

3. Chan P., Dastur A. The sensitivity of positive scram reactivity neutronic decoupling in the RBMK-1000. — Nucl. Sci. Engng, 1989, v. 103, p. 289.
4. Loizzo P. 2-D and 3-D Neutron Calculations during the Chernobyl Transient. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00008, 1991.
5. Loizzo P. Xe Distribution Effect on the Initial Power Distribution of the Chernobyl Accident. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00009, 1992.
6. Адамов Е.О., Василевский В.П., Ионов А.И. и др. Анализ первой фазы развития аварийного процесса на четвертом блоке Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 1, с. 24.
7. Абагян А.А., Аршавский И.М., Дмитриев В.М. и др. Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС. — Там же, 1991, т. 71, вып. 4, с. 275.
8. Danilova E., Zinovjeva N., Podlazarov L. e.a. Problems of the Creation the Full-Scale Computer Code Complex «TROJA» for RBMK-Type reactor NPP's simulation. RBMK Safety — Bilateral ENEA-RDIPE Agreement on the Dynamics Modelling under Severe Accidents. Second Bilateral ENEA-RDIPE Working Meeting, Rome, 1990, May 20—25.
9. Fowler T., Vondy D., Cunningham G. Nuclear Reactor Core Analysis: CITATION. ORNL-TM-2496, Rev. 2, Oak-Ridge, 1971.
10. Stenbock I., Rozhdestvensky M., Podlazarov L. e.a. Methodology and Code to Calculate Two Group Macro Cross Sections in RBMK Reactor Polycell. ET 91/03, Moscow, 1991.
11. Емельянов И.Я., Постников В.В., Володько Ю.И. и др. Контроль и регулирование энергораспределения в РБМК. — Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 6, с. 360.
12. Броницкий Л.Л., Постников В.В., Пошин В.А. и др. Восстановление трехмерного поля энерговыделения в ТВС РБМК-1500. — Там же, 1991, т. 70, вып. 4, с. 246.
13. Loizzo P. RBMK Super Cell: Void Effect and Control Rod Worth. A Benchmark Evaluation. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00005, 1991.
14. Loizzo P. Alternate Calculation of RBMK Control Rod Worth. Addendum to the Benchmark Evaluation. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00006, 1991.
15. Loizzo P. Qualification and Adjustment of WIMS Cross Section for Chernobyl. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00007, 1991.
16. Rozhdestvenskij M.I., Gusejnova O.E., Davydov V.K., Tochenyi L.V. Neutronics Calculation of Two-dimensional Polylattices and Reactivity Effects of Channel-type Water-graphite Reactors. Second Bilateral ENEA-RDIPE Working Meeting. Rome, 1990, May 20—25.
17. Trekhov V., Podlazarov L. Automatic CITATION Input for the RBMK Polycell Microscopic Cross Section Model. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00015, 1992.
18. Loizzo P., Podlazarov L., Trekhov V. Spase Discretization on RBMK with Polycell Physical Constants. ENEA-RDIPE Rep. FT-WAA-00017, 1992.

Поступила в Редакцию 22.06.94

УДК 621.181:621.039.524.44—98

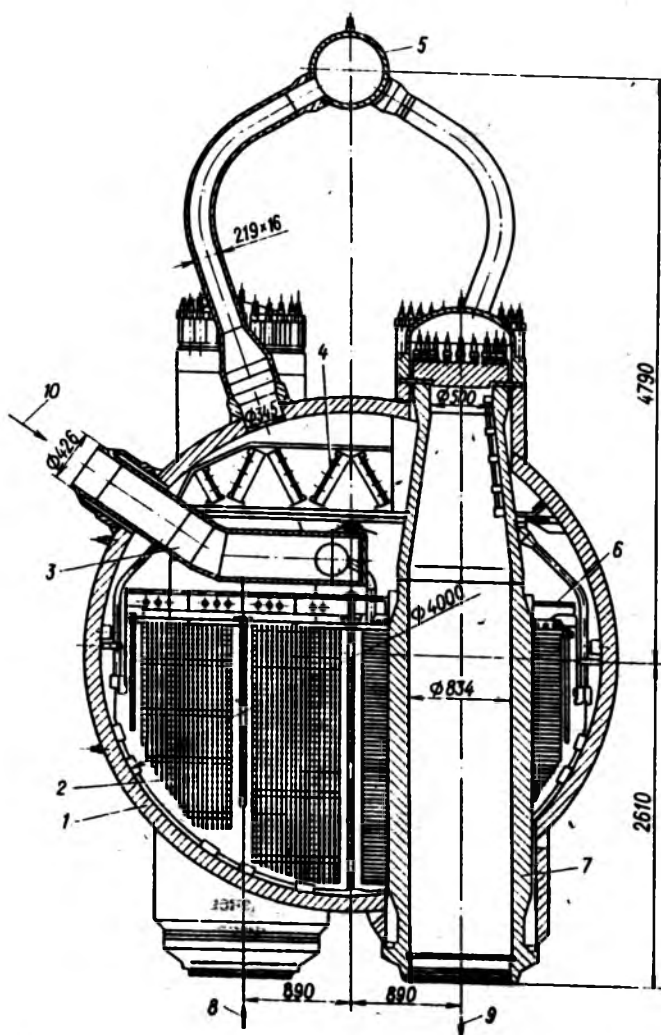
ПАРОГЕНЕРАТОРЫ ЭНЕРГООБЛОКОВ АЭС С ВВЭР-1000

Титов В.Ф. (ОКБ «Гидропресс»)

Энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000 начали эксплуатироваться с 1980 г. и по состоянию на август 1993 г. их насчитывалось 19 (7 в России, 10 на Украине, 2 в Болгарии). С конца 1986 по 1991 г. на парогенераторах ПГВ-1000 (1000М) этих энергоблоков были обнаружены повреждения на выходных («холодных») коллекторах теплоносителя в виде трещин коррозионно-механического происхождения в перемычках между отверстиями перфорированной зоны. Повреждения появлялись только на холодных коллекторах и только в зоне вертикальной оси, проходящей через вершину неперфорированного клина. Конструкция ПГВ-1000 является развитием конструкций горизонтальных парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и показана на рис. 1. Технические характеристики парогенераторов следующие:

	ПГВ-440	ПГВ-1000
Тепловая мощность, МВт. . .	229,2	750
Паропроизводительность (расчетная), кг/с. . .	125	408,33
Давление генерируемого пара, МПа. . .	4,61	6,27
Температура, °С:		
пара. . .	258,9	278,5
питательной воды. . .	164—223	164—220

теплоносителя на входе/выходе в парогенератор. . .	295/267	320/290
Теплоноситель:		
расход, м ³ /ч. . .	7100	21200
давление, МПа. . .	12,26	15,7
скорость в трубках, м/с. . .	2,71	4,21
Коэффициент теплопередачи (средний)		
(с учетом загрязнения), кВт/м ² . . .	4,7	5,4
Среднелогарифмический температурный напор, °С. . .	18,7	22,9
Удельный тепловой поток (средний), кВт/м ² . . .	89,23	12,3
Полная поверхность теплообмена, м ² . . .	2576,6	6115
Общее число трубок. . .	5536	11000
Диаметр и толщина стенки трубок, мм. . .	16×1,4	16×1,5
Приведенная скорость выхода пара		
с зеркала испарения, м/с. . .	0,240	0,382
Влажность пара (расчетная), %. . .	0,25	0,2
Марка стали:		
корпуса. . .	22К	10ГН2МФА
коллекторов теплоносителя. . .	08Х18Н10Т	10ГН2МФА
		с внутренней плакировкой
теплообменных трубок. . .	•	08Х18Н10Т



Р и с. 1. Парогенератор ПГВ-1000 (1000М): 1 — корпус; 2 — трубный пучок; 3 — коллектор подачи питательной воды; 4 — сепарационное устройство; 5 — коллектор пара; 6 — погруженный дырчатый лист; 7 — коллектор теплоносителя; 8, 9 — вход и выход теплоносителя; 10 — подвод питательной воды

Характеристики стали 10ГН2МФА приведены в работе [1]. Ударная вязкость KCV ≥ 245 кДж/м² указана для температуры -10 °С.

Всего по состоянию на конец 1991 г. были обнаружены повреждения, главным образом приборным контролем во время планово-предупредительного ремонта, на 24 парогенераторах, один из которых в 1992 г. отремонтирован и продолжает эксплуатироваться, 23 заменены (табл. 1). Вместе с ними заменены не имеющие дефектов еще 11 парогенераторов. Общее состояние ПГВ-1000 энергоблоков приведено в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Данные о поврежденных ПГВ-1000 на 01.06.93 г.

Энергоблок АЭС	Дата ввода в эксплуатацию	Дата обнаружения повреждения	Число парогенераторов с поврежденными коллекторами	Время наработки повреждения, тыс. ч
Южно-Украинская АЭС:				
1-й, комплект 1	12.82	08.88	2	39—43
» 2	11.89	10.90	1	7
		09.91	1	12,7
2-й, комплект 1	01.85	10.86	4	11,7—16,9
		02.87		
» 2	11.87	03.89	2	13,2
	08.88	07.89		
Нововоронежская АЭС, 5-й блок, 1-й комплект	05.80	06.88	4	58,8—59,1
Запорожская АЭС:				
1-й, комплект 1	12.84	12.88	2	26,0
2-й, » 1	07.85	05.89	3	15,3
3-й, » 1	12.87	10.91	2	34,4
Балаковская АЭС:				
1-й, комплект 1	12.85	11.89	2	24,9
2-й, » 1	03.87	12.90	1	23,6

Т а б л и ц а 2. Состояние ПГВ-1000 на 01.06.93 г.

Энергоблок АЭС	Дата ввода в эксплуатацию	Время наработки, тыс. ч	Состояние
Нововоронежская АЭС, 5-й*	07.89	27,4	Взрывная вальцовка, коллекторы разневолены на заводе, трубы не довальцованы, низкотемпературная термообработка выполнена в конце 1992 г.
Южно-Украинская АЭС:			
1-й, комплект 2* (ПГ4**)	11.89 (ПГ1-ПГ3) 06.91 (ПГ4)	25,07 (ПГ1), 25,07 (ПГ2), 16,9 (ПГ3), 14,00 (ПГ4)	ПГ1—ПГ3 — взрывная вальцовка, коллекторы разневолены на заводе, трубы не довальцованы, низкотемпературная термообработка выполнена на АЭС ПГ3 поврежден после низкотемпературной термообработки, отремонтирован и пущен 09.92 г. ПГ4 — гидравлическая вальцовка, коллекторы разневолены на заводе, низкотемпературная термообработка выполнена на заводе
2-й, комплект 3**	05.91	14,5	Гидравлическая вальцовка, коллекторы разневолены, низкотемпературная термообработка выполнена до пуска в эксплуатацию

3-й	09.89	26,2	Взрывная вальцовка, коллекторы разневолены на АЭС, трубы не довальцованы, низкотемпературная термообработка не проводилась
Калининская АЭС:			
1-й**	05.84	58,94—59,87	Взрывная вальцовка, коллекторы разневолены на АЭС, трубы не довальцованы, низкотемпературная термообработка выполнена
2-й**	12.86	39,67—40,27	То же
Запорожская АЭС:			
1-й**	10.89	25,65	Вальцовка взрывом сухими зарядами, коллекторы разневолены, трубы не довальцованы, низкотемпературная термообработка выполнена на АЭС
2-й*	09.90	19,25	Взрывная вальцовка, трубы довальцованы, коллекторы разневолены на заводе, низкотемпературная термообработка выполнена
3-й, 2-й комплект*	05.92	7,6	Вальцовка взрывом сухими зарядами, коллекторы разневолены на заводе, трубы довальцованы, низкотемпературная термообработка проведена на заводе
4-й*	12.87	38,45	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
5-й*	08.89	26,8	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
Хмельницкая АЭС, 1-й блок*	12.87	38,45	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
Ровенская АЭС, 3-й блок**	12.86	45,5	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
Балаковская АЭС:			
1-й*,**	09.90	19,25	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены, низкотемпературная термообработка проведена до пуска
2-й	10.87 ПГ1, 3, 4**, 06.91 ПГ2*	39,7 ПГ1, 14,0 ПГ2, 39,7 ПГ3, 39,7 ПГ4	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы ПГ1, 3, 4 разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка проведена на АЭС
3-й**	12.88	31,45	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
4-й*	05.93	0,5	Взрывная вальцовка, трубы довальцованы, коллекторы разневолены и низкотемпературная термообработка выполнена до пуска
АЭС «Козлодуй» (Болгария):			
5-й**	11.87	39,05	Взрывная вальцовка, трубы не довальцованы, коллекторы разневолены на АЭС, низкотемпературная термообработка выполнена
6-й**	06.91	14	Взрывная вальцовка, трубы довальцованы, коллекторы разневолены и низкотемпературная термообработка выполнена до пуска

* ** Поставщик ПО «Атомаш» и завод им. Орджоникидзе соответственно.

Ведущими институтами проведена большая работа по исследованию причин и установлению механизма повреждений, разработке мероприятий по повышению эксплуатационной надежности и ресурса ПГВ-1000 (1000М). Установлено, что причины повреждения многофакторные, механизм повреждений — ранее не изученный в практике парогенераторостроения, обусловленный резким изменением пластичности стали 10ГН2МФА при рабочей температуре холодного коллектора и напряжениях (остаточных технологических и рабочих), приближающихся к пределу текучести, в условиях воздействия коррозионно-активной рабочей среды ($pH < 5$). Исследованиями установлена склонность стали 10ГН2МФА к коррозионному растрескиванию под напряжением при рабочей температуре холодного коллектора в условиях накопления деформаций с малой скоростью, которая в свою очередь обусловлена ее склонностью к ползучести при низкой температуре и напряжениях, близких к пределу текучести (рис. 2). В процессе дополнительного исследования выявлена склонность стали к деформационному старению, отмечены снижение характеристик циклической прочности при испытании образцов, вырезанных из перемычек, особенности развития процесса циклического деформирования при 290 °С, загрязнение стали мартеновской выплавки неметаллическими включениями (MnS), а также структурные изменения в тонком слое при сверлении отверстий.

Исследования поверхности трещин на темплатах, извлеченных из поврежденных коллекторов, показали, что развитие трещин носило ступенчатый характер, обусловленный циклическими нагрузками, среди которых были, очевидно, и термопульсационные, вызванные, в частности, отключениями подогревателей высокого давления, колебаниями уровня и давления, возможными изменениями характера циркуляции при переходных режимах [2, 3].

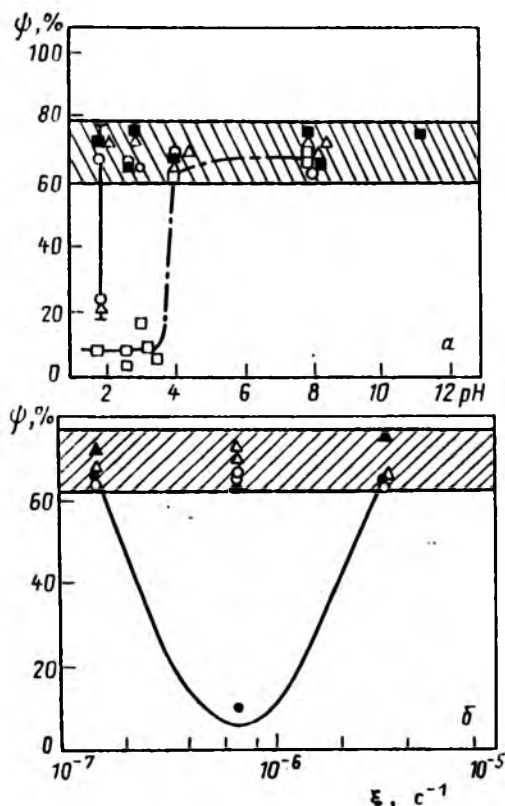
Исследования позволили понять и объяснить причину повреждения только холодных коллекторов. К сожалению, установленный и обоснованный механизм повреждения пока не нашел конкретного отражения в нормативной документации по расчету оборудования АЭС на прочность или исследованию новых материалов.

Анализ конструкторских решений, дополнительные исследования стали 10ГН2МФА, анализ технологии изготовления парогенераторов, связанной прежде всего с коллекторами теплоносителя, сбор и обработка эксплуатационных данных по всем энергоблокам с ВВЭР-1000 позволили последовательно с 1987 г. внедрять мероприятия, повышающие эксплуатационную надежность парогенераторов:

контроль целостности перемычек коллекторов в условиях изготовления (на заводе) и эксплуатации;

переход на сталь 10ГН2МФА электрошлакового переплава вместо открытой (мартеновской) выплавки;

Р и с. 2. Влияние водородного показателя (а) водной среды при содержании в ней $\leq 0,5$ мг/кг хлоридов, $\leq 0,005$ мг/кг кислорода, 270 °С на пластичность стали 10ГН2МФА мартеновской выплавки и электрошлакового переплава при скорости деформирования $\dot{\epsilon}$, равной (1,5 ○, △; 6,8 □, ■; 33 ●, ▲) 10^{-7} с $^{-1}$ соответственно и скорости деформирования (б) при содержании $\leq 0,005$ мг/кг кислорода при pH 7,8—8 (○, △) и 2,7—2,9 (●, ▲) соответственно (ψ — коэффициент относительного сужения)



«разневоливание» коллекторов;
довальцовку (механическую) труб на парогенераторах, не бывших в эксплуатации;

отмену вальцовки взрывом «жесткими» зарядами, переход на вальцевание «мягкими» зарядами, отмену с 1990 г. вальцовки взрывом и замену ее гидравлическим методом;

низкотемпературную термообработку ($\sim 450^\circ\text{C}$) перфорированной зоны коллекторов;

улучшение качества ведения водно-химического режима, ужесточение отдельных показателей его норм, особенно рН (табл. 3);

новую технологию ремонта перемычек (рис. 3).

В результате их внедрения с 1989 г. число поврежденных парогенераторов начало сокращаться, в течение последних 2,5 лет повреждений не зафиксировано. В 1992 г. один поврежденный парогенератор был отремонтирован (семь перемычек) и эксплуатируется (на Южно-Украинской АЭС).

Конечно, если рассуждать таким образом, что из 76 находящихся в эксплуатации ПГВ-1000 (1000М) на 19 энергоблоках заменено 34, можно представить мрачную картину. Однако это не так, и картина замены парогенераторов в динамике, показанная на рис. 4, свидетельствует об этом.

Поскольку не прекращалось изготовление парогенераторов, эксплуатация и сооружение энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, мероприятия, повышающие эксплуатационную надежность, внедрялись по мере их отработки. В настоящее время эксплуатируются парогенераторы с различной степенью реализации мероприятий:

а) изготовленные по первоначальной технологии с вальцеванием методом взрыва, на которых выполнены уже в условиях эксплуатации разневоливание и низкотемпературная обработка коллекторов;

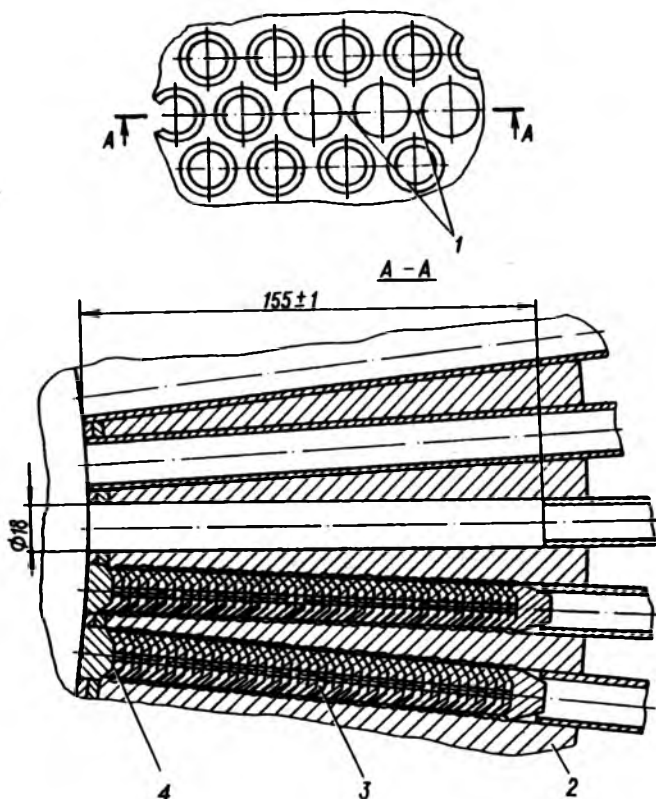
б) изготовленные по первоначальной технологии с вальцеванием методом взрыва, на которых внедрены до пуска в эксплуатацию разневоливание коллекторов, механическая довальцовка труб, низкотемпературная термообработка коллекторов;

Т а б л и ц а 3. Нормативное качество воды в парогенераторах АЭС

Нормируемые показатели	Питательная/продувочная вода					Фирма «Вестингауз» для продувочной воды
	1973 г., Решение № 60 ИТС МЭиЭ СССР	1977 г., ПТЭ, изд. 13	1981 г., 8.05-Пр-2298	1985 г., ОСТ 34-37-769-85	1990 г., Временные нормы	
Содержание хлоридов, мг/кг рН при 25°C	$<20/500-1000$ $6,5-7,5^{**}/7-8,5^{**}$	$\leq 5/<1000$ $9-9,2/7-8,5^{**}$	$\leq 5/<500^{**}$, -1000 $7,5-8,5^{**}/7-8,5^{**}$ $8,5-9,2$	$-/<150$ $8,8-9,2/8-9$	$-/<150$ $8,8-9,2/8-9,2$	20 8,5-9,2
Содержание кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 , мг/кг	$<50/<5000$ $\leq 4^{**}/\leq 10^{**}$	$<50/<5000$ $\leq 4^{**}/\leq 10^{**}$	$-/-$ $< \frac{0,3}{0,5} / < \frac{2}{3}$	$-/-$ $<0,3/<5$	$-/-$ $<0,3/<5$	0,8
Содержание натрия, мг/кг	—	—	—	$-/<300$	$-/<300$	20

* При наличии конденсатоуловити.

** По техническим условиям на ПГВ-1000.



Р и с. 3. Ремонт перемычек, имеющих трещины: 1 — трещины; 2 — коллектор; 3, 4 — заглушки из стали 08Х18Н10Т и 10ГН2МФА соответственно

в) изготовленные по технологии гидровальцевания труб, на которых в заводских условиях реализованы разневоливание и низкотемпературная термообработка коллекторов (см. табл. 2).

Как уже отмечалось (см. рис. 4), демонтировано 34 парогенератора, из них 23 повреждены, 11 не имеют повреждений. На сегодня имеются организационные решения по всем группам парогенераторов, в том числе выполнены оценки их ожидаемого ресурса [4].

По группе а ресурс устанавливается по фактическому времени до обнаружения повреждений. Теоретические наработки позволяют более конкретно оценить остаточный ресурс, при этом требуется для каждого энергоблока выполнить экспериментальную проверку накопленной повреждаемости металлом холодного коллектора на образцах. Длительность такой оценки для энергоблока 3—5 мес. Прорабатывается возможность увеличения ресурса парогенераторов за счет повторной низкотемпературной термообработки коллекторов.

По группе б минимально гарантированный расчетный ресурс 80 тыс. ч, однако скорее всего фактический будет заметно больше в условиях улучшающегося водно-химического режима на блоках с ВВЭР-1000.

По группе в расчетный ресурс соответствует 30 годам.

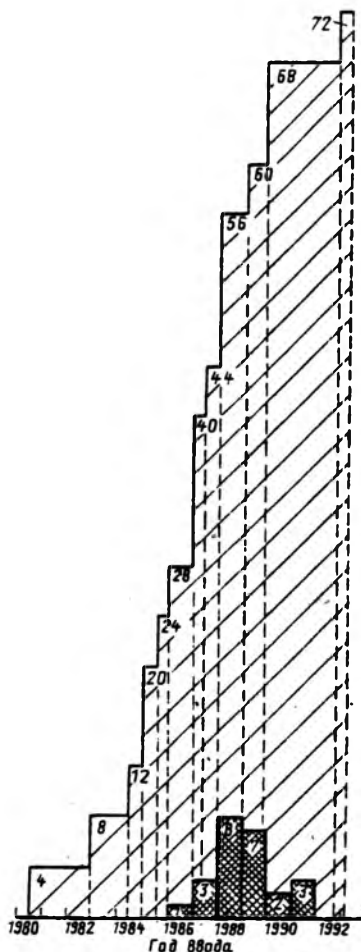
Приняты организационно-технические решения по использованию компонентов демонтированных парогенераторов, но их реализация чрезвычайно сложна.

По-прежнему важным является обеспечение безопасной эксплуатации блоков. Безопасность эксплуатации подтверждена при реализации мероприятий. Существенное снижение (на 60—70%) остаточных технологических напряжений за счет разне-

Р и с. 4. Ввод и эксплуатация парогенераторов ПГВ-1000 (1000М) и их повреждения на АЭС (без четвертого блока Балаковской АЭС) в динамике:  — число и время повреждения парогенераторов;  — ввод в эксплуатацию четырех парогенераторов пятого блока Нововоронежской АЭС, по четыре первого блока Южно-Украинской и Калининской, восьми первого блока Запорожской и второго блока Южно-Украинской, по четыре второго блока Запорожской, первого блока Балаковской, второго блока Калининской, восьми третьего блока Запорожской и первого блока Ровенской, четырех второго блока Балаковской, 12 четвертого блока Запорожской, пятого блока АЭС «Козлодуй» и первого блока Хмельницкой, четырех третьего блока Балаковской, восьми третьего блока Южно-Украинской, пятого блока Запорожской и четырех шестого блока АЭС «Козлодуй», всего 72

воливания и низкотемпературной термообработки коллекторов, внедрение постоянного контроля за радиоактивностью воды и пара, периодический приборный контроль целостности перемычек предотвращают вероятность крупномасштабного разрушения. Однако рассмотреть в масштабах АЭС такую гипотетическую аварию было бы полезно для разработки аварийного регламента. Как показали расчеты вероятностного анализа безопасности коллекторов ПГВ-1000, вероятность малой течи (Ду 30) в 10^3 — 10^4 раз выше, чем большой (> Ду 100), т.е. применим принцип течь перед разрушением.

На базе проекта ПГВ-1000 (1000М) в настоящее время разработана документация и начато производство парогенератора ПГВ-1000У, в котором центральная перфорированная зона коллекторов выполняется из нержавеющей стали 08Х18Н10Т-ВД. Его расчетные показатели по эксплуатационной надежности заметно выше, чем ПГВ-1000М, в которых реализованы все мероприятия. Освоение производства будет начато в 1994—1995 гг., сдача в эксплуатацию намечена на 1996—1998 гг. Проекты новых блоков выполняются с применением этого парогенератора. Оценены теплогидравлические показатели эксплуатируемых блоков типа 320 с использованием ПГВ-1000У в случае замены парогенераторов. Показана возможность такой замены без потери мощности блока.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников В.В., Титов В.Ф. — Причины повреждения коллекторов теплоносителя и меры повышения надежности парогенераторов ПГВ-1000. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 4, с. 312—320.
2. Титов В.Ф. Причины повреждения «холодных» коллекторов горизонтальных парогенераторов ПГВ-1000 и меры повышения их эксплуатационной надежности. — Теплоэнергетика, 1993, № 12, с. 53—60.
3. Working Material IAEA. Consultants Meet. WWER-1000 MW Steam Generator, collector integrity, IAEA, 23—26 Nov. 1993.
4. Titov V. Status of Steam Generators for NPPs with WWER-1000. Working Material IAEA of a Spec. Meet. «Steam Generator Problems and Replacement, 13—16 Dec. 1993, Madrid, IWG-LMNPP 94/01.