-5 холодные ловушки надежно очищают натрий от окислов до чистоты $(1 \div 3) \times$

$\times 10^{-3}\%$. Такая чистота вполне достаточная для предотвращения коррозии и гарантирует от забивания окислами имеющихся в установке узких отверстий и щелей.

Натрий оказался удобным в эксплуатации теплоносителем, и технические проблемы не представляли такой сложности, как предполагалось ранее. Опыт работы реактора показал, что имеется реальная возможность создания вполне надежного оборудования, такого, как насосы, задвижки, теплообменники, приборы для измерения уровня, давления, расхода натрия и т. д. Разработаны и осуществлены различные технологические режимы, в том числе режимы подготовки оборудования, теплоносителя и технологических контуров к заполнению их натрием, режимы проведения ремонтных работ на технологических трактах и пр. Накоплен ценный опыт работы с радиоактивным натрием в условиях, когда в активной зоне реактора размещены твэлы с нарушенной герметичностью.

Большое значение имеют исследования радиоактивных загрязнений теплоносителя, контура и защитного газа. Установлено, что изотопами, определяющими остаточную активность теплоносителя на реакторе БР-5 после распада Na^{24} , являются Cs^{137} (продукт деления плутония) и Na^{22} . В газовой полости реактора активность определялась газообразными осколками деления (изотопами ксенона и криптона). Выход осколков деления из твэлов приводит к некоторому увеличению активности газа и теплоносителя, но не влияет на нормальную эксплуатацию установки.

Исследования мощностных эффектов реактивности и различных явлений, дающих основной вклад в мощностной коэффициент реактивности, показали, что кинетика быстрого реактора в принципе не отличается от кинетики тепловых реакторов.

Работа реактора в 1959—1966 гг.

С января 1959 г. реактор работал на различных уровнях мощности в зависимости от требований проводимых исследований 33 500 ч, включая на мощности 5000 *квт* 8590 ч. За указанное время выработано $85 \cdot 10^6$ *квт·ч* тепловой энергии (табл. 1).

Мощностной режим работы реактора БР-5 в 1959—1966 гг. Таблица 1

Год	Время работы реактора (ч) на мощности						% от календарного времени
	до 100 квт	101— 1000 квт	1001— 4000 квт	4001— 4999 квт	5000 квт	всего	
1959	574	167	342	91	48	1 222	27,4
1960	583	1 639	2 174	1 394	887	6 677	78,7
1961	498	78	864	231	2 709	4 380	75,4
1962	1 307	3 139	—	—	—	4 446	60,5
1963	529	3 771	990	—	—	5 290	61,6
1964	224	1 218	2 487	—	—	3 929	53,6
1965	271	240	281	79	1 586	2 457	46,5
1966	783	400	229	192	3 362	4 966	56,9
Итого	4769	10 652	7367	1987	8592	33 367	—

За указанный период два раза осуществлялась полная перегрузка активной зоны. С сентября 1961 г. по март 1962 г. реактор был остановлен из-за нарушения герметичности части твэлов, достигших 5% выгорания и загрязнения продуктами деления теплоносителя и оборудования первого контура. В течение шести месяцев были выполнены следующие работы: разгрузка реактора, испытание на герметичность всех тепловыделяющих сборок, очистка первого контура от осадков деления, повторная загрузка в активную зону 80% тепловыделяющих сборок и части новых сборок. Вторая полная перегрузка производилась с декабря 1964 г. по май 1965 г., после завершения работы активной зоны с твэлами из окиси плутония (достигнутое выгорание составляло 6,5%); затем реактор был загружен твэлами из монокарбида урана.

В 1962—1964 гг. реактор работал на пониженных уровнях мощности (до 3500 квт), так как из некоторых повторно загруженных сборок с твэлами из двуокиси плутония, достигших 5% выгорания, в первый контур стали проникать газообразные и летучие продукты деления. При этом исследовался выход твердых и газообразных продуктов деления из негерметичных твэлов в теплоноситель и газовые полости первого контура в зависимости от температурного и мощностного режимов работы реактора. До декабря 1960 г. обеспечивался проектный температурный режим теплоносителя: на входе 375°С и на выходе 450°С. С 1 декабря 1960 г. температура натрия на выходе из реактора была увеличена до 500°С. Результаты анализа температурных режимов работы установки приведены в табл. 2.

Температурный режим работы реактора БР-5 в 1959—1966 гг. Таблица 2

Год	Время работы первого контура (ч) при температуре натрия на выходе из реактора				
	до 300°С	301— 400°С	401— 450°С	451— 495°С	496— 510°С
1959	6 731	295	2	—	—
1960	2 446	3 887	1239	748	248
1961	2 734	452	174	850	2828
1962	3 196	4 073	—	—	—
1963	3 397	4 977	167	219	—
1964	4 668	1 190	1200	1726	—
1965	4 000	939	225	451	1483
1966	3 490	557	427	333	3664
Итого	30 662	16 370	3134	4327	8223

В течение всего периода эксплуатации БР-5 имели место предусмотренные и вынужденные остановки реактора, вызванные различными причинами. Анализ этих причин приведен в табл. 3.

Половина всего времени простоя реактора связана с неисправностями оборудования первого и второго технологических контуров и определяется в основном временем, необходимым на ремонт и замену циркуляционных натриевых насосов первого контура.

Представляет интерес анализ причин срабатывания аварийной защиты (табл. 4). Из таблицы видно, что 35% общего числа срабатываний аварийной защиты происходило при выводе реактора на мощность (на уровнях до 2% от номинальной мощности). Это объясняется большим числом операций по переключениям и блокировкам аппаратуры СУЗ при выводе реактора на мощность.

Эксплуатация и ремонт насосов

На реакторной установке в качестве циркуляционных насосов первого и второго контуров используются центробежные герметичные одноколесные насосы с вертикальным расположением вала (рис. 1).

Ниже приведены основные параметры насоса:

Производительность	150 м ³ /ч
Напор	4 атм
Максимальная температура теплоносителя	450°С
Число оборотов рабочего колеса	1450 об/мин

В течение восьми лет эксплуатации реактора, особенно в период пуска наладочных работ (1958—1959 гг.) и последующие 1960—1961 гг.,

Анализ причин остановки реактора БР-5 с июня 1959 г. по июнь 1966 г.

Таблица 3

Таблица 1											
Причина остановки реактора	Время простоя реактора, ч									Всего	
	1959 г. (второе полугодие)	1960 г.	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г. (первое полугодие)			
	ч	% от календарного времени									
Плановая догрузка активной зоны	127	241	649	756	67	34	260	11	2 144	12	
Остановки, связанные с проведением экспериментальных работ	444	37	142	502	684	20	85	479	2 392	13,5	
Неисправность оборудования первого контура	837	173	410	77	2463	1548	1	91	5 599	31,7	
Неисправность оборудования второго контура	500	120	166	—	—	1077	265	26	2 153	12,2	
Неисправность оборудования третьего контура	53	470	—	—	150	—	—	8	533	3,0	
Неисправность вспомогательного оборудования	36	425	24	204	23	129	9	16	866	4,9	
Неисправность системы СУЗ	80	80	30	45	15	4	11	26	291	1,65	
Неисправность системы КИП	134	—	1	3	—	562	140	292	1 132	6,4	
Неисправность системы электропитания	1	5	4	121	17	—	12	2	160	0,95	
Ошибки персонала	5	53	9	5	92	8	56	3	230	1,3	
Прочие причины	—	136	108	99	167	14	1509	171	2 120	12,05	
Итого	2285	1739	1542	1811	3532	3396	2347	1039	17 691	100	

Анализ причин срабатывания аварийной защиты

Таблица 4

Причина срабатывания АЗ	Число срабатываний АЗ	В том числе:	
		БАЗ*	МАЗ**
Неисправность аппаратуры СУЗ	56	35	21
Неисправность технологического оборудования	49	30	19
Ошибки персонала при управлении аппаратурой	48	29	19
Неисправность системы электропитания	34	25	9
Проявление мощностных эффектов	12	5	7
Неисправность контрольно-измерительных приборов основных контуров	11	6	5
Прочие причины	17	16	1
Итого	227	146	81

* БАЗ — быстродействующая аварийная защита.

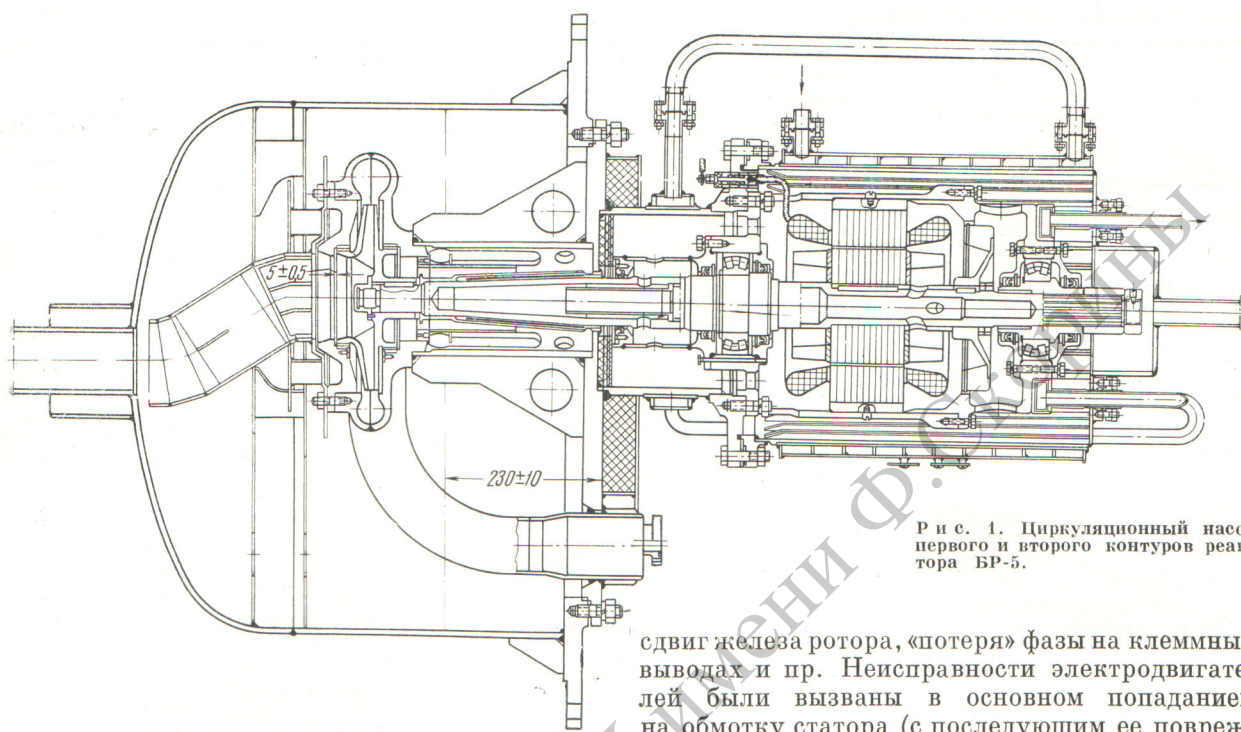
** МАЗ — медленнодействующая аварийная защита.

имели место простои реактора из-за неисправности циркуляционных насосов. Всего за период 1958—1966 гг. отмечено 45 остановок, связанных с ремонтом насосов, из них 22 — ремонт насосов первого контура и 23 — ремонт насосов второго контура. На период 1959—1961 гг. приходится 25 таких остановок.

Особенно много времени занимает ремонт или замена циркуляционного насоса первого контура. При неисправностях оборудования первого контура длительность простоя определяется временем спада радиоактивности теплоносителя, наведенная активность которого составляет около 3 кюри/л. Время замены насоса первого контура составляло 15—20 суток, а насоса второго контура 6—7 суток.

Ниже приводятся основные неисправности циркуляционных насосов первого и второго контуров.

Перекачивание газа насосом. Как уже отмечалось в литературе, во время пуско-наладочных работ на первом контуре реактора БР-5 газ из газовой полости бака работающего насоса перекачивался в газовую полость центральной трубы. При работе насоса в баке создавались благоприятные условия для образования газометаллической эмульсии и захвата ее рабочим



Р и с. 1. Циркуляционный насос первого и второго контуров реактора БР-5.

колесом. Установлено, что перекачивание газа вызывалось «неорганизованным» входом теплоносителя в бак насоса. В начале 1959 г. на всех циркуляционных насосах была усовершенствована гидравлическая часть, в результате этого перекачивание газа насосом устранено.

Выход из строя подшипников насоса. Неисправности в работе как нижних, так и верхних подшипников насосов составляли 60% всех неисправностей насосов (26 остановок, из них 11 из-за верхних и 15 из-за нижних подшипников). Работоспособность подшипников в значительной степени определялась условиями охлаждения и сохранения в них смазки. Средняя продолжительность работы верхних подшипников в 1959—1960 гг. не превышала 1000 ч. Для улучшения работы на корпуса подшипников были напрессованы охлаждающие камеры.

После установки охлаждающих камер на все циркуляционные насосы (в 1960 г.), были заменены только три верхних подшипника. Непрерывная работа нижних подшипников составила на некоторых насосах первого контура 16 000 ч, на насосах второго контура 20 000 ч.

Повреждения электрической части насоса. За время эксплуатации произошло 10 остановок циркуляционных насосов из-за неисправностей электродвигателей, причинами которых послужили: межвитковое замыкание обмотки статора,

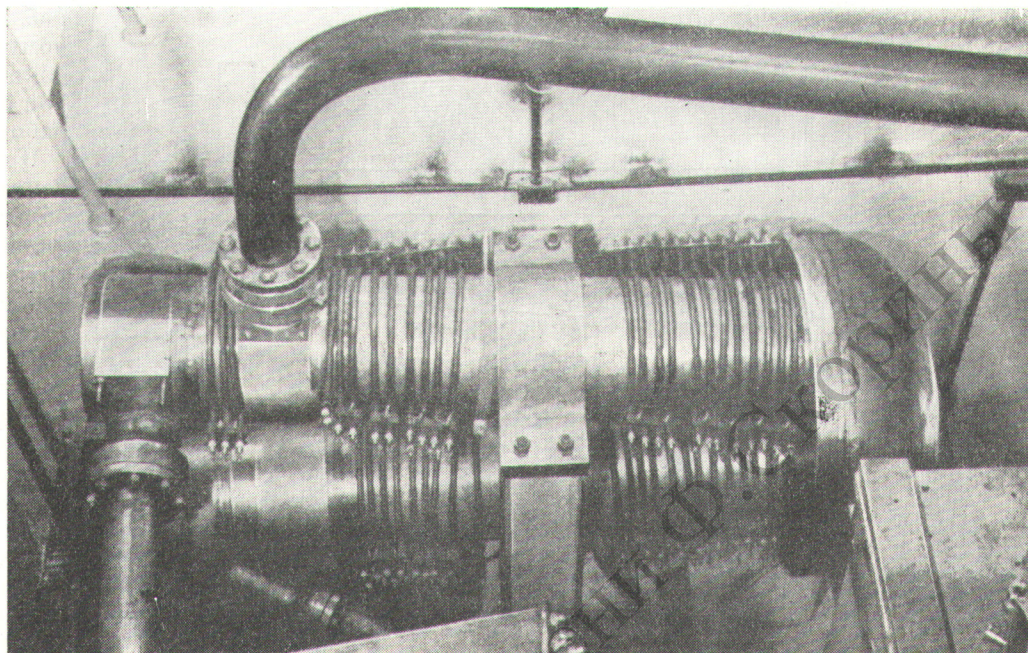
сдвиг железа ротора, «потеря» фазы на клеммных выводах и пр. Неисправности электродвигателей были вызваны в основном попаданием на обмотку статора (с последующим ее повреждением) сконденсированных паров теплоносителя, а также смазки, разжиженной и выброшенной из подшипниковых узлов. Поврежденная обмотка заменялась без демонтажа циркуляционного насоса и дренирования теплоносителя.

Разуплотнение основного фланцевого соединения насоса. Герметичность указанного соединения нарушалась в результате температурных перепадов, связанных с прекращением циркуляции и соответствующим колебанием температуры теплоносителя. В связи с этим в 1960 г. на фланцевых соединениях баков с корпусами всех циркуляционных насосов были наварены П-образные герметичные чехлы. С целью увеличения надежности циркуляционного насоса и сокращения времени на ремонт в 1964—1965 гг. его конструкция была улучшена. При этом была изменена система крепления нижнего подшипника, что позволило проводить необходимую проверку или замену подшипника, не прибегая к демонтажу насоса; улучшены система охлаждения подшипников, защита электровыводов двигателя, дистанционирование подачи смазки в подшипниковые узлы.

Работа теплообменного оборудования реактора

На реакторе БР-5 было установлено следующее теплообменное оборудование: два теплообменника Na — NaK на нитках первого контура;

Рис. 2. Теплообменник первого контура реактора БР-5.



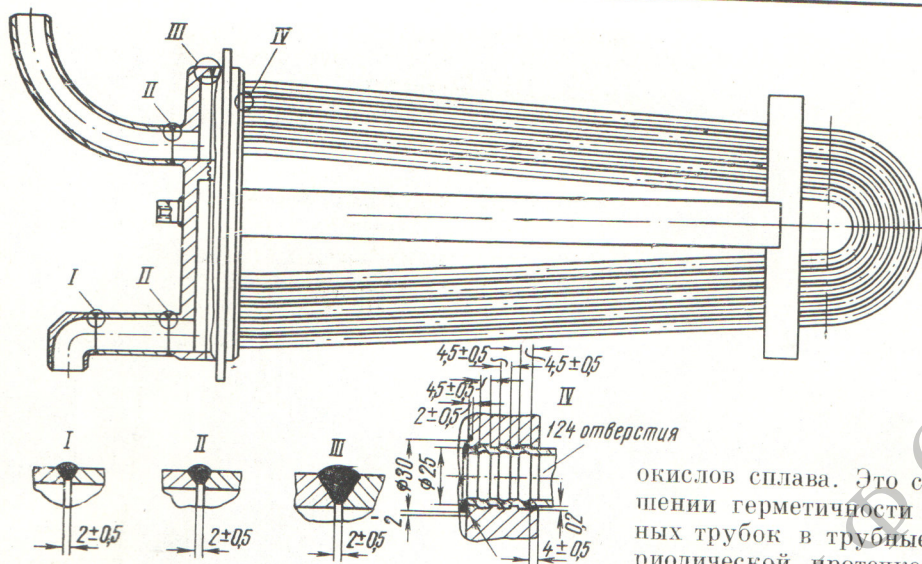
теплообменники NaK — воздух и парогенератор на нитках второго (промежуточного) контура. В конце 1960 г. парогенератор был заменен теплообменником NaK — воздух, аналогичным работающему на воздушной нитке с момента пуска реактора.

Теплообменник Na—NaK. Теплообменник представляет собой кожухотрубный аппарат с 85 U-образными трубками диаметром 22 мм и толщиной стенки 2 мм. Трубки расположены в кожухе, состоящем из двух цилиндров, приваренных к доске штампованного дна. По трубкам протекает натрий, в межтрубном пространстве NaK. Теплообменник изготовлен из нержавеющей стали 1X18H9T. Общий вид теплообменника с подводящими трубопроводами и с элементами электрообогрева показан на рис. 2. За восемь лет эксплуатации установки теплообменники обеих ниток проработали в среде натрия 60 000 ч, из них в режиме теплоотвода при работе реактора на мощности 33 500 ч. За указанный период не было замечено нарушений герметичности между трубным пучком и межтрубным пространством. Целостность теплообменников контролируется при помощи датчиков контроля γ -излучения, установленных на трубопроводах ниток второго контура. Эксплуатация теплообменников Na — NaK продолжается.

Парогенератор был установлен на одной из ниток второго контура и эксплуатировался

с июня 1959 г. по октябрь 1960 г. Опытный прямоточный парогенератор состоял из двух последовательно соединенных секций П-образной формы. Каждая секция представляла собой кожухотрубный теплообменник, состоящий из 61 U-образной паро-водяной трубки диаметром 16 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Для предотвращения непосредственного контакта вода — пар с NaK при нарушении герметичности трубного пучка трубки были заключены на прямых участках в обсадные трубки диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Зазор между трубками заполнялся ртутью. Парогенератор, как и все жидкометаллическое оборудование контуров реактора, был изготовлен из нержавеющей стали 1X18H9T. Он вырабатывал 5 т/ч пара и проработал всего 4200 ч.

В течение августа — сентября 1960 г. было установлено нарушение плотности в восьми трубках первой секции парогенератора. Это нарушение фиксировалось подъемом уровня ртути и увеличением давления газа в расширительном баке. Одновременно наблюдалось снижение теплосъема с первой секции парогенератора. Исследования трубок показали, что дефекты имеют вид продольных трещин длиной 10—70 см, появляющихся в испарительной части парогенератора (в зоне конца испарения и начала перегрева), и связаны с межкристаллитной коррозией нержавеющей стали в условиях колебания температур и его напряжений.



Р и с. 3. Секция воздушного теплообменника промежуточного контура реактора БР-5.

В октябре 1960 г. отмечалась значительная протечка ртути в сплав NaK из-за нарушения плотности одной из обсадных труб в месте ее заделки в трубную доску. Причиной послужил дефект при изготовлении парогенератора.

Полученный опыт эксплуатации парогенератора с ртутной прослойкой между водой и сплавом NaK позволяет сделать вывод, что усложнение конструкции парогенератора с целью увеличения его надежности не всегда оправдано.

Теплообменник NaK — воздух. Теплообменник состоит из девяти секций, размещенных в корпусе размером $1,5 \times 1,5 \times 2$ м. Каждая секция представляет собой пучок из 62 U-образных трубок диаметром 25 мм и толщиной стенки 1,5 мм, расположенных в шахматном порядке и заделанных в трубную доску камер секции (рис. 3). Сплав NaK поступает в верхний коллектор теплообменника, из которого распределяется по трем параллельным трехсекционным рядам и отводится из теплообменника через нижний коллектор. Воздух для охлаждения сплава подается снизу вверх. Секции теплообменника изготовлены из нержавеющей стали 1X18H9T.

При эксплуатации воздушных теплообменников на магистралях второго контура до января 1966 г. специальных осмотров состояния трубных пучков секций внутри корпуса не проводилось. Никаких отклонений рабочих параметров сплава NaK и воздуха от номиналов не

наблюдалось. К указанному времени теплообменники первой и второй ниток контура проработали по 16 500 ч.

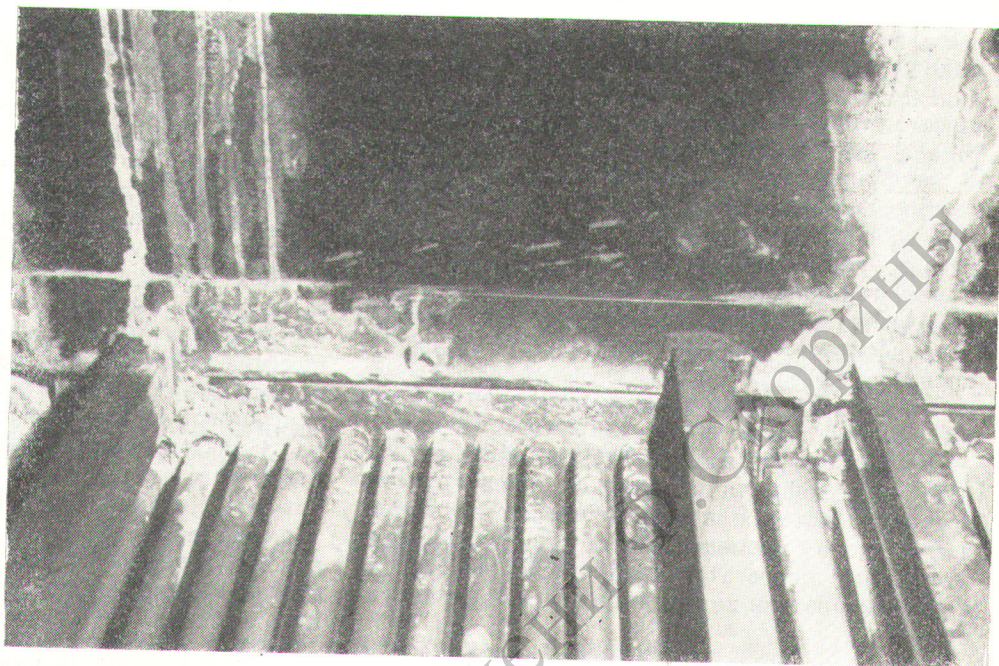
В январе 1966 г. при осмотре секций теплообменника со стороны нижнего ряда пучка труб было установлено, что отдельные трубки и группа трубок в местах заделки в трубные доски трех нижних секций покрыты наростами

окислов сплава. Это свидетельствовало о нарушении герметичности в местах заделки отдельных трубок в трубные доски и небольшой периодической протечке сплава через образовавшиеся неплотности. На рис. 4 приведена фотография состояния нижних секций теплообменника. Осмотр трубок после удаления с них окислов сплава показал, что поверхность трубок имеет удовлетворительное состояние с незначительными коррозионными повреждениями. При циркуляции теплоносителя по контуру после заполнения теплообменника сплавом NaK протечки NaK не обнаружено. Теплообменник продолжали эксплуатировать без замены текущих секций, при постоянном наблюдении за состоянием нижнего ряда труб, и периодически осматривали состояние трубок при остановках. При осмотре трубок секций, проведенном в апреле и декабре 1966 г., а также в феврале 1967 г., было установлено, что число мест с окисными образованиями на трубных досках по сравнению с январем 1966 г. значительно уменьшилось.

Эксплуатация арматуры для жидкого металла

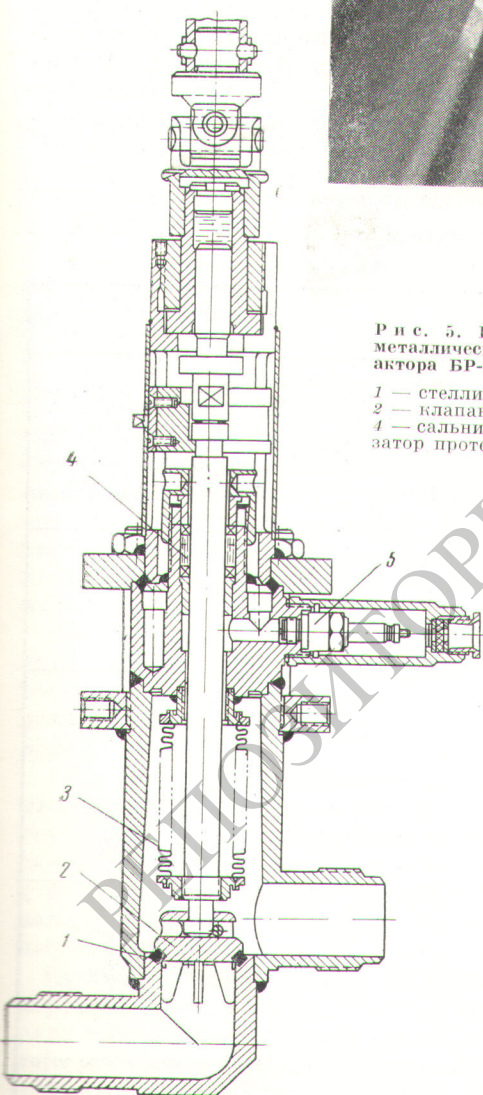
На жидкометаллических контурах реактора БР-5 применены шесть типоразмеров арматуры, вентили Ду-15, Ду-25, Ду-40, Ду-100 и обратные клапаны Ду-100 и Ду-70. Арматура для жидкого металла состоит из 58 единиц, в том числе на первом контуре 30. Вся арматура, установленная на жидкометаллических контурах, выполнена из нержавеющей стали 1X18H9T. На рис. 5 приведен вентиль, конструктивное решение которого заложено во все типоразмеры. Вентили данной конструкции рассчитаны на работу при температуре натрия или NaK до 500°C и давлении до 10 кг/см^2 . Герметичность

Р и с. 4. Нижний пучок трубок секций воздушного теплообменника при протечках щелочного металла (январь 1966 г.).



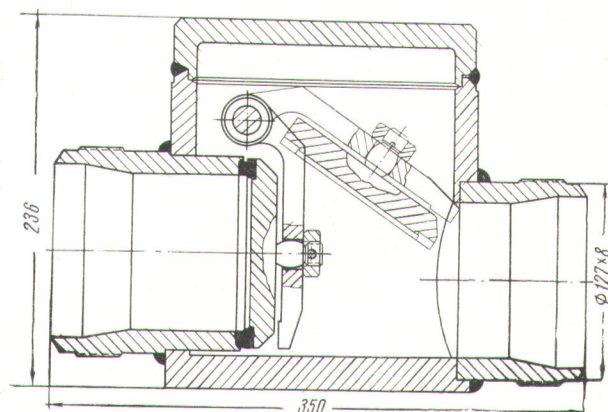
Р и с. 5. Вентиль жидкометаллических контуров реактора БР-5:

1 — стеллитовые наплавки;
2 — клапан; 3 — сиффон;
4 — сальник; 5 — сигнализатор протечки (свеча).



по штоку достигается при помощи многослойных сиффонов. На уплотнительных поверхностях седла и клапана наплавлен стеллит. На рис. 6. показана схема обратного клапана. За время эксплуатации установки арматура прослужила около 60 000 ч, в среде жидкометаллического теплоносителя при температурах натрия в первом контуре и сплава NaK во втором контуре 240—500 °С. Содержание кислорода в контурах поддерживалось в пределах $(1 \div 3) \cdot 10^{-3} \%$.

За восемь лет эксплуатации установки имели место неисправности только трех регулирую-



Р и с. 6. Обратный клапан напорного трубопровода первого контура реактора БР-5.

щих вентилях Ду-15, установленных в системе индикации. Неисправности были связаны с нарушением герметичности сильфона с появлением незначительного количества теплоносителя в полости между сильфоном и сальником. В начальный период эксплуатации плотность вентилях была достаточно хорошей. После 1000—2000 ч работы герметичность вентилях начала ухудшаться. Было установлено, что утечка теплоносителя при закрытом вентиле находится в прямой зависимости от чистоты теплоносителя. За время эксплуатации установки из контура были вырезаны десять вентилях Ду-40 и Ду-25 из-за повышенной протечки теплоносителя через закрытый клапан.

Опыт эксплуатации арматуры свидетельствует об имеющихся недостатках в конструкции вентилях, которые не обеспечивают в течение длительного времени плотности заклипания. Указанный недостаток не приводил к остановкам реактора или каким-либо аварийным ситуациям.

Контроль герметичности оболочек твэлов и радиоактивного загрязнения контура

При работе реактора с твэлами из двуокиси плутония, достигшими выгорания более 5%, возникла необходимость в системе контроля герметичности оболочек твэлов, а также контроля радиоактивного загрязнения теплоносителя и стенок трубопроводов первого контура. С 1962 г. проводится регулярный контроль загрязнения продуктами деления теплоносителя, стенок трубопроводов и газовых полостей контура реактора при помощи сцинтилляционного гамма-спектрометра. С 1964 г. проводится постоянный контроль активности теплоносителя по запаздывающим нейтронам при помощи счетчиков нейтронов с коронным разрядом, установленных на трубопроводах первого контура, а также измеряется β -активность инертного газа первого контура. Эксплуатация этих систем контроля позволила получить информацию о выходе продуктов деления в теплоноси-

Максимальная активность продуктов деления и продуктов активации натрия в первом контуре в различные периоды работы реактора

Таблица 5

Место взятия пробы	Изотоп	Единица измерения	Апрель 1962 г. — октябрь 1964 г.	Май — август 1965 г.	Август 1965 г. — апрель 1966 г.
			Мощность 3500 кет; в активной зоне 63 тепловыделяющие сборки из PuO_2 с выгоранием до 6,5% (из них 17 с дефек- тами твэлов)	Мощность 5000 кет; в активной зоне отсутствуют твэлы с дефектами, актив- ность обусловлена загрязнением пер- вого контура плу- тонием	Мощность 5000 кет; в активной зоне четыре тепловыде- ляющие сборки из PuO_2 с выгоранием до 6,7% (из них 2 с дефектами твэлов)
Газовая полость насоса № 2 пер- вого контура	Xe^{133} Xe^{135} Ar^{41} Ne^{23}	мкюри/см ³ » » »	250 (420 *) 32 (145 *) 0,1 700	0,31 0,25 0,1 700	28 9 0,1 700
Теплоноситель пер- вого контура	J^{131} Cs^{137} $\text{Zr}^{95} - \text{Nb}^{95}$ $\text{Ba}^{140} - \text{La}^{140}$ Ne^{23} Na^{24} Na^{23}	» » » » » » »	0,8 7 0,3 2 500 3000 0,15	0,001 0,5 — 0,01 500 3000 0,23	0,04 1,2 — — 500 3000 0,20
Стенки трубопрово- да первого кон- тура	J^{131} Cs^{137} $\text{Zr}^{95} - \text{Nb}^{95}$ $\text{Ba}^{140} - \text{La}^{140}$	мкюри/см ² » » »	70 74 55 19	0,001 0,01 0,3 0,08	0,75 0,1 0,4 1,7

* Максимальная активность ксенона на 1 ноября 1964 г. — в момент значительной разгерметизации твэлов, после чего реактор был остановлен для замены активной зоны.

тель и газовые полости первого контура при различных состояниях активной зоны.

Кроме изотопов Na^{24} и Na^{22} в первом контуре были обнаружены следующие продукты деления: Cs^{137} , Cs^{136} , J^{131} , Zr^{95} , Ba^{140} , Ce^{144} , Ru^{106} , а также Ne^{23} , образующийся из Na^{23} по реакции (n, p) . В газовых полостях первого контура кроме изотопов Ar^{41} и Ne^{23} обнаружены газообразные продукты деления: Xe^{133} , Xe^{135} , Xe^{131} , Xe^{138} , Kr^{88} , Kr^{87} , Kr^{85} , а также J^{131} .

В табл. 5 приведены значения активности продуктов деления и продуктов активации натрия в первом контуре реактора БР-5 в различные периоды его работы. Отмечено, что активность J^{131} и Cs^{136} в теплоносителе и на стенках контура, а также активность J^{131} в газе первого

контура становились заметными лишь при значительной разгерметизации элементов. Доля выхода изотопов J^{131} , Zr^{95} , Ba^{140} , Xe^{135} из негерметичных твэлов составляет $10^{-2} - 10^{-3}$, доля выхода изотопов Cs^{137} , Cs^{136} и Xe^{133} — на порядок больше.

Холодная ловушка, предназначенная для очистки натрия от окислов, хорошо улавливает осколки деления, такие, как J^{131} , Cs^{137} , Cs^{136} . При работе контура с включенной ловушкой более 90% активности иода и цезия в контуре переходит в ловушку. Холодная ловушка может улавливать изотопы Zr^{95} и Ba^{140} , но значительно хуже, чем изотопы иода и цезия.

Поступила в Редакцию 12/VI 1967 г.

Диаграммы состояния плутония с металлами групп IIIA, IVA, VIII и IV

В. И. КУТАЙЦЕВ, Н. Т. ЧЕБОТАРЕВ, М. А. АНДРИАНОВ, В. Н. КОНЕВ, И. Г. ЛЕБЕДЕВ,
В. И. БАГРОВА, А. В. БЕЗНОСИКОВА, А. А. КРУГЛОВ, П. Н. ПЕТРОВ,
Е. С. СМОТРИЦКАЯ

УДК 546.799.4:669.824

За последние годы в Советском Союзе, США, Англии и Франции проведены значительные работы в области металловедения плутония и его сплавов. Исследованы структура и свойства сплавов плутония со многими элементами периодической системы и построены соответствующие диаграммы состояния. При исследовании сплавов в наших работах применялись методы металлографического, рентгенографического, дифференциально-термического и dilatометрического анализов. В отдельных случаях определялись магнитные свойства и электропроводность металла и его сплавов.

При изучении сплавов широко использовались микрометоды, позволяющие на образцах весом 10—300 мг получать достаточно точные данные об их структуре и фазовых превращениях.

В тех случаях, когда по условиям опыта микрообразцы не обеспечивали достаточной точности (определение коэффициента термического расширения, электропроводности, опыты с применением высоких давлений), использовались образцы большого веса — порядка нескольких граммов.

Система Pu — Sc. Эта система (рис. 1) характеризуется образованием непрерывного ряда твердых растворов на основе модификаций ϵ -фазы плутония и γ -фазы скандия, а также широких областей твердых растворов на основе

δ -фазы плутония и α -фазы скандия. Максимальная растворимость скандия в δ -фазе плутония при температуре 660°C составляет 26%. Растворимость плутония в α -фазе скандия при температуре 850°C достигает 40%. Методом рентгенографического анализа установлено также существование широкой области твердых растворов на основе гранецентрированной кубической решетки β -фазы скандия. Максимальная растворимость плутония в β -фазе скандия составляет приблизительно 42—45%.

В области концентрации 41—43% скандия при температуре 760°C образуется промежуточная фаза ξ , имеющая структуру гексагональной четырехслойной компактной упаковки с неупорядоченным расположением атомов плутония и скандия в решетке. Периоды решетки этой фазы в пределах области гомогенности:

$$a = (3,310 \div 3,307) \pm 0,001 \text{ \AA};$$

$$c = (10,715 \div 10,718) \pm 0,002 \text{ \AA}.$$

Система Pu — Y. Эта система (рис. 2) характеризуется незначительной растворимостью иттрия в модификациях плутония. Растворимость плутония в α -фазе иттрия при температуре около 820°C составляет $\sim 15\%$. Результаты настоящей работы удовлетворительно согласуются с данными, полученными сотрудниками Маундской лаборатории [1]. Однако в деталях, особенно в положении линии ликвидуса, при-