



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Разработка и внедрение СОАИ для энергоблоков с реакторами РБМК

VI Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2023)

Василевский В. П., Новиков А. В., Посашков Д. А.

- 28 марта 1979 года в 4⁰⁰ на АЭС TMI-2 в США (реактор PWR с водой под давлением мощностью 885 МВт) произошла тяжелая авария с расплавлением верхней части активной зоны.
- При штатном срабатывании АЗ авария произошла в результате отказов оборудования с наложением ошибок персонала:
 - отключение ПЭН,
 - включение АПЭН при закрытых задвижках на напоре,
 - выпаривание воды в обоих ПГ,
 - рост давления в 1 контуре, открытие ПК на КО,
 - незакрытие (заклинивание) ПК,
 - снижение давления в 1 контуре ($P_0 = 155 \text{ атм}$),
 - автоматическое включение САОЗ, ручное отключение 2 из 3 насосов САОЗ, неисправность уровнемера КО,
 - запаривание верхней части активной зоны,
 - перегрев и расплавление верхних участков ТВЭЛ (62 из 138 т UO_2 , 20 т расплава на днище).
- Новый методический подход специалистов США к аварийным инструкциям, ориентированный на симптомы аварии и защиту барьеров безопасности.
- Создание текстовых СОАИ с двухколончатой структурой.
- Для кипящих реакторов BWR разработаны графические СОАИ с блок-схемами.

- 26 апреля 1986 года на 4 блоке Чернобыльской АЭС на Украине (реактор РБМК мощностью 1000 МВт) произошел разгон реактора с выбросом активной зоны за пределы РП. Реактор и реакторные помещения блока полностью разрушены и восстановлению не подлежат.
- Во время испытаний по использованию выбега ТГ для обеспечения электроснабжения насосов системы аварийного охлаждения реактора, нагрузка которых имитировалась подключением штатных ГЦН, за счет положительного парового эффекта реактивности произошел неконтролируемый рост мощности реактора и потеря его конструктивной целостности.
- Состояние государственных отношений между СССР и США в тот период времени позволяло принять помощь США с целью недопущения аварий, подобных аварии на ЧАЭС.
- Специалисты США, Канады, Швеции предложили оказать поддержку специалистам СССР в разработке симптомно-ориентированных аварийных инструкций (СОАИ) для энергоблоков с канальными уран-графитовыми реакторами РБМК, охлаждаемыми кипящей водой.

- В СССР в 1993 году эксплуатировалось 16 энергоблоков с реакторами РБМК:
 - 11 энергоблоков с РБМК-1000 на Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС в России,
 - 3 энергоблока с РБМК-1000 на Чернобыльской АЭС на Украине (без учета аварийного блока № 4),
 - 2 энергоблока с РБМК-1500 на Игналинской АЭС в Литве.
- Для работ по созданию СОАИ для АЭС с РБМК в 1993 году в рамках международных проектов была создана группа ЭРГ-3, в которую входило около 5 специалистов США и 20 – 25 специалистов России, Украины и Литвы (в основном эксплуатационники и разработчики энергоблоков с реакторами РБМК). Периодически к работе этой группы подключались специалисты Канады и Швеции.
- Работа группы продолжалась около 15 лет. Ежегодно проводилось 3 – 4 семинара, в основном на АЭС с РБМК. Несколько семинаров было проведено на АЭС «Duane Arnold» в США, на АЭС «Bruce A, B» и «Lepreau» в Канаде и на фирме Relcon в Швеции.

Можно выделить несколько этапов работы группы:

1993 – 1998 – разработка руководств:

- по форме представления блок-схем,
- по разработке и внедрению,
- по верификации,
- по валидации,
- проекты типовых блок-схем.

1997 – 2004 – проведение дополнительных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов для энергоблоков РБМК трех поколений.

Проведение тренировочных занятий на тренажере АЭС "Дуана Арнольд" (PWR) в США.

Проведение техучебы разработчиками СОАИ на АЭС "Брюс А, В" (CANDU) в Канаде.

Встреча со специалистами NRC в США. Итоги встречи:

- Графические СОАИ предпочтительнее, поэтому выбор графических СОАИ для РБМК сделан верно.
- Комплект СОАИ для РБМК должен базироваться на не более 5 КФБ.
- Переход с двухколончатых на графические СОАИ на АЭС с PWR в США не осуществляется ввиду высокой стоимости.

В процессе внедрения СОАИ с персоналом АЭС проводилась техническая учеба, поскольку персонал не испытывал желания без увеличения зарплаты увеличивать объем знаний, необходимых для работы. После разъяснений по отсутствию ответственности за последствия аварии, если все действия выполнялись в полном соответствии с СОАИ, отношение к СОАИ стало доброжелательным. В этом случае ответственными являются либо разработчики СОАИ, либо авторы проекта.

В результате в период с 1998 по 2009 год были разработаны и внедрены СОАИ: на блоке № 3 Чернобыльской АЭС, блоках № 1, 2 Игналинской АЭС, на всех 11 блоках Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС.

- До разработки СОАИ управление аварийными ситуациями на всех АЭС с реакторами любого типа исторически базировалось на событийных аварийных инструкциях (событийные АИ). Для энергоблоков с РБМК событийные АИ включают более 100 исходных событий (ИС), которые по способу и степени воздействия на мощность реактора (автоматическое или ручное оператором заглушение или снижение мощности) разделены на 6 групп.
- По каждому ИС указаны возможные причины, характерные признаки и конкретные действия персонала. Обращение к АИ осуществляется при возникновении признаков ИС, которое по этим признакам и идентифицируется.
- Однозначная идентификация ИС подчас затруднена или может быть сделана ошибочно. Наложение множественных отказов оборудования в большинстве случаев значительно изменяет протекание аварийного процесса и действия по событийной АИ могут оказаться неэффективными.
Согласно методологии СОАИ ориентированы не на идентификацию ИС, а на контроль состояния реактора путем поддержания критических функций безопасности (КФБ).

- КФБ – состояние РУ, обеспечивающее целостность барьеров безопасности, которыми для реактора РБМК являются:
 - топливная матрица,
 - оболочки ТВЭЛОВ,
 - границы контура циркуляции, включая каналные трубы,
 - герметичное ограждение локализирующих систем безопасности.
- Условия сохранения барьеров безопасности определяют перечень КФБ:
 - подкритичность реактора,
 - теплоотвод от реактора,
 - целостность топливных каналов,
 - целостность КМПЦ, паропроводов и питательных трубопроводов,
 - целостность системы локализации аварий (СЛА).
- Параметры КФБ – набор измеряемых и расчетных величин, значения которых отражают состояние безопасности реактора и энергоблока. Через контроль этих параметров осуществляется контроль физических процессов, представляющих угрозу целостности барьеров безопасности.
- Параметры КФБ должны контролироваться непрерывно, а управление ими должно поддерживать КФБ в безопасном состоянии или обеспечивать восстановление КФБ в случае их нарушения.

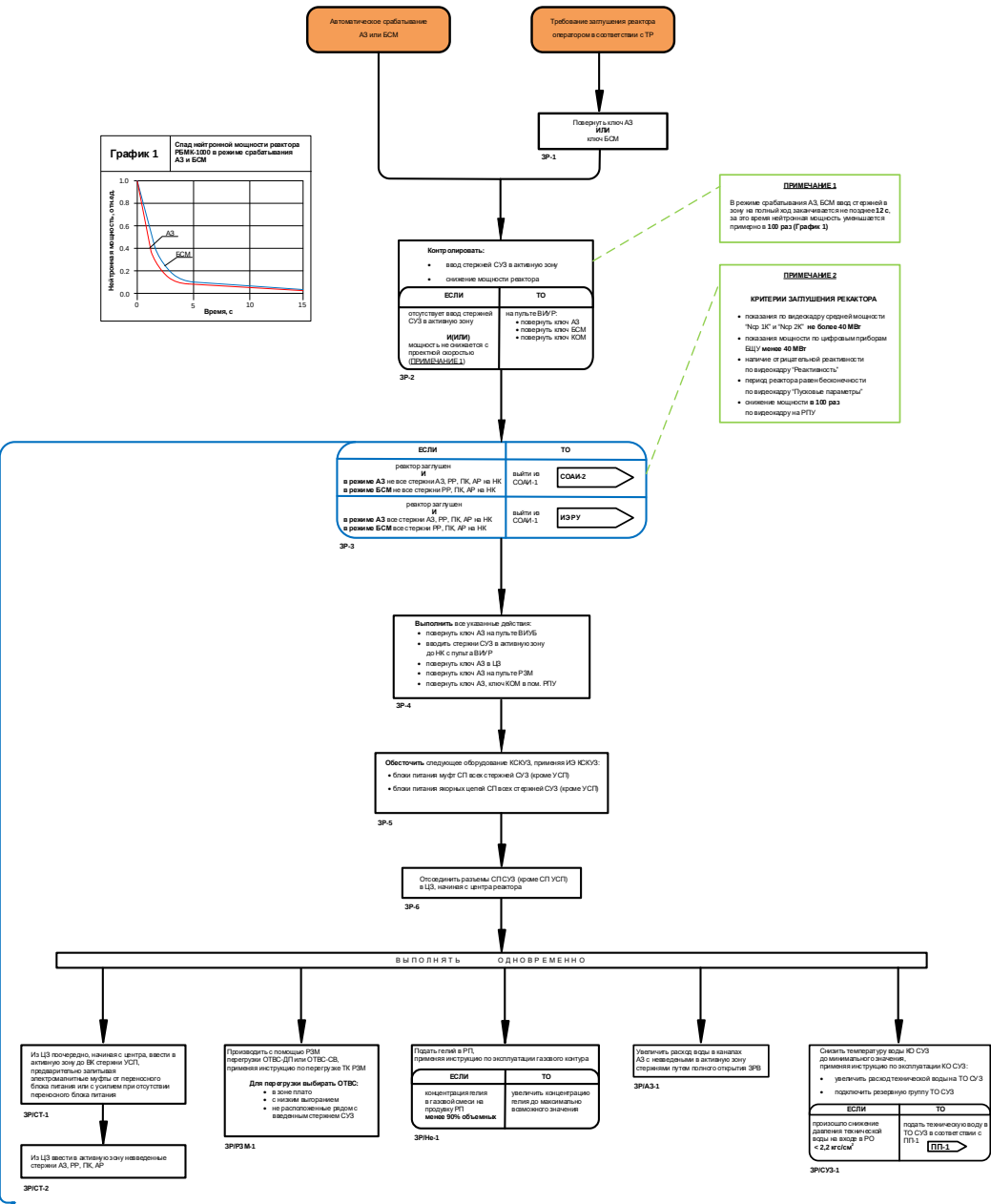
Перечень параметров, определяющих состояние КФБ

КФБ	Параметры
Подкритичность	Тепловая мощность реактора Положение стержней СУЗ Реактивность
Теплоотвод от реактора	Тепловая мощность реактора Расход теплоносителя через каждый циркуляционный насос Давление в барабан-сепараторах (БС) Уровень в БС на каждой половине контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) Расход системы аварийного охлаждения реактора (САОР)
Целостность топливных каналов	Давление в реакторном пространстве (РП) Влажность газа на выходе из графитовых ячеек группы каналов (система контроля целостности технологических каналов (КЦТК)) Температура газа на выходе из графитовой ячейки канала (система КЦТК)
Целостность КМПЦ, паропроводов и трубопроводов питательной воды	Давление в БС Уровень в БС на каждой половине КМПЦ Давление в помещениях КМПЦ, паропроводов и трубопроводов питательной воды Открытие главных предохранительных клапанов (ГПК) Расход пара из БС Расход питательной воды Расход через топливный канал
Целостность системы локализации аварий	Давление в реакторном пространстве Давление в прочноплотном боксе, помещении водяных коммуникаций, помещении БС Уровень и температура воды в бассейне-барботере системы локализации аварий (СЛА) Концентрация водорода в помещениях КМПЦ Уровень активности в помещениях КМПЦ Радиоактивность газовых сбросов из вентиляционной трубы Уровень радиации в помещениях блока и на площадке АЭС

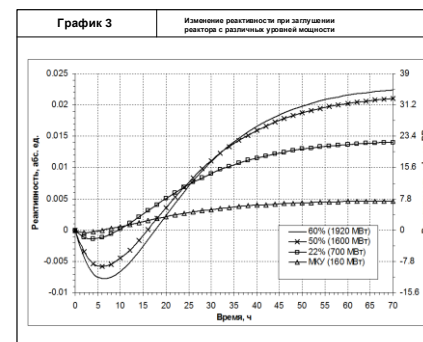
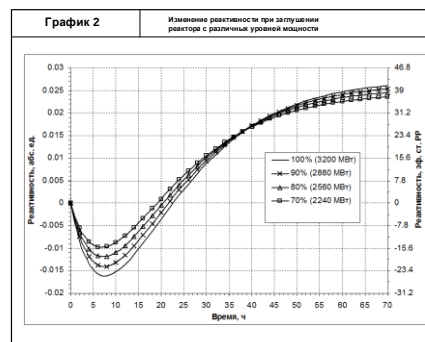
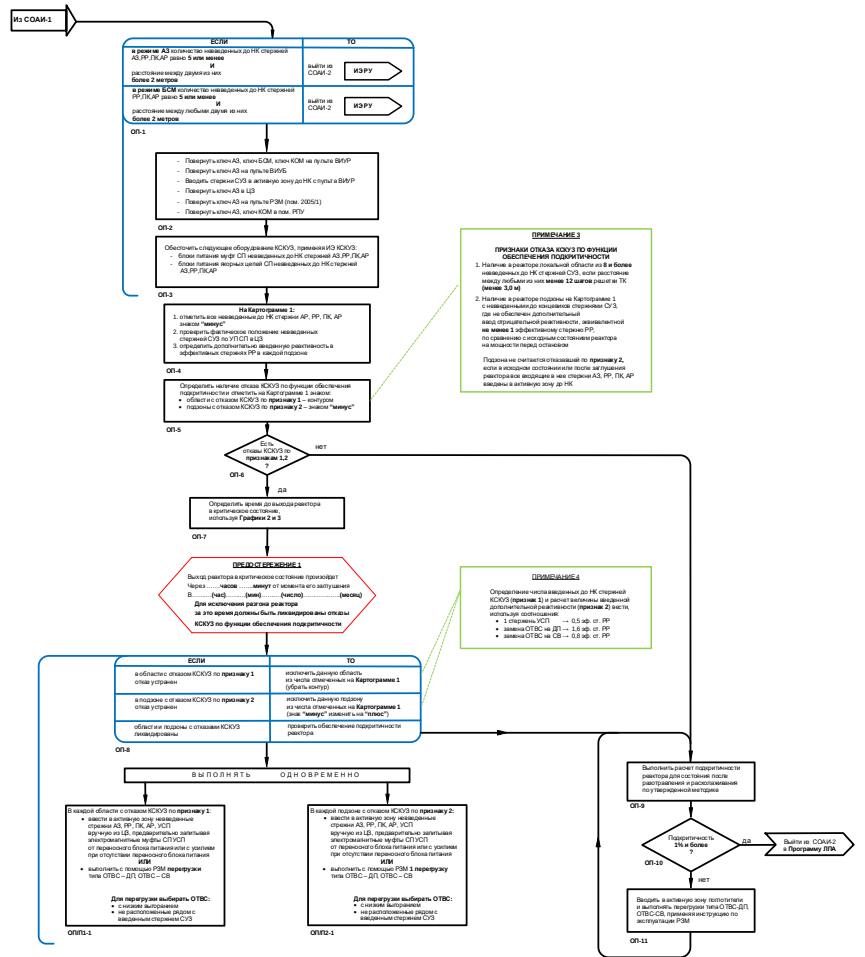
- СОАИ основаны на поддержании КФБ, т.е. использование технических средств и действия операторов в предаварийной ситуации или при аварии должны быть направлены на исключение нарушения или восстановление КФБ, что в свою очередь обеспечивает целостность или ограничение повреждений барьеров безопасности на пути распространения радиоактивности в окружающую среду.
- Целью разработки СОАИ является формализация алгоритмов действий оперативного персонала АЭС в условиях предаварийных ситуаций или аварий. Эти действия ориентированы не на определение ИС, а на контроль состояния реактора и энергоблока в целом в ходе протекания аварийного процесса.
- Однозначная идентификация исходного события затруднена или может быть сделана ошибочно, а поддержание КФБ с помощью технических средств и организационных мер в соответствии с СОАИ должно обеспечить максимально достижимую для данного проекта АЭС безопасность.
- СОАИ разработаны для 20 % ИС, имеющих наиболее тяжелые последствия и вызывающих наибольшие трудности у операторов в процессе их идентификации и локализации. Такими ИС для АЭС с РБМК являются: разрывы труб КМПЦ, паропроводов, питательных трубопроводов, обесточивание СН, нарушения подачи питательной воды, непосадка ГПК.
- Остальные 80 % ИС достаточно просто могут быть идентифицированы имеющимися техническими средствами, поэтому они оставлены в рамках событийной АИ.

- Комплект СОАИ и ПП каждого энергоблока с РБМК включает в себя:
 - СОАИ-1. Заглушение реактора
 - СОАИ-2. Обеспечение подкритичности
 - СОАИ-3. Теплоотвод от реактора
 - СОАИ-4. Защита реакторного пространства
 - СОАИ-5. Локализация выбросов теплоносителя
 - ПП-1. Обеспечение технической водой
 - ПП-2. Обеспечение аварийного электроснабжения
 - ПП-3. Обеспечение подпитки КМПЦ
 - Каждая СОАИ (ПП) состоит из двух частей:
 - Первая – блок-схема в графическом виде дает указания персоналу по оперативным действиям, содержит входные симптомы, шаги действий, условия взаимодействия СОАИ и ПП, условия выхода из СОАИ;
 - Вторая – текстовой документ, который содержит техническое обоснование СОАИ или техническое описание ПП
 - На основе обоснований СОАИ и описаний ПП с блок-схемами персонал АЭС для каждого энергоблока разрабатывает «Инструкцию пользователя СОАИ и ПП». Комплект блок-схем в форме плакатов помещен на БЩУ в удобном для пользования виде
- Я пролистаю блок-схемы СОАИ энергоблока 2^{го} поколения. Чтобы дать им даже краткую характеристику, потребовалось бы очень много времени. Если будут вопросы, постараюсь на них ответить.

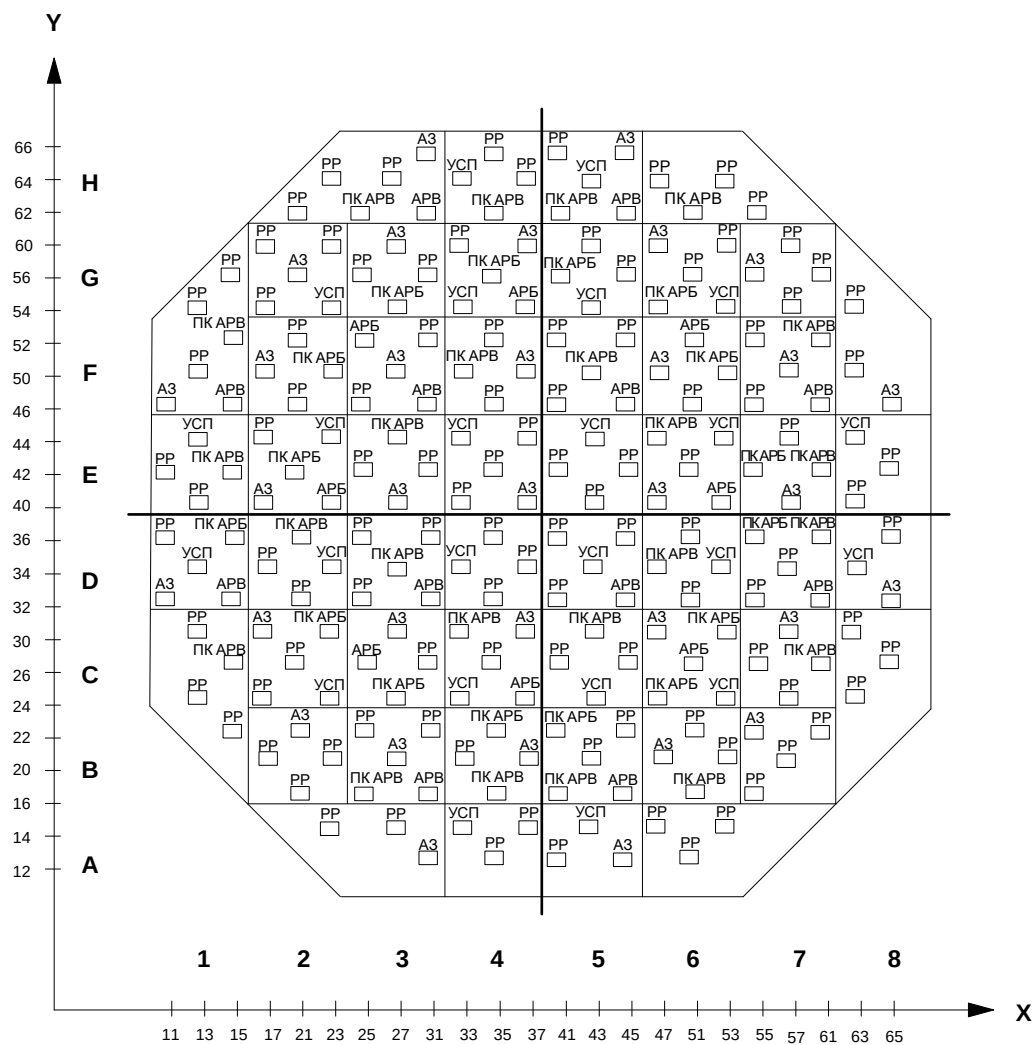
СОАИ-1. Заглушение реактора



СОАИ-2. Обеспечение подкритичности



СОАИ-2. Обеспечение подкритичности (Картограмма)



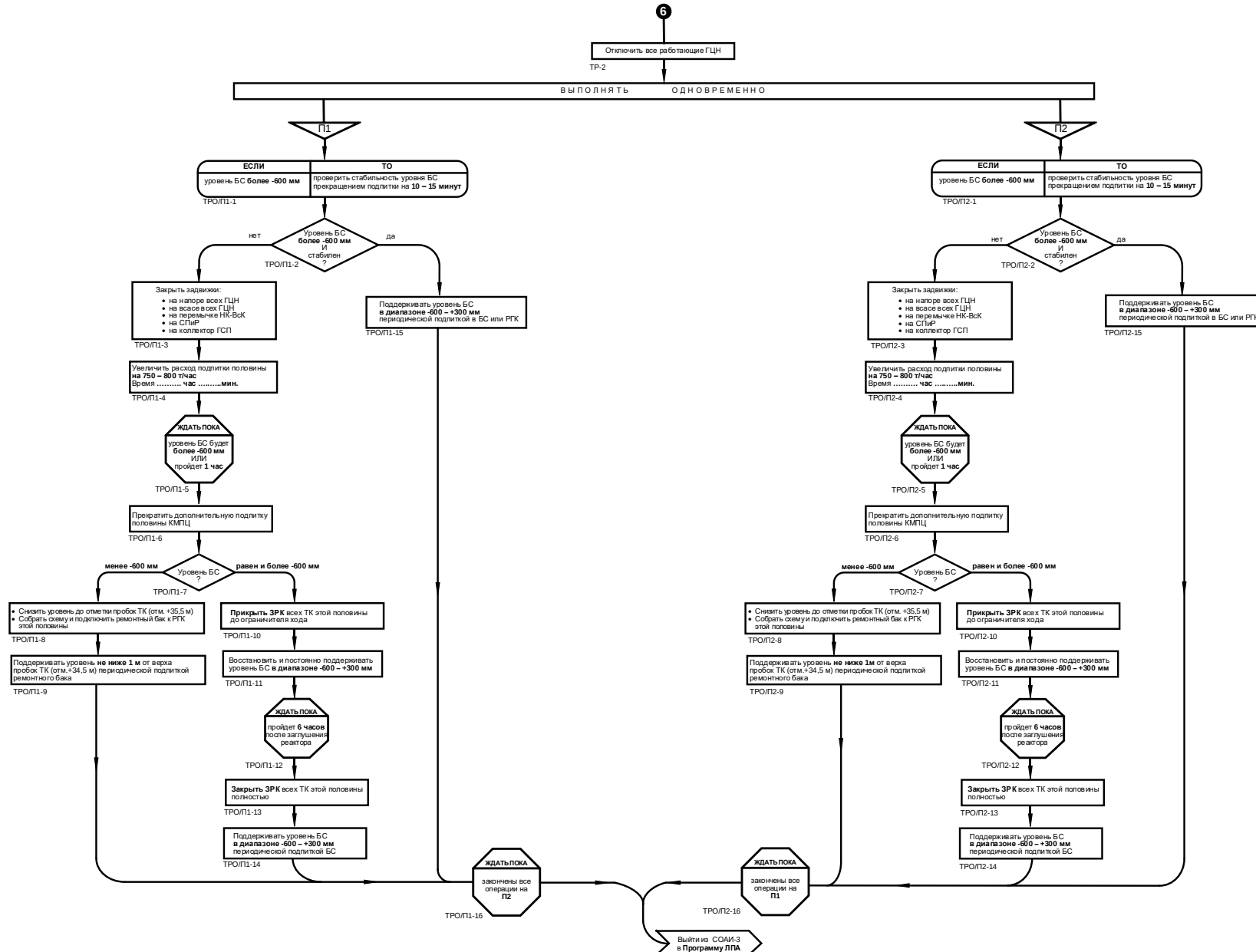
НИКИЭТ
РОСАТОМ



НИКИЭТ
РОСАТОМ



СОАИ-3. Теплоотвод от реактора (Лист 3 – переход на ремонтное охлаждение реактора)



СОАИ-4. Защита реакторного пространства

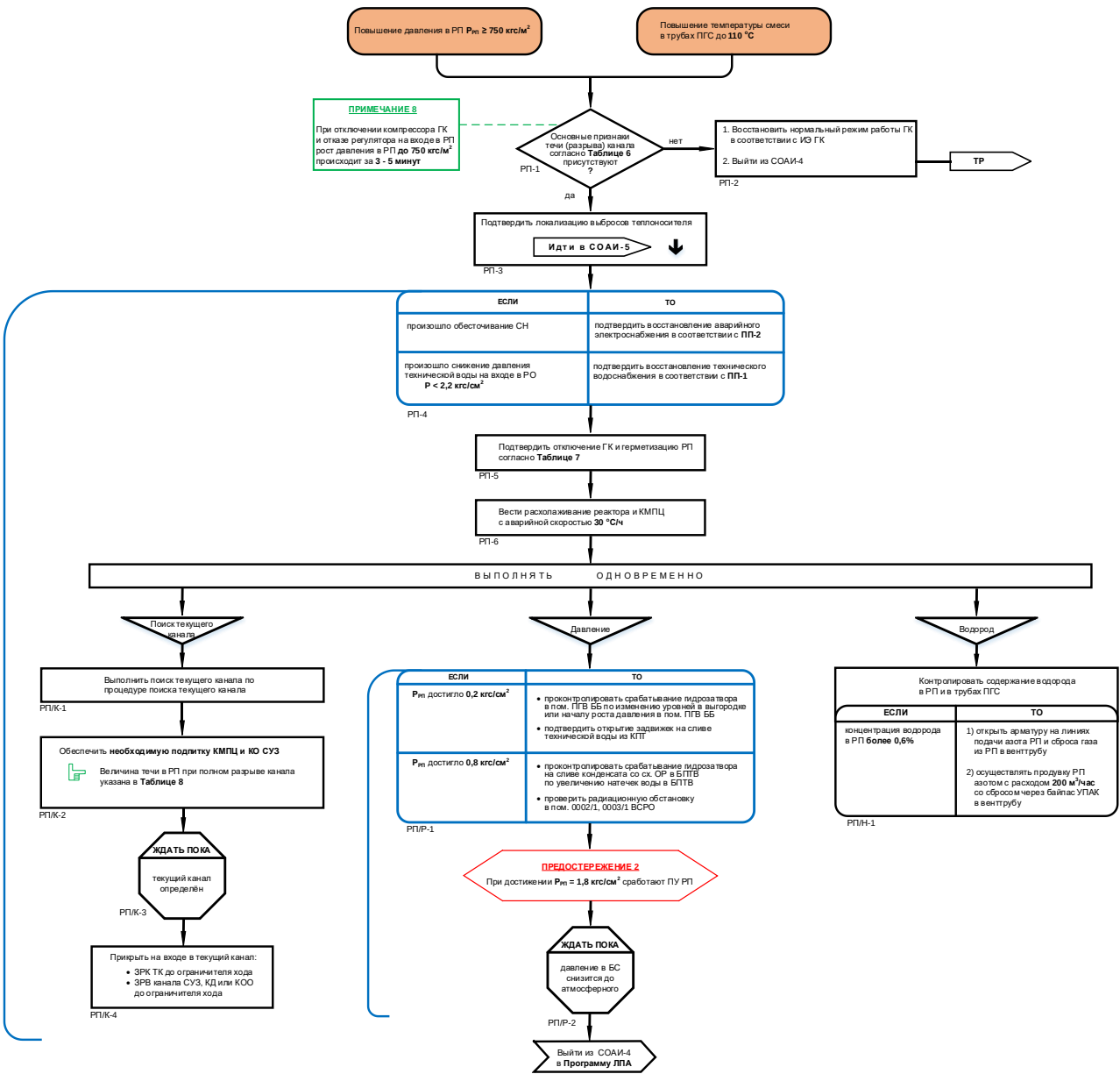


Таблица 6	Признаки течи (разрыва) канала реактора
Основные признаки:	
1. Сигнал "Газы" в системе КЦТК 2. Сигнал "Влажность" в системе КЦТК	
Дополнительные признаки:	
1. Сигнал ПРВ (СРВ) в аварийном канале 2. Повышение влажности в РП по показаниям ПТК СК/У ГК 3. Повышение воды с дренажей сх. ОР, конденсаторов ГК 4. Снижение температуры дренажей из трактов каналов СУЗ (сб. ББ) 5. Повышение уровня ДРБ на сливе дренажей из трактов каналов СУЗ (сб. ББ)	

Таблица 7	Отключение УОГ при срабатывании АЗ по повышению $P_{\text{м}}$ или температуры паровой смеси на выходе из РП
1. Отключение работающего компрессора 2. Отключение работающей газодувки КЦТК 3. Закрытие отсечной арматуры РП, МК и КЦТК 4. Закрытие отсечной арматуры на дренажах трактов каналов СУЗ (сб. ББ)	

Таблица 8	Величина течи в РП при полном разрыве канала
Тип канала	Величина течи, т/час
Т К	120
канал С УЗ	10
К О О	9

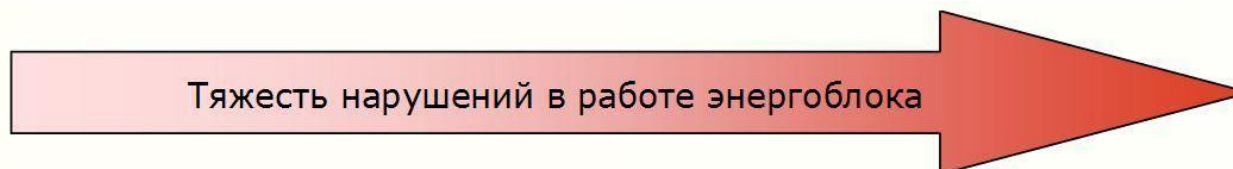
НИКИЭТ
РОСАТОМ





- Стратегия управления технологическим процессом при нарушениях нормальной эксплуатации энергоблока с реактором РБМК состоит в оперативном устранении возникшего отклонения от эксплуатационных пределов и условий и недопущении:
 - создания предаварийной ситуации,
 - перехода предаварийной ситуации в аварию,
 - перерастания проектной аварии в запроектнуюи предотвращении или уменьшении масштаба повреждений энергоблока и радиационных последствий аварии
- На рисунке представлена схема управления при нарушениях в работе энергоблока с реактором РБМК в зависимости от тяжести нарушений в широком диапазоне – от режимов нормальной эксплуатации до запроектной аварии с потерей конструктивной целостности реактора.

Схема управления при нарушениях в работе энергоблока с реактором РБМК



Нормальная эксплуатация		Нарушения нормальной эксплуатации, предаварийные ситуации, проектные аварии				Запроектные аварии		
Работа на стационарной мощности	Переходные режимы	Аварийное снижение мощности реактора	Аварийный останов реактора	Обезвоживание части или всей активной зоны	Повреждение активной зоны	Нарушение границ локализирующих систем	Потеря конструктивной целостности реактора	
		Технологический регламент по эксплуатации						
		Событийная АИ		СОАИ				
								Руководство по управлению запроектными авариями
		План мероприятий по защите персонала						

Области действия эксплуатационных документов верхнего уровня:

- **Технологический регламент** – восстановление параметров в диапазоне эксплуатационных пределов вплоть до аварийного снижения мощности и заглушения реактора.
- **Событийная АИ** – в любой ситуации, сопровождающейся снижением мощности или заглушением реактора вплоть до ситуаций с повреждением активной зоны.
- **СОАИ** – в любой ситуации, сопровождающейся аварийным остановом реактора, включая запроектные аварии с наложением множественных отказов и нарушением границ локализирующих систем.
Управление по СОАИ позволит свести к минимуму тяжесть последствий за проектной аварии.
- **РУЗА** – используется вместе с СОАИ с момента заглушения реактора и распространяется на все за проектные аварии.
- **План мероприятий** – вводится в действие при возникновении угрозы превышения выбросом радиоактивных продуктов в помещения АЭС, на территорию площадки и санитарно-защитной зоны установленных нормами пределов.
Поэтому область действия плана имеет широкие границы – от аварии с разгерметизацией контура до самых тяжелых за проектных аварий.

Внедрение СОАИ на энергоблоках с реактором РБМК – фактор существенного повышения безопасности эксплуатации АЭС с реакторами этого типа.

На случай аварийной ситуации с потерей возможности управления технологическим процессом с БЩУ по предложению Ленинградской АЭС нами разработаны СОАИ для управления 3 и 4 блоком ЛАЭС с РЩУ, которые основаны на СОАИ для БЩУ, но имеют существенные отличия:

- действуют только на процесс останова и расхолаживания блока,
- имеют ограниченный набор средств контроля и управления оборудованием,
- необходимость выполнения ряда действий по месту.

Предлагаем Курской и Смоленской АЭС рассмотреть возможность разработки аналогичных СОАИ для управления с РПУ эксплуатируемых в энергетическом режиме блоков в аварийной ситуации с потерей возможности управления с БЩУ.

Спасибо за внимание !

