

Комплекс расчетно-экспериментальных исследований подтвердил работоспособность технологических каналов РБМК-1000 в условиях формоизменения графитовой кладки в течение не менее 3 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002—86. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-008—89. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. **Руководства** по безопасности. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Капиллярный контроль. ПНАЭ Г-7-018—89. М.: Энергоатомиздат, 1990.

УДК 621.039.53

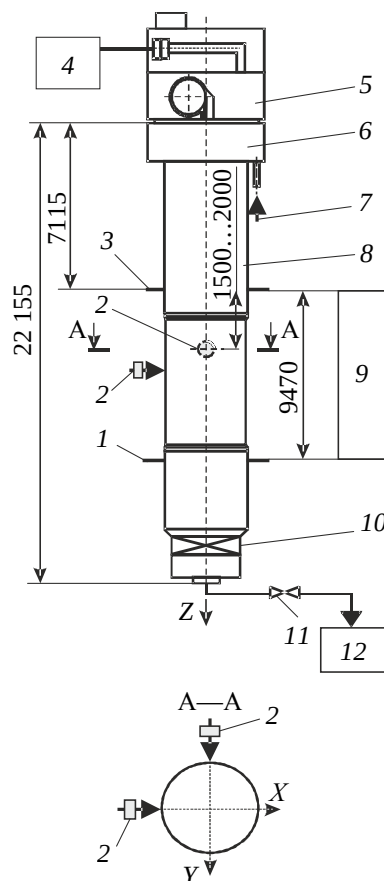
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ В УСЛОВИЯХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РБМК

Мельников О.П., Кушнareв П.А., Петров М.Б., Лемехов Ю.В. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)

Для обоснования работоспособности исполнительных механизмов системы управления и защиты в части обеспечения проходимости поглощающих рабочих органов (стержней) при искривлении каналов в условиях формоизменения графитовой кладки РБМК-1000 в АО «НИКИЭТ» был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований на полномасштабном стенде [1—3]. Стенд (рис. 1) включал в себя штатный канал СУЗ, который подключен к гидравлическому контуру и укомплектован средствами создания искривления канала и контроля параметров, характеризующих форму линии изгиба (прогиба участка канала по высоте). На стенде создавали как плоское, так и пространственное искривление канала. С учетом фактической фиксации канала СУЗ РБМК-1000 в вертикальном положении при изменении состояния графитовой кладки искривлению подвергается участок высотой 9470 мм, включающий среднюю часть канала внутренним диаметром 82 мм (циркониевый сплав Э-125) и концевые участки верхней и нижней стальных частей внутренним диаметром 85 мм. На стенде СУЗ РБМК на концах участка канала, подвергаемого искривлению, были установлены опоры.

Искривление создавали приложением к каналу поперечных нагрузок посредством нажимных устройств на основе винтовых домкратов, которые обеспечивали возможность приложения нагрузок как в одном направлении для плоского искривления, так и в двух взаимно перпендикулярных для пространственного искривления. Стрела прогиба в месте приложения поперечной нагрузки задавалась посредством

нажимного устройства и контролировалась по шкале с ценой деления 1 мм. Прогибы контролировали по всей высоте между опорами с по-



Р и с. 1. Специализированный стенд испытаний проходимости рабочих органов исполнительных механизмов СУЗ РБМК: 1 — нижняя опора; 2 — нажимное устройство; 3 — верхняя опора; 4 — стойка управления сервоприводом; 5 — сервопривод; 6 — головка канала СУЗ; 7 — подвод воды; 8 — канал СУЗ; 9 — система датчиков линейного перемещения канала; 10 — дроссель; 11 — запорно-регулирующий орган; 12 — циркуляционный бак

мощью датчиков линейного перемещения, которые были установлены в каретке рельсовой направляющей. За начало координат принята верхняя опора канала. В нижней части рельсовой направляющей расположен неподвижный датчик, который контролирует положение каретки по высоте участка между опорами. Электрический сигнал от датчиков заведен в персональный компьютер. Датчики располагаются напротив участка канала СУЗ, подверженного искривлению. При перемещении каретки по рельсу датчик сканирует искривленный участок и передает в компьютер информацию о координатах X и Y точек линии изгиба. Неподвижный датчик контролирует положение подвижного по высоте Z между опорами. Таким образом, контролируются координаты каждой точки канала X , Y , Z . Погрешность измерения координат X и Y точек линии изгиба канала ± 1 мм, абсолютная погрешность измерения координат Z точек линии изгиба $\pm 1,5$ мм.

Измеренные координаты точек искривленного участка в дальнейшем использовали для определения формы линии изгиба и радиуса кривизны с привлечением математического аппарата и расчетной оценки проходимости рабочих органов СУЗ в искривленных каналах по специально разработанной методике. В качестве критериев для оценки проходимости рабочих органов СУЗ выбраны следующие контролируемые при испытаниях параметры, по изменению которых можно судить о затирании рабочих органов в канале:

время перемещения на рабочий ход в режимах управления и останова реактора;

ток в обмотке якоря электродвигателя сервопривода при подъеме рабочих органов;

характер перемещения рабочих органов (изменение скорости перемещения по ходу движения) по записям на персональный компьютер сигнала от тахогенератора постоянного тока, установленного на выходном валу барабана сервопривода, и характеру перемещения стрелки указателя положения на стойке управления сервоприводами.

Рабочие органы СУЗ штатного исполнения испытывали в составе штатных исполнительных механизмов СУЗ в штатных режимах эксплуатации [3] (рис. 2). Испытаниям подвергали стержень аварийной защиты типа 2505.00.000, укороченный стержень-поглотитель типа 2093.00.000, кластерный регулирующий орган типа 2399.00.000. Испытания проводили как при

плоском, так и пространственном искривлении канала. Схема закрепления и силового нагружения канала СУЗ при плоском искривлении канала следующая:

концы участка канала СУЗ заземлены;

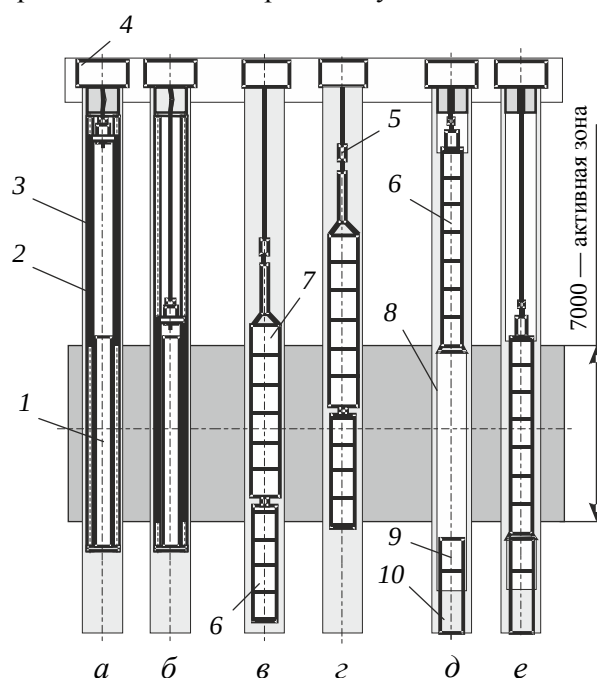
длина подверженного искривлению участка канала СУЗ между опорами 9470 мм;

расстояние от верхней поверхности головки канала СУЗ до верхней опоры 7115 мм;

расстояние от верхней опоры до точки приложения поперечной нагрузки в направлении оси X 4720 мм, т.е. нагрузка приложена в середине участка канала СУЗ между опорами.

При искривлении канала в пространстве схема закрепления и силового нагружения канала такая же, но с дополнительным приложением на расстоянии 2000 мм от верхней опоры поперечной нагрузки к каналу в направлении оси Y .

Результаты испытаний приведены в табл. 1. В качестве иллюстраций на примере рабочего органа кластерного регулирующего органа на рис. 3, 4 показаны отдельные зарегистрированные процессы перемещения рабочего органа в искривленном канале на участке длиной 9470 мм под действием поперечных нагрузок, приложенных в середине участка канала в



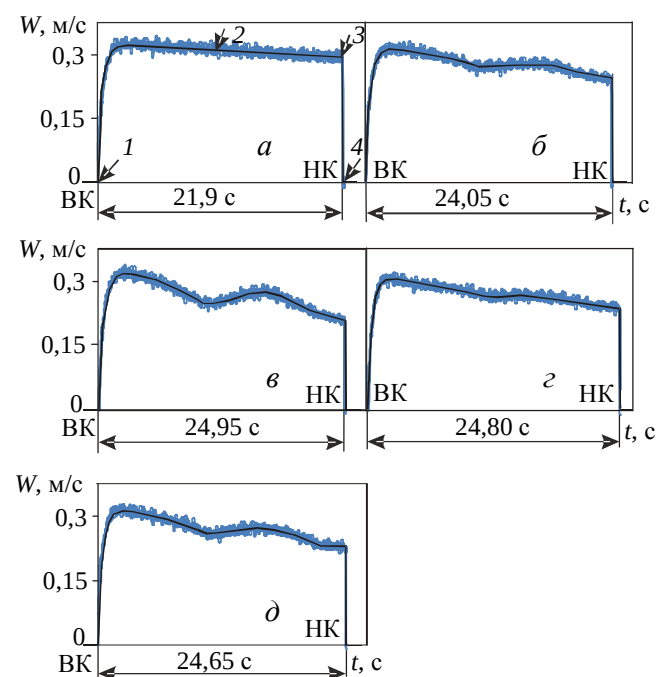
Р и с. 2. Схема расположения рабочих органов исполнительных механизмов СУЗ РБМК: а, б — кластерный регулирующий орган в верхнем и нижнем положении рабочего органа; в, г — укороченный стержень-поглотитель в нижнем и верхнем положении; д, е — стержень аварийной защиты в верхнем и нижнем положении; 1 — опора; 2 — гильза; 3 — рабочий орган; 4 — сервопривод; 5 — амортизатор; 6 — поглотитель; 7 — вытеснитель; 8 — пленка воды; 9 — демпфер; 10 — опора

Таблица 1. Расчетно-экспериментальные исследования проходимости рабочих органов СУЗ в искривленном канале СУЗ РБМК-1000

Параметр проходимости рабочего органа	Стержень аварийной защиты	Укороченный стержень-поглотитель	Кластерный регулирующий орган
Стрела прогиба участка при плоском искривлении канала: без заметных затираний при перемещении рабочего органа, мм предельное значение, мм	До 180 210	До 150 160	До 230 Не менее 230*
Суммарная стрела прогиба участка при искривлении канала в пространстве: без заметных затираний при перемещении рабочего органа, мм предельное значение, мм	До 180 $X \leq 173, Y \leq 67$ 196	До 156 $X \leq 140, Y \leq 82$ 160	До 194 $X \leq 186, Y \leq 57$ Не менее 194*
*При большей стреле прогиба канала эксперименты не проводили. X, Y — стрела прогиба по направлению оси X и Y соответственно.			

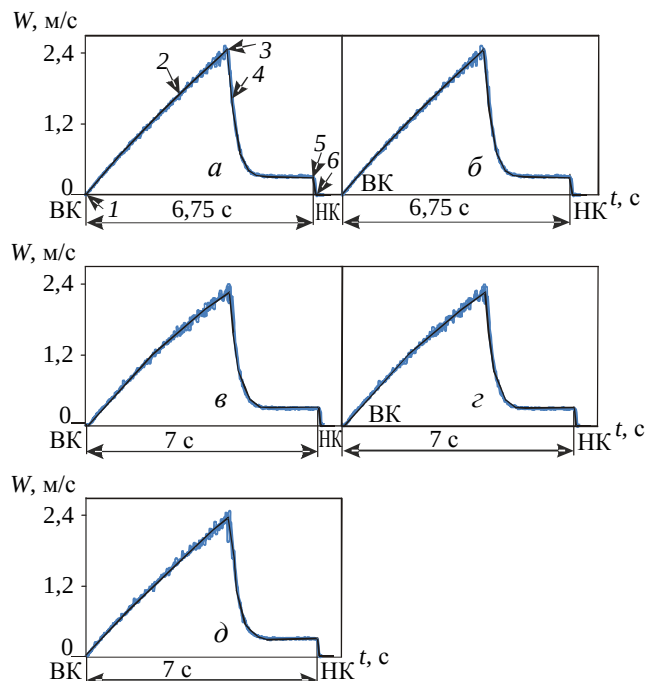
направлении оси X и на расстоянии 2000 мм от верхней опоры в направлении оси Y с суммарной стрелой прогиба: a — 0 мм (исходное состояние канала при отсутствии поперечных нагрузок); b — 158 мм ($X = 158$ мм, $Y = 0$ мм); $в$ — 230 мм ($X = 230$ мм, $Y = 0$ мм); $г$ — 166 мм ($X = 158$ мм, $Y = 64$ мм); $д$ — 194 мм ($X = 186$ мм, $Y = 57$ мм).

Достоверность проходимости рабочих органов СУЗ в искривленном канале подтверждена



Р и с. 3. Перемещение рабочего органа кластерного регулирующего органа в режиме управления на рабочий ход: 1 — обесточивание электромагнитной муфты двигателя сервопривода и начало движения; 2 — ввод; 3 — достижение нижнего концевика и включение электромагнитной муфты; 4 — останов

статистическими данными. В каждом эксперименте в исходном состоянии канала и на каждом этапе задания стрелы прогиба посредством поперечных нагрузок выполняли не менее трех перемещений на ввод рабочих органов в зону на рабочий ход и не менее трех перемещений на извлечение рабочих органов из зоны на рабочий ход в режиме управления, а также не менее трех сбросов в режиме аварийной защиты. При этом суммарное число перемещений на рабочий ход



Р и с. 4. Перемещение рабочего органа кластерного регулирующего органа в режиме останова реактора на рабочий ход: 1 — обесточивание электромагнитной муфты двигателя сервопривода и начало движения; 2 — ввод; 3 — начало торможения; 4 — движение в режиме торможения; 5 — достижение нижнего концевика и включение электромагнитной муфты; 6 — останов

за весь период испытаний составило для укороченного поглотителя стержня не менее 70, стержня аварийной защиты в режиме управления не менее 100, в режиме аварийной защиты не менее 50, рабочего органа кластерного регулирующего органа в режиме управления не менее 90, в режиме аварийной защиты не менее 33.

Критерии допустимого формоизменения канала, условия проходимости рабочих органов СУЗ, расчетные оценки. Поскольку проходимость рабочих органов СУЗ оценивается в искривленных каналах, следует оперировать терминами «кривизна» или «радиус кривизны» оси канала. Это подтверждают проведенные с использованием теории сопротивления материалов [4] расчетные исследования разных схем крепления и силового нагружения участка канала СУЗ — при одинаковой стреле прогиба оси канала форма изгиба ее линии может быть разной, соответственно и кривизна линии изгиба может существенно отличаться [1]. Поэтому основным критерием допустимого формоизменения канала СУЗ с точки зрения проходимости рабочих органов в искривленном канале является радиус кривизны линии изгиба оси канала.

Основное условие проходимости рабочих органов СУЗ в искривленном канале следующее: фактический наименьший радиус кривизны линии изгиба канала $(R_{\min})^{\text{факт}}$ должен быть не менее радиуса $(R_{\min})^{\text{ПО}}$, определенного, исходя из геометрии критичного звена рабочего органа и канала при наличии гарантированного зазора между критичным элементом и каналом $(R_{\min})^{\text{факт}} \geq (R_{\min})^{\text{ПО}}$.

Под критичным звеном (элементом) рабочего органа понимается такой элемент, который при перемещении рабочего органа в искривленном канале имеет наибольшую вероятность заклинивания (нарушения проходимости). Критичное звено (элемент) имеет максимальные геометрические параметры, зазоры между стенками направляющего канала и этим звеном

наименьшие. Если обеспечивается проходимость критичного звена рабочего органа в искривленном канале, то очевидно, что обеспечивается и проходимость рабочего органа в целом.

С учетом этого была разработана методика расчетной оценки проходимости рабочих органов в искривленных каналах. При известных форме линии изгиба оси канала, максимальной стреле прогиба оси канала и $(R_{\min})^{\text{ПО}}$, определенных расчетно-экспериментальным путем для каждого типа рабочего органа СУЗ, методика позволяет оценить проходимость рабочего органа в искривленном канале, дать прогнозную оценку максимально допустимой стрелы прогиба канала, при которой будет обеспечена проходимость рабочего органа, и рассчитать геометрические параметры элементов рабочего органа для достижения требуемого уровня проходимости.

При расчетной оценке максимально допустимой стрелы прогиба, при которой будет обеспечена проходимость рабочих органов СУЗ, принято, что при искривлении канала отсутствует его пластическая деформация с изменением геометрии проходного сечения (табл. 2) [3].

Расчетные оценки проходимости рабочих органов СУЗ, выполненные по методике для фактически полученных при испытаниях профилограмм (форм изгиба) канала на участке его искривления, имеют хорошую сходимость с экспериментами по максимально допустимой стреле прогиба, при которой обеспечивается проходимость рабочих органов (табл. 3).

Расчетно-экспериментальные исследования проходимости в искривленных каналах рабочих органов СУЗ, включая методику оценки их проходимости, были использованы при следующих работах:

обоснование безопасности эксплуатации реакторной установки 1-го и 2-го энергоблока Ленинградской АЭС в условиях формоизменения

Т а б л и ц а 2. Расчетно-экспериментальный минимальный радиус кривизны линии изгиба оси канала $(R_{\min})^{\text{ПО}}$, обеспечивающий проходимость рабочего органа [3], мм

Стержень аварийной защиты	Укороченный стержень-поглотитель	Рабочий орган кластерного регулирующего органа
Расчетно-экспериментальное значение 26 050	Экспериментальное значение 29 500	Экспериментальное значение 19 300
Звено поглотителя диаметром 74 мм в канале диаметром 82 мм	Звено вытеснителя диаметром 74 мм в канале диаметром 82 мм	Пэл рабочего органа в каналах диаметром 10 мм гильзы кластерного регулирующего органа

Таблица 3. Экспериментальные исследования и расчетные оценки проходимости рабочих органов СУЗ

Максимальная стрела прогиба, измеренная при испытаниях, мм	Расчетно-экспериментальные параметры линии изгиба оси канала, мм		Максимальная стрела прогиба, обеспечивающая проходимость рабочего органа в канале без заметных затираний, мм	
	$(R_{\min})^{\text{факт}}$	$(R_{\min})^{\text{PO}}$	Расчет	Эксперимент
Плоское искривление канала				
Стержень аварийной защиты				
61	75 877	26 050	177,7	180
111	41 953		178,8	
141	32 570		176,3	
157	28 711		173,0	
196	22 978		172,9	
207	21 590		171,6	
216	21 194		175,7	
226	20 316		176,3	
Укороченный стержень-поглотитель				
71	63 623	29 500	153,1	150
121	38 301		157,1	
149	31 169		157,4	
159	29 378		158,3	
168	27 435		156,2	
Рабочий орган кластерного регулирующего органа				
163	30 739	19 300	259,6	Не менее 230*
192	26 645		265,1	
212	23 423		257,3	
230	22 358		266,4	
Искривление канала в пространстве				
Стержень аварийной защиты				
124,3	41 517	26 050	185	180
141,55	34 349		179	
195,5	23 931		180	
Укороченный стержень-поглотитель				
142	35 616	29 500	144	156
156	27 351		146	
165	26 664		151	
Рабочий орган кластерного регулирующего органа				
166,3	29 626	19 300	244	Не менее 194*
172	28 162		246	

* При бóльшей стреле прогиба канала эксперименты не проводили.

* При большей стреле прогиба канала эксперименты не проводили.

графитовой кладки в 2011—2012 гг. и 2012—2013 гг. соответственно;

обоснование безопасности эксплуатации 1-го энергоблока Ленинградской АЭС после ремонтно-восстановительных работ 2013 г.;

разработка стержней аварийной защиты повышенной проходимости;

разработка дополнительных требований при создании модернизированной системы для

внутриреакторных измерений геометрических параметров технологических каналов и СУЗ РБМК-1000 ИСТ-5М (разработка и изготовление ООО «Пролог»);

выбор и обоснование предельного прогиба стрелы каналов СУЗ РБМК-1000.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований проходимости рабочих органов исполнительных механизмов СУЗ в искривлен-

ных каналах будут использованы на всех энергоблоках РБМК-1000. Они могут быть применены для других типов реакторов и в отраслях промышленности, где проходимость твердых элементов имеет большое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгунов Ю.Г., Петров А.А., Иванов А.В. и др. Модернизация и продление сроков эксплуатации энергоблоков с РБМК. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 1, с. 6—13.
2. Мельников О.П., Петров М.Б., Слободчиков А.В. и др. Работоспособность рабочих органов СУЗ в условиях пространственного искривления каналов реактора РБМК-1000. — В сб.: Годовой отчет НИКИЭТ-2014. Под ред. Е.О. Адамова. М., НИКИЭТ, 2014, с. 186.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1967.
4. Драгунов Ю.Г., Петров А.А. Решение научно-технических проблем заключительного этапа эксплуатации реакторов РБМК. Тезисы докл. 9-й Межд. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 21—23 мая 2014 г. М., Концерн «Росэнергоатом», 2014, с. 21—22.

УДК 621.039.4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РБМК

*Федосовский М.Е., Дунаев В.И., Гурин Д.А. (АО «Диаконт», г. Санкт-Петербург),
Слободчиков А.В. (АО «НИКИЭТ», г. Москва), Харахнин С.Н. (Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»
«Ленинградская атомная станция», г. Сосновый Бор)*

В 2012—2013 гг. группой компаний «Диаконт» был создан комплекс оснастки для технологических операций воздействия на графитовую кладку при восстановлении ресурсных характеристик элементов РБМК-1000 двух первых энергоблоков Ленинградской АЭС по параметру пространственного искривления технологических каналов и каналов СУЗ. Ресурсные характеристики восстанавливали путем уменьшения пространственного искривления ячеек реакторной установки до не более 50 мм и скорости нарастания деформации ячеек до не более 15 мм/год посредством создания свободного объема в графитовой кладке с помощью продольной резки графитовых колонн на две или четыре части и дальнейшего силового воздействия на кладку.

В начале работ определяли исходное состояние пространственного искривления в контрольных ячейках с использованием данных, полученных при эксплуатационном контроле кривизны технологических каналов и каналов СУЗ, затем разделяли ячейки на три основные группы: контрольные — для проверки изменения состояния реакторной установки, ремонтные — для создания свободного объема и восстанавливаемые — для силового воздействия на технологические каналы при компенсации созданного свободного объема. Из выбранных ячеек выгружали топливо, из ремонтных дополнительно извлекали технологические каналы. Параллельно проводилась технологическая подготовка

центрального зала и подреакторного помещения: размещение оборудования, подключение систем к рабочим средам, монтаж технологической цепочки производственного цикла.

Основное оборудование подразделяется на четыре группы:

- системы измерений параметров реакторной установки;
- оборудование механической обработки графитовых блоков ячеек;
- оборудование силового воздействия на графитовую кладку;
- вспомогательное оборудование.

СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Модернизированная система для измерения пространственного искривления технологических каналов и каналов СУЗ. Главным фактором, ограничивающим ресурс РБМК-1000 в целом, является искривление графитовых колонн в результате растрескивания блоков под действием облучения и температуры, которое, в свою очередь, приводит к искривлению технологических каналов и каналов СУЗ. Искривление каналов может повлиять не только на безопасность реактора, но и на экстренный останов энергоблока. Разработанная и внедренная для оценки формоизменения кладки и каналов РБМК-1000 система СИПИ-М предназначена для измерения внутреннего диаметра канала,